

**CARACTERIZACIÓN REOLOGICA DE UNA SUSPENSION EN UN CIRCUITO DE
MOLIENDA CERRADO PARA PRODUCCIÓN DE CEMENTO POR VÍA HÚMEDA**

IVÁN DARÍO MONCAYO RIASCOS

**Trabajo de Grado presentado para optar el título de
Ingeniero Químico**

OSCAR JAIME RESTREPO BAENA

Director del Trabajo de Grado

M. OSWALDO BUSTAMANTE RÚA

Codirector del Trabajo de Grado

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLIN

FACULTAD DE MINAS

PROGRAMA CURRICULAR DE INGENIERÍA QUÍMICA

2009

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	6
1. ASPECTOS GENERALES DE REOLOGÍA	10
1.1 BREVE PERSPECTIVA HISTÓRICA	10
1.2 DESARROLLO DE LAS BASES TEÓRICAS DE LA REOLOGÍA	11
1.3 TIPOS DE FLUIDOS	12
1.4 ESFUERZOS	14
1.5 DEFORMACIONES	15
1.6 ECUACIONES CONSTITUTIVAS	16
2. REOLOGÍA DE SUSPENSIONES	18
2.1 INTRODUCCIÓN	18
2.1.1 Fuerzas que actúan en las partículas suspendidas en un líquido	18
2.1.2 Otras Estructuras	19
2.1.3 Estructuras inducidas por el flujo	20
2.2 VISCOSIDAD DE SUSPENSIONES DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EN LÍQUIDOS NEWTONIANOS	20
2.2.1 Dilución de suspensiones dispersas	20
2.2.2 Fracción de empaquetamiento máxima	21
2.2.3 Suspensiones newtonianas concentradas	22
2.2.4 Reducción de cizalladura en suspensiones concentradas	23
2.2.5 Consecuencias en la práctica del efecto del volumen de la fase	24
2.2.6 Espesamiento de la cizalladura de suspensiones concentradas	24
2.3 CONTRIBUCIÓN COLOIDAL A LA VISCOSIDAD	25
2.4 SUSPENSIONES DE PARTÍCULAS DEFORMABLES	26
2.5 ESTUDIOS DE SIMULACIÓN EN COMPUTADOR DE LA REOLOGÍA DE SUSPENSIONES	27
3. REOLOGÍA DE SUSPENSIONES CALCÁREAS	29
3.1 INTRODUCCIÓN	29
3.2 GENERALIDADES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO	29
3.2.1 Diagrama del proceso de producción de cemento	29
3.2.2 Características reológicas de la materia prima	30
3.2.3 Consideraciones micro-reológicas	31
3.3 REOLOGÍA DE LAS SUSPENSIONES CALCÁREAS	32
3.3.1 Evaluación de la reología	32
3.3.2 Determinación de la reología de una suspensión calcárea	33
3.4 COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UNA SUSPENSIÓN CALCÁREA EN UN HIDROCICLÓN CILINDROCÓNICO	36
4. ESTADO DEL ARTE	39
5. TRABAJO EXPERIMENTAL	44

5.1 MODELO DE CÁLCULO	46
5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
6. CONCLUSIONES	50
BIBLIOGRAFÍA	51

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de casos para las leyes de Newton y Hooke	17
Tabla 2. Fracción máxima de empaquetamiento para diferentes arreglos	21
Tabla 3. Porcentaje de los aluminosilicatos	45
Tabla 4. Datos obtenidos del PPI y viscosidades	45
Tabla 5. Porcentajes de caolín y arena para cada corriente del hidrociclón	46

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación reológica para fluidos	13
Figura 2. Deformación de una almohada al colocar un peso determinado	14
Figura 3. Notación de las tensiones que realiza un elemento de fluido sobre los elementos contiguos	15
Figura 4. Deformación extensional y deformación en cizalla simple	16
Figura 5. Diagrama una planta de producción de cemento por vía húmeda	30
Figura 6. Tensión de cizalla contra la tasa de cizalladura para líquidos newtonianos y no-newtonianos	33
Figura 7. Variaciones del cociente de ϕ_{eff}/ϕ en función de la tensión de cizalla (τ) para las suspensiones calcáreas. Las líneas completas son ajustes de la ley de energía	36
Figura 8. Comparación entre el modelo (líneas completas) y el experimento para las suspensiones calcáreas	36
Figura 9. Diagrama esquemático del flujo en un hidrociclón cilindrocónico	37
Figura 10. Corrientes del hidrociclón del circuito de molienda	44
Figura 11. Porcentaje de caolín y arena para las muestras 154, 155 y 156	48
Figura 12. Porcentaje de caolín y arena para las muestras 157, 158 y 159	48
Figura 13. Porcentaje de caolín y arena para las muestras 163, 164 y 165	48
Figura 14. Porcentaje de caolín y arena para las muestras 173, 174 y 175	48
Figura 15. Porcentaje de caolín y arena para las muestras 178, 181 y 182	48
Figura 16. Porcentaje de caolín y arena para las muestras 178, 189 y 190	48
Figura 17. Porcentaje de caolín y arena para las muestras 207, 208 y 209	49

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la industria química a principios de siglo XX, seguido por la aparición a gran escala de procesos de producción de polímeros, junto con otros materiales, como adhesivos, cosméticos, plásticos, pinturas, fluidos biológicos, asfaltos, aceites, combustibles, etc., dio lugar a la aparición de un conjunto de nuevos materiales con un comportamiento de flujo algo fuera de lo normal que no podría ser explicado únicamente por las leyes clásicas. En 1920 el estudio de tales materiales provocó que Eugene Bingham acuñara el término 'Reología', del griego ρεiv, fluir, que etimológicamente significa estudio del flujo, aceptada en el año 1929, cuando se fundó la American Society of Rheology.

La Reología también podría definirse como la ciencia que trata la manera en que la materia se deforma cuando se le aplica una determinada fuerza; en esta definición, las dos palabras clave son fuerza y deformación. Para conocer cualquier característica sobre las propiedades reológicas de un material, es necesario medir la fuerza necesaria para producir la deformación del material, considerando hoy en día la reología en su sentido más amplio, se ve claramente que casi no hay campo de actividad humana en el que no desempeñe un papel importante.

Las medidas reológicas se están convirtiendo en métodos importantes para control y especificaciones desde cualquier actividad cotidiana hasta un nivel industrial. Por ejemplo, si vamos a comprar almohadas y las presionamos, comprobaremos que algunas requerirán más fuerza para ser comprimidas ("duras"), y serán poco confortables, mientras que otras ("demasiado blandas") requerirán muy poca fuerza y no podrán soportar adecuadamente la cabeza. En otra situación podríamos ir a comprar aceite lubricante a la tienda, donde encontraremos en sus estanterías una amplia gama. Si tomamos cualquier botella y la inclinamos, los aceites "más ligeros" fluirán muy rápido, mientras que los más pesados, lo harán más despacio; en este caso el ensayo reológico ha empleado el esfuerzo de la gravedad.

En otro nivel, en la industria petrolera se utilizan medidas reológicas para clasificar aceites, alquitranes y materias bituminosas; las propiedades reológicas de los lodos que ayudan a taladrar terrenos en busca de petróleo se controlan cuidadosamente. Las industrias de los plásticos emplean medidas reológicas en el control del tratamiento y en la evaluación de los productos terminados. Los materiales de la construcción y las construcciones mismas son examinados por métodos reológicos. Por ejemplo: la velocidad y la amortiguación de ondas elásticas generadas por una unidad móvil de prueba se utilizan para comprobar el estado de los pavimentos de hormigón. En la industria de los alimentos la reología ha tenido un apogeo importante debido a que la mayoría de los alimentos que ingiere el hombre los constituyen los fluidos, sin embargo en la preparación de alimentos se utilizan tradicionalmente las observaciones reológicas empíricas y subjetivas.

En el campo biotecnológico, la información obtenida a partir de la Reología permite diagnosticar patologías caracterizando fluidos biológicos en el contexto de la biorreología (cualquier materia o sustancia de organismo humano, animal o vegetal) y de la hemorreología (para diagnosticar enfermedades en la sangre). En el campo biomédico, permite predecir respuestas de materiales y fluidos en desempeños

mecánicos complejos de la vida práctica, como el de una prótesis (para saber si es mecánicamente compatible).

La Reología presenta principalmente dos aspectos; uno supone el desarrollo de ecuaciones entre esfuerzo y deformación para un material de interés, lo cual solamente puede ser conseguido con ayuda de un número relativamente importante de experimentos; volviendo al ejemplo de las almohadas, se debería observar que la fuerza necesaria para comprimirla una cierta distancia, debería ser proporcional a la distancia. En el caso del aceite, se debería encontrar que la velocidad con que el aceite fluye a través de un orificio en el fondo de una lata debería ser proporcional a la altura del aceite restante en la lata. Estas relaciones son conocidas como ecuaciones reológicas de estado o ecuaciones constitutivas.

Otro aspecto es el desarrollo de relaciones que muestran como el comportamiento reológico esta influido por la estructura y composición del material, la temperatura y presión. Idealmente, convendría saber cómo estos parámetros afectan a las ecuaciones constitutivas, cosa que aún hoy en día sigue sin haberse realizado, excepto para materiales muy simples como los fluidos Newtonianos. En el caso de materiales mucho más complejos, tan solo se podría especificar magnitudes, como viscosidad, que pueden depender de la estructura molecular, composición y temperatura. En el caso de los materiales poliméricos, se muestra un comportamiento intermedio al de un sólido elástico y un fluido viscoso, una ecuación constitutiva exclusiva de estos sistemas no ha sido desarrollada hasta el momento y el conocimiento actual sobre este tipo de sistemas es en gran parte empírico.

Existen muchos otros campos donde la reología se aplica cada vez más, mostrando el gran interés que despierta esta técnica hoy día. La medida de las propiedades reológicas de determinado material involucra, en la actualidad, un factor muy importante tanto para el conocimiento de los procesos como para el control de los mismos, mediante el cual se puede determinar puntos o variables clave en el desempeño del proceso de interés, sin dejar de lado la posibilidad de optimización de los procesos existentes. Por ejemplo las fuerzas que se desarrollan cuando un lubricante es sometido a una deformación a elevadas cizallas es obviamente de gran importancia para un ingeniero mecánico: en este caso, la viscosidad es la propiedad reológica de interés. La rigidez de una viga de acero usada para construir edificios es de gran importancia para los ingenieros civiles, y en este caso la propiedad relevante es el módulo elástico.

Dentro de la aplicación de la Reología suscitan muchos aspectos en cuanto a la especulación en el manejo de esta ciencia, tildándola de compleja y con estructuras matemáticas tediosas. Varias razones se pueden proponer para explicar esta opinión generalizada. Una de ellas es el hecho de que la reología tenga un carácter multidisciplinario. Se puede decir que no existe un oficio de un "reólogo" sino más bien de un conjunto de profesionales y técnicos que utilizan los conocimientos reológicos para entender y modelar el comportamiento de diversos materiales. En otras palabras, aquellas personas que deben formular y manejar fluidos complejos, como los mencionados anteriormente, pueden conseguir que el uso de los conocimientos reológicos faciliten la formulación fisicoquímica, la obtención de comportamientos deseados, como capacidad de suspensión, textura, facilidad de

esparcimiento, etc. y permiten determinar los equipos y los instrumentos necesarios para mezclar, agitar, bombear o drenar dichos materiales.

Por otra parte, el fundamento teórico de la reología sustentada en los principios de la mecánica continua necesita desarrollar complementos con aspectos de físico-química, estadística, mecánica y otras disciplinas relacionadas a los estudios de micro-reología que generan un conocimiento reológico más amplio que aún continua estableciéndose. Lo anterior sumado la necesidad de involucrar el manejo de matemáticas no triviales es quizás la necesidad que más disuade.

Prácticamente la totalidad de los fluidos utilizados en plantas industriales corresponden a fluidos no newtonianos, los cuales son tratados o calculados según leyes para flujos newtonianos, (velocidad proporcional al esfuerzo de corte). Se ha mostrado en estudios previos, el error que se comete al tratar como newtonianos, fluidos dilatantes o pseudoplásticos, de aquí la importancia del desarrollo de herramientas para el estudio de estos fluidos.

En el caso específico de la industria cementera, en la cual la reología juega un papel fundamental porque en todos los escenarios de los procesos se involucran la relación entre esfuerzo y deformación, existen varias consideraciones dejadas de lado en el diseño y operación de las plantas cementeras, entre las cuales se destacan la composición de la materia (polimineral) y el desconocimiento de la caracterización reológica de las suspensiones calcáreas o pulpa, dejando de lado la importancia de variables como el tamaño de partícula, la distribución granulométrica, fracción volumétrica de sólidos y las interacciones micro-reológicas del material, efecto del medio de dispersión, la influencia y relación que estas variables tienen con respecto al comportamiento reológico de estas suspensiones.

En este trabajo se citaran situaciones que presentan los esfuerzos que se adelantan por comprender el comportamiento reológico de las suspensiones calcáreas y por analizar modelos que se acerquen a la realidad del proceso.

Desde un punto de vista de diagnóstico, el comportamiento reológico de las mezclas minerales es un indicativo del nivel de interacción interpartículas o agregación en una mezcla y por lo tanto es una variable importante en el control del proceso. La influencia del comportamiento reológico de mezclas minerales en sus capacidades ha atraído cada vez más interés y atención, especialmente en el desempeño de los diferentes equipos del proceso productivo.

En este estudio, se lleva a cabo el análisis de las particularidades reológicas de las suspensiones calcáreas en general, con vistas a determinar una caracterización reológica y, la dependencia de los parámetros reológicos con los principales factores que pueden afectar la viscosidad de las mismas. Se pretende dar los primeros pasos que sirvan de base para la obtención futura de modelos generalizados, que permitan predecir la viscosidad de estos materiales.

La metodología ha desarrollar en este Trabajo de Grado se orienta en realizar una acercamiento al proceso histórico que involucraron los cimientos de esta ciencia, posteriormente se le introducirá al lector a los aspectos generales de reología enfocados a desarrollar en él un conocimiento reológico que permita entender tanto

fenomenológicamente como empíricamente los aspectos más importantes de esta ciencia, para ello se tiene dispuesto la contextualización del desarrollo histórico de los conceptos y bases de la reología que origina una clasificación de los fluidos teniendo en cuenta el comportamiento reológico. Finalmente para redondear el acercamiento teórico a los aspectos generales de la reología se hace una familiarización de los términos “esfuerzo” y “deformación”, términos fundamentales en reología, mediante el cual se culmina la presentación teórica de esta ciencia.

A continuación, el estudio se centra en la comprensión del comportamiento reológico de las suspensiones mediante una presentación de este tema e introducción de nuevos términos, desarrollando toda la parte fenomenológica y matemática, inicialmente de fluidos newtonianos, para luego exponer los aspectos reológicos que influyen el comportamiento de dichas suspensiones, variables reológicas, adentrando cada vez a aspectos más complejos de la suspensiones monominerales, como preámbulo al centro de interés de este Trabajo de Grado, las suspensiones calcáreas (poliminerales), esta parte del trabajo involucra además la puesta en consideración de variables que influyen el comportamiento reológico de los materiales, que a nivel industrial e involucrando la complejidad de suspensiones poliminerales son aún tema de desconocimiento.

Luego de la presentación de reología de suspensiones, se adentra en el tema de suspensiones poliminerales, aspecto que genera grandes incógnitas, para ello se enfocara específicamente en las suspensiones calcáreas orientado en la industria cementera, mediante lo cual se presentan los trabajos investigativos adelantados hasta el día de hoy para luego dar un acercamiento al tema que permita dejar planteadas unas orientaciones e incógnitas que sirvan de apoyo a futuras investigaciones que ahonden la comprensión del comportamiento reológico de las suspensiones poliminerales, siendo la consecución de un modelo y la determinación del efecto de todas sus variables sobre el comportamiento de la suspensión, la meta ha alcanzar en un futuro es este campo investigativo.

1. ASPECTOS GENERALES DE REOLOGÍA

1.1 BREVE PERSPECTIVA HISTÓRICA

Aunque se podría decir que el estudio del comportamiento de los fluidos nace en la antigüedad (se remonta a los antiguos egipcios- Amenemhet) es prácticamente en el siglo XVII cuando se crearon las bases de lo que hoy en día se conoce como reología.

Por una parte, en 1678 Robert Hooke publicó "True Theory of elasticity" (Verdadera Teoría de la elasticidad), donde estableció la proporcionalidad entre la deformación y el esfuerzo aplicado, es decir que si se dobla la tensión o esfuerzo se obtendrá el doble de deformación. De esta forma gran parte de sólidos se han venido clasificando como sólidos de Hooke, por su capacidad de deformarse y recuperar la forma de su estado inicial.

Años más tarde, por otra parte, en 1687 Isaac Newton prestó atención a los líquidos en el escrito "Principia", donde aparece el concepto de viscosidad (como un sinónimo de fricción interna), siendo la viscosidad una constante de proporcionalidad entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de deformación causada. Fluidos que se comporten de acuerdo con esta ley de proporcionalidad se denominan fluidos de Newton o newtonianos, siendo el agua y la glicerina los más comunes que siguen este comportamiento.

Durante casi 200 años se vinieron clasificando los materiales como líquidos de Newton o como sólidos de Hooke. En el siglo XVIII comenzaron las primeras dudas respecto a dicha clasificación. Uno de los hechos que demostraban la invalidez de la misma ocurrió en 1835, cuando Weber llevó a cabo experimentos con hilos de lana, sobre los cuales aplicaba esfuerzos longitudinales, observando que para determinados esfuerzos sí se cumplía la ley de Hooke es decir la deformación causada volvía a su origen al retirar la fuerza aplicada, pero a partir de un cierto valor el hilo de lana se extendía para no volver a recuperar su longitud original. Con este experimento puso en manifiesto que con sólo la ley de Hooke no se podría explicar el comportamiento de este sólido. En 1867 J.C. Maxwell estableció un modelo matemático para justificar el comportamiento de sólidos como los hilos de lana empleados por Weber. En dicho modelo se propuso que las propiedades de una sustancia son una combinación de una componente elástica y otra viscosa. Este modelo es la base de los utilizados en la actualidad, y fue de gran importancia, ya que dio lugar a que en la comunidad científica de la época surgiera la noción de viscoelasticidad, término que describe un comportamiento comprendido entre los extremos clásicos de una respuesta elástica de Hooke y un comportamiento viscoso de Newton.

En el año 1926 comenzaron una serie de encuentros en la Universidad de Easton (EEUU) entre físicos, químicos e ingenieros interesados en los problemas de los coloides. Dichos encuentros desembocaron en la creación en 1929 de la American Society of Rheology. A pesar de este creciente interés por las propiedades viscoelásticas de la materia, la reología no sufre un importante empuje hasta la Segunda Guerra Mundial, cuando materiales como los usados en los lanzallamas

resultaron ser viscoelásticos, lo que hizo cobrar importancia a la reología en los laboratorios de investigación.

1.2 DESARROLLO DE LAS BASES TEÓRICAS DE LA REOLOGÍA

En base a los conceptos planteados tanto por Hooke como por Newton se dio desarrollo a una serie de planteamientos matemáticos que permitieron establecer el comportamiento de ciertos materiales. Por una parte, Hooke quien desarrollo su estudio de la reología de sustancias sólidas planteo:

$$\sigma = G \cdot \gamma \quad (1.1)$$

Siendo, σ : esfuerzo cortante (Pa)
 G : módulo de rigidez (Pa).
 γ : deformación (%).

Este planteamiento matemático sugiere que al aplicar una carga σ sobre un cuerpo sólido, éste va a sufrir una cierta deformación γ . El valor de dicha deformación se mantendrá hasta que cese el esfuerzo aplicado.

Por otra parte, Newton establece que la fuerza por unidad de área que se requiere para el movimiento de un fluido se define como F/A y se denota como " σ " (tensión o esfuerzo de cizalla). Según Newton la tensión de cizalla o esfuerzo cortante es proporcional al gradiente de velocidad (du/dy), o también denominado como D . Si se duplica la fuerza, se duplica el gradiente de velocidad, de esta forma se obtiene:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu D \quad (1.2)$$

Posterior al planteamiento de la existencia de sustancias con propiedades elásticas (Hooke) y viscosas (Newton) por parte de Weber, es Maxwell, en su artículo "Sobre la teoría dinámica de los gases", incluido en la Enciclopedia Británica, quien propuso un modelo matemático:

$$\sigma = \beta \cdot \gamma \quad (1.3)$$

Donde β es un parámetro semejante al módulo de rigidez (Parámetro no-nulo).

En el contexto de la Segunda Guerra Mundial, la Reología cobró mucha fuerza con la búsqueda de materiales viscoelásticos para lanzallamas. Aparecieron poco a poco modelos que asumieron que tanto el módulo de rigidez podían variar con la tensión aplicada. Además se observó que la viscosidad también dependía del tiempo (Tixotropía y Reopexia) y se profundizó en que los materiales reales pueden presentar comportamiento viscoso, elástico, o una combinación de ambos. Dada la ambigüedad que se generó debido al comportamiento combinado, es M. Reiner en 1945 quien establece una herramienta que permite determinar la afinidad de la sustancia hacia un comportamiento elástico o viscoso, Reiner define el número de Deborah, D_e como:

$$D_e = \frac{\tau}{T} \quad (1.4)$$

En donde “ τ ” es el tiempo característico del material y “ T ” el tiempo característico del proceso de deformación. Si D_e era muy alto se consideraba al material como un sólido elástico, y si D_e era muy bajo se le consideraba como un líquido viscoso.

Posterior a la Segunda Guerra Mundial el estudio de la reología fue generando mayor interés con la aparición de fibras sintéticas, plásticos, detergentes, aceites multigrados, pinturas y adhesivos entre otros, mediante el estudio de suspensiones newtonianas tanto diluidas como concentradas.

En esta instancia se hace necesario definir el concepto de suspensión para luego, hacer énfasis en los aspectos teóricos de la reología que caracterizan su comportamiento dentro de un contexto generalizado en la industria. Un sistema que se compone de dos fases, una fase continua y una fase dispersa, la primera hace referencia al líquido que transporta y contiene en su interior a la fase dispersa que puede estar compuesta por partículas sólidas, líquidos inmiscibles o burbujas de algún gas dando origen a suspensiones, emulsiones y espumas. En el capítulo siguiente se especificaran los fundamentos reológicos para las suspensiones.

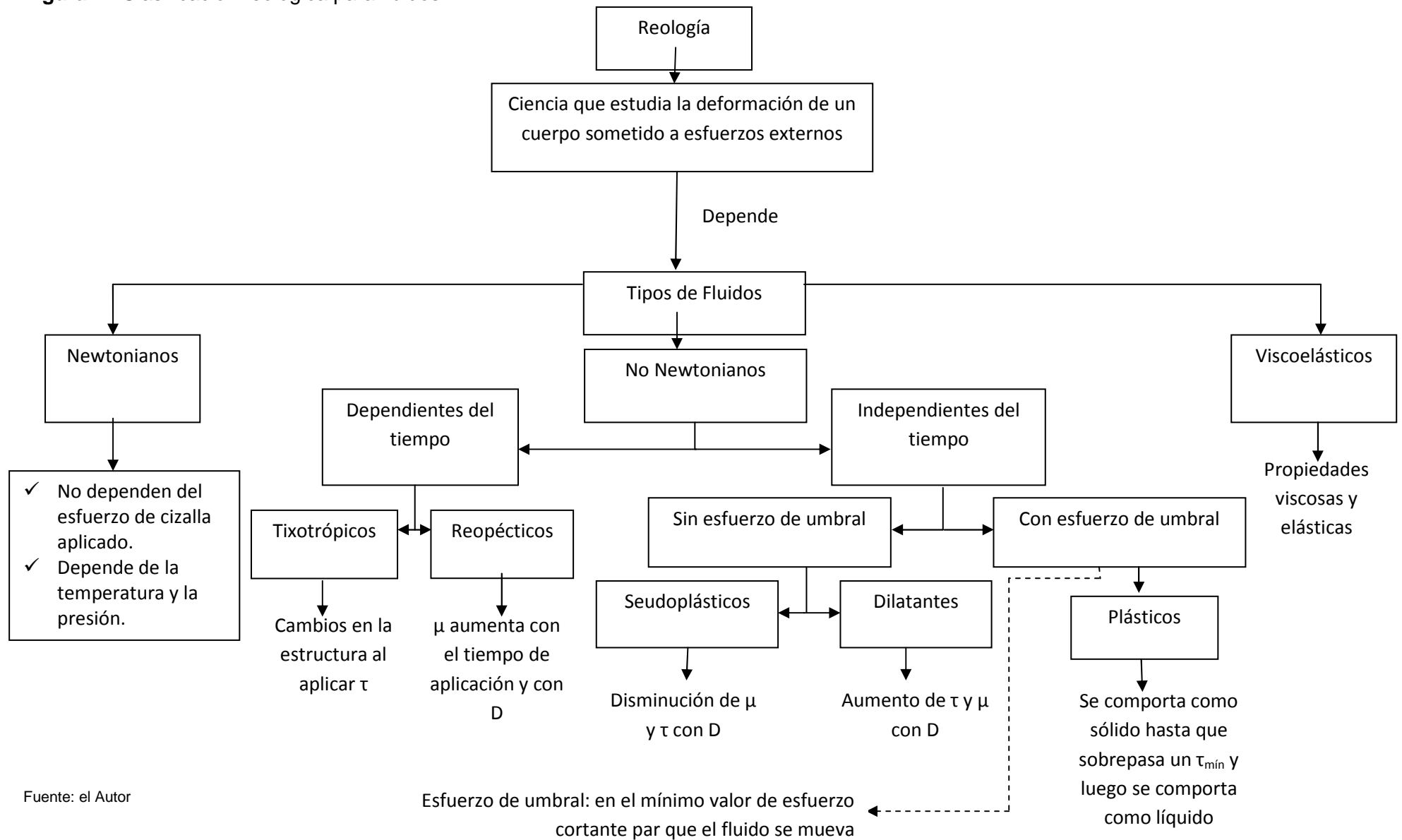
1.3 TIPOS DE FLUIDOS

Existen 3 tipos de fluidos:

1. Newtonianos (proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación).
2. No Newtonianos (no hay proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación)
3. Viscoelásticos (se comportan como líquidos y sólidos, presentando propiedades de ambos).

La figura 1, presenta un esquema de la clasificación reológica para fluidos. En la literatura actual sobre principios de reología se puede enfatizar en esta clasificación, por ahora, solo se hace mención de ella.

Figura 1. Clasificación reológica para fluidos

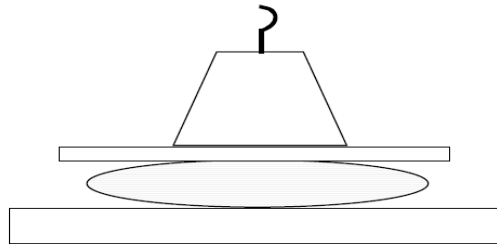


Fuente: el Autor

1.4 ESFUERZOS

Por ejemplo, volviendo al caso de las almohadas; para establecer un test un ensayo de cuantificación sobre su consistencia, sería necesario colocar la almohada sobre una superficie lisa y una tabla plana sobre ésta, y medir la distancia entre ambas. Si nuestro objetivo es comparar almohadas de la misma dimensión, tan solo bastaría con medir el grado de compresión alcanzado al colocar un determinado peso, que sería la fuerza actuante en este caso.

Figura 2. Deformación de una almohada al colocar un peso determinado



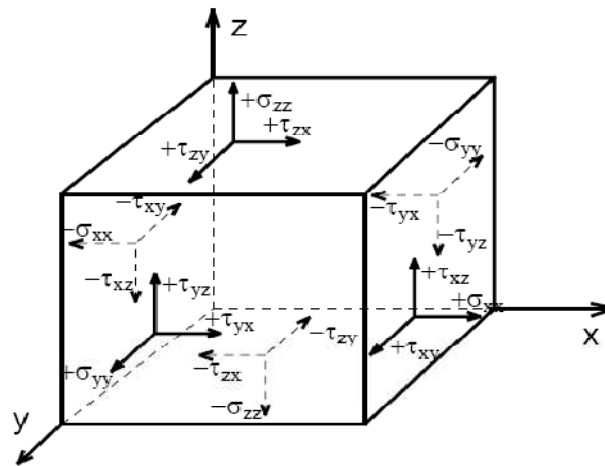
Fuente: Revista Iberoamericana de Polímeros Volumen 3(2), Abril 2002

Sin embargo, si éstas no son iguales, un determinado peso, por ejemplo de 1 kg., no causaría la misma deformación en una almohada pequeña que en una grande, de lo que es fácil deducir que la fuerza tal cual no podría servir para reflejar el estado del material; pero si la fuerza aplicada es dividida por el área de la sección de la muestra, se obtendría una forma más adecuada de describir las propiedades del material. Esta magnitud es conocida como “esfuerzo”, y suele ser representado de forma genérica por la letra griega “ τ ” con dos subíndices (τ_{xy}); x es la dirección normal a la superficie sobre la que actúa la fuerza de dirección y . En algunos textos τ_{xy} suele representar la densidad de flujo de cantidad de movimiento “ y ” a través de una cara perpendicular al eje “ x ”.

De esta forma, sobre cada una de las caras de un elemento cúbico genérico pueden actuar una serie de fuerzas por unidad de área, denominados tensiones o esfuerzos; mientras que las tangenciales a dichas superficies son denominadas tensiones o esfuerzos cortantes, las normales son las tensiones o esfuerzos normales. A fin de establecer una notación conveniente para las tensiones determinadas por las fuerzas de contacto que ejerce un elemento de fluido sobre los elementos contiguos, en la Figura 2 se representa un elemento de forma cúbica con sus aristas coincidentes con los ejes de un sistema cartesiano rectangular, así como los tres componentes de cada una de las tensiones que ejerce sobre los elementos contiguos en las seis superficies límite del elemento.

A cada componente de una tensión se le han incorporado dos subíndices, el primero corresponde al eje normal a la superficie sobre la que se ejerce el esfuerzo y el segundo corresponde al eje de dirección del componente, atribuyéndoles signos positivos o negativos según la superficie que la produce enfrente sentidos positivos o negativos de los ejes. (Recuérdese que una superficie viene definida por un vector perpendicular a ella y hacia fuera).

Figura 3. Notación de las tensiones que realiza un elemento de fluido sobre los elementos contiguos.



Fuente: Revista Iberoamericana de Polímeros Volumen 3(2), Abril 2002

Asimismo y desde el punto de vista de τ como densidad de flujo de transporte de cantidad de movimiento, el primer subíndice indica la dirección en que se transporta y el segundo subíndice se propaga. Cuando nos referimos a un punto concreto, necesitaríamos definir nueve tensiones, que normalmente aparecen expresadas en forma tensorial:

$$\bar{\pi} = \begin{pmatrix} \pi_{xx} & \pi_{xy} & \pi_{xz} \\ \pi_{yx} & \pi_{yy} & \pi_{yz} \\ \pi_{zx} & \pi_{zy} & \pi_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

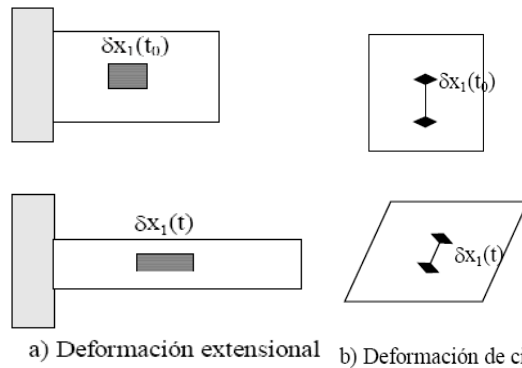
1.5. DEFORMACIONES

La expresión de la deformación experimentada por un material no es tan sencilla como ocurría con el esfuerzo, ya que es necesario hacer referencia a los dos estados del elemento de material. En otras palabras, no se podría especificar el estado de deformación de un material a menos que se indique el estado de referencia con respecto al cual se ha medido la deformación; en el caso de materiales que no fluyen, como un polímero fundido, existe únicamente un estado sin deformar, correspondiente al momento en el que no se aplican esfuerzos. Pero en el caso de materiales que sí fluyen, tal estado de referencia único no existe. En el caso de un experimento controlado, en el que una deformación homogénea es impuesta sobre una muestra inicialmente en reposo, esta condición inicial ofrece un estado de referencia con respecto al cual la deformación puede ser medida. Así pues la expresión del estado de deformación de un determinado elemento, sometido a cualquier tipo de deformación puede ser obtenida mediante expresiones como:

Figura 4. Deformación extensional y deformación en cizalla simple.

$$\varepsilon = \frac{\delta x(t) - \delta x(t_0)}{\delta x(t_0)} \quad (\text{Deformación extensional})$$

$$\gamma = \frac{\delta x(t)}{\delta x(t_0)} \quad (\text{Deformación en cizalla simple})$$



Fuente: Revista Iberoamericana de Polímeros Volumen 3(2), Abril 2002

Se puede demostrar que para deformaciones infinitesimales, la deformación experimentada por un determinado elemento de fluido puede ser expresada con ayuda del conocido tensor de deformaciones infinitesimales, a partir del tensor gradiente de desplazamiento ∇u :

$$\gamma = \nabla u + (\nabla u)^T, \gamma_{ij} = \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (du = v dt) \quad (1.6)$$

Mientras que la velocidad de deformación puede expresarse con ayuda del tensor velocidad de deformación:

$$\dot{\gamma} = \nabla v + (\nabla v)^T, \dot{\gamma}_{ij} = \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (1.7)$$

1.6 ECUACIONES CONSTITUTIVAS

Por tanto, para describir el comportamiento de un determinado material es necesario disponer de una ecuación reológica de estado o ecuación constitutiva adecuada, según el material en cuestión. Entre los dos extremos clásicos, dados por las leyes de Newton y Hooke, existe una gama de comportamientos que deberían de ser descritos por las correspondientes ecuaciones reológicas de estado.

A pesar de existir distintos tipos de ecuaciones, a todas ellas se les exige una serie de requisitos:

- La relación entre esfuerzo y deformación debe ser independiente de rotaciones o translaciones impuestas al fluido.
- Debe ser independiente del sistema de coordenadas elegido.
- La respuesta del material debe ser independiente de lo que ocurra en los alrededores de los distintos elementos: es decir, para un elemento de fluido

se debe satisfacer las condiciones de contorno, pero al margen de esto, su comportamiento debería ser independiente de lo que le ocurra a los elementos vecinos.

Tabla 1. Clasificación de casos para leyes de Newton y Hooke

Fluidos (Newton)	Fluido viscoso	Agua
	Fluido viscoso no lineal	Suspensión en medio newtoniano
	Material viscoelástico	Polímero bajo deformaciones infinitesimales
	Material viscoelástico no lineal	Soluciones poliméricas o polímeros fundidos bajo grandes deformaciones
Sólidos (Hooke)	Material elástico no lineal	Caucho
	Material elástico	Muelle de Hooke

Fuente: Revista Iberoamericana de Polímeros Volumen 3(2), Abril 2002

2. REOLOGÍA DE SUSPENSIONES

2.1 INTRODUCCIÓN

La reología de suspensiones ha sido materia de numerosas investigaciones por muchos años debido a las cuantiosas aplicaciones que tienen dentro de la industria entre las que se encuentran la industria cementera, de pinturas, de tintas de impresión, que involucren mezclas de carbón y lodos de perforación, de limpiadores líquidos abrasivos, de productos alimenticios y muchos productos afines a las medicinas. Estos estudios están encaminados al entendimiento de los mecanismos de estas suspensiones que permitan caracterizar tanto los insumos como los procesos que involucran estas suspensiones proporcionando información que permite ajustar mejor los parámetros de diseño y operación.

El desarrollo de los conceptos teóricos de la reología de suspensiones comprende varios aspectos entre los que se encuentran la determinación de las fuerzas que actúan sobre las partículas en suspensión, el efecto del medio de dispersión (que dependen del tipo de líquido), la concentración de sólidos (fracción volumétrica, ϕ), distribución de partícula, las tasas de cizalladura, viscosidad del medio de dispersión y de las partículas en suspensión, entre otras que se detallaran mas adelante.

2.1.1. Fuerzas que actúan sobre las partículas suspendidas en un líquido

Tres clases de fuerzas coexisten en una suspensión que fluye. Primero, están las fuerzas de origen coloidal las cuales involucran las interacciones entre las partículas que dependen de las propiedades del líquido, por ejemplo la polaridad. Estas fuerzas pueden dar lugar a una repulsión o a una atracción total entre las partículas que se evidencian, por ejemplo, como cargas electrostáticas de atracción o de repulsión al material polimérico o a el tensioactivador presente en la partícula, este último puede presentar fuerzas atracción de Van der Waals entre las partículas, o de la atracción de cargas electrostáticas sobre diversas partes de la partícula. Si el beneficio neto de todas las fuerzas es una atracción, las partículas tienden a flocular, mientras que si se da un resultado total de repulsión, significa que siguen siendo separadas (dispersado o defloculación). La determinación del resultado global de la acción de estas fuerzas que funcionan juntas puede ser absolutamente complicada.

En segundo lugar, se considera el movimiento browniano omnipresente en la suspensión debido a la movilidad térmica de las partículas del líquido que genera un movimiento sobre las partículas en suspensión, es decir las partículas de líquido que en proporción son mucho más pequeñas en comparación con las partículas del sólido suspendido ejercen una fuerza pequeña sobre la superficie del sólido y sumando el efecto de todas las partículas del fluido que ejercen esta fuerza generan un movimiento continuo del sólido en suspensión y aleatorio ya que esta fuerza neta ejercida sobre la superficie del sólido es desproporcional. Para las partículas de todas las formas, esta distribución aleatoria influencia la forma de la función de distribución del arreglo espacial de las partículas. La fuerza browniana posee una fuerte dependencia del tamaño de partícula, de modo que debajo de un tamaño de partícula de $1\mu\text{m}$ tiene una influencia grande. Debido a que esta fuerza se asegura

de que la partícula esté en el movimiento constante, cualquier descripción de la distribución espacial de las partículas es un promedio del tiempo.

En tercer lugar, debemos considerar las fuerzas viscosas que actúan en las partículas. Las fuerzas viscosas son proporcionales a la diferencia local de la viscosidad entre las partículas del líquido circundante. Por lo tanto esto afecta la manera en que la viscosidad de la suspensión se incorpora a la viscosidad de la fase continua que entonces abarca dichas interacciones. Por esta razón, “viscosidad de la suspensión”; se considera generalmente como la viscosidad en relación con la viscosidad de la fase continua.

Claramente, la reología medida macroscópicamente es fuertemente dependiente de estas consideraciones microestructurales. Por ejemplo, la presencia de desviación aislada de las partículas en las líneas del fluido en flujo y por lo tanto hay un incremento de la viscosidad. En concentraciones más altas, presenta más resistencia porque las partículas tienen que moverse en medio del camino de otras.

Cuando las partículas forman las estructuras floculadas, presenta aún más resistencia debido a que los flóculos causan una inmovilización de la fase continua originando un aumento evidente del volumen de la fase, aumentando la viscosidad.

2.1.2. Otras Estructuras

Cuando las partículas están introducidas en un líquido en descanso asumen generalmente un estado de equilibrio termodinámico que, cuando el movimiento browniano domina corresponde a un estado desordenado. Cuando las fuerzas coloidales son dominantes, las partículas forman estructuras que dependen de si las fuerzas totales son atractivas o repulsivas. Cuando son atractivas forman los agregados y cuando son repulsivos forman una estructura de enrejado.

La estructura de enrejado esta formado por la repulsión total, por ejemplo en sistemas de partículas que llevan cargas electrostáticas iguales se pueden dispersar en una fase continua polar. Las partículas entonces toman posiciones lo mas lejos posible una de la otra. Si la carga en tales partículas es muy grande, el movimiento de las partículas esta seriamente restringido y la estructura se puede visualizar como una estructura de cristal: si el espaciamiento del enrejado es comparable a las longitudes de onda ópticas, ocurren efectos de interferencia que generan en radiación por parte de la suspensión.

Cualquier de las estructuras mencionadas anteriormente pueden ser modificada por la absorción de materiales tensioactivadores sobre la superficie de las partículas. Las estructuras formadas por las cargas electrostáticas se pueden modificar por de adición de electrólitos.

Las estructuras discutidas hasta ahora están formadas por partículas cercanas a una forma esféricas. Sin embargo, si la partícula es de forma irregular, las estructuras formadas pueden ser muy complicadas. La estructura agregada es entonces como un castillo de naipes atraídos de los bordes de las de caras. Otro ejemplo es una suspensión de cristal de jabón. El jabón se puede hacer cristalizando bajo la forma

de cintas largas, que entonces se entrelazan para formar una estructura enredada, como en grasa lubricante.

2.1.3. Estructuras inducidas por el flujo

Consideraremos primero, los sistemas sin agregados en los cuales las fuerzas brownianas dominan. Cuando una suspensión concentrada de este tipo fluye a tasas muy bajas de cizalla, las partículas tienen que moverse necesariamente alrededor una de otra, esto ocurre en todo el flujo. Esto implica una resistencia grande y la viscosidad resultante es alta. Por otra parte, el resto de las partículas de la distribución están esencialmente imperturbadas porque el efecto del movimiento browniano domina el movimiento de cizalladura y restaura la aleatoriedad de la distribución del estado del resto de partículas. La viscosidad sigue siendo esencialmente constante. A tasas levemente más altas de cizalladura, el gradiente impuesto de velocidad induce una orientación de la estructura de la partícula, el cual no está restaurado por el movimiento browniano. Sin embargo esta orientación permite a partículas pasar una a la otra más libremente que a las tasas bajas de cizalladura y por lo tanto la viscosidad es más baja. Incluso a tasas de cizallas más altas, la estructura se orienta tan gruesa que las partículas forman capas separadas por capas claras de fase continua. La viscosidad dentro toma su valor mínimo. La existencia de las capas de la partícula ha sido confirmada por la difracción ligera.

Si la tensión de cizalla se aumenta sobre un valor crítico, las capas se interrumpen y desaparecen gradualmente. Por lo tanto, la viscosidad comienza a levantarse otra vez y también aumentará con el tiempo de cizalladura.

2.2 Viscosidad de suspensiones de partículas sólidas en líquidos newtonianos

2.2.1 Dilución de suspensiones dispersas

Una considerable cantidad de progreso se ha hecho en predecir la viscosidad de las suspensiones diluidas (el 10% y menos en volumen). Todos los estudios esencialmente extienden el trabajo de Einstein (1906-1911) en esferas, para poder considerar la forma de la partícula, carga y la pequeña cantidad de interacción hidrodinámica que se presenta cuando cualquier partícula entra en la vecindad de otra. Einstein demostró que las solas partículas aumentaron la viscosidad de un líquido como una simple función de la fase del volumen, según la fórmula

$$n = n_s(1 + 2.5\varphi) \quad (2.1)$$

Donde n es la viscosidad de la suspensión y n_s es la viscosidad del medio que se suspende. En la anterior ecuación es notorio que no existe ningún efecto del tamaño de la partícula o de la posición de la misma, porque la teoría descuida los efectos de otras partículas. Cuando se incluyen las interacciones entre las partículas, la situación llega a ser más complicada. La presencia de otras partículas es explicada por términos de más alto orden en φ . No obstante la única teoría manejable está para el flujo extensional, porque solamente en este tipo de flujo puede la posición relativa de las partículas ser explicada analíticamente Berchelor (1977) da la viscosidad en este caso como

$$n = n_s(1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2) \quad (2.2)$$

Donde las viscosidades se deben interpretar como viscosidades extensionales. Se han hecho numerosas determinaciones experimentales del término que multiplicaba ϕ^2 para los flujos de cizalla, pero la gama de valores obtenidos es grande (variando de 5 a 15). Se han realizado muchos trabajos y muchas revisiones (véase, por ejemplo, a Barnes 1981) en suspensiones diluidas, pero casi todas concluyen que, aparte del abastecimiento en una cierta condición de limitación para el caso concentrado, el trabajo es de poca importancia a las suspensiones industriales. La teoría diluida de las suspensiones cubre la gama debajo del 10% de volumen de la fase, esto no explica no más que un aumento del 40% viscosidad durante la fase continua.

2.2.2 Fracción de empaquetamiento máxima

La influencia de la concentración de las partículas en la viscosidad de las suspensiones concentradas se determina mejor en lo referente a la fracción de empaquetamiento máxima, pues las partículas se agregan cada vez más, cuando “el atasco aumenta”, dando el contacto tridimensional continuo a través de la suspensión, haciendo el flujo imposible, la viscosidad tiende al infinito. El volumen particular de la fase en el cual éste sucede se llama la fracción de empaquetamiento máxima ϕ_m , y su valor dependerá del arreglo de las partículas.

La fracción de empaquetamiento máxima es controlada por el tipo de empaquetamiento el cual es muy sensible a la distribución de tamaño de las partículas y a la forma de la partícula (véase, por ejemplo, Wakeman1975). Para distribuciones de tamaño de partícula más amplias tienen valores más altos del ϕ_m porque las partículas más pequeñas caben en los boquetes existentes entre las partículas más grandes. Por otra parte, las partículas no esféricas llevan a un relleno más pobre del espacio y por lo tanto a un ϕ_m más bajo. La floculación de la partícula puede también llevar a una fracción de empaquetamiento máxima menor debido a que los flóculos no tienden a formar un cierre de empaque y continúan creciendo.

El ejemplo está dando en la tabla abajo para las esferas del monodispersión.

Tabla 2. Fracción máxima de empaquetamiento para diferentes arreglos

Arreglo	Fracción de empaquetamiento máxima
Simple cúbico	0.52
Configuración termodinámicamente estable	0.548
Hojas hexagonales llenas que apenas que tocan	0.605
Empaquetamiento cercano al azar	0.637
Empaquetamiento cúbico de cuerpo centrado	0.68
Cubico de cara hexagonal centrado	0.74

Fuente: H. A. Barnes, J. F. Hutton & K. Walters, An introduction to rheology, página 120

2.2.3 Suspensiones newtonianas concentradas

La situación para suspensiones concentradas, donde se espera que el término φ^2 sea de un orden más alto e importante, es aún más difícil de analizar desde un punto de vista teórico. Los únicos métodos disponibles para abordar el problema son introducir una técnica para hacer un promedio de la influencia de las partículas vecinas o simular alternativamente la situación usando el modelado del computador.

Un desarrollo reciente, basado en una técnica que consiste en hacer un promedio, Ball y de Richmond (1980) que esencialmente empiezan con la asunción que el efecto de todas las partículas en una suspensión concentrada es la suma de los efectos de las partículas agregadas secuencialmente. Por lo tanto la ecuación de Einstein se puede escribir en una forma diferenciada

$$dn = \left(\frac{5n}{2}\right) d\varphi \quad (2.3)$$

Donde dn es el incremento de la viscosidad en la adición de un pequeño incremento de $d\varphi$ del volumen de la fase a una suspensión de la viscosidad n . La viscosidad de la suspensión final entonces se obtiene integrando el volumen de la fase entre 0 y φ , para los cuales la viscosidad es n_s , y n , respectivamente. Entonces:

$$n = n_s \exp\left(\frac{5\varphi}{2}\right) \quad (2.4)$$

Ball y Raymond precisan que se omite las correlaciones entre las esferas debido a su tamaño finito. Esto significa que cuando una partícula se agrega a una suspensión relativamente concentrada requiere más espacio que $d\varphi$ de volumen y presentar dificultades debidas a el empaquetamiento. Por lo tanto el $d\varphi$ tiene que ser substituido por el $d\varphi/(1-K\varphi)$, donde K explica el efecto de "apretadura" supuesto por el empaquetamiento. De la integración se produce ahora

$$n = n_s(1 - K\varphi)^{-5/(2K)} \quad (2.5)$$

En esta ecuación vemos que la viscosidad llega a ser infinita cuando $\varphi = 1/K$ por lo tanto, nosotros puede identificar $1/k$ como la fracción de empaquetamiento máxima φ_m . La expresión de Ball y Richmond; es efectivamente idéntica a la de Krieger y Dougherty (1959), esta teoría dice que en el caso general, el factor de 5/2 se podría substituir por la viscosidad intrínseca (n). El valor 5/2 es la viscosidad intrínseca de una suspensión diluida ideal de partículas esféricas. El reemplazo de él por (n) permite que las partículas de cualquier forma sean explicadas. La ecuación de Krieger-Dougherty es

$$n = n_s \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-n\varphi_m} \quad (2.6)$$

Los valores de φ_m obtenidos empíricamente son fuertemente dependientes en la distribución de tamaño de la partícula. Así, se dan aumentos de φ_m con el aumento de la polidispersidad (la extensión de tamaños). La mezcla de los tamaños de las partículas permite que la viscosidad sea reducida mientras que se mantiene el mismo volumen de la fase, o alternativamente, el volumen de la fase se aumentará manteniendo la misma viscosidad.

La mayoría de las suspensiones de interés industrial tienen una distribución continua de los tamaños de las partículas que caben a menudo en alguna expresión matemática empírica. Sin embargo no hay información disponible en la literatura reológica en cómo los parámetros de tal control del ajuste de φ_m . Cada sistema tiene por lo tanto que ser medido y φ_m ser encontrado por el ajuste de curvas no lineales. Una vez que φ_m se encuentra para cualquier suspensión práctica, es un parámetro útil para determinar el efecto sobre la viscosidad de cambiar la concentración de la fase dispersa o la viscosidad de la fase continua.

Hasta el momento, se ha concentrado en el efecto de partículas esféricas sobre la viscosidad de suspensiones. Sin embargo, las partículas asimétricas tienen un efecto fuerte sobre la viscosidad intrínseca y la fracción de empaquetamiento máximo, y por lo tanto en la relación de la viscosidad/concentración. Un número de estudios han demostrado que cualquier desviación de partículas esféricas significa un aumento en la viscosidad para el mismo volumen de la fase.

2.2.4 Reducción de cizalladura en suspensiones concentradas

Aunque la teoría descrita arriba en la ecuación 2.5 derivada para la función de distribución radial simétrica, en el caso de una tasa de cizalladura muy baja, ha sido encontrado para trabajar asombrosamente bien sobre una gama de tasas de cizalladura para las cuales la estructura sea isotrópica. Esto acomoda estas situaciones permitiendo la clasificación de (n) y el φ_m que varía con la cizalla, así explicando la cizalladura que enrarece por el hecho de que trae alrededor del flujo un arreglo más favorable de partículas. La tendencia a formar las estructuras de dos dimensiones más que de tres es un cambio favorable. Considerando primero las relaciones de la viscosidad/ fase de volumen a tasas de baja cizalladura que en la ecuación de Krieger-Dougherty.

En segundo lugar, un número de investigadores han encontrado que no sólo pueden ser relacionados la viscosidad con el volumen de la fase a la tasa de cizalla de los extremos sino también en valores intermedios. Sin embargo, es generalmente necesario en este caso correlacionar los valores de la viscosidad medidos en la misma tensión de cizalla, no la tasa de cizalladura. Otra reducción de datos es posible siguiendo la sugerencia de Krieger (1972). Él reconoció que aunque φ_m y (n) sean dependientes de la tensión, son independientes del tamaño de partícula. Para relacionar la viscosidad de diversas suspensiones del tamaño de partícula, él sugirió que, en vez de tasa de cizalladura, una nueva variable esté utilizada, dada por

$$P_e = \frac{6\sigma a^3}{KT} \quad (2.7)$$

Donde a es el radio de la partícula, σ es la tensión de cizalladura y KT es la unidad de energía térmica.

La variable de Krieger es adimensional y es de hecho un número modificado de Peclet. Krieger dice que la viscosidad de la suspensión es más relevante que la de la fase continua en suspensiones concentradas. La forma de la curva de la viscosidad contra el P_e en la mayoría de los casos sigue el modelo empírico de Ellis:

$$\frac{n-n_{\infty}}{n_0-n_{\infty}} = \frac{1}{1+b(P_e)^p} \quad (2.8)$$

Donde b y p son cantidades adimensionales.

2.2.5 Consecuencias en la práctica del efecto del volumen de la fase

✓ Causa de errores

Una examinación de la ecuación 2.5 demostrará que, en los volúmenes de la fase de menos concentración cerca de 30%, la viscosidad cambia lentamente con la concentración, y las viscosidades a tazas muy bajas y muy altas del cizalladura, respectivamente, es esencialmente igual y para suspensiones diluidas se comportan básicamente como newtoniana. Sin embargo, en los valores del ϕ alrededor de 0.5, los pequeños cambios en el ϕ o en ϕ_m dan cambios grandes en viscosidad y alteran el grado de reducción de cizalla. Así, los pequeños errores en el pesaje implicado en la incorporación de las partículas que componen la suspensión pueden dar variaciones muy grandes en viscosidad. También al igual que a menudo el caso en látex del polímero después de que su fabricación, la absorción de pequeñas cantidades de la fase que suspende en los cambios grandes en los suspendidos que la viscosidad de suspensiones concentradas. Incluso la mitad del uno por ciento a partir de la fase continua a la fase suspendida significa un aumento en el volumen de la fase del un por ciento, que puede, en el caso de alto volumen de la fase, llevar a una duplicación o más de la viscosidad. Cuando se observa que esto es equivalente al incremento del tamaño de partícula cercana al de 0.2%, y que las técnicas de medida del tamaño de partícula están en ninguna parte cerca de capaz de detectar tales pequeños cambios. Vemos que viscosidad es una variable muy sensible en la reología de la suspensión.

✓ Efecto de pared

Otro factor más que se debe considerar en reometría, así como en situaciones industriales, se conoce como el “efecto de pared”. Este término cubre los fenómenos que llevan a una reducción de la concentración de una suspensión adyacente a la pared sólida del canal de flujo. Un fenómeno tal se presenta por la imposibilidad geométrica de arreglar partículas cerca de una pared de la misma forma que se arreglan al interior del flujo. Otra es una migración de la partícula de regiones de taza alta de cizalla a una de baja. En la mayoría de casos es común el uso del concepto de una capa de fase continua solamente en la pared y la dispersión normal por todas partes, con el grueso de la capa agotada que está del orden del radio de las partículas. El resultado del efecto de pared en viscosímetros de tubo es una reducción en la viscosidad medida, esta reducción se incrementa a medida que disminuye el radio del tubo.

2.2.6. Espesamiento de la cizalladura de suspensiones concentradas

Dado las condiciones correctas, todas las suspensiones concentradas no se agregan partículas sólidas demostrarán el espesamiento de cizalladura. Las circunstancias y la severidad particulares de la cizalladura que espesan dependerán del volumen de la fase, de la distribución dimensional de partícula y de la viscosidad continua de la fase. La región de cizalladura se espesa generalmente por la

reducción de cizalla causada por acodar dos dimensiones de flujo. El arreglo acodado es inestable, y se interrumpe sobre una tensión de cizalla crítica. El efecto se ha estudiado usando un sistema óptico de la difracción (Hoffman 1972).

Un número de estudios han demostrado que la tasa crítica de cizalladura para que la transición cizalle - espesamiento varía poco con el volumen de la fase cuando el volumen de la fase está cerca de 0.50. Sin embargo, en los volúmenes de fase mucho más arriba que esto, las disminuciones para la tasa crítica cizalla son mucho más evidentes, mientras que en los volúmenes de la fase perceptiblemente debajo de 0.5, sucede lo contrario es decir se presenta un aumento en la tasa crítica de cizalle. Para cualquier volumen de la fase alrededor de 0.50, se encuentra que el efecto del tamaño de partícula sobre el valor de la tasa crítica de cizalladura es absolutamente grande. De hecho, es aproximadamente proporcional al inverso del cuadrado del tamaño de partícula. La viscosidad de la fase continua es también muy importante, y un aumento de esta viscosidad disminuye la tasa crítica de cizalladura. Esto refleja importancia de la tensión de cizalladura para el inicio del espesamiento de cizalla.

2.3 Contribución coloidal a la viscosidad

✓ Repulsión total entre las partículas

La repulsión total entre las partículas de una suspensión se crea si las partículas llevan cargas electrostáticas iguales. Las partículas entonces toman posiciones lejos una de la otra como tanto como sea posible. Para que el flujo ocurra, las partículas tienen que ser forzadas fuera de sus posiciones de equilibrio e inducidas a trasladarse contra los campos electrostáticos de partículas vecinas a vacantes próximas en el enrejado imperfecto. Goodwin (1987) ha dado la ecuación siguiente para evaluar la contribución adicional de la repulsión a la viscosidad cero de la tasa de cizalladura superior a la contribución generalmente de Krieger-Dougherty:

$$\Delta n = \frac{h}{b^3} \exp(E^*/kT) \quad (2.9)$$

Donde h es la constante de Planck, b es la separación entre del centro de dos partículas y E^* es la energía de activación calculada por la difusión de ella misma. La expresión predice las viscosidades muy grandes (pero finitas) comparadas a la contribución viscosa solamente, como explicó la expresión de Krieger-Dougherty. Los efectos del tamaño y de la concentración de partícula son muy fuertes, siendo explicadas por el factor de E^* .

Goodwin también sugiere que la cizalladura hará que tal del sistema llegue a ser significativo para tensión de cizalla del orden de KT/b^3 . A tazas muy altas de cizalla, el acodamiento de dos dimensiones ocurre y la contribución electrostática pierde su dominación. La viscosidad disminuye y esta dada por la expresión de Krieger-Dougherty para las partículas no que actúan recíprocamente. La gama de fuerzas electrostáticas se disminuye grandemente si un electrolito se agrega a la solución, dependiendo de las cargas en las partículas. Esto significa que usando fuerzas electrostáticas para espesar la suspensión está limitado a un sistema muy puro,

puesto que la contaminación leve del electrólito puede dar una disminución grande de la viscosidad.

La repulsión puede también presentar fuerzas entrópicas causadas por la interacción de las cadenas de cualquier polímero fijado por adsorción sobre las superficies de las partículas. Aunque no siempre funcionen sobre grandes distancias de la partícula, pueden afectar a la viscosidad en los altos volúmenes de fase.

✓ **Atracción total entre las partículas**

La formación de flóculos en la fase continua, llevan a un volumen eficaz más grande de la fase que el de las partículas primarias. Esto ocasiona un incremento adicional en la viscosidad superior al esperado por el del volumen de la fase de las partículas individuales. Cuando se cizallan las suspensiones floculadas, los flóculos giran, con posibilidad deformarse siempre y cuando la tensión aplicada sea lo suficientemente grande. Los flóculos toman a veces la forma de cadenas y redes a través del líquido.

La longitud de los filamentos es una función de la tensión de cizalla. Todas las estructuras floculadas se toman para analizar y para reconstruir, y el comportamiento tixotrópico se asocia generalmente a las suspensiones floculadas; suspensiones de arcillas son ejemplos clásicos. La fuerza impulsora para reconstruir el floculo es el movimiento browniano, y presenta aumentos con la disminución de tamaño de partícula. Así, uno espera del sistema de partículas grandes recuperar su viscosidad más lenta que los sistemas de pequeñas partículas. Las suspensiones semejantemente grandes de las partículas analizarán más rápidamente bajo corte. Estas consideraciones son importantes en el diseño de productos tixotrópicos tales como pinturas y tintas de impresión.

La atracción entre las partículas se puede reducir de un número de maneras, incluyendo la adsorción de moléculas sobre la superficie de las partículas. La adición del electrólito a las suspensiones de la arcilla puede reducir el efecto de la carga diferenciada. En todo el éstos caso, la viscosidad se reducen substancialmente Los sistemas floculados tienen generalmente viscosidades muy altas a tazas de cizalladura. En muchos casos el modelo de Bingham se ha utilizado para describir este comportamiento.

2.4 Suspensiones de partículas deformables

Muchas dispersiones se hacen de partículas deformables, los ejemplos más obvios que son las emulsiones y la sangre. Haciendo frente a la reología de estos sistemas, los factores anteriores como fuerzas interpartículas son todas relevantes, pero el efecto del volumen de la fase no es tan extremo como con los sólidos. El volumen máximo de la fase es generalmente mucho más alto que con las partículas sólidas puesto que las partículas se deforman para acomodar la presencia de vecinos cercanos. En esta situación, la forma de las partículas es poliédrica y la suspensión se asemeja a una estructura de espuma. Las fracciones de empaquetamiento máximas son generalmente de 0.09 y superiores.

La forma familiar considerada para las dispersiones sólidas es otra vez igual que a la del comportamiento no newtoniano con incrementos en la concentración. Sin embargo, se presenta una dispersión asintótica de partículas sólidas en el mismo volumen de la fase. Este efecto es atribuible a la deformación de la partícula en la emulsión.

El trabajo teórico realizado por Oldroyd (1953) para emulsiones diluidas demostró que la viscoelasticidad resulta ser la fuerza de resistencia debido a la tensión diédra entre las fases continuas y de la dispersión. Las gotitas de la emulsión en descanso son esféricas, pero llegan a ser elipsoidales sometidas a cizalla, con un aumento la superficie.

Las partículas sólidas se estabilizaron por los polímeros fijados por adsorción pueden aparecer como partículas deformables cuando el tamaño de partícula es muy pequeño (menos 100nm). En este caso la capa estabilizadora deformable puede formar una considerable proporción del volumen verdadero de la fase. El efecto total es que la viscosidad es una función de disminución del tamaño de partícula nominal. En este caso sin embargo el volumen de la fase se debe ajustar para tomar cuenta de la capa de estabilización. Esto se puede obtener midiendo la viscosidad de suspensiones muy diluidas y aplicando la ecuación de Einstein.

2.5 Estudios de simulación en computador de la reología de suspensiones

La simulación de computadora de suspensiones en flujo ha sido considerada por Barnes (1987). La simulación no es diferente a las simulaciones de computadora de líquidos simples. Ambas simulaciones utilizan las ecuaciones del movimiento newtonianas y un tipo de de partícula Lennard-Jones haciendo referencia a las fuerzas repulsivas a distancias pequeñas. Las diferencias principales son que las fuerzas interpartículas son más pequeñas y la resistencia hidrodinámica al movimiento es mucho mayor para la suspensión.

Las técnicas de las dinámicas no moleculares del equilibrio (NEMD) consideran un montaje de partícula de un sistema inicial de posiciones en espacio y un sistema de velocidades. El cálculo de NEMD es la evaluación de las nuevas posiciones y de las velocidades sobre una sucesión de intervalos cortos. Para esta información la presión (o el tensor de cizalladura) se puede calcular, por lo tanto la viscosidad y las diferencias de la tensión normal.

Dado las semejanzas del acercamiento, no es de extrañar que lo primordial tanto para los líquidos simples como para la suspensión sea similar. Después de la región newtoniana del sistema más baja, se exhibe una reducción en la cizalla. A tazas de cizalladura más altas las simulaciones predicen el espesamiento.

La considerable ayuda para la existencia de estructuras inducidas por el flujo en la región de reducción cizalladura es proporcionado por NEMD. Las simulaciones demuestran que de una partícula esférica se forman capas en dos dimensiones que se rompen en el inicio del espesamiento de la cizalla. El resultado corresponde a líquidos simples en la formación de cadenas de moléculas alineadas en la dirección

del flujo y para moléculas diatómicas y más largas, una alineación adicional de las moléculas.

La técnica de la simulación de computado llegará a ser más importante en el futuro, especialmente en su capacidad para los sistemas complicados pero sistemas idealizados.

3. REOLOGÍA DE SUSPENSIONES CALCÁREAS

3.1 INTRODUCCIÓN

En apartados anteriores ya se plantearon los diferentes campos en los cuales la reología desenvuelve un papel determinante tanto en el desempeño de los procesos como en el control de los mismos. La necesidad de desarrollar un conocimiento más amplio en el manejo de las materias primas y de los procesos involucrados, posee un fin concreto en el cual se esperan resultados que permitan la optimización de los equipos, procesos y el ajuste de los parámetros de operación.

Esta situación no es ajena a la industria cementera que involucra en su proceso productivo tres etapas, la primera es la preparación de las materias primas en donde se da la reducción de tamaño (deformación mediante sometimiento a un esfuerzo), transporte de finos por vía húmeda (flujo de una suspensión), clasificación de partículas (comportamiento de una suspensión), La segunda etapa comprende la cocción del clinker y finalmente la tercera comprende la molienda del cemento. La reología exhibe una importancia destacada en la primera y tercera etapa donde el transporte y clasificación del material requiere de una caracterización y conocimiento adecuado para evitar pérdidas de energía debido a un mal funcionamiento, y es precisamente en la clasificación donde se acrecienta uno de los mayores porcentajes de error debido a la recirculación de material óptimo, dando lugar a pérdidas energéticas y a la disminución en la capacidad de procesamiento de los equipos de reducción de tamaño.

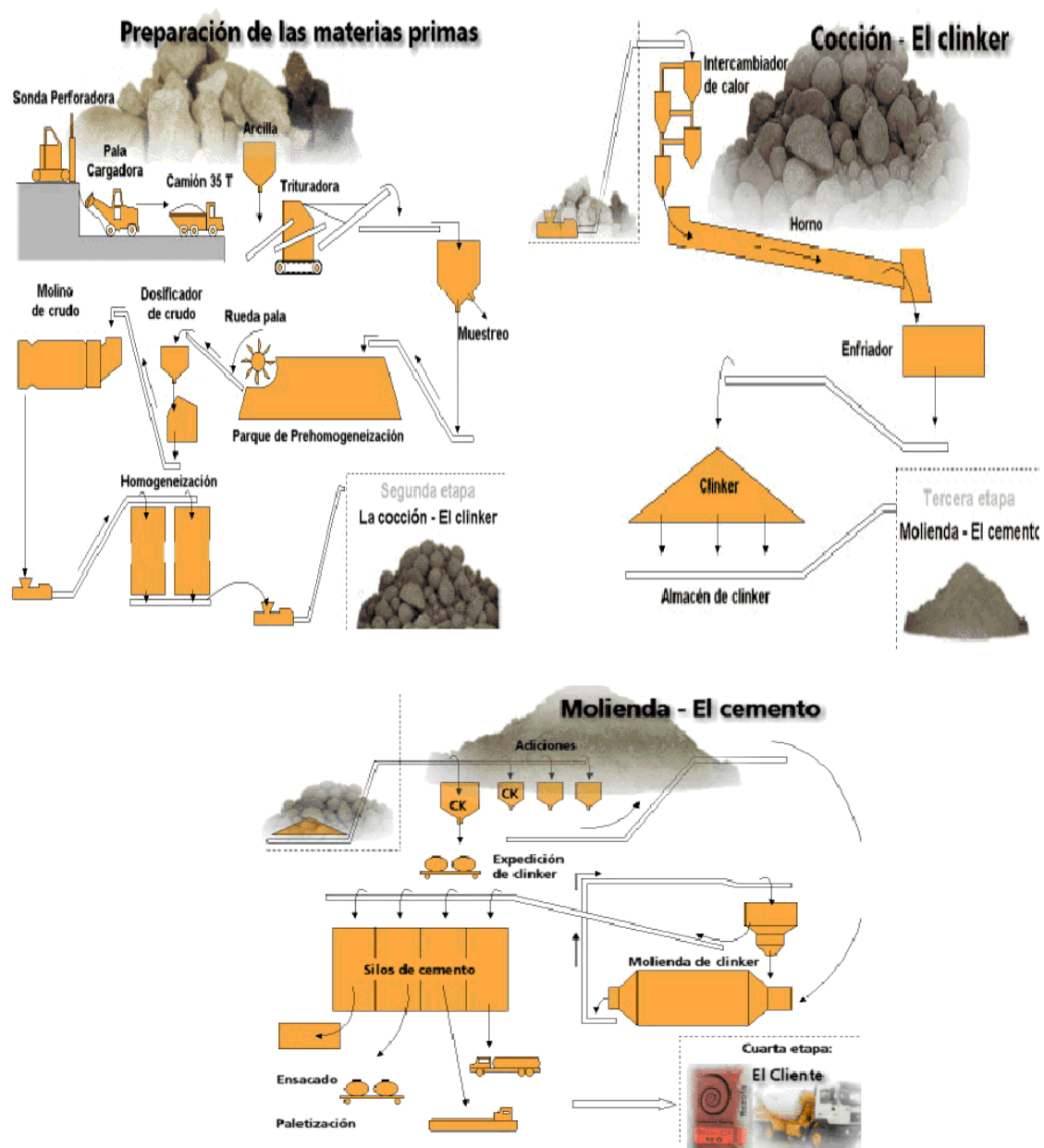
En el caso de las pastas de cemento, los datos de la literatura disponible son muy escasos y no se han reportado datos en la literatura para el caso específico de la pasta de cemento de composición polimineral. Por otro lado, las características de las mismas y la influencia que ejercen sobre la viscosidad factores tales como: la composición química, humedad, granulometría, entre otras, son particulares para los materiales de la zona en que son extraídos y la forma en que son procesados por determinada planta de producción, es decir el comportamiento reológico de las pastas de cemento no pueden generalizarse.

3.2 Generalidades del proceso de producción de cemento

3.2.1 Diagrama del proceso de producción de cemento

En la figura 5 se observa el diagrama de producción para la preparación de materias primas, cocción del clinker y la molienda del cemento, siendo la primera y tercer etapa las cuales la caracterización reológica es más importante dentro del proceso de producción de cemento.

Figura 5. Diagrama de una planta de producción de cemento por vía húmeda



Fuente: www.monografias.com/trabajos58/produccion-cemento/produccion-cemento2.shtml

3.2.2 Características reológicas de la materia prima

Las materias primas de la cantera, en explotación por la fábrica, están formadas esencialmente por mezclas de calizas y arcillas denominadas margas. Las calizas presentan un alto contenido de carbonato de calcio y las margas un bajo contenido. En la mezcla también se presentan calizas de elevada pureza, las que pertenecen a una formación geológica posterior al resto de los materiales presentes en la capa superior del yacimiento.

Se destaca el hecho de que la presencia de arcillas en las margas se incrementa a medida que aumenta la profundidad del yacimiento, hasta llegar a capas de gran profundidad formadas por arcillas plásticas imposibles de explotar por la alta viscosidad que generan en las suspensiones que se preparan con las mismas. El cuarzo, en las condiciones mencionadas, se encuentra de modo apreciable en las margas arcillosas. En cantidades muy pequeñas se presenta también magnesita ($MgCO_3$) y otros óxidos de componentes menores.

Las materias primas suelen presentar muy bajos contenidos de óxido férrico (Fe_2O_3), en ocasiones se adiciona hierro para lograr una temperatura más baja de formación del clinker, lo cual se traduce en un menor consumo de energía, así como una mayor duración del revestimiento refractario del horno.

De todo este conjunto de materias primas se compone la suspensión, la que adquiere su total consistencia en los molinos de bola, en los cuales se logra un mezclado total de cada uno de sus componentes, y se le añade la cantidad de agua necesaria, preparándola para su bombeo a los hornos. En éstos se somete a una serie de transformaciones físico-químicas en el clinker, y posteriormente se lleva al área de molienda para producir finalmente el cemento.

3.2.3 Consideraciones micro-reológicas

El uso de materiales calcáreos y arcillosos para la fabricación de cementos origina una serie de consideraciones reológicas analizadas a escala micro debido a las estructuras que estas tienen y las interacciones inter partículas, que suscitan marcadas influencias en el comportamiento reológico de la pulpa cruda a escala macro. Las rocas usadas pueden presentar principalmente calcita, ópalo, minerales de la arcilla, los feldspatos y el cuarzo, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 ; los anteriores componentes de la materia prima para la producción de cemento vienen en diferentes composiciones que dependen de las características de la cantera, las condiciones del entorno y de su formación, no necesariamente posee todos los componentes mencionados anteriormente.

La pulpa es una suspensión de las partículas que tienen muy alta densidad de carga superficial negativa bivalente (Ca_2^+). Se observan las fuerzas globales atractivas entre las partículas y un mecanismo posible por el cual las partículas desarrollan esta cohesión se puede encontrar en la literatura. Las interacciones entre las partículas resultan de la competición de la presión entrópica, una fuerza repulsiva que origina de la presión del "gas" y una fuerza atractiva debido a las correlaciones de los iones situados alrededor de partículas vecinas.

La agregación de las partículas se propone generalmente para explicar su comportamiento reológico. Realmente sin los agregados, las suspensiones serían líquidos tixotrópicos que presentan una tensión de producción evidente y un comportamiento de cizalla-reducción, estas características se pueden interpretar por la existencia de fuerzas global atractivas que son responsables de la agregación de las partículas, la tensión de producción que es ligada a la congelación de la suspensión, y el comportamiento de cizalla-reducción que es explicado por un progresivo desmenuzarse bajo cizalladura. A tazas altas de cizalladura y para las pastas concentradas de cemento, algunos autores sugieren un comportamiento del

cizalla-espesamiento, que podría ser debido al aumento del tamaño del agregado bajo cizalla. Los modelos teóricos propuestos describen la agregación de las suspensiones. Relacionan viscosidad de la suspensión al tamaño de los agregados.

Este radio del agregado resulta de la competición entre las fuerzas hidrodinámicas, que tienden a romper los agregados, y las fuerzas de la cohesión, en el origen de la agregación; puede ser derivada según una aproximación del espacio del medio. La validez de estos modelos fue probada con muchos sistemas, tales como glóbulos rojos en las suspensiones salinas, látex del poliestireno.

3.3 Reología de las suspensiones calcáreas

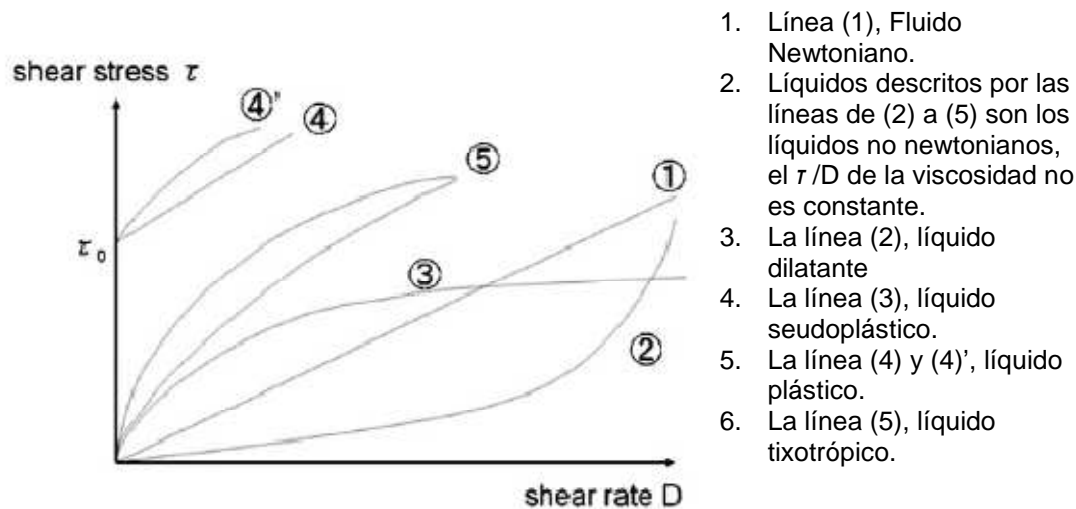
Las características reológicas de las pulpas para la producción de cemento no han sido debidamente estudiadas en nuestro país, y la información con que se cuenta es casi inexistente. Este material se considera un producto intermedio constituido esencialmente por una mezcla de margas calizas y arcillosas en agua. La caliza es la materia prima calcárea formada principalmente por un elevado contenido de carbonato de calcio (CaCO_3), base fundamental de la mezcla de materias primas usadas para la producción de cemento; otro componente imprescindible es la arcilla o barro como comúnmente se le llama, la misma está formada por sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y hierro (Fe_2O_3), este último en muy poca proporción, por lo que se adiciona normalmente para completar la mezcla. La pulpa también presenta composiciones químicas de acuerdo con ciertas normas establecidas en la fábrica por el proceso, sobre la base de relaciones existentes entre sus componentes de óxidos.

La reología de las pulpas comprende muchos factores por ejemplo la separación por diferencia de densidades entre las partículas y el agua, la coagulación causada por la generación de productos de la fuerza de hidratación de las partículas, y las diferencias en las cargas superficiales debidas a las partículas constituidas por diversos minerales que causan con frecuencia la agregación de la partícula, generando un cambio perceptiblemente en función de tiempo que complican perceptiblemente una caracterización reológica completa.

3.3.1 Evaluación de la reología

Generalmente para la realización de una evaluación reológica lo primero que se debe hacer es una clasificación del material a analizar, es decir, ubicar el comportamiento del fluido de interés ubicando en uno de las categorías referenciadas en el capítulo 1 (ver Figura 1.1). Esta evaluación consiste en hacer una serie de experimentos en los cuales se somete la muestra a diferentes tasas de cizalladura y mediante un reómetro se obtienen los correspondientes valores de deformación logrados para cada una de las tasas de cizalladura aplicados. Mediante los datos obtenidos se construye el gráfico tensión de cizalla (shear stress τ) vs tasa de cizalladura (shear rate, deformación)

Figura 6. Tensión de cizalla contra la tasa de cizalladura para líquidos newtonianos y no-newtonianos.



1. Línea (1), Fluido Newtoniano.
2. Líquidos descritos por las líneas de (2) a (5) son los líquidos no newtonianos, el τ/D de la viscosidad no es constante.
3. La línea (2), líquido dilatante
4. La línea (3), líquido pseudoplástico.
5. La línea (4) y (4)', líquido plástico.
6. La línea (5), líquido tixotrópico.

Fuente: S. Hanehara , K. Yamada. Rheology and early age properties of cement systems, Science Direct , Cement and Concrete Research 21 (2008) 175–195

Mediante la figura 6, y comparando los comportamientos registrados en ella con el comportamiento de la figura obtenida mediante la experimentación se determina el tipo de fluido de la muestra.

Para entender mejor este procedimiento de evaluación se considera el concepto de reometría. La reometría es el conjunto de técnicas desarrolladas para llevar a cabo mediciones de parámetros reológicos entre los cuales están la determinación de las relaciones cuantitativas y cualitativas entre la deformación y la tensión mecánica y sus derivadas.

Para varios sectores industriales, las propiedades mecánicas de los líquidos y semisólidos son de gran interés. Un reómetro puede obtener propiedades de dichos compuestos, como:

- Medición de viscosidad
- Medición de visco-elasticidad
- Medición de elasticidad
- Medición de límite de fluidez

En el mercado se encuentran una gran gama de reómetros y viscosímetros, y para el caso específico de la evaluación de suspensiones existen con gran variedad de geometrías, funciones y posibilidades que se ajustan a las condiciones de determinado trabajo de investigación.

3.3.2 Determinación de la reología de una suspensión calcárea.

Para adquirir el comportamiento de la tensión de cizalla o corte en función de la tasa de cizalladura en una serie de tiempo, es imprescindible el uso de un viscosímetro giratorio. Sin embargo, debido a las diferencias entre los instrumentos y los términos de su gama de la medida o forma del rotor, han suscitado diferencias entre los investigadores en cuanto al máximo índice de cizalladura, generando una variación

considerable en cuanto a los resultados obtenidos, en otras palabras, existe la imposibilidad de realizar una comparación de datos válida. Además, en la presentación de resultados también existen diferencias en cuanto la curva de flujo, que se dibuja con frecuencia como curvas hacia arriba o hacia abajo, o a veces como una curva más complicada de histéresis.

Por lo tanto la fluidez para los materiales y las suspensiones calcáreas son evaluadas a menudo usando el flujo, el cociente del área del flujo, o el tiempo que tarda en pasar a través de un embudo, como los parámetros sustitutos para la tensión de producción o la viscosidad plástica.

Y. Yamada indica que existen dos puntos de vista sobre la reología y reología fenomenológica en la cual se hace el análisis del punto de vista de los fluidos mecánicos, y de la reología del material. Él utiliza una reología de cómputo (simulación en computador) para fusionar estos dos conceptos reológicos en un intento por fomentar la comprensión de la reología de las suspensiones calcáreas. Él utiliza una derivación de la ecuación de flujo basada en la teoría excesiva de la tensión y propone una ecuación constitutiva para el flujo extensivamente desarrollando el modelo de Bingham. Además, él indica que la relación entre la tensión de cizalla y el índice de cizalladura de la suspensión incluye fenómenos tales como ablandamiento, endurecimiento, e histéresis, que pueden ser simulados.

Alice Chougnnet, propone un acercamiento al comportamiento de las suspensiones calcáreas bajo condiciones de flujo de cizalladura. Este acercamiento se basa principalmente en las consideraciones siguientes: el tamaño de agregados bajo condiciones de flujo de cizalladura se obtiene mediante la aproximación una fracción de volumen eficaz considerado en lugar de la fracción de volumen real. Los agregados son caracterizados por un lazo de la ley de energía correspondiente al número de partículas por agregadas, N , con el radio de la partícula “ a ” y el radio agregado R .

$$N \propto \left(\frac{R}{a}\right)^f. \quad (3.1)$$

Una constante se puede introducir en el lado derecho de (3.1), dependiendo de la definición del longitud característica R , que puede ser el radio dinámico, el radio de la colisión, el radio del giro o el radio de la esfera circunscrita. Solamente las relaciones proporcionales son utilizadas, luego la constante no se tiene en cuenta.

Bajo condiciones de cizalladura, en un τ dado de la tensión de cizalladura, el estado estacionario cuando los agregados alcanzan su tamaño R . del equilibrio. El tamaño de estado estacionario se puede predecir entre la cohesión agregada y los flujos relacionados con las tensiones o la competición entre la agregación y la fragmentación dinámica correspondiente a la destrucción y formación de agregados de partículas. Dos modos de ruptura del agregado se consideran generalmente: erosión en la superficie y la fragmentación. Para la fragmentación del agregado, las cajas de agregados “rígidos” y “suaves” pueden ser distinguidas.

Los experimentos en los sistemas o los modelos del lowconcentration que se ocupan de los agregados aislados rinden una expresión del escalamiento de la forma:

$$\frac{R}{a} \propto \left(\frac{F_a/a^2}{\eta_0 \dot{\gamma}} \right)^m. \quad (3.2)$$

Donde la viscosidad dinámica del líquido (η_0), la tasa de cizalladura del ($\dot{\gamma}$) y la constante (m); define el F_a , la fuerza de adherencia, como la fuerza que se aplicará para separar las partículas una distancia infinita. Para las fracciones de volumen finitas, las tensiones soportadas por los agregados son iguales que las que las generadas por una serie continúa que tiene las características mecánicas de una suspensión a granel. Así, la viscosidad del líquido que suspende η_0 se puede substituir por la viscosidad del η de la suspensión. Se obtiene así:

$$\frac{R}{a} \propto \left(\frac{F_a/a^2}{\tau} \right)^m \quad (3.3), \text{ con } \tau = \eta \dot{\gamma} \quad (3.4)$$

Los agregados se suponen con un comportamiento similar al de unas esferas integradas por partículas en contacto que atrapan el líquido. Se introduce ϕ_{eff} , como una medida de la fracción de volumen eficaz, relacionado con el ϕ real de la fracción de volumen cerca:

$$\phi_{\text{eff}} \propto \phi \left(\frac{R}{a} \right)^{(3-f)}. \quad (3.5)$$

La anterior expresión es similar a la ley material elegida es una función de la viscosidad propuesta por Mills, se introduce en su ecuación el ϕ_{eff} que expresa el η_r relativo de la viscosidad en función de la fracción de volumen y del ϕ_{max} máximo de la capacidad empaquetamiento.

$$\eta_r = \frac{(1 - \phi_{\text{eff}})}{\left(1 - \frac{\phi_{\text{eff}}}{\phi_{\text{max}}}\right)^2} \quad (3.6)$$

Por otra parte, usando la Ec. (3.6), ϕ_{eff} puede determinarse mediante las viscosidades experimentales de la cizalladura obtenidas para las diferentes suspensiones analizadas. Para fracciones de volumen ϕ sólido y las tasas de cizalladura entre 1 s^{-1} y 2000 s^{-1} .

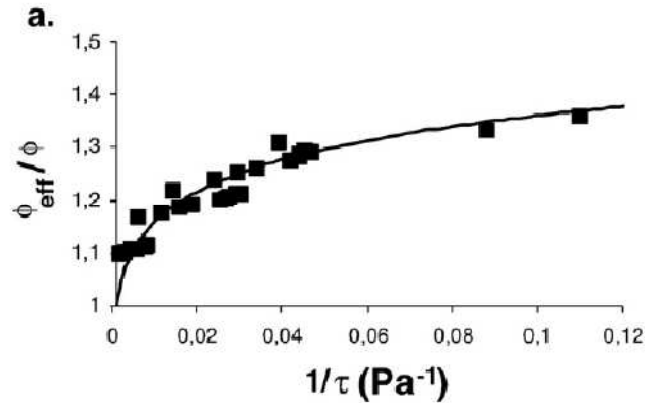
El cociente ϕ_{eff}/ϕ se representa en función de τ^{-1} (ver Figura 3.3) para las suspensiones calcáreas. Puede ser notado que ϕ_{eff}/ϕ varía como ley de energía del τ . Introduciendo los parámetros K y x , se tiene

$$\frac{\phi_{\text{eff}}}{\phi} = K \left(\frac{1}{\tau} \right)^x. \quad (3.7)$$

El exponente x corresponde a $m(3-f)$ es igual a 0.09 y para las suspensiones calcáreas. La constante K permite un orden de magnitud para $(F_a/a^2)^{m(3-f)}$.

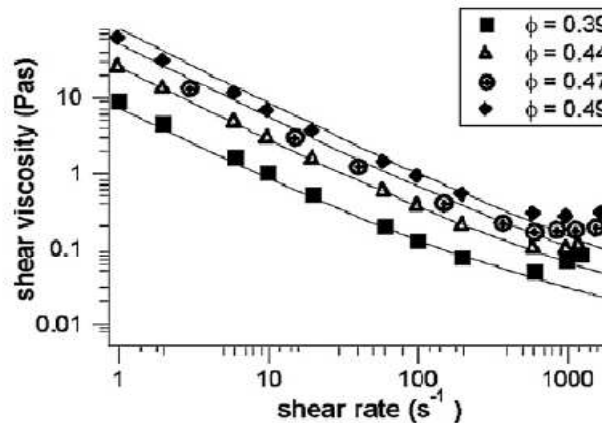
Se obtiene $K=1.7 \text{ (N/m}^2\text{)}^{m(3-f)}$ para las suspensiones calcáreas. Estos valores están muy cercanos a los reportados en las curvas de flujo obtenidas para las suspensiones.

Figura 7. Variaciones del cociente de ϕ_{eff}/ϕ en función de la tensión de cizalla (τ) para las suspensiones calcáreas. Las líneas completas son ajustes de la ley de energía.



Fuente: www.sciencedirect.com/science/journal/00088846.

Figura 8. Comparación entre el modelo (líneas completas) y el experimento para las suspensiones calcáreas.



Fuente: www.sciencedirect.com/science/journal/00088846.

3.4 Comportamiento reológico de una suspensión calcárea en un hidrociclón cilindrocónico

Para dimensionar el campo de investigación que sugiere el problema de la caracterización reológica de la pastas de cemento, se pone en consideración el caso del desempeño de un hidrociclón siendo un claro ejemplo que pone en manifiesto la necesidad en desarrollar este tipo de trabajos que permitan obtener mejores herramientas para el diseño y operación de los equipos de la planta de producción de cemento. Esta caracterización reológica de la pasta de cemento no solo trae beneficios a nivel técnico sino también a nivel económico mediante un uso adecuado de la energía (disminución en los costos de operación).

Los hidrociclones son uno de los tipos de aparatos multiusos para la separación de sistemas heterogéneos más comunes en productos químicos, microbiológicos, de alimentos, y otras industrias. El uso de hidrociclones tiene un rendimiento económico pronunciado debido al efecto de la intensificación de procesos tecnológicos. La

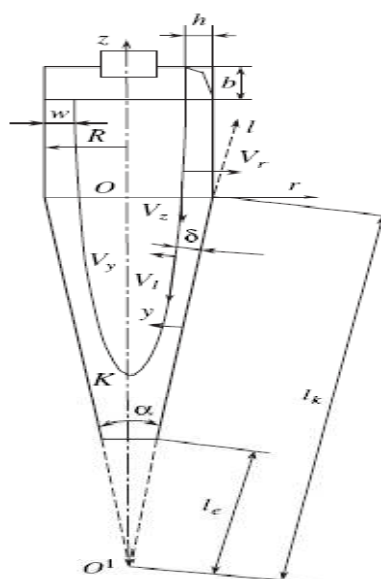
viabilidad económica y la eficacia de los procesos de la separación son determinadas por el grado de espesamiento de la fase dispersa y por su pérdida. En este contexto, optimizando los parámetros de diseño de los hidrociclones y con la determinación de los modos óptimos de operación, siendo estos los problemas importantes, que llevan, cuando está solucionado, a la intensificación y al desarrollo acelerado de numerosas ramas en la industria.

Un hidrociclón cilindrocónico consiste en una parte cilíndrica, en la cual una suspensión se alimenta tangencial, y una partición cónica. Después de incorporar la parte cilíndrica del hidrociclón, la suspensión remolina hacia debajo de la pared del hidrociclón bajo acción de la gravedad y de la presión (Figura 4.2) y su flujo es caracterizada por las velocidades axial, radial y circunferenciales V_z , V_r , y V_ϕ respectivamente. El flujo en la parte cónica del hidrociclón se considera en un sistema coordinado bicónico, en cuál es descrito este flujo por las velocidades meridionales, normales, y circunferenciales V_l , V_y , y V_ϕ , respectivamente.

Hasta ahora, no ha habido teoría rigurosa del movimiento de sistemas bifásicos en un flujo de vórtice que remolinaba. Basados la mayoría en estudios modernos de la ecuación de movimiento unidimensional de una pequeña partícula esférica suspendida en un flujo turbulento incompresible viscoso.

Los métodos para el cálculo de los parámetros fiables de la separación y el funcionamiento adecuado de las características del hidrociclones cilindro-cónicos fueron desarrollados en el marco de un acercamiento aleatorio unificado. Según lo observado por algunos autores, una descripción analítica exacta del movimiento de la partícula en un campo centrífugo, basado en las ecuaciones de la continuidad de Navier-Stokes del flujo, requieren que un número de asunciones no absolutamente correctas sean hechas, debido a la complejidad de la situación hidrodinámica en hidrociclones, la cual deteriora la suficiencia de las descripciones analíticas sugeridas del patrón hidrodinámico verdadero.

Figura 9. Diagrama esquemático del flujo en un hidrociclón cilindrocónico.



Fuente: V. O. Yablonskii and G. V. Ryabchuk. Flow of a Rheologically Complex Suspension in a Cyliandroconical Hydrocyclone, Theoretical Foundations of Chemical Engineering, Vol. 39, No. 4, 2005, pp. 333–339

Los aspectos fundamentales en el cálculo del transporte turbulento de la partícula en un hidrociclón, está basado en la ecuación de continuidad para el flujo de la fase sólida. Tal acercamiento permite calcular la cantidad de la fase sólida recuperada en un hidrociclón y sus parámetros (concentración, composición granulométrica) en cualquier momento del aparato. Un estudio numérico de la estructura del flujo y los procesos de la separación en un hidrociclón fueron realizados usando las ecuaciones de Navier-Stokes. La transferencia de ímpetu por la fase dispersa era descrita en términos de la teoría de serie continua con varias velocidades. Ahora, la ecuación del movimiento radial de las partículas en los hidrociclones de varios diseños se soluciona contando con la acción de las fuerzas de inercia y de Coriolis en una partícula. Esto se hizo posible calculando la distribución dimensional de las partículas en la fase dispersa y determinar su contenido en productos de separación.

La dificultad radica en solucionar las ecuaciones que caractericen la sedimentación de partículas sólidas en un hidrociclón y satisfacer el requisito de sistema cerrado además implementar la posibilidad de utilizar esas soluciones a las ecuaciones de la hidrodinámica para el hidrociclón, que relacione los componentes circunferenciales, radiales, y axiales de la velocidad fluida sobre el funcionamiento entero en el espacio del aparato. Además, las suspensión separada posee una viscosidad eficaz que disminuye cuando se aumenta la intensidad de las tazas de deformación, la cual afecta a la hidrodinámica del aparato.

La ecuación estado reológica de un líquido no newtoniano, la cual se escribe comúnmente bajo la forma de ley de energía de Ostwald-de Weyl, aplicable a los sistemas heterogéneos polifásicos.

La descripción del proceso de separación en un hidrociclón con deformación en la superficie de una fase fluida no-newtoniana no ha proporcionado una solución a las ecuaciones completas de la reodinámica, solamente considera el interés teórico y práctico dejando muchas incógnitas respecto al comportamiento reológico de la suspensión en el hidrociclón.

4. ESTADO DEL ARTE

La primera percepción que deja la revisión bibliográfica de los artículos de la comunidad científica en relación al tema de reología de suspensiones calcáreas, contiene un número considerable de artículos, que a primera vista dan la impresión de un adelanto importante en el conocimiento de este tipo de suspensiones enfocadas a la producción de cemento, sin embargo, un gran número de ellos manejan una perspectiva de introducción del tema enmarcado en la exposición de los diferentes factores que dan importancia en desarrollar un conocimiento profundo del comportamiento reológico de las suspensiones calcáreas, pero sin desarrollar aún aspectos teóricos que ayuden a entender la fenomenología de estas suspensiones.

Se puede encontrar una amplia gama de motivos expuestos en los artículos que hacen referencia a diferentes procesos que involucran el manejo de estas suspensiones, entre los cuales se encuentran los procesos de molienda, clasificación, manejo y caracterización de pastas (generalizado), determinación del efecto de las variables reológicas sobre el comportamiento reológico de las suspensiones, entre otras.

El desarrollo de fundamentos reológicos suscita un marcado interés en el proceso que involucra el ciclo de molienda, el cual comprende la molienda, clasificación y recirculación, debido a que este proceso implica en gran medida la relación entre esfuerzo y deformación (proceso de reducción de tamaño), en donde el esfuerzo involucra aspectos energéticos que traducidos en términos de operación del proceso connota factores económicos, dando un valor enorme a las investigaciones en procura de desarrollar unos conocimientos reológicos que impliquen una reducción en los costos de operación de la planta. Por otra parte, la deformación implica factores como la calidad, optimización y requerimientos del proceso, es decir, involucra aspectos tanto económicos como técnicos en donde esta implícitos los objetivos para el producto final.

Otro aspecto que es importante resaltar y que aún no se ha realizado, tal vez por que la investigación mencionada abarca este ítem, es el del transporte en los pastoductos en donde la reología juega un papel importante, y los fundamentos de micro-reología que dan una percepción del comportamiento de los sólidos en suspensión además de los diferentes efectos que causan variables como la distribución de partícula, forma de la partícula, fracción de sólidos en volumen, etc. Este comportamiento micro-estructural de las suspensiones calcáreas siempre va estar condicionado por las materias primas propias de la planta de producción, es decir del tipo de caliza y su composición mineral.

Shunsuke Hanehara y Kazuo Yamada en su artículo Rheology and early age properties of cement systems, marcan la importancia que tienen para las suspensiones calcáreas, factores como por ejemplo la separación por diferencia de densidad entre las partículas en suspensión, la agregación de partículas generados por las fuerza de hidratación de las partículas y las diferencias en las cargas superficiales de los diversos minerales que causan con frecuencia la precipitación de las partículas, y cambian perceptiblemente en función de tiempo complicando así la

caracterización reológica completa. Asegurando además, que hay muchas desventajas respecto a la dificultad en la interpretación del comportamiento fenomenológico en términos concretos de reología.

Los autores de este artículo, marcan la gran importancia que tiene proponer en una manera más cuantitativa los aspectos reológicos de las suspensiones calcáreas, lo cual contribuiría, según ellos, a asegurar la estabilidad de la calidad, racionalizar la producción, racionalizar y economizar el proceso, enmarcando el amplio campo que hay en cuanto a la investigación de las características respecto a la deformación y a la fluidez de las suspensiones calcáreas y del cemento en su estado fresco.

Un artículo, en el cual se puede observar una investigación más a fondo en cuanto a los fundamentos de reología de las suspensiones calcáreas, es el de Alice Chougnnet, Thierry Palermo, Annie Audibert, Michel Moan quienes en su artículo Rheological behaviour of cement and silica suspensions: Particle aggregation modelling, trabajan sobre el comportamiento reológico de las suspensiones calcáreas mediante el levantamiento de un modelo, suponiendo la agregación de las partículas. La metodología de trabajo para este artículo, usado por los autores es la siguiente, mediante dos parámetros independientes, la variación de la viscosidad en función de la cizalla y de la tasa de cizalladura, para suspensiones con diferentes fracciones en volumen de sólidos. Las suspensiones iniciales son muy similares a las suspensiones inertes sílice. Los valores de las fuerzas de adherencia obtenidas parecen demostrar que las áreas eficaces de la interacción son muy pequeñas. Refleja el hecho que en el período inactivo las partículas están entrando en contacto con los puntos, que llegan a ser progresivamente más altos en superficie como precipitados de C-S-H.

El modelo constituye una variación de la ley de energía de las tensiones de producción estáticas y dinámicas con la fracción de volumen de sólidos. Los agregados formados bajo cizalla parecen ser muy compactos y según los autores se intuye la probablemente relación entre las fracciones de volumen sólidas de las suspensiones estudiadas y la formación de agregados.

Los autores proponen el término ϕ_{eff} fracción de volumen eficaz o fracción de volumen agregada, que es un parámetro más relevante en suspensiones agregadas que el ϕ fracción de volumen. El ϕ_{eff} está ligado a una serie de implicaciones de tipo energético correspondiente a la energía del tamaño agregado, que se puede expresar en función de la fuerza de adherencia " F_a " y del " τ " de la tensión de cizalla. La determinación del índice de la energía y de la " F_a " permite la predicción del comportamiento reológico de las suspensiones calcáreas de cualquier fracción de volumen sólida.

Las curvas obtenidas mediante el modelo muestran una coherencia respecto a los datos experimentales manejados por ellos. Es de resaltar, que los agregados formados son muy compactos, y el posible origen de esta alta compacticidad puede ser las concentraciones sólidas grandes de las suspensiones estudiadas en el artículo (0.39 a 0.51).

Finalmente el modelo desarrollado por los autores para la viscosidad, es el siguiente:

$$\eta_r = \frac{(1-\phi_{\text{eff}})}{\left(1 - \frac{\phi_{\text{eff}}}{\phi_{\text{max}}}\right)^2} \quad (4.1)$$

Donde se ve claramente, la influencia que tiene la fracción máxima de empaquetamiento, y el término de ϕ_{eff} .

Con las herramientas teóricas que brindan la reología y los adelantos originados por las investigaciones científicas es de esperar que el manejo de estas suspensiones sea más eficaz desde todo punto de vista. Ahora, si bien se puede evidenciar la influencia tan significativa que tienen variables como la fracción de sólidos, quedan factores que aún no se ponen en consideración como lo son la composición mineral, la distribución de partículas (que influencia fuertemente la agregación de partículas o empaquetamiento), forma de la partícula, factores que determinan la dispersión termomecánica de la suspensión.

Por otra parte, existen numerosas investigaciones enfocadas al efecto en concreto que estas variables reológicas tienen sobre el comportamiento de este tipo de suspensiones en equipos del proceso, en particular, entre ellas encontramos trabajos acerca del desempeño de hidrociclones, efecto de la recirculación de finos al molino, todo lo anterior teniendo en cuenta los parámetros de reología concernientes al efecto termomecánico.

Entre estos trabajos, el desarrollado por V. O. Yablonskii and G. V. Ryabchuk, en su trabajo Flow of a Rheologically Complex Suspension in a Cylindroconical Hydrocyclone en el cual se ponen en consideración aspectos más complejos para una suspensión, como el hecho de trabajar el medio de dispersión como un fluido no-Newtoniano y con el objetivo de determinar y solucionar las ecuaciones reodinámicas que describen el flujo en un hidrociclón cilindrocónico. Inicialmente se calculan los campos de velocidad y de presión, y se describe el espesor de película de la suspensión en función de la coordenada meridional, adicionalmente se introduce el efecto de las características reológicas de la suspensión. Esta investigación básicamente tiene un desarrollo matemático de las ecuaciones de Navier-Stokes en términos de componentes del tensor, la ecuación de continuidad, las condiciones de límite en el enchufe más bajo del hidrociclón en el sistema coordinado bicónico, y las condiciones para el acoplador de los flujos e las partes del hidrociclón cilíndrico y cónico, además de la consideración de la ecuación reológica de estado.

El hidrociclón es quizás, el equipo más sensible a las variables reológicas de las suspensiones originado una eficiencia menor a la esperada o de diseño. La eficacia de separación de la suspensión en un hidrociclón es determinada por parámetros hidrodinámicos de una película preliminar remolinada de la suspensión que fluye abajo a lo largo de las paredes bajo acción de la fuerza de gravedad y la presión creada por las fuerzas centrífuga, factores como la formación de paquetes hacen que el equipo no actúe adecuadamente y recircule material adecuado.

Si bien, para la optimización de un hidrociclón la reología es una herramienta fundamental, se podría abrir aún más el panorama al poner en consideración

factores como la composición mineral de los sólidos en suspensión (polimineral), el ineludible efecto de la fracción en volumen de sólidos sumado a los aspectos hidrodinámicos de la suspensión (como el efecto de película en las paredes del hidrociclón), es por esta razón que el funcionamiento del hidrociclón debe estar condicionado a esta caracterización reológica, es más, posiblemente reevaluar los parámetros de diseño en consideración de lo anterior.

V. O. Yablonskii, en su artículo *Effect of Rheological Properties of the Dispersion Medium on Separation of Suspensions in Hydrocyclones with Various Working Space Configurations*, se suman a las variables mencionadas en el artículo anterior, poniendo en consideración el movimiento de un sistemas bifásicos en un flujo de vórtice que remolina. Basando su estudio en modelos de ecuaciones de movimiento unidimensional de una partícula esférica suspendida en un flujo turbulento incompresible viscoso. Para el cálculo de parámetros fiables de la separación y el funcionamiento adecuado de las características de los hidrociclones cilindro-cónicos fueron desarrollados en el marco de un acercamiento estocástico unificado.

Según lo observado por los autores, una descripción analítica exacta del movimiento de la partícula en un campo centrífugo, basado en las ecuaciones de la continuidad del flujo de Navier-Stokes, requieren hacer un número de asunciones no absolutamente correctas, debido a la complejidad de la situación hidrodinámica en hidrociclones, la cual deteriora la suficiencia de las descripciones analíticas sugeridas del patrón hidrodinámico verdadero.

El autor, además introduce el efecto que tiene el medio de dispersión no-Newtoniano observando que el grado de espesamiento de las partículas sólidas de la suspensión en un hidrociclón cilindrocónico crece con la anomalía de las características no-Newtonianas del medio de dispersión llegando a ser más pronunciado debido a la disminución de la velocidad radial a lo largo del eje del hidrociclón y al aumento en el coeficiente de la distribución radial, porque el índice de decaimiento disminuye, haciendo simultáneamente que la longitud de la parte cónica sea atravesada en menos tiempo, lo que hace más corto el tiempo de residencia de la suspensión en la zona de separación.

Finalmente, el artículo plantea un modelo matemático de la separación de suspensiones con un medio de dispersión no-Newtoniano en un hidrociclón cilindrocónico, construido dentro del estudio, permite calcular el grado de espesamiento de partículas sólidas en función de los números de semejanza y de las propiedades reológicas del entorno de dispersión, que puede ser utilizado como base para desarrollar un procedimiento para dirigir cálculos de los hidrociclones para la separación de medios reológicos complejos.

Otro factor importante a tener en cuenta en el circuito de molienda en la producción de cemento, es el efecto que tiene el porcentaje de finos presente en la suspensión, factor investigado por J. Yianatos, N. Bergh, R. Bucarey, J. Rodríguez, F. Díaz en el artículo *The effect of fines recycling on industrial grinding performance*, en el que los autores trabajan el efecto de los finos que se reciclaban de nuevo al molino en un circuito de molienda completo convencional.

Con este fin una fracción de (34-40) % de la corriente de la alimentación del hidrociclón fue vertida a la alimentación del molino, observando que el funcionamiento de la recirculación de finos permite el tamaño de molienda del producto (%+212 μm) disminuya en un 2-3% en la capacidad de alimentación (tph sólido). Este efecto representa un aumento de cerca de 1.0-1.5% en la recuperación total de la suspensión.

El trabajo propone una correlación derivada para describir el tamaño del producto pulido (% +212 μm) en términos de variables de funcionamiento principales tales como índice de trabajo en enlace, tonelaje de la alimentación, consumo de energía y carga de circulación en los molinos de bola. Los autores desarrollan un modelo para describir la operación sin el recirculación de los finos. Así, en comparación con de datos experimentales de los finos que se recirculan y sin la recirculación, lo cual demuestra una disminución de 2.5% de (% +212 μm), para la misma capacidad de la alimentación (tph). Además el tiempo de residencia eficaz de la pulpa en molinos de bola fue evaluado por 1.8 minutos, así, el volumen eficaz de mezcla dentro de los molinos de bola era estimado y era igual a 32.7% al estimado en el diseño.

Es también importante observar que el usar la partícula fina en al recirculación al molino requerirá un buen sistema de control debido que el llevar cada vez mayor cantidad de finos disminuye la capacidad de recuperación total.

Todos los artículos estudiados presentan en su desarrollo la marcada importancia que las propiedades reológicas tienen en el proceso de producción de cemento, la complejidad, y hacen mención de las variables para la caracterización de esta suspensión. Ahora, con un panorama mas amplio del proceso se extiende un abanico de posibilidades investigativas de todos lo fenómenos, demandado la interdisciplinariedad en búsqueda de una optimización del circuito de molienda (proceso más sensible a las propiedades reológicas) que se traduce en beneficios económicos, uso racional de energía y operacionales.

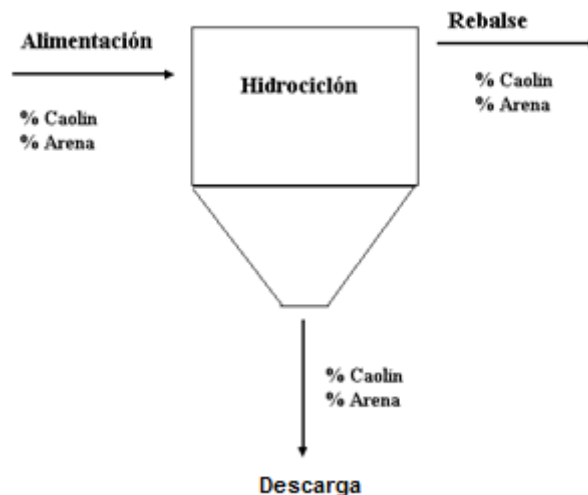
5. TRABAJO EXPERIMENTAL

La viscosidad de una suspensión mineral depende en gran medida de las características de los sólidos en suspensión, tanto la forma de las partículas (ψ) como la distribución granulométrica del sistema particulado $F(x)$ presentan una marcada influencia sobre la viscosidad de la suspensión para determinadas fracciones volumétricas de sólidos (ϕ). Estos factores se convierten aun más determinantes cuando se trata de una suspensión compuesta por dos o más tipos de minerales, debido a que las interacciones entre las partículas conllevan a fenómenos más complejos que las contempladas para suspensiones monominerales.

El trabajo experimental concerniente a este estudio, consiste en el análisis de diferentes fracciones volumétricas de sólidos (ϕ) de una suspensión polimineral compuesta por caolín y arena que pasa por un circuito de molienda de una planta de producción de cemento, enfocado a determinar una posible hipótesis acerca de una variación en el porcentaje de caolín y arena que componen la suspensión en las corrientes de alimentación, rebalse y descarga del hidrociclón de dicho circuito. (Ver Figura 10)

Las causas fenomenológicas de estas variaciones no están descritas específicamente y solo son controladas por la manipulación de las corrientes, haciendo un ajuste manual de ellas.

Figura 10. Corrientes del hidrociclón del circuito de molienda.



Fuente: Esta investigación

El procedimiento que se llevó a cabo consta de la evaluación de 20 muestras, que corresponden a las corrientes de alimentación, rebalse y descarga para diferentes fracciones volumétricas de sólidos (ϕ) (ver Tabla ¿?). Las muestras seleccionadas pertenecen a la planta de Argos y hacen parte de un muestreo de cerca de 100 mediciones tomadas en intervalos de una hora, tomando 4 muestras por cada valor de fracción volumétrica en dicho intervalo de tiempo.

La composición química de la suspensión polimineral contiene básicamente SiO₂ (Silicio) y (Si₄O₁₀)Al₄(OH)₈ (Aluminosilicatos), correspondientes a la Arena y Caolín respectivamente. La molécula de agua (H₂O) que forma parte de los aluminosilicatos teóricamente hace referencia al PPI (Pérdidas Por Ignición) (ver tabla 5.1) y al obtener este dato nos permite determinar el porcentaje de Caolín y a su vez el porcentaje de Arena que contiene cada una de las muestras en estudio.

Tabla 3. Porcentajes de los Aluminosilicatos

(Si₄O₁₀)Al₄(OH)₈	
ÓXIDO	%
Al ₂ O ₃	39.50
SiO ₂	46.50
PPI	14.00

De acuerdo a lo anterior, las muestras tuvieron que ser acondicionadas para desarrollar de manera correcta la obtención del PPI, por lo tanto se eliminó el agua (H₂O) inicialmente por decantación, lo cual se pudo desarrollar por el largo período de reposo que tenían, posteriormente se procedió a retirar el resto del agua por evaporación en la estufa a una temperatura de 90° por un lapso de 48 hora mínimo. Luego se pesó aproximadamente 10 gramos de cada muestra y se calculó el PPI que se llevo a cabo a una temperatura de 1000°C.

Los datos obtenidos del análisis por PPI se muestran en la tabla 5.2 junto con sus respectivas viscosidades.

Tabla 4. Datos obtenidos de PPI y Viscosidad

Composición de la muestra (%caolín/%arena)	Corriente	Muestra	Viscosidad de la suspensión (Pa.s)	%PPI
90/10	Alimentación	154	0,008917	5,66
	Descarga	155	0,006689	2,45
	Rebalse	156	0,009783	8,69
90/10	Alimentación	157	0,01265	5,24
	Descarga	158	0,01116	1,50
	Rebalse	159	0,01285	8,45
100/0	Alimentación	163	0,008075	7,53
	Descarga	164	0,01354	5,07
	Rebalse	165	0,01259	9,50
0/100	Alimentación	172	0,01002	0,22
	Descarga	173	0,04034	0,09
	Rebalse	174	0,1128	0,32
60/40	Alimentación	178	0,01177	3,78
	Descarga	181	0,03584	1,14
	Rebalse	182	0,01163	5,20
60/40	Alimentación	178	0,01177	3,78
	Descarga	189	0,03398	1,00
	Rebalse	190	0,01339	5,20

60/40	Alimentación	206	0,007114	3,36
	Descarga	207	0,02073	0,93
	Rebalse	208	0,008952	4,88

Fuente: Esta investigación

5.1 Modelo de Cálculo

(%Caolín/%Arena= 90/10)

Muestra 154 (Alimentación)

$$5,66\% PPI(H_2O) * \frac{100\% Caolín}{14\% H_2O} = 40,43\% Caolín$$

$$100\% - 40,43\% Caolín = 59,57\% Arena$$

La muestra 154 contiene 40,43 % de Caolín y 59,57 % de Arena.

Muestra 155 (Descarga)

$$2,45\% PPI(H_2O) * \frac{100\% Caolín}{14\% H_2O} = 17,50\% Caolín$$

$$100\% - 17,50\% Caolín = 82,50\% Arena$$

La muestra 155 contiene 17,50 % de Caolín y 82,50 % de Arena.

Muestra 156 (Rebalse)

$$8,69\% PPI(H_2O) * \frac{100\% Caolín}{14\% H_2O} = 62,07\% Caolín$$

$$100\% - 62,07\% Caolín = 37,93\% Arena$$

La muestra 156 contiene 17.5 % de Caolín y 82.5 % de Arena.

Los porcentajes de Caolín y Arena para cada una de las muestras se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Porcentajes de Caolín y Arena para cada corriente del Hidrociclón.

Composición de la muestra (%caolín/%arena)	Corriente	Muestra	% Caolín	%Arena
90/10	Alimentación	154	40,43	59,57
	Descarga	155	17,50	82,50
	Rebalse	156	62,07	37,93
90/10	Alimentación	157	37,43	62,57
	Descarga	158	10,71	89,29
	Rebalse	159	60,36	39,64
100/0	Alimentación	163	53,79	46,21
	Descarga	164	36,21	63,79
	Rebalse	165	67,86	32,14

0/100	Alimentación	172	1,57	98,43
	Descarga	173	0,64	99,36
	Rebalse	174	2,29	97,71
60/40	Alimentación	178	27,00	73,00
	Descarga	181	8,14	91,86
	Rebalse	182	37,14	62,86
60/40	Alimentación	178	27,00	73,00
	Descarga	189	7,14	92,86
	Rebalse	190	37,14	62,86
60/40	Alimentación	206	24,00	76,00
	Descarga	207	6,64	93,36
	Rebalse	208	34,86	65,14

Fuente: Esta investigación

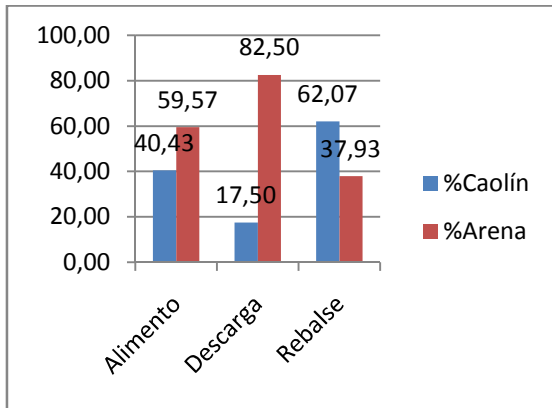
5.2 Análisis de Resultados

De acuerdo a las gráficas presentadas, se observa una clara diferencia entre el porcentaje de caolín y de arena en las corrientes del hidrociclón para cada una de las composiciones del muestreo. Es decir, existe una variación de estos componentes en dichas corrientes.

La composición de arena y caolín de las corrientes de alimentación obtenidas en el desarrollo del trabajo experimental difieren de los valores registrados por la planta de producción de Argos, por ejemplo, en la figura 11, para una composición de 90/10 la corriente de alimentación presenta 40,43% de caolín y 59,57% de arena. La única composición que concuerda con los porcentajes de la corriente de alimentación es la registrada en la figura 14, correspondiente a 0/100.

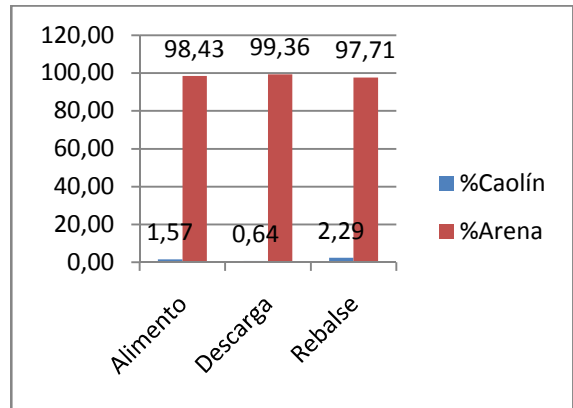
Estas variaciones de las composiciones en las corrientes del hidrociclón indican que existe un fenómeno reológico que influye en dicho comportamiento. Desafortunadamente, los esfuerzos por encontrar las causas fenomenológicas que ayuden a comprender y posteriormente controlar esta variación no han sido suficientes, por tal razón, a nivel industrial se sigue controlando este comportamiento manipulando la concentración de las corrientes.

Figura 11. Porcentaje de Caolín y Arena para las muestras 154,155,156



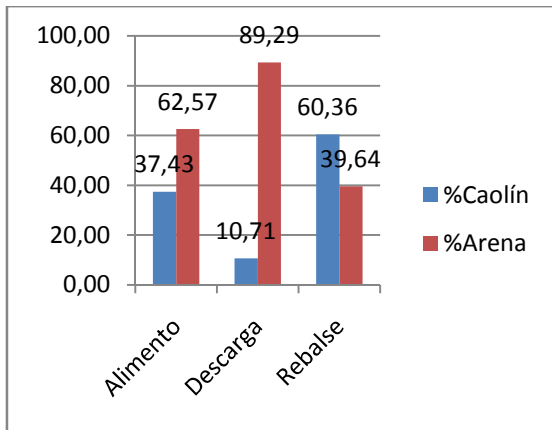
Fuente: Esta investigación

Figura 14. Porcentaje de Caolín Arena para las muestras 173,174,175



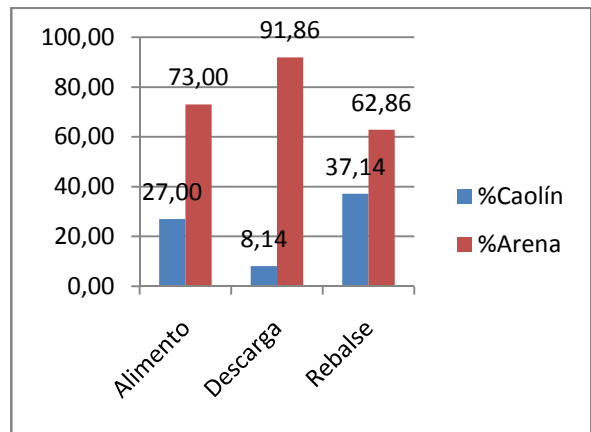
Fuente: Esta investigación

Figura 12. Porcentaje de Caolín Arena para las muestras 157,158,159



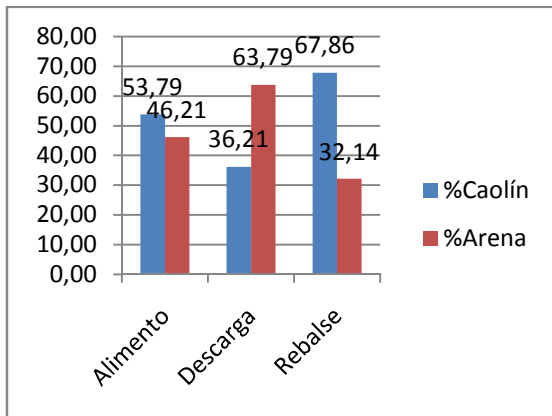
Fuente: Esta investigación

Figura 15. Porcentaje de Caolín Arena para las muestras 178,181,182



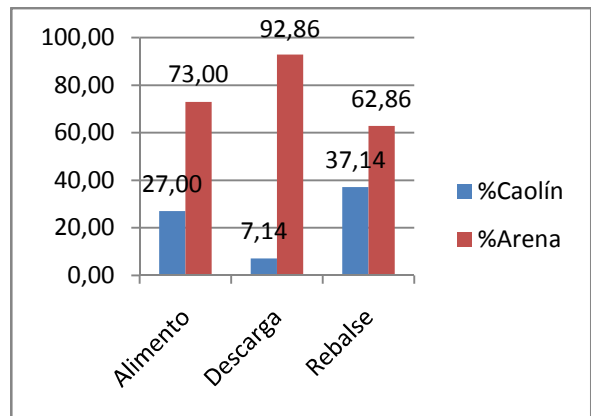
Fuente: Esta investigación

Figura 13. Porcentaje de Caolín Arena para las muestras 163,164,165



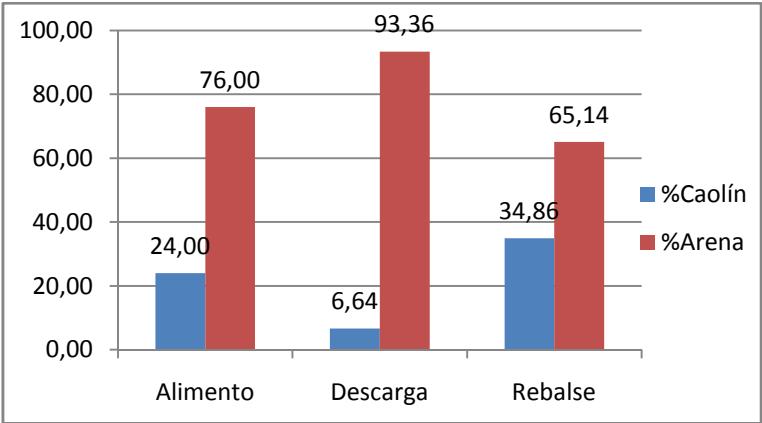
Fuente: Esta investigación

Figura 16. Porcentaje de Caolín Arena para las muestras 178,189,190



Fuente: Esta investigación

Figura 17. Porcentaje de Caolín Arena para las muestras 207,208,209



Fuente: Esta investigación

6. CONCLUSIONES

- Para la producción de cemento, la relación entre esfuerzo y deformación esta involucrada en la mayoría de procesos de la planta, dando a la reología un amplio campo en la industria cementera.
- La reología de suspensiones está evolucionando en gran medida por la conciencia suscitada por las diferentes industrias debido a la necesidad de una correcta caracterización de ellas. Esta situación no es ajena a las suspensiones presentes en la producción de cemento, donde no se tiene un conocimiento claro de su comportamiento.
- El carácter polimineral de las suspensiones calcáreas originan que factores debidos a la composición mineral de la materia prima influyan sobre el comportamiento reológico de la suspensión.
- La fracción volumétrica de sólidos esta fuertemente afectada por la distribución de tamaño de partícula y su forma, originando una forma de empaquetamiento en particular. Un aumento en el porcentaje de finos mejora la formación de los paquetes lo cual disminuye la viscosidad de la suspensión, pero este efecto se evidencia hasta un cierto valor para el cual un aumento en este porcentaje aumenta significativamente la viscosidad.
- Una adecuada caracterización reológica de una suspensión calcárea puede en gran medida aumentar la eficiencia en un circuito de molienda, mitigando los efectos de la recirculación de finos (tamaño de partícula de rebalse que erróneamente sale por la corriente de descarga) al molino.
- En las corrientes del hidrociclón analizadas en el trabajo experimental, es claro que existen zonas de enriquecimiento o empobrecimiento de caolín que se evidencian en la variación de concentración para las diferentes corrientes. Las razones fenomenológicas no se han determinado aún, por tanto, estas variaciones son controladas por la manipulación de las concentraciones de las corrientes mencionadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Eveson G. F. The viscosity of stable suspensions of spheres at low rates of shear, chapter 4 , Rheology of disperse systems (C.C. Mills, editor), Pergamon Press, pp.61-83, 1959.
2. Krieger I. M., Dougherty T. J. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Trans. Soc. of Rheology*; III, 137-152, 1959.4, 306-347, 1962.
3. Fredrickson A. G., Principles and Applications of Rheology. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., USA 1964.
4. C. Parkinson, S. Matsumoto & P. Sherman (1970). The influence of particle-size distribution on the apparent viscosity of non-newtonian dispersed systems, *J. of Colloid and Interface Science*, 33 (1): 150-160.
5. V. V. Jinescu (1974), The rheology of suspension, *Int. Chem Eng*, 14 (3): 397-420.
6. G. Bossis & J. F. Brady (1984). Dynamic simulation of sheared suspensions. I. General method. *J. Chem. Phys.*, 80:5141-5154.
7. D. Quemada (1985). Phenomenological rheology of concentrated dispersions, I. Clustering effects and the structure-dependent packing fraction, *J. of Theoretical and Applied. Mechanics*, 267-288.
8. G. Bossis & J. F. Brady (1987). Self-diffusion of Brownian particles in concentrated suspensions under shear, *J. Chem. Phys.* 87 (9): 5437-5448.
9. T. Dabak & O. Yucel (1987). Modeling of concentration and particle size distribution effects on the rheology of highly concentrated suspensions. *Powder Technology*: 52: 193-206.
10. H. A. Barnes, J. F. Hutton & K. Walters, An introduction to rheology. Elsevier, Amsterdam, 1989.
11. C. Tangsathitkuchai & L. G. Austin (1989), Slurry density effects on ball milling in a laboratory ball mill, *Powder Technology* 59: 285-293.
12. P. F. Luckham M.A. Ansarifard, B. A. de L. Costello & Th. F. Tadros (1991), The relationship between interparticle forces and the bulk rheology of the suspensions, *Powder Technology* 65: 371 - 379.
13. C. W. Macosko (1994). Rheology principles, measurements, and applications, VCH-Publishers, Inc, New York, USA.
14. C. Logos & Q. D. Nguyen (1996). Effect of particle size on the flow properties of a south Australian cola-water slurry, *Powder Technology*, 88:55-58.

- 15.M: O. Bustamante & A. Barrientos (2000) Modelo de viscosidad de suspensiones bajo una aproximación termomecánica. VI Encuentro Argentino de Tratamiento de Minerales, Salta- Argentina.
- 16.M. O.Bustamante & A. Barrientos (2001) Mineral suspension viscosity a high shear rate. VI Southern Hemisphere Meeting on Mineral Technology. Río de Janeiro, 2000.
- 17.Chougnet, Alice y otros. Rheological behaviour of cement and silica suspensions: Particle aggregation modeling, Science Direct Revizar (online) sciencedirect.com/science/journal/00088846.
- 18.V. O. Yablonskii. Effect of Rheological Properties of the Dispersion Medium on Separation of Suspensions in Hydrocyclones with Various Working Space Configurations, Russian Journal of Applied Chemistry, Vol. 78, No. 8, 2005, pp. 1294-1300. Translated from Zhurnal Prikladnoi Khimii, Vol. 78, No. 8, 2005, pp. 1317-1323.
- 19.V. O. Yablonskii and G. V. Ryabchuk. Flow of a Rheologically Complex Suspension in a Cylindroconical Hydrocyclone, Theoretical Foundations of Chemical Engineering, Vol. 39, No. 4, 2005, pp. 333–339. Translated from Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii, Vol. 39, No. 4, 2005, pp. 355–361.
- 20.S. Hanehara , K. Yamada. Rheology and early age properties of cement systems, Science Direct , Cement and Concrete Research 21 (2008) 175–195
- 21.M. Hea, Y. Wanga, E. Forssberga. Slurry rheology in wet ultrafine grinding of industrial minerals: a review, Science Direct, Powder Technology 147 (2004) 94–112.
- 22.J. Yianatos, N. Bergh, y otros. The effect of fines recycling on industrial grinding performance, Science Direct, Minerals Engineering 18 (2005) 1110–1115