

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**Profesor patrocinante**

Dr. Fernando Betancourt

**Ingeniero Supervisor**

Cristian Soto P.

# “ESTUDIO DE ARRASTRE MECÁNICO EN FLOTACIÓN UTILIZANDO FLUIDOS NO- NEWTONIANOS”

**IGNACIO ANDRES BLANCO MILLACURA**

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Marzo 2024

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi padre y a mi madre que estuvieron en todo momento y brindaron todo el apoyo necesario para que me mantuviera a flote en los momentos más agotadores y difíciles.

A mis amigos de toda la vida que fueron un pilar fundamental para cumplir las metas y objetivos en todo el periodo universitario.

A mis compañeros de carrera, en especial al grupo “Champagne”, grupo con el que compartimos material, conocimiento, estudios, risas, esfuerzo y fútbol.

A todos los profesores del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción que aportaron su conocimiento para mi formación profesional. Recalcar al profesor Fernando Betancourt quien confió en mí para esta memoria y a Cristian Soto, ingeniero supervisor, quien dio un soporte clave para el desarrollo del trabajo de laboratorio.

Al proyecto ACT210030 por el financiamiento de la memoria.

## RESUMEN

El presente documento presenta los resultados de la evaluación del arrastre mecánico de partículas de cuarzo de distintos tamaños expuestas a distintos pH en fluidos no newtonianos y luego comparar los resultados al fluido newtoniano convencional utilizado en flotación. Además de las pruebas de flotabilidad, se estudió la incidencia de estos medios en la cinética de adhesión burbuja-partícula y la hidrofobicidad del material con el medio utilizado. Para la obtención de los fluidos mencionados se prepararon soluciones con CMC y Goma Guar, ambas a 50 ppm para asemejar fluidos regidos por la ley de potencia y Bingham respectivamente.

Las pruebas de flotabilidad indican que, a menor tamaño de partícula, se obtiene una mayor recuperación. Lo anterior se debe a que las partículas más pequeñas se exponen en mayor medida a permanecer suspendidas en el interior de la celda por lo que son más susceptibles a ascender producto del movimiento ascendente del fluido y así llegar a la zona de limpieza en mayor cantidad que las partículas de mayor tamaño, ya que al ser más grande adquieren un mayor peso, y una mayor fuerza de arrastre debido a su mayor área superficial por lo que tienden a quedarse en el fondo de la celda. En lo que respecta al aumento de la viscosidad, en promedio las recuperaciones aumentaron entre un 2 y 3% al aumentar la viscosidad en un 5%. Esto se debe a que las partículas tienen una mayor facilidad de seguir el movimiento del fluido a pesar de que la fuerza de arrastre también lo hizo. Haciendo el balance de fuerzas, sin un cambio en la reología, la fuerza de arrastre aumenta considerablemente al aumentar el tamaño de partícula y sumándola con la fuerza peso, provoca que la fuerza de empuje no sea lo suficiente para permitir su ascenso. Al aumentar la viscosidad, la fuerza de arrastre también aumenta, no obstante, haciendo el mismo balance, podemos ver que la fuerza de arrastre y peso se ven opacadas por el empuje y el movimiento ascendente de un fluido mayormente viscoso.

Se comprueba que el arrastre en las pruebas realizadas es netamente mecánico y no químico, ya que las pruebas de hidrofobicidad no mostraron mayores diferencias, llegando a valores máximos de diferencia de 7° entre fluido newtoniano y Bingham a valor de pH 11. Las pruebas de cinética mostraron que el tiempo de inducción se ve afectado mayormente por el tamaño de partícula y no por la reología.

## ABSTRACT

The present work consisted to evaluating the behavior of the mechanical entrainment of quartz particles of different sizes exposed to various pH levels in non-Newtonian fluids and then compare the results to the conventional Newtonian fluid used in flotation. In addition to flotation tests, the impact of these media on bubble-particle adhesion kinetics and material hydrophobicity with the medium used was investigated. To obtain the mentioned fluids, solutions with CMC and guar gum were prepared, both at 50 g/t, to simulate fluids governed by the power-law and Bingham flow behavior, respectively.

Flotation tests indicate that, with smaller particle sizes, higher recovery is achieved. This is attributed to the increased exposure of smaller particles, making them more likely to remain suspended within the cell and ascend due to the upward movement of the fluid, reaching the cleaning zone in greater quantities than larger particles. Larger particles, owing to their increased weight and higher drag force resulting from their larger surface area, tend to settle at the bottom of the cell. Regarding viscosity increase, recoveries, on average, increased by 2 to 3% with a 5% viscosity increment. This is because particles exhibit greater ease in following fluid movement, despite the concurrent increase in drag force. Force balance analysis, without a change in rheology, reveals a considerable increase in drag force with larger particle sizes. When added to the weight force, this prevents sufficient buoyancy for particle ascent. Increasing viscosity also augments drag force; however, the same balance demonstrates that drag and weight forces are overshadowed by buoyancy and the upward movement of a predominantly viscous fluid.

It is confirmed that drag in the conducted tests is purely mechanical and not chemical, as hydrophobicity tests show minimal differences, reaching maximum divergence of 7° between Newtonian and Bingham fluids at a pH value of 11. Kinetic tests demonstrate that induction time is primarily affected by particle size rather than rheology.

# Índice

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivo general.....	1
1.2	Objetivos específicos.....	1
2	Antecedentes teóricos.....	3
2.1	Flotación espumante.....	3
2.2	Flotación columnar.....	4
2.3	Transporte mecánico de minerales de ganga.....	6
2.4	Mecanismos de arrastre.....	6
2.4.1	Teoría de capa límite y estela de burbujas.....	7
2.4.2	Teoría enjambre de burbujas.....	8
2.5	Fluidos no newtonianos.....	9
2.6	Fuerza de arrastre.....	11
2.7	Tiempo de inducción.....	12
2.8	Ángulo de contacto.....	13
2.9	ESTADO DEL ARTE.....	14
2.9.1	Agua recuperada.....	14
2.9.2	Tamaño de partícula.....	15
2.9.3	Intensidad de agitación.....	16
2.9.4	Velocidad volumétrica de gas.....	17
2.9.5	Reología.....	18
2.9.6	Tiempo de retención espuma.....	19
2.9.7	Estructura de la espuma.....	19
2.9.8	Altura de la espuma.....	20
2.9.9	Estudios de tiempo de inducción a sistemas de cuarzo.....	20
3	Desarrollo experimental.....	23
3.1	Muestras y reactivos.....	23
3.2	Equipos y procedimientos.....	23
3.2.1	Pruebas de reología.....	23
3.2.2	Pruebas de microflotación.....	25
3.2.3	Pruebas de tiempo de inducción.....	27
3.2.4	Ángulo de contacto.....	30

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	32
4.1 Comprobación efecto modificadores .....	32
4.2 Efecto tamaño de partícula y pH en pruebas de microflotación .....	33
4.3 Efecto reología en pruebas de microflotación .....	37
4.4 Resultados tiempo de inducción .....	39
4.4.1 Efecto tamaño de partícula y pH .....	39
4.4.2 Efecto reología en el tiempo de inducción .....	42
4.5 Resultados ángulo de contacto .....	45
4.6 Discusiones generales .....	48
5 CONCLUSIÓN .....	50
6 REFERENCIAS .....	52
7 ANEXOS .....	56
7.1 Código tiempo de inducción .....	56
7.2 Número de adhesiones en pruebas de tiempo de inducción .....	56

## Índice de figuras

Figura 1. Representación del proceso de flotación (Wills & Finch, 2016). .....	4
Figura 2. Diagrama esquemático de una flotación columnar (Pal & Masliyah, 1989). .....	5
Figura 3. Figura representativa de la teoría de capa límite y estela de burbujas (Wang, 2017). .....	7
Figura 4. Representación esquemática de la teoría de enjambre de burbujas (Wang, 2017). .....	8
Figura 5. Representación esquemática de los Bordes de Plateau (Wang, 2017). .....	9
Figura 6. Tipos de fluidos no-newtonianos independientes del tiempo (Richardson, 2008). .....	10
Figura 7. Correlacion número de Reynolds y coeficiente de arrastre (Chhabra & Richardson, 2008). .....	11
Figura 8. Esquema de medición del tiempo de inducción (Gu et al., 2003). .....	13
Figura 9. Esquema medición ángulo de contacto (Chau et al., 2009). .....	13
Figura 10. Relación entre agua recuperada y grado del concentrado (Yianatos & Contreras, 2010a). .....	15
Figura 11. Recuperación de siderita en función del tamaño de partículas (Trahar, 1981). .....	15
Figura 12. Relación entre el agua recuperada en función de la velocidad del impulsor (Wang, Runge, et al., 2016). .....	17
Figura 13. Grado de arrastre en función del caudal de aire para distintos tamaños de espuma (Zheng et al., 2006). .....	18
Figura 14. Grado de arrastre en función de la altura de la espuma para diferentes tamaños de partículas (Zheng et al., 2006). .....	20
Figura 15. Efecto del tamaño de partícula en el tiempo de inducción presente en partículas de cuarzo (Yoon & Yordan, 1991). .....	21
Figura 16. Efecto del pH en el tiempo de inducción presente en partículas de cuarzo (Yoon & Yordan, 1991). .....	22
Figura 17. Equipo de pruebas reológicas. ....	24
Figura 18. Diagrama P&ID set up pruebas de microflotación (Fuente: elaboración propia). .....	25
Figura 19. Diagrama P&ID set up tiempo de inducción (Fuente: elaboración propia). .....	27
Figura 20. Software ADVANCE. ....	30
Figura 21. Reograma fluidos no newtonianos, .....	32

Figura 22. Gráfico velocidad cizalle versus viscosidad fluidos no newtonianos.....	33
Figura 23. Ph versus recuperación en peso de cuarzo a distintas mallas en fluido newtoniano. ....	34
Figura 24. Ph versus recuperación en peso de cuarzo a distintas mallas en fluido no-newtoniano con modificador CMC. ....	34
Figura 25. Ph versus recuperación en peso de cuarzo a distintas mallas en fluido no-newtoniano con modificador Goma Guar. ....	35
Figura 26. Comparación arrastre mecánico #140 en distintos medios. ....	38
Figura 27. Comparación arrastre mecánico #230 en distintos medios. ....	38
Figura 28. Comparación arrastre mecánico #270 en distintos medios. ....	39
Figura 29. Efecto tamaño de partícula en el tiempo de inducción presenta en fluido newtoniano. ....	40
Figura 30. Efecto tamaño de partícula en el tiempo de inducción presenta en fluido ley de potencia. ....	40
Figura 31. Efecto tamaño de partícula en el tiempo de inducción presenta en fluido Bingham. ....	41
Figura 32. Efecto reología en el tiempo de inducción para malla 140. ....	43
Figura 33. Efecto reología en el tiempo de inducción para malla 230. ....	44
Figura 34. Efecto reología en el tiempo de inducción para malla 270. ....	44
Figura 35. Comparación curvas tiempo de inducción.....	45
Figura 36. Comparación gotas una vez alcanzado el equilibrio sobre la superficie de cuarzo.....	45
Figura 37. Comparación ángulos de contacto. ....	46

## Índice de tablas

Tabla 1. Condiciones operaciones flotación .....	26
Tabla 2. Registro de adhesiones en barrido de tiempo de contacto. ....	29
Tabla 3. Número total de adhesiones.....	29
Tabla 4 Ejemplo medición ángulo de contacto. ....	31
Tabla 5. Modelo fluidos .....	33
Tabla 6. Resultados ángulos de contacto.....	47
Tabla 7. Número de adhesiones para #140 en fluido newtoniano a pH 7.....	56
Tabla 8. Número de adhesiones para #140 en fluido newtoniano a pH 9.....	57
Tabla 9. Número de adhesiones para #140 en fluido newtoniano a pH 11. ....	57
Tabla 10. Número de adhesiones para #230 en fluido newtoniano a pH 7.....	58
Tabla 11. Número de adhesiones para #230 en fluido newtoniano a pH 9. ....	58
Tabla 12. Número de adhesiones para #230 en fluido newtoniano a pH 11. ....	59
Tabla 13. Número de adhesiones para #270 en fluido newtoniano a pH 7.....	59
Tabla 14. Número de adhesiones para #270 en fluido newtoniano a pH 9.....	59
Tabla 15. Número de adhesiones para #270 en fluido newtoniano a pH 11. ....	60
Tabla 16. Número de adhesiones para #140 en fluido Bingham a pH 7. ....	60
Tabla 17. Número de adhesiones para #140 en fluido Bingham a pH 9. ....	61
Tabla 18. Número de adhesiones para #140 en fluido Bingham a pH 11. ....	61
Tabla 19. Número de adhesiones para #230 en fluido Bingham a pH 7.....	62
Tabla 20. Número de adhesiones para #230 en fluido Bingham a pH 9. ....	62
Tabla 21. Número de adhesiones para #230 en fluido Bingham a pH 11. ....	62
Tabla 22. Número de adhesiones para #270 en fluido Bingham a pH 7. ....	63
Tabla 23. Número de adhesiones para #270 en fluido Bingham a pH 9. ....	63
Tabla 24. Número de adhesiones para #270 en fluido Bingham a pH 11. ....	64
Tabla 25. Número de adhesiones para #140 en fluido Potencia a pH 7. ....	64
Tabla 26. Número de adhesiones para #140 en fluido en Potencia a pH 9. ....	65
Tabla 27. Número de adhesiones para #140 en fluido en Potencia a pH 11.....	65
Tabla 28. Número de adhesiones para #230 en fluido en Potencia a pH 7. ....	66
Tabla 29 Número de adhesiones para #230 en fluido en Potencia a pH 9. ....	66
Tabla 30. Número de adhesiones para #230 en fluido en Potencia a pH 11.....	66
Tabla 31. Número de adhesiones para #270 en fluido en Potencia a pH 7. ....	67
Tabla 32. Número de adhesiones para #270 en fluido en Potencia a pH 9. ....	67

Tabla 33. Número de adhesiones para #270 en fluido en Potencia a pH 11..... 68

# 1 Introducción

Para la separación de minerales, el método físico-químico mayormente utilizado es la flotación por espumante, el cual permite por medio de la hidrofobicidad captar selectivamente las partículas objetivo y desligar la mayor cantidad de ganga, la cual se caracteriza por carecer de valor económico para el enfoque minero del proceso en cuestión, originándose así, los concentrados y las colas.

Se busca que los concentrados sean de una gran calidad, es decir, que tengan la menor cantidad posible de ganga. Uno de los factores que tiene mayor relevancia en la disminución de calidad de los concentrados es el arrastre mecánico, el cual contribuye en gran medida a la incorporación de partículas no valiosas, las cuales en su gran mayoría son de carácter finas y ultrafinas. Debido al pequeño tamaño de estas partículas, estas suelen ser afectadas por diversos y amplios factores que han sido estudiados previamente.

Este trabajo se enfoca en investigar cómo un cambio en la reología puede influir en el comportamiento del arrastre en el proceso de flotación, utilizando medios alternativos al newtoniano. Dicho lo anterior, se abordará este aspecto con la implementación de fluidos no-newtonianos de modelo tipo “Bingham” y “Ley de Potencia” y como estos pueden influir en la cantidad de partículas finas recuperadas, variaciones cinéticas en el proceso de adhesión y variaciones en la hidrofobicidad del mineral con respecto al fluido.

El estudio será realizado para distintos tamaños de partículas que serán sometidos a distintos pH en el fluido base, para luego comparar con los casos mencionados anteriormente en pruebas de flotabilidad, tiempo de inducción y ángulo de contacto.

## 1.1 Objetivo general

Estudio del arrastre mecánico en fluidos no-newtonianos.

## 1.2 Objetivos específicos

- Efecto de los medios no-newtonianos en el ángulo de contacto burbuja-partícula

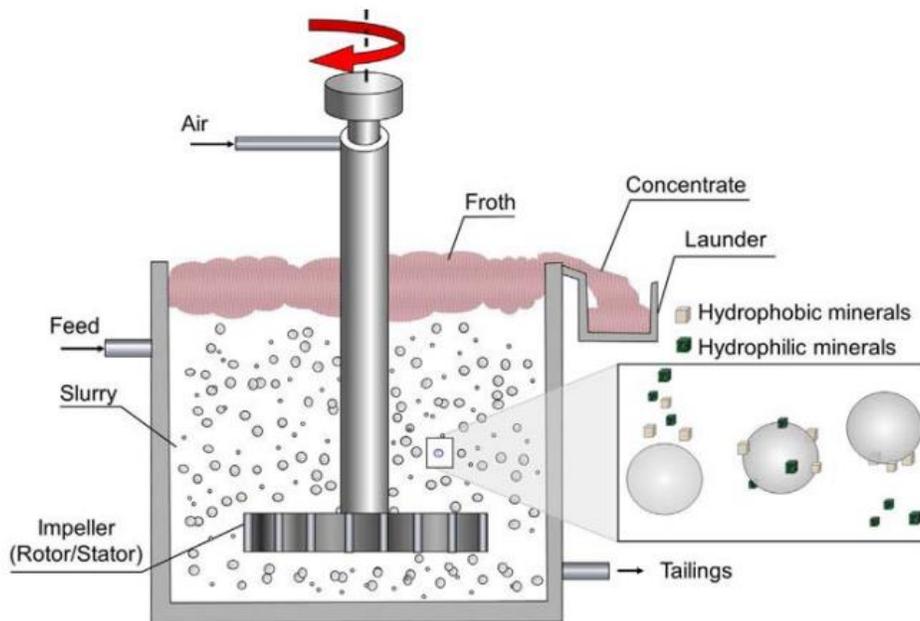
- Efecto de los medios no-newtonianos en el tiempo de inducción presente en el contacto burbuja-partícula.
- Efecto del pH en la recuperación en peso de partículas de ganga en pruebas de flotabilidad.
- Efecto del tamaño de partícula en la recuperación en peso de partículas de ganga en pruebas de flotabilidad.

## **2 Antecedentes teóricos**

### **2.1 Flotación espumante**

En lo que respecta a la concentración de minerales, uno de los procesos que tiene mayor relevancia en la minería es la flotación, proceso que se basa en fenómenos fisicoquímicos, los cuales buscan separar las partículas minerales objetivo de las que carecen de valor económico mediante la selectividad que se genera gracias a la incorporación de burbujas de gas, las cuales son las encargadas de coleccionar dichas partículas valiosas mediante la adhesión partícula-burbuja, dando origen así, a 2 corrientes llamadas concentrado y colas, siendo estas últimas las que cargaran con la ganga o también llamadas partículas no valiosas.

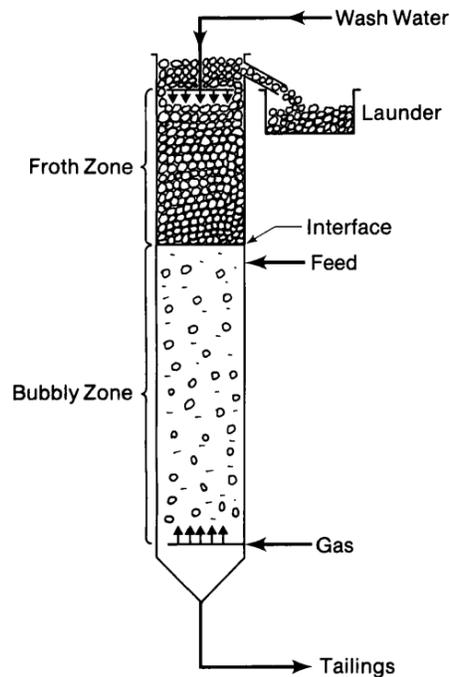
Este proceso ocurre en celdas de flotación, donde se puede evidenciar 2 zonas que tienen una mayor relevancia, la zona de colección, la cual se encarga de la interacción que tiene la pulpa con el gas y los reactivos en una zona de alta turbulencia, y por otro lado la zona de limpieza, en la cual se genera una espuma que cumple la función de recoger las burbujas generadas por la inyección de gas y el rotor presente en la celda. Como se mencionó anteriormente, estas burbujas están destinadas a interactuar con las partículas de mineral valioso captándolas selectivamente para luego ascender a la zona de limpieza gracias a la fuerza de empuje y a la hidrofobicidad (ver Figura 1), siendo esta última la fuerza impulsora de este proceso, ya que es la propiedad que evita la interacción de las partículas minerales con el agua permitiendo que se generen adhesiones estables entre burbujas de gas y partículas hidrofóbicas que al llegar a la espuma salen como concentrado (Ata, 2012; Hernáinz & Calero, 2001; Yarar, 2000).



**Figura 1. Representación del proceso de flotación (Wills & Finch, 2016).**

## **2.2 Flotación columnar**

Las constantes necesidades generadas por la demanda de la industria en lo que respecta a la recuperación del mineral valioso, además de la creciente innovación tecnológica en lo que respecta al proceso de concentración de minerales, han impulsado a que se desarrollen en las últimas décadas, nuevas alternativas a la flotación convencional. La flotación columnar muestra ventajas con respecto a la flotación convencional en aspectos como la obtención de concentrados con leyes más altas, ahorros energéticos, requiere menos espacio, cuenta con menor cantidad de zonas muertas y además que sus sistemas operativos se adaptan de mejor manera a lo que sería el control computacional (Pal & Masliyah, 1989; Sastri, 1998).



**Figura 2. Diagrama esquemático de una flotación columnar (Pal & Masliyah, 1989).**

Algunas diferencias notables que existen entre la flotación mecánica convencional y la flotación columnar radican en la formación de burbujas, la velocidad relativa en la que se mueven las burbujas y las partículas minerales, mayor tiempo de colisión entre burbuja y partícula, recuperaciones, tamaños de burbuja, etc. La formación de burbujas en las celdas convencionales es mediante el rompimiento mecánico del aire introducido producto del movimiento giratorio del rotor, mientras que, por otro lado, la generación de burbujas en las celdas columnares ocurre por el pasar de una mezcla que involucra un aire comprimido y aire a través de un generador de burbujas. En lo que respecta a la velocidad relativa a la que interactúan las partículas y burbujas, en las celdas convencionales es prácticamente despreciable, mientras que en las columnas es una velocidad diferente ya que partículas minerales y burbujas avanzan en contracorriente provocando una mayor posibilidad de colisión. El tiempo de residencia efectivo en las columnas es mayor debido a la longitud de estas (ver Figura 2), ya que la colisión se puede dar en toda la zona de colección, no así en la contraparte, ya que su zona efectiva de colisión se puede dar en una fracción de tiempo menor. El proceso en sí que se logra en las columnas de flotación permite tener una menor turbulencia en la zona de colección lo que se traduce en que

existe un menor grado de desprendimiento en lo que sería la adhesión partícula-burbuja, además de que se obtiene un menor arrastre de partículas de ganga provocando un menor grado de contaminación en el concentrado. Uno de los problemas que conlleva la flotación en celdas convencionales es el bajo control que se tiene en lo que respecta al tamaño de las burbujas, esto influye significativamente en procesos de flotación ya que burbujas demasiado grandes no son compatibles con partículas finas. Las columnas permiten la obtención de burbujas de menor tamaño, las cuales permiten un área de contacto y tiempo de residencia mayor (Sastri, 1998).

### **2.3 Transporte mecánico de minerales de ganga**

Durante el proceso de flotación, se considera transporte mecánico de ganga cuando las partículas de este tipo de mineral se transportan hacia la superficie de la celda o columna, donde son captadas por la espuma quedando atrapadas en la zona de limpieza. Es importante destacar que el ascenso mencionado no se atribuye al fenómeno de la flotación en sí, ya que no se involucran aspectos químicos que afecten la selectividad de partículas valiosas en el proceso (Smith & Warren, 1989).

Este fenómeno se da mayormente en partículas finas y ultrafinas, cuyas distribuciones de tamaños rondan los 20 y 10 micrones, respectivamente. La presencia de estas partículas incide significativamente en la recuperación y ley de concentrado (Wang et al., 2020). El transporte de estas partículas de ganga puede ser ocasionado por variados factores, tales como el atrapamiento de partículas finas en aglomerados de partículas-burbujas, excesivo grado de molienda debido a la presencia excesiva de partículas compuestas de ganga y minerales valiosos, así como el arrastre ocasionado del ascenso de las burbujas (Kirjavainen, 1996).

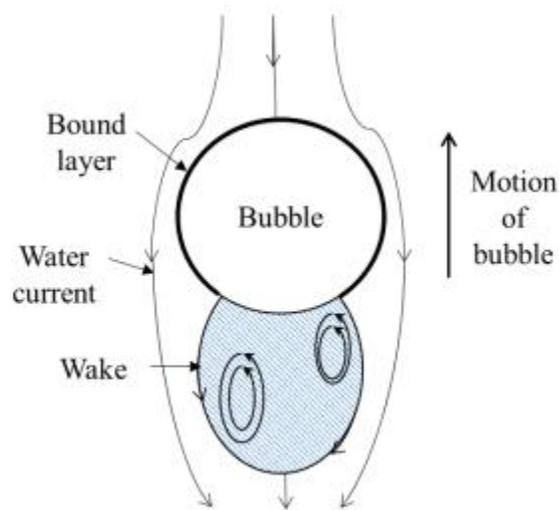
### **2.4 Mecanismos de arrastre**

El arrastre es considerado como una secuencia de dos etapas distintas. En la primera etapa, el mineral se transporta a la fase de espuma procedente de la zona de colección, mientras que, en la segunda etapa, las partículas de ganga hacen la transición desde la espuma hacia el concentrado. La zona de colección se divide en 2 zonas, una caracterizada por turbulencia y la otra de reposo. Al inyectarse gas a la celda de flotación y como resultado del movimiento del rotor, se genera el rompimiento mecánico que inicia

la formación de burbujas, generando enjambres de pequeñas burbujas en todas las direcciones, las cuales tienden a subir hacia la zona de reposo situada debajo de la espuma. Producto del ascenso de burbujas mencionado, se han postulado 3 teorías con el propósito de caracterizar el transporte de masa desde la región de colección a la espuma (Wang et al., 2015a).

#### 2.4.1 Teoría de capa límite y estela de burbujas

La teoría de la capa límite y de estelas de burbujas constituyen una caracterización del transporte de agua tanto en la pulpa como en la espuma. Cuando el agua es transportada desde la pulpa para ingresar posteriormente en la espuma debe hacerlo contra la fuerza de gravedad. Los mecanismos que posibilitan este transporte son el arrastre de agua a lo largo de las paredes de la burbuja, así como su transporte ascendente a través de la estela generada en la parte inferior de la burbuja (Smith & Warren, 1989). Lo mencionado anteriormente se puede observar en la Figura 3.

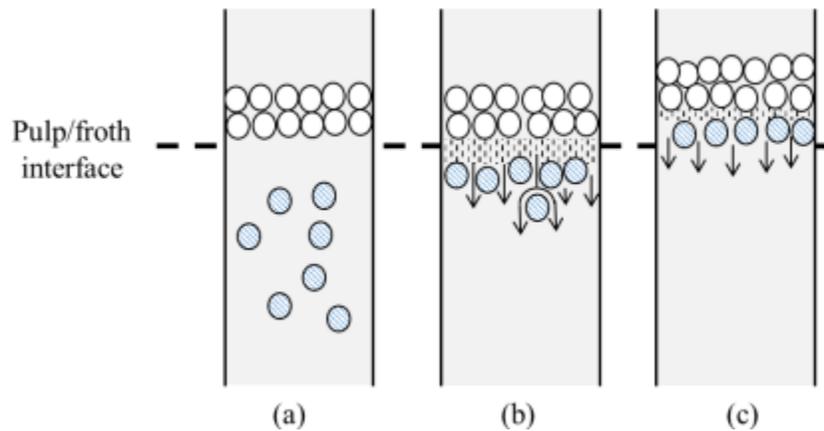


**Figura 3. Figura representativa de la teoría de capa límite y estela de burbujas (Wang, 2017).**

## 2.4.2 Teoría enjambre de burbujas

Las teorías previamente mencionadas no logran explicar completamente la presencia de agua en la espuma y el transporte de masa de partículas de ganga hacia esta, debido a una serie de diversos factores (Wang, 2017). Entre las objeciones más significativas se destacan las condiciones específicas a las que deben actuar las fuerzas hidrodinámicas para que se genere la estela. Además, dentro de la espuma, se genera un arreglo compacto de burbujas que evita la formación de estelas, por lo que no se puede recurrir para explicar la presencia continua de agua en la espuma (Smith & Warren, 1989; Wang et al., 2020).

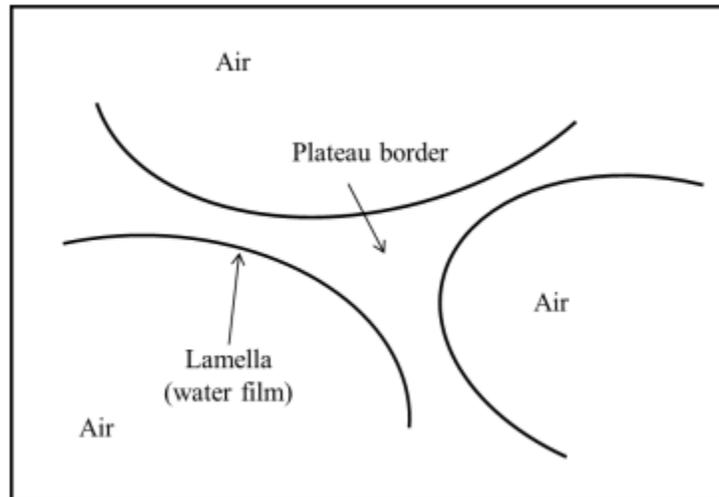
La Figura 4 caracteriza y describe el movimiento que se produce en esta teoría, básicamente cuando las burbujas pasan por la pulpa y se transportan hacia la superficie, estas tienden a disminuir su velocidad llegando al interfaz pulpa/espuma (a) provocando un atrapamiento de burbujas. Una vez producido este atrapamiento, el agua y las partículas presentes en el enjambre deben ser expulsadas hacia la zona de colección (b), pero debido al ascenso del siguiente enjambre de burbujas, dichas partículas inmersas en el agua quedan retenidas en la espuma (c) (Smith & Warren, 1989; Wang et al., 2020).



**Figura 4. Representación esquemática de la teoría de enjambre de burbujas (Wang, 2017).**

Los “Bordes de Plateau” son entidades significativas para el arrastre. Se forman a partir de la unión de la capa de agua que rodea a las burbujas en la espuma adoptando una configuración angular de 120 grados aproximadamente (ver Figura 5). Este fenómeno proporciona canales para que el agua y las partículas sean arrastradas dentro de estos bordes provocando un asentamiento. Cabe destacar, que la mayor parte del agua inserta

en la fase de espuma está contenida en los “Bordes de Plateau” proporcionando una vía para que las partículas hidrofílicas se puedan mover libremente en la fase acuosa presente en la espuma (Wang, 2017; Wang et al., 2020).



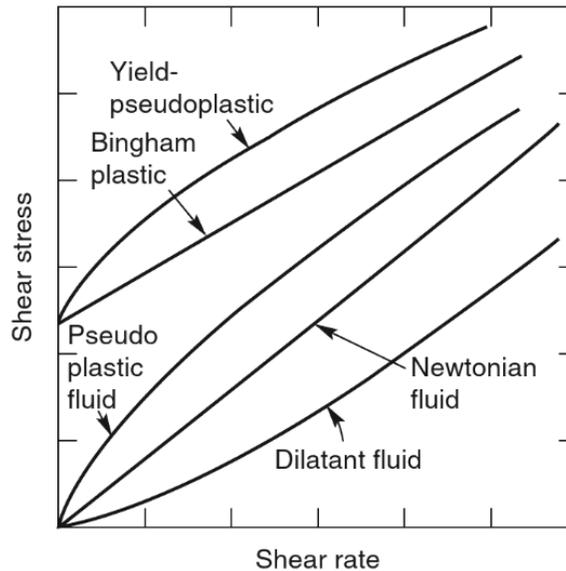
**Figura 5. Representación esquemática de los Bordes de Plateau (Wang, 2017).**

## **2.5 Fluidos no newtonianos**

Los fluidos no-newtonianos se caracterizan por tener la curva de esfuerzo cortante versus velocidad de corte de una forma no lineal y que, además, la curva no pasa por el origen como en el caso de los fluidos newtonianos. Por otra parte, las viscosidades que presentan este tipo de fluidos no son de una forma constante a determinadas características como temperatura y presión.

Es factible considerar 3 grupos de fluidos. El primer grupo se caracteriza por ser independiente del tiempo, es decir, su velocidad de corte se rige exclusivamente por los valores que adquiere el esfuerzo cortante en tal instante. En segundo lugar, se encuentra el grupo en el que la velocidad de corte depende de la duración del esfuerzo cortante, dando lugar a los “fluidos dependientes del tiempo”. Finalmente, se encuentran los fluidos viscoelásticos que adquieren características de fluidos ideales y sólidos elásticos, es decir, que luego de que son sometidos a una deformación, estos tienden a volver parcialmente a su forma inicial (Richardson, 2008).

En la Figura 6 se presenta un gráfico que muestra las curvas de esfuerzo cortante versus velocidad de corta para distintos fluidos. En lo que respecta al presente trabajo, la comparación de medios se basará principalmente en el fluido Newtoniano, Bingham y Pseudoplásticos.



**Figura 6. Tipos de fluidos no-newtonianos independientes del tiempo (Richardson, 2008).**

Además, cada tipo de fluido es caracterizado por un modelo específico. A continuación, los modelos presentados en las ecuaciones (1) y (2) pertenecen a Bingham y Ley de Potencia respectivamente.

$$\tau = \tau_0 + n\gamma \quad (1)$$

$$\tau = m\gamma^n \quad (2)$$

En el caso del modelo Bingham,  $\tau_0$  representa el valor mínimo de esfuerzo que se debe superar para que el fluido pierda la rigidez. Por otro lado, en el modelo de Ley de Potencia, el parámetro  $n$  representa la desviación que tiene el fluido con respecto al modelo newtoniano. La viscosidad está representada como  $n$  en el modelo de Bingham y como una  $m$  en el modelo de Ley de Potencia. Finalmente, ambos modelos representan el esfuerzo cortante y la velocidad de corte con los parámetros  $\tau$  y  $\gamma$  respectivamente (Lightfoot, 1992).

## 2.6 Fuerza de arrastre

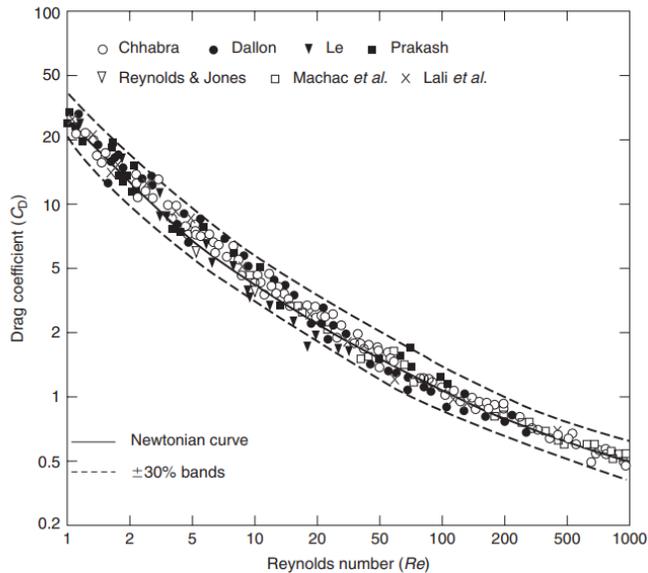
En un sistema particulado, cuando los cuerpos se encuentran sumergidos en un fluido que se encuentra en movimiento, los objetivos son expuesto a una fuerza de dos componentes llamada fuerza de arrastre. Los dos componentes son la fricción ejercida por el fluido y el arrastre de forma que depende de la distribución de presión ejercida sobre el objetivo. La fuerza de arrastre queda expresada en la ecuación (3) (Chhabra & Richardson, 2008):

$$F_D = \frac{C_D \rho V^2 R^2 \pi}{2} \quad (3)$$

Donde  $C_D$  es el coeficiente de arrastre,  $\rho$  la densidad del fluido,  $V$  la velocidad del fluido y  $R$  el radio de la partícula. Como se puede observar, la fuerza de arrastre es dependiente del valor adimensional del coeficiente de arrastre, el cual queda netamente en función del número de Reynolds y la consistencia del fluido, como se ve en la ecuación (4).

$$C_D = \frac{24}{Re} X(n) \quad (4)$$

En la figura 7 se puede observar una correlación entre el coeficiente de arrastre y el número de Reynolds donde se deja en evidencia la inversa proporcionalidad.



**Figura 7. Correlación número de Reynolds y coeficiente de arrastre (Chhabra & Richardson, 2008).**

## 2.7 Tiempo de inducción

El tiempo de inducción es un parámetro elemental en la flotación que está determinado de las propiedades químicas e hidrodinámicas del sistema. Básicamente, representa el tiempo que demora el “film protector” que rodea la burbuja en romperse previo a la adhesión partícula-burbuja. Es un indicador clave al momento de proporcionar información cinética para un proceso de flotación exitoso, dado que uno de los requisitos fundamentales para que se lleve a cabo el proceso es que el tiempo de inducción partícula-burbuja debe ser menor al tiempo de contacto de entre ellas (Danoucaras et al., 2013; Yoon & Yordan, 1991).

Además, a nivel detallado, el proceso de unión partícula-burbuja contiene una secuencia de eventos entre las 2 fases que interactúan. Estos eventos son el adelgazamiento y ruptura del film, donde este último ocurre al alcanzar el “espesor crítico” para que se rompa espontáneamente. Dentro de los eventos mencionados ocurren 3 etapas: (1) adelgazamiento del film hasta el espesor crítico, (2) ruptura desde el espesor de tamaño original hasta el espesor crítico, lo cual da el pie para que se genere un orificio que permite la formación de la línea de contacto trifásica. Finalmente, la etapa (3) es la expansión de la línea de contacto mencionada hasta un punto denominado radio mínimo, el cual es la distancia mínima necesaria para que haya un contacto estable (Gu et al., 2003).

La ecuación (5) muestra como medir el tiempo de inducción con todos sus componentes.

$$t = t_t + t_r + t_e \quad (5)$$

La medición del tiempo de inducción  $t$  se basa en la sumatoria de los componentes  $t_t$  que es el tiempo de adelgazamiento,  $t_r$  el tiempo de ruptura y  $t_e$  la expansión del punto trifásico. La medición del tiempo de inducción ha variado con el paso del tiempo hasta alcanzar una cierta perfección, la cual se obtiene gracias a un sistema de monitoreo que se logra mediante un video que permite visualizar de forma clara el contacto partícula-burbuja. El sistema permite ajustar los principales parámetros físicos involucrados en el proceso como la distancia inicial entre lecho de partículas y burbuja, desplazamiento de la burbuja, tamaño de la burbuja y velocidades de acercamiento y alejamiento de la burbuja como se muestra en la Figura 8 (Gu et al., 2003).

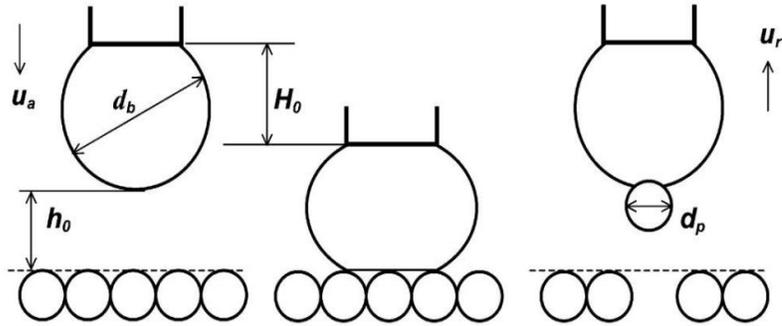


Figura 8. Esquema de medición del tiempo de inducción (Gu et al., 2003).

## 2.8 Ángulo de contacto

Es una forma que permite cuantificar la hidrofobicidad de partículas valiosas y ganga. Se deposita una gota de fluido en la superficie de un mineral y cuando la gota alcanza su equilibrio entre las 3 fases presentes, el ángulo se mide desde la tangente formada y la interfaz sólido-líquido (ver Figura 9). Además, es un parámetro que depende de factores como el balance de fuerzas cohesivas y adhesivas presentes en la fase líquida y sólida del equilibrio de energías superficiales presentes entre las distintas fases y las leyes de la termodinámica.

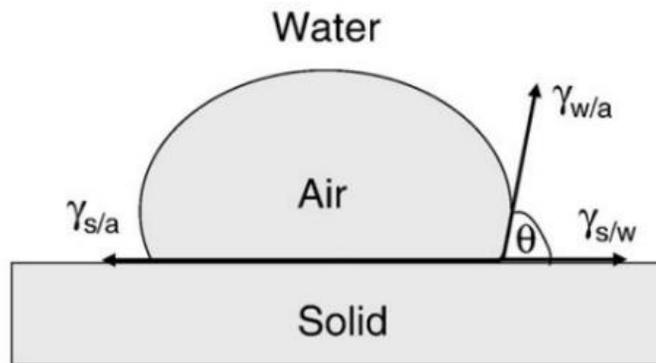


Figura 9. Esquema medición ángulo de contacto (Chau et al., 2009).

Además, se puede cuantificar la mojabilidad de un sólido mediante la ecuación de Young descrita en la ecuación (6), donde un sistema trifásico muestre un ángulo de contacto a una determinada temperatura y presión. Young plantea que el sistema trifásico

en equilibrio entrega una relación de las tensiones superficiales involucradas en el proceso (Chau et al., 2009).

$$\gamma_{s/a} = \gamma_{s/l} + \gamma_{l/a} \cos(\theta) \quad (6)$$

Donde

$\gamma_{s/a}$  : Tensión superficial sólido/gas

$\gamma_{s/l}$  : Tensión superficial sólido/líquido

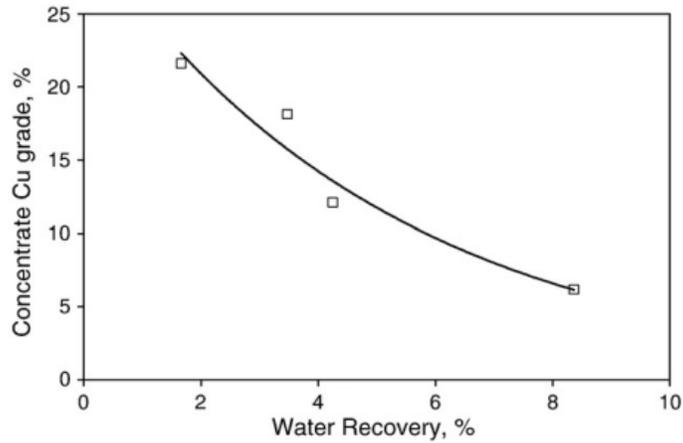
$\gamma_{l/a}$ : Tensión superficial líquido/gas

Reescribiendo la ecuación (6) para despejar  $\cos(\theta)$  tenemos los siguientes casos: (1) si  $\gamma_{l/a} > \gamma_{s/a} - \gamma_{s/l}$  el ángulo de contacto es mayor a 0 lo que se refleja en un mojado parcial, en caso (2) donde  $\gamma_{l/a} = \gamma_{s/a} - \gamma_{s/l}$  el ángulo de contacto es cero por lo que el mojado es completo (Paredes Garcés, 2018).

## 2.9 ESTADO DEL ARTE

### 2.9.1 Agua recuperada

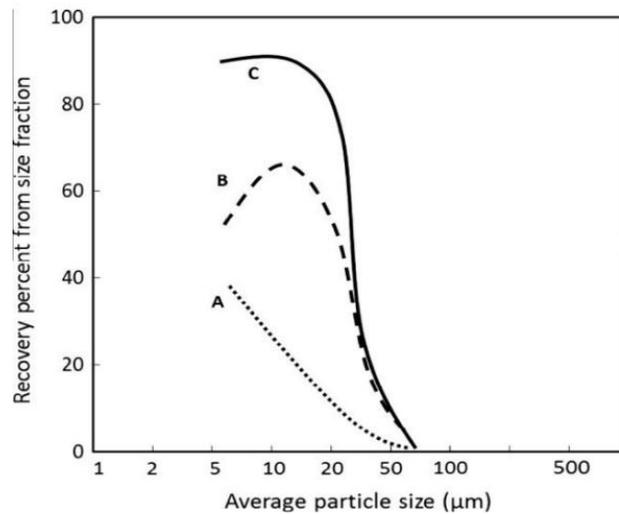
Como se explicó en puntos anterior, el arrastre mecánico depende en gran medida por el agua que es transportada a la espuma. Un gran número de investigadores realizaron pruebas piloto en laboratorios y se llegó a la conclusión de que existe una directa relación entre los sólidos en suspensión y el agua recuperada (Engelbrecht & Et, 1975a; Johnson & W., 1972; Laplante et al., 1989; Wang et al., 2015a). La Figura 10, muestra la relación del grado del concentrado con respecto a la recuperación de agua. Esto se puede reflejar en el hecho de que una mayor cantidad de agua recuperada en la espuma trae consigo el arrastre de las partículas suspendidas en las zonas de colección y reposo.



**Figura 10. Relación entre agua recuperada y grado del concentrado (Yianatos & Contreras, 2010a).**

### 2.9.2 Tamaño de partícula

El arrastre se centra en las partículas finas ya que estas al tener un menor peso tienen una mayor facilidad para ser afectadas por las fuerzas hidrodinámicas de la celda generando que se expongan un mayor tiempo a ser captadas por el enjambre de burbujas (Wang et al., 2015a).



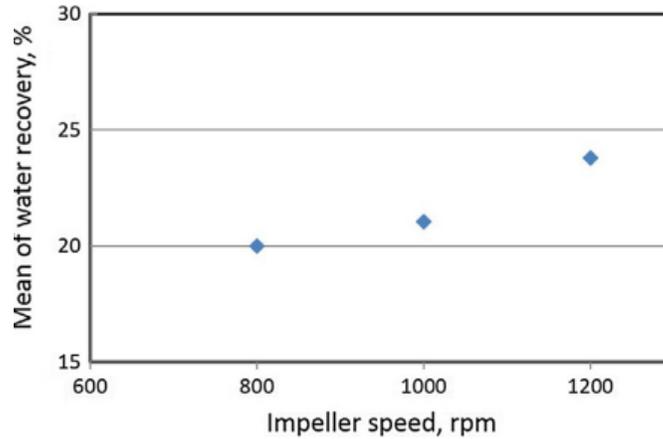
**Figura 11. Recuperación de siderita en función del tamaño de partículas (Tahar, 1981).**

El fenómeno descrito anteriormente se puede observar en la Figura 11, donde se muestra el descenso en el porcentaje de material recuperado a medida que aumenta el tamaño de las partículas para los casos (A), (B) y (C). Estos casos corresponden a la recuperación por arrastre, recuperación por verdadera flotación y la recuperación por arrastre junto con la verdadera flotación, respectivamente (Trahar, 1981).

### **2.9.3 Intensidad de agitación**

El rotor tiende a transferir mecánicamente energía a la pulpa. Esta energía viene dada por la velocidad a la que se maneja el impulsor. Al tener conocimiento sobre el control del impulsor se puede tener grandes beneficios al momento de flotar, ya que cumple ciertas funciones (Wang et al., 2020). Dentro de las funciones más destacadas se encuentran las interacciones entre minerales y burbujas, las que dependen de la probabilidad de colisión. Esta probabilidad tiende a aumentar a medida que aumenta la velocidad del rotor. La probabilidad de colisión también se ve aumentada si existe una mejor mezcla y dispersión en la zona de colección, con el fin de evitar zonas muertas y suspensión de partículas sólidas. Un control óptimo de la velocidad también genera una mejor estabilidad en las burbujas y espuma.

Un gran número de investigadores han estudiado las influencias que causa la velocidad del impulsor en la flotación. Los estudios concluyeron que la inyección de una mayor cantidad de energía tenía directa relación con una mejoría en la probabilidad de colisión y a la vez aumentaba el agua recuperada (ver Figura 12), traduciéndose en un mayor arrastre mecánico (Akdemir & Sönmez, 2003; Wang, Runge, et al., 2016; Yang & Aldrich, 2006).



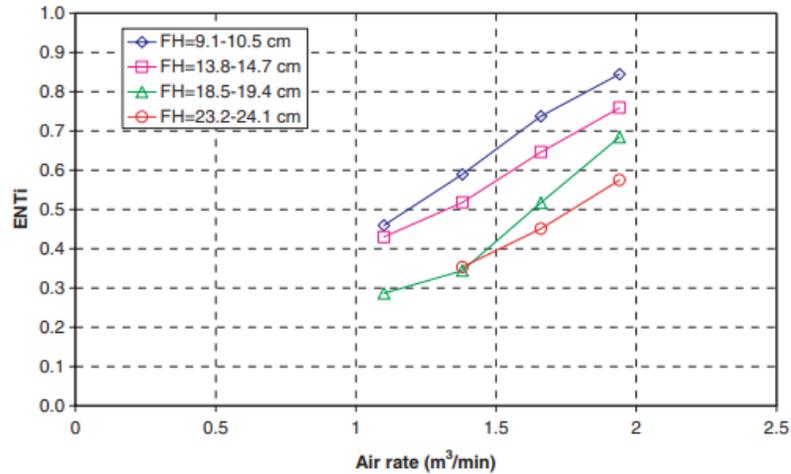
**Figura 12. Relación entre el agua recuperada en función de la velocidad del impulsor (Wang, Runge, et al., 2016).**

### 2.9.4 Velocidad volumétrica de gas

Este parámetro se expresa mediante la ecuación (7).

$$J_g = \frac{\text{Caudal de aire volumétrico}}{\text{Area transversal de la celda}} \quad (7)$$

Diversos estudios han dictado que la velocidad del gas superficial tiene directa relación con el arrastre de las partículas no valiosas (Neethling & Cilliers, 2009; Wang, Peng, et al., 2016; Wang, Runge, et al., 2016; Yianatos & Contreras, 2010; Zheng et al., 2006). En una primera instancia, se creía que la velocidad de gas superficial tenía directa incidencia en el tiempo de residencia de la espuma, lo que se traduce en consecuencias sobre el drenaje de las partículas presentes en la zona de limpieza, transportándose hacia la zona de colección. Experimentos aledaños, declinaron dicha teoría, ya que se afirmó que el grado de arrastre era independiente al tiempo de residencia de la espuma. Finalmente se produjo un mecanismo (Wang et al., 2020), el cual puede explicar el efecto del gas en el grado de arrastre. Resumiendo el mecanismo, un mayor caudal de aire significa una mayor velocidad a través de los bordes originados entre burbujas, lo que repercute significativamente en el arrastre de las partículas de ganga. La Figura 13 muestra lo explicado anteriormente. El grado de arrastre se comporta de manera directa al aumento del caudal de aire, es decir, si se mantiene el tamaño del área transversal y se produce un aumento del caudal, la velocidad volumétrica de gas también lo hará. El efecto se comprobó para 4 espumas de distinto tamaño.



**Figura 13. Grado de arrastre en función del caudal de aire para distintos tamaños de espuma (Zheng et al., 2006).**

### 2.9.5 Reología

La reología se muestra como un factor determinante en el fenómeno del arrastre, dado que diversos estudios han demostrado que la viscosidad tiene directa relación con la recuperación de las partículas valiosas, sólidos en suspensión y el grado de turbulencias en la zona de colección, siendo estas últimas las que afectan significativamente la estabilidad del sistema burbuja-partícula (Kirjavainen, 1992; Shabalala et al., 2011; Wang et al., 2020; Wang et al., 2015a).

Además, la reología no solo se toma en cuenta en la zona de colección. La viscosidad de la espuma también fue signo de estudio en lo que respecta al arrastre. Los resultados fueron una relación directamente proporcional con la recuperación de los minerales valiosos y una relación inversa con los minerales de ganga. Esto se debe a que un aumento de la viscosidad de la espuma provoca una mayor estabilidad en esta, lo que se traduce en un mayor tiempo de retención, provocando que el agua inserta en la zona de limpieza tenga mayor tiempo de salir y así las partículas hidrofílicas tengan mayores posibilidades de ser drenadas a la zona de colección (Shi & Zheng, 2003).

### 2.9.6 Tiempo de retención espuma

El tiempo de retención de espuma (FRT), se define conforme a lo establecido en la ecuación (8) (Wang et al., 2015):

$$FRT = \frac{H_f}{J_G} \quad (8)$$

Donde  $H_f$  es el espesor de la espuma.

El FRT tiene directa relación con el grado de arrastre presente en el proceso de flotación debido a su incidencia en lo que es el grosor de capas de burbuja, bordes de Plateau, viscosidad de la espuma, velocidad de coalescencia y explosión de las burbujas (Zheng et al., 2006). Además, estudios han determinado que el tiempo promedio en que las partículas de ganga permanecen en la espuma es de 9 a 12 segundos (Yianatos et al., 2008), y teniendo como objetivo utilizar esta variable para observar el comportamiento de la recuperación de ganga, se realizaron estudios en los que se buscaba variar dicho tiempo en flotación columnar. Los resultados obtenidos indicaron que la recuperación de la ganga bajo en un 10% al aumentar el FRT de 5 a 20 segundos. La explicación de estos resultados radica en que un mayor tiempo de FRT, aumenta el drenaje y así, aumenta la probabilidad de que las partículas de ganga sean devueltas a la pulpa (Beneventi et al., 2006; Wang et al., 2015a).

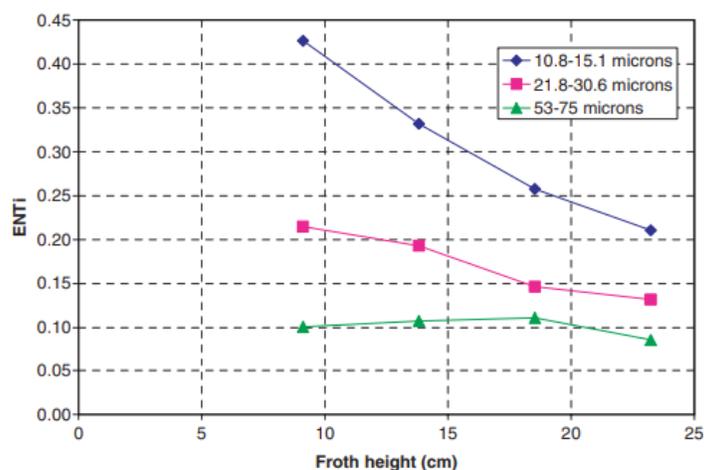
### 2.9.7 Estructura de la espuma

La cantidad de ganga recuperada en la espuma puede ser una función directa de la estructura de la espuma. Esta última, a su vez, está en función de una serie de factores, incluyendo la cantidad de agua, flujo de gas, tamaños de burbuja, dosis de reactivos, cantidad de partículas valiosas, entre otros. En caso de cualquier alteración en los factores mencionados, habrá un impacto en la composición de la espuma, afectando la recuperación de agua y por consecuencia, variará el grado de arrastre.

Además, la estructura de la espuma depende en gran medida de la estabilidad presente, la cual depende de la coalescencia y explosión que tienen las burbujas. Si estos factores mencionados ocurren de manera poco frecuente o si las burbujas no alcanzan un tamaño adecuado, la estabilidad tenderá a verse afectada, provocando que el arrastre de ganga se vea favorecido (Savassi, 1998; Wang et al., 2015a).

### 2.9.8 Altura de la espuma

Estudios han demostrado que el arrastre es función de la altura de la espuma. Esto se debe a que los resultados indicaron que, a una menor altura, la humedad tiende a subir, y como se había indicado anteriormente que, al aumentar la recuperación de agua, el arrastre y las partículas de ganga en el concentrado también lo hacen (Cutting et al., 1981; Engelbrecht & Et, 1975b). La Figura 14 muestra el fenómeno mencionado además de enfatizar el efecto que tiene el arrastre con una partícula más fina.



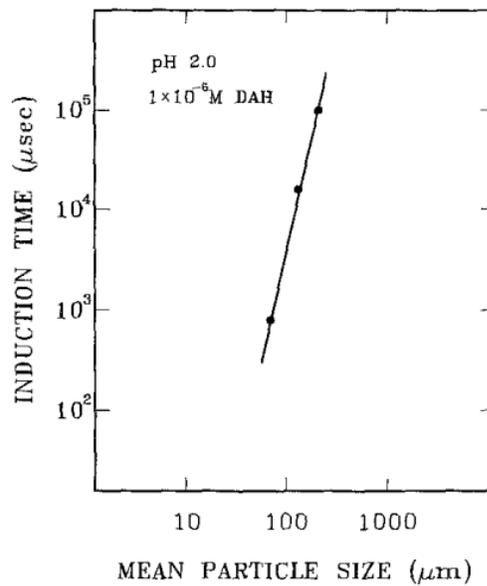
**Figura 14. Grado de arrastre en función de la altura de la espuma para diferentes tamaños de partículas (Zheng et al., 2006).**

Finalmente, otros resultados que apoyan la teoría de que el arrastre se puede ver influenciado por la altura de la espuma indicaron que, al aumentar la altura de la espuma, se aumenta el tiempo de retención de la espuma, lo que genera un mayor drenaje de agua y así, las partículas sin valor tengan mayor posibilidad de regresar a la zona de colección.

### 2.9.9 Estudios de tiempo de inducción a sistemas de cuarzo

Sistemas de cuarzo y agregados de otras especies se sometieron a estudios para determinar factores que afectan el tiempo de inducción en el proceso de flotación. A modo de resumen, se determinó que el tiempo de inducción es una función de la concentración

del colector, concentración de electrolitos utilizados en el medio, cargas de las burbujas, temperatura, tamaño de partícula y pH. Estos últimos resultan ser de gran importancia para el análisis de resultados en el presente estudio. Las figuras 15 y 16 muestran el efecto del tamaño de partícula y el pH en el tiempo de inducción del cuarzo, respectivamente. A modo de resumen se puede observar que a mayor tamaño de partícula existirá un mayor tiempo de inducción, mientras que, por otro lado, a medida que aumenta el pH, se observa un decrecimiento notable en el tiempo de inducción hasta llegar a valores superiores de pH 10, donde incrementa exponencialmente (Yoon & Yordan, 1991).



**Figura 15. Efecto del tamaño de partícula en el tiempo de inducción presente en partículas de cuarzo (Yoon & Yordan, 1991).**

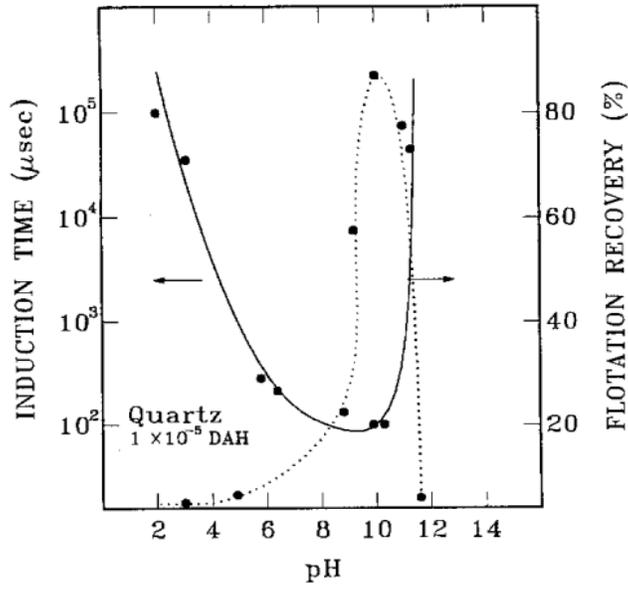


Figura 16. Efecto del pH en el tiempo de inducción presente en partículas de cuarzo (Yoon & Yordan, 1991).

## **3 Desarrollo experimental**

### **3.1 Muestras y reactivos**

El mineral utilizado a lo largo de todo el trabajo experimental fueron cristales de cuarzo, el cual fue chancado y posteriormente sometido a una molienda de 15, 20 y 35 minutos para llegar a una clasificación de partícula bajo malla #140, #230 y #270 que pertenecen a tamaños aproximados de 100, 63 y 50 micrones respectivamente.

Los medios acuosos utilizados para las diferentes pruebas fueron el fluido newtoniano, fluido Bingham y fluido ley de potencia. Para el fluido newtoniano se utilizó agua destilada pura, mientras que para lograr la consistencia de los otros fluidos se utilizó agua destilada junto con reactivos de Goma Guar y carboximetilcelulosa (CMC), ambos a 1 g/L.

Para las pruebas de flotación se utilizó nitrógeno como gas, Metil Isobutil Carbonil (MIBC) a una concentración de 40ppm como espumante y para el ajuste y regulación de pH se utilizó hidróxido de sodio (NaOH) y ácido clorhídrico (HCl).

### **3.2 Equipos y procedimientos**

#### **3.2.1 Pruebas de reología**

Para las pruebas de reología, se utilizó un reómetro diseñado para evaluar el comportamiento de los fluidos a utilizar. El equipo utilizado fue un viscosímetro Haake RV-20 equipado con un sensor MV2-P de diámetro de 41.04 mm. Dentro de las características que presenta el sensor es la rugosidad presente en los bordes del cilindro con el fin disminuir en lo mayor posible el fenómeno de deslizamiento (ver Figura 17).

Para la fabricación de estos fluidos, se utilizaron materiales como Goma Guar y CMC para crear soluciones madre con concentraciones de 1 g/L como se mencionó anteriormente. Cada solución se sometió a agitación en un agitador magnético por 120 minutos a una velocidad de 900 rpm con el fin de lograr una mezcla perfecta. Posteriormente, se extrajeron muestras de 12 mL y se diluyeron con agua destilada a soluciones de 50 ppm cada una.

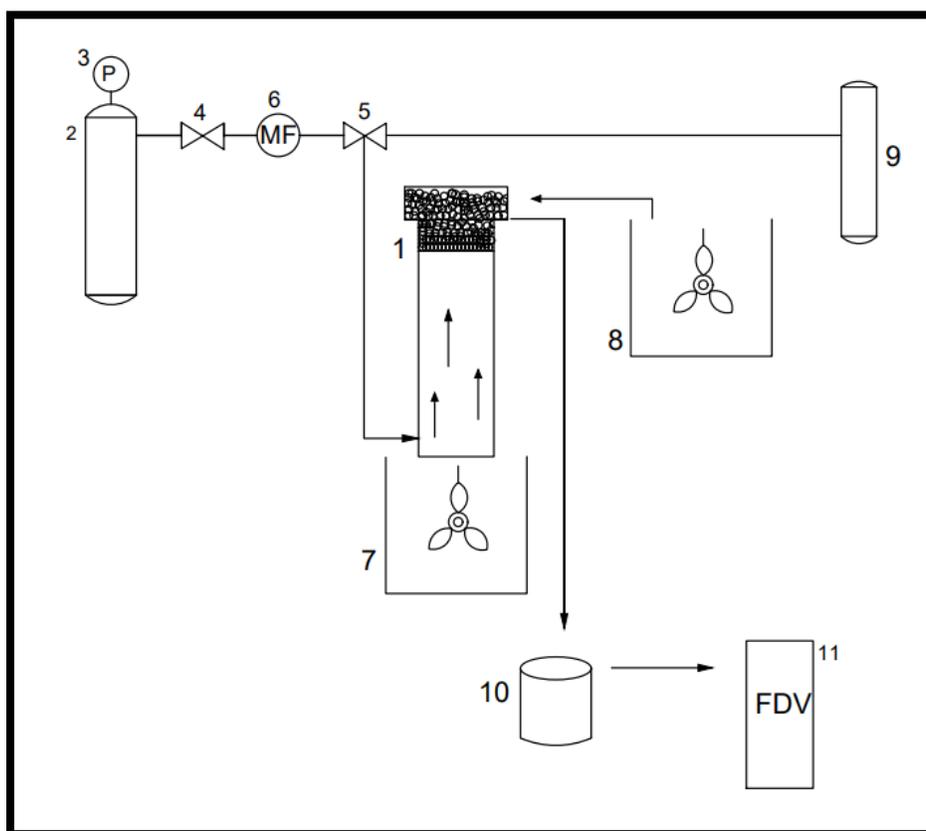
Una vez preparadas las soluciones, se llevaron a cabo las pruebas de reología cargando muestras de 50 mL en la copa del viscosímetro a condiciones de temperatura ambiente (20°C) con un barrido de velocidades de cizalle que van desde los 0 a 450 1/s por un periodo de 30 segundos. Finalmente, se utilizó el software del viscosímetro para producir los reogramas.



**Figura 17. Equipo de pruebas reológicas**

### 3.2.2 Pruebas de microflotación

El equipamiento utilizado consistió en una celda Partridge-Smith de 150 mL, una bombona de nitrógeno con regulador de presión, un medidor de flujo, un agitador magnético, una columna estabilizadora, un vaso precipitado y un filtro de vacío. La disposición del set-up incluyó la conexión de la parte inferior de la celda a la bombona de nitrógeno mediante una goma, regulando el traspaso del gas mediante válvulas conectadas a un manómetro perteneciente a la bombona, a un flujómetro y a la columna estabilizadora. En la copa de la celda se conectó otra goma que permitió el descenso del concentrado a un vaso precipitado. En la Figura 18 se muestra el diagrama P&ID correspondiente al equipamiento utilizado en este trabajo.



**Figura 18. Diagrama P&ID set up pruebas de microflotación (Fuente: elaboración propia).**

Diagrama P&ID set up pruebas de microflotación (1) celda Partridge-Smith, (2) tanque de nitrógeno, (3) regulador de presión, (4,5) válvulas, (6) medidor de flujo, (7) agitador

magnético, (8) acondicionamiento, (9) columna estabilizadora, (10) concentrado y (11) filtro de vacío.

Para realizar las pruebas, se utilizaron en todos los casos 1 g de mineral, el cual fue depositado en un vaso precipitado en el que se agregaron 150 mL del fluido correspondiente y MIBC a una dosis de 40 ppm. El acondicionamiento se realizó colocando el vaso precipitado sobre un agitador magnético y añadiendo NaOH o HCl con el fin de ajustar el pH requerido, el cual una vez alcanzado, se cronometraron 2 minutos de acondicionamiento a 500 rpm. Una vez finalizado el acondicionamiento, la pulpa se introdujo en la celda y se abrieron las válvulas para permitir el paso del nitrógeno. El tiempo de flotación fue de 2 minutos exactos, durante los cuales se añadía líquido a las mismas condiciones experimentales de la flotación cada 15-20 segundos, y se removía la espuma con una paleta cada 10 segundos. El concentrado obtenido se depositó en un vaso precipitado para luego verterse en el filtro de vacío con el fin de eliminar el exceso de líquido. Una vez filtrado el mineral se procedió a calcular la recuperación de mineral mediante la ecuación (9), que se muestra a continuación.

$$\text{Recuperación en peso, \%} = \frac{\text{Cantidad de mineral en el concentrado}}{\text{Cantidad de mineral alimentado}} \times 100 \quad (9)$$

La Tabla 1 sirve como resumen de todas las condiciones experimentales utilizadas en cada una de las pruebas de microflotación. Cada entrada en esta tabla representa una decisión crítica que influyo en los resultados de las pruebas realizadas.

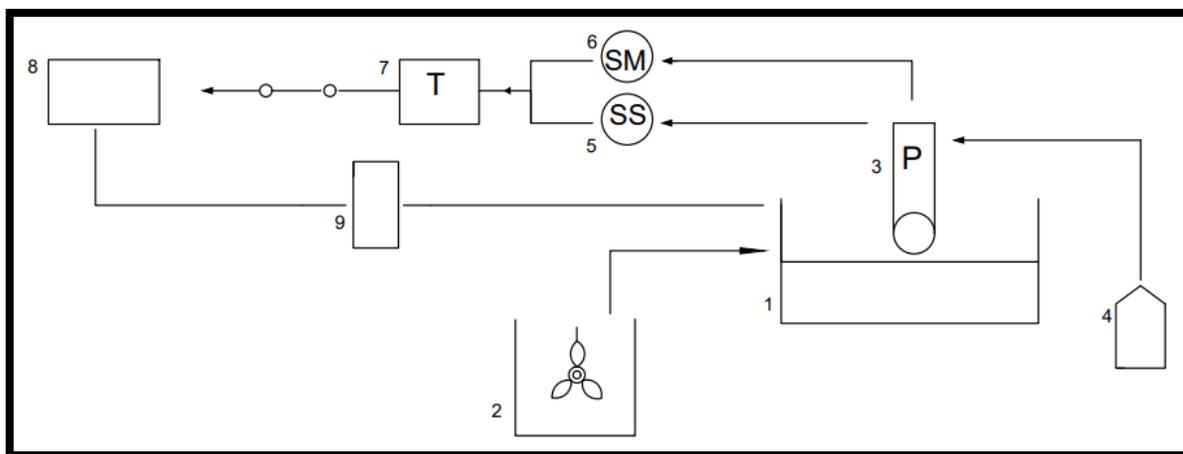
**Tabla 1. Condiciones operaciones flotación**

Cantidad de mineral, g	1
Tiempo de acondicionamiento, segundos	120
Tiempo de flotación, segundos	120
Remoción espuma, segundos	10
Dosis MIBC, ppm	40
Velocidad agitador, rpm	500
Temperatura, °C	20-25

Rango pH	7-11
Flujo de gas, $cm^3/s$	80-85
Presión de gas, atm	1

### 3.2.3 Pruebas de tiempo de inducción

Los equipos utilizados son un medidor de tiempo de inducción el cual cuenta con un software específico que contribuye a la medición, una cámara conectada a un computador que permite monitorear la adherencia burbuja-partícula, un agitador magnético para el acondicionamiento de la muestra, un pistón generador de burbujas, una jeringa de aire, un sensor de sonido, un sensor de movimiento, un transformador y finalmente una celda de vidrio de  $15\text{ cm}^3$  en el que va el lecho de mineral. Se muestra en la Figura 19 el diagrama P&ID correspondiente al equipamiento utilizado en este trabajo.



**Figura 19. Diagrama P&ID set up tiempo de inducción (Fuente: elaboración propia).**

Diagrama P&ID set up tiempo de inducción, (1) celda con lecho de partículas, (2) acondicionador de muestra, (3) pistón generador de burbujas, (4) jeringa de aire, (5) sensor de sonido, (6) sensor de movimiento, (7) transformador, (8) monitor, (9) cámara

El protocolo experimental se inició depositando 3 gramos de mineral en la celda de ensayo. Luego, se vertió el fluido previamente acondicionado en un vaso precipitado ubicado encima del agitador magnético hasta alcanzar el pH requerido. Teniendo la muestra lista, se colocó la celda dentro del equipo para el ajuste de luz y lente de cámara

para obtener una visualización nítida del proceso de adhesión en el software del computador. A continuación, es necesario ajustar los parámetros que indica el software (tamaño de burbuja, barrido de tiempo de inducción, tiempo de duración del contacto). Luego de tener establecidos los parámetros, se procede a iniciar las pruebas para todo el tiempo de barrido designado. Cada prueba debe realizarse en un total de 10 veces en distintos momentos y lugares celda. Para registrar los resultados y la cantidad de adhesiones obtenidas se procede a completar cada casilla de la Tabla 2 con un “SI” en caso de existir adhesión y un “NO” en caso de no existir. Posteriormente, se completó la Tabla 3, que muestra la cantidad total de adhesiones en los distintos tiempos de barrido.

Con ambas tablas completadas, se procede a determinar el tiempo de inducción mediante un código programado en el software “MatLab” (ver Anexo 7.1). El modelo utilizado para el ajuste de datos y la obtención del tiempo de inducción en cada prueba está expresado mediante la ecuación (10).

$$\text{Función de ajuste: } y = f(x) = y_0 + a * (1 - b^x) \quad (10)$$

Donde:

Y es equivalente al número de adhesiones en diez mediciones realizadas con diferentes burbujas de igual tamaño, en diez diferentes locaciones en la cama de mineral, a una misma distancia del sistema particulado.

X es el tiempo de inducción calculado al cual ocurren el 50 % de las adhesiones dentro de las diez mediciones realizadas con diferentes burbujas, en diez diferentes locaciones en la cama de mineral.

$y_0$ ,  $a$  y  $b$  son coeficientes respectivos de la función graficada por el modelo.

Las condiciones experimentales del sistema fueron a temperatura de 20-25°C, con una agitación de acondicionamiento de 500 rpm por 3 minutos. El rango de pH utilizado para el estudio fue de 7, 9 y 11.

**Tabla 2. Registro de adhesiones en barrido de tiempo de contacto.**

Barrido (ms)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10										
30										
50										
75										
100										
200										
500										
800										
1200										
1600										

**Tabla 3. Número total de adhesiones**

Prueba	Número adhesiones
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

### 3.2.4 Pruebas de ángulo de contacto

Para las pruebas de ángulo de contacto se utilizó el equipo “OSCILLATING DROP MODULE (ODM)” y el software “ADVANCE”. La preparación consiste en ubicar el lugar exacto en donde se quiera depositar por medio de una aguja la gota de fluido a evaluar. Luego, se debe enfocar con la cámara la base de la aguja y moldear la gota para que se ilustre de la mejor forma posible. Una vez enfocada la base de la aguja, se debe determinar la escala de la imagen para así proporcionar las dimensiones correspondientes a evaluar, es este caso, el ángulo de contacto entre la gota y el mineral utilizado. En la Figura 20 se muestra el uso del software, el cual monitorizó el proceso en que la gota dejó la aguja y se depositó en el mineral hasta alcanzar el equilibrio de 3 fases, calculando ángulo de contacto izquierdo y derecho a distintos tiempos, para luego sacar el promedio de estos y finalmente, completar la Tabla 4.

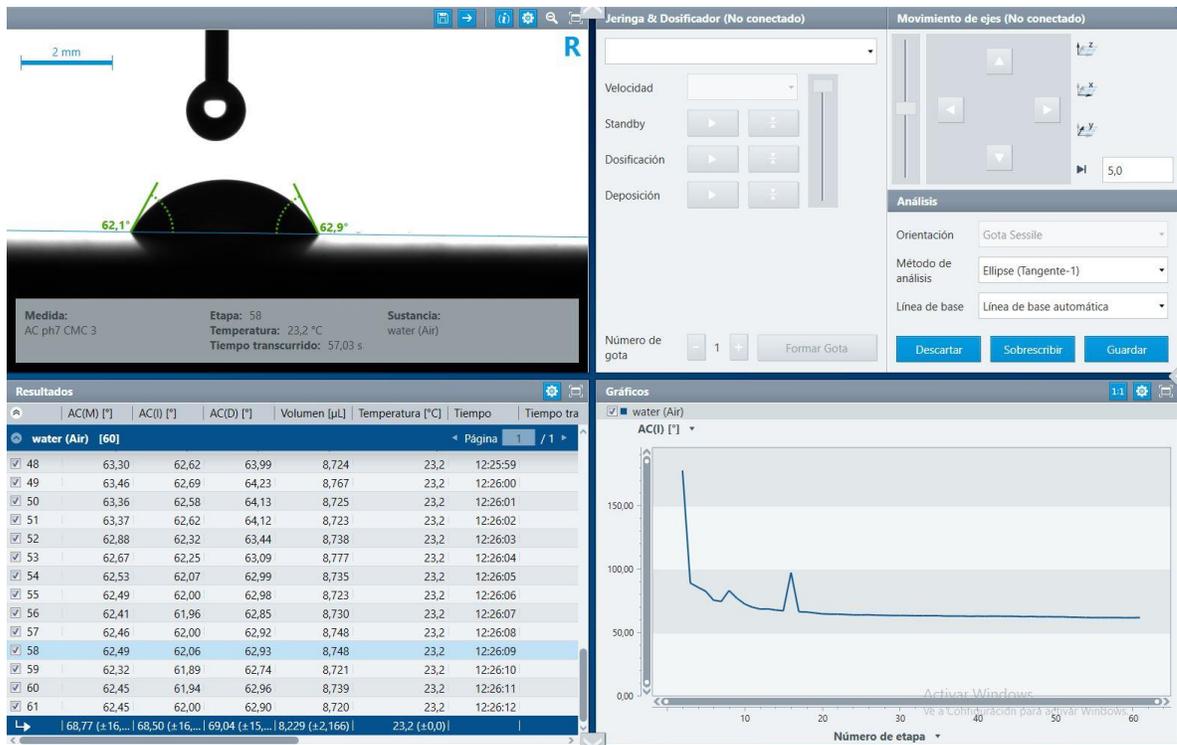


Figura 20. Software ADVANCE.

**Tabla 4 Ejemplo medición ángulo de contacto.**

Tiempo (s)	Test	ACI, °	ACD, °	ACM, °
300	1			
300	2			

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Comprobación efecto modificadores

Se realizaron pruebas en el reómetro para comprobar el comportamiento del uso de los reactivos. Las figuras 21 y 22 muestran los resultados de las pruebas reológicas obtenidas de las soluciones con los modificados de goma guar y CMC. Los comportamientos que tuvieron los fluidos son presentados en reogramas y como se puede observar, se presentan comportamientos que se asemejan a fluidos regidos por los fluidos Bingham y Potencia respectivamente. Además, la Tabla 5 muestran el comportamiento con respecto a los modelos mencionados anteriormente.

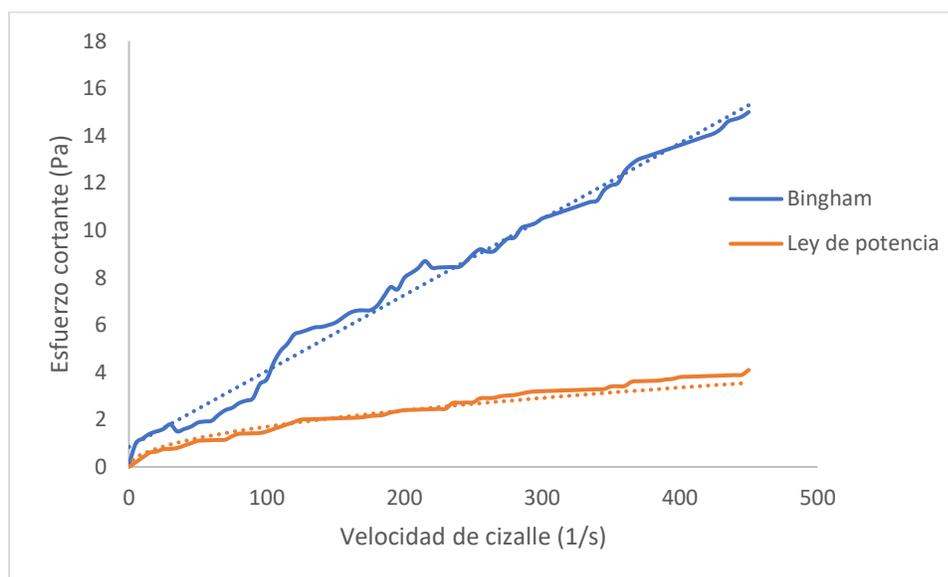
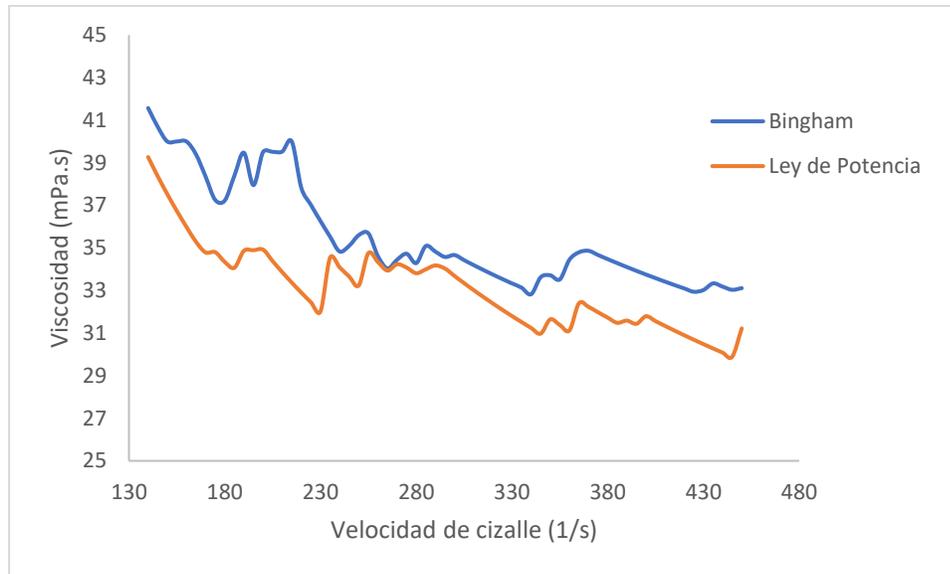


Figura 21. Reograma fluidos no newtonianos,



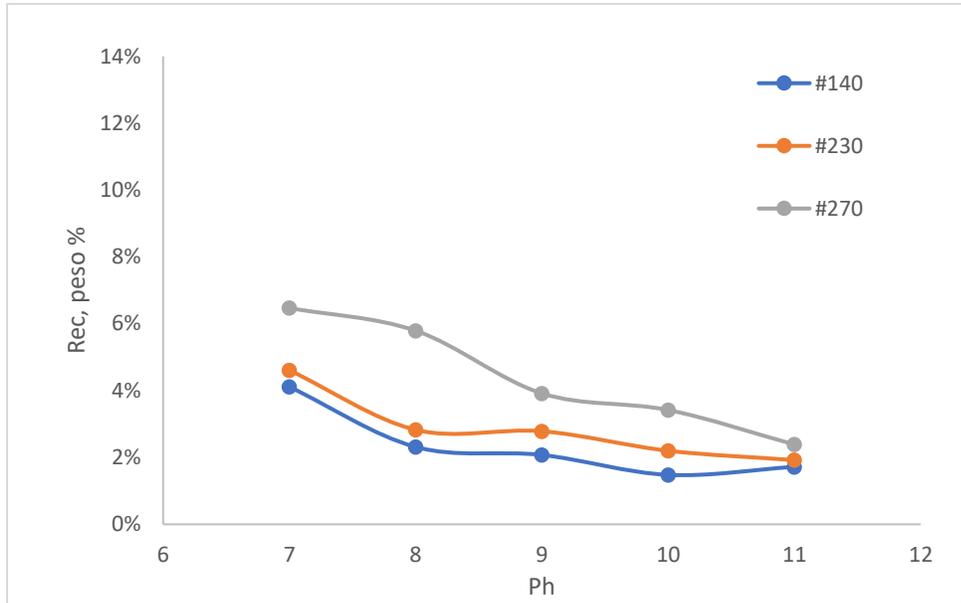
**Figura 22. Gráfico velocidad cizalle versus viscosidad fluidos no newtonianos.**

**Tabla 5. Modelo fluidos**

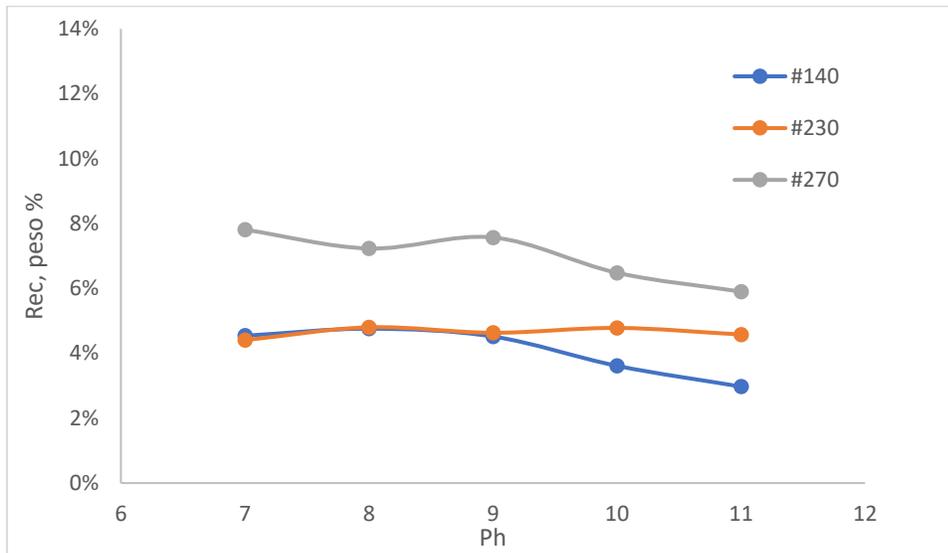
Fluido	Modelo	$R^2$
Bingham	$\tau = 0.8428 + 0.0321\gamma$	0.994
Ley de Potencia	$\tau = 0.1784\gamma^{0.4897}$	0.969

## 4.2 Efecto tamaño de partícula y pH en pruebas de microflotación

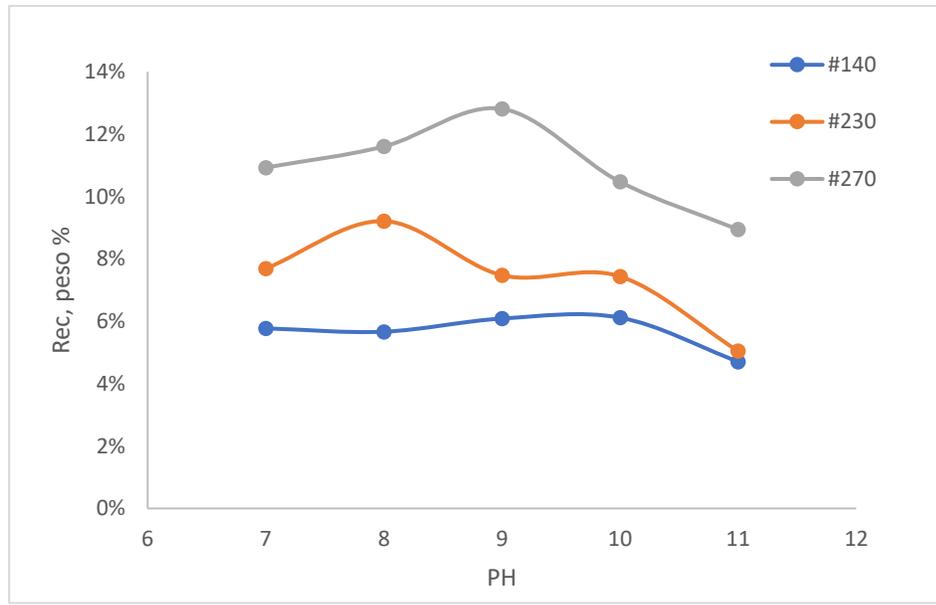
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las recuperaciones en peso de las pruebas de flotabilidad de cuarzo a distintos pH, tanto en medios newtonianos como no-newtonianos. Las figuras 23, 24 y 25 representan distintos medios, siendo el medio newtoniano para la Figura 23 y medios no-newtonianos con modificadores de CMC y Goma Guar para las restantes respectivamente.



**Figura 23. Ph versus recuperación en peso de cuarzo a distintas mallas en fluido newtoniano.**



**Figura 24. Ph versus recuperación en peso de cuarzo a distintas mallas en fluido no-newtoniano con modificador CMC.**



**Figura 25. Ph versus recuperación en peso de cuarzo a distintas mallas en fluido no-newtoniano con modificador Goma Guar.**

En primer lugar, en cuanto al tamaño de partícula, se observa un aumento en el porcentaje de material recuperado en las pruebas de flotación a medida que las partículas disminuyen su tamaño. Este fenómeno ocurre en todo el rango de pH experimentado y se repite en los 3 medios utilizados, afirmándose la teoría de que el arrastre mecánico aumenta a medida que la partícula se vuelve más fina.

Dado los estudios realizados (Kursun, 2014; Wang et al., 2015b), podemos observar que los resultados obtenidos con respecto al tamaño de partícula se asemejan bastante y de acuerdo a la teoría, esto puede deberse a factores como una mayor suspensión dentro de la celda, lo que aumenta exposición que tienen las partículas finas a las fuerzas hidrodinámicas generadas en la zona de colección producto de las turbulencias originadas por la agitación proveniente del agitador magnético presente en el fondo de la celda o la constante infusión de nitrógeno. Otro factor contribuyente al ascenso de las partículas de menor tamaño puede deberse al fenómeno de enjambre de burbujas explicado anteriormente. Por otro lado, las partículas gruesas presentan una suspensión menor debido a su mayor peso, lo que dificulta su ascenso hacia la zona de limpieza, lo que reduce la probabilidad a que lleguen al concentrado, aumentando su tendencia a permanecer debajo de la celda.

Además, es importante destacar que existe un rebalse en la parte superior de la celda, indicando que el fluido se desplaza hacia arriba. En este sentido, las partículas

están expuestas al movimiento y se desplazan en dirección contraria a la fuerza de arrastre. Según la ecuación (3), la fuerza de arrastre es directamente proporcional al área superficial de la partícula. Como se mencionó anteriormente, el fluido se transporta hacia la superficie de la celda, por lo que las partículas de mayor tamaño tienden a tener una mayor fuerza de arrastre lo que aumenta la tendencia a permanecer en el fondo de la celda. A su vez, las partículas sumergidas en el fluido experimentan el fenómeno de la sedimentación por gravedad, lo que contribuye a que la recuperación de las partículas de mayor tamaño sea menor en comparación con las más pequeñas. Complementando, al considerar el movimiento del fluido y las fuerzas que interactúan, haciendo un balance de estas, se deduce que las partículas de mayor tamaño poseen una sumatoria de fuerzas de arrastre y peso mayor que las partículas más pequeñas, lo que dificulta su ascenso.

En segundo lugar, al considerar el pH como variable relevante, se observa un patrón similar en los 3 medios evaluados cuando se llega a valores entre rango de pH 9 y 11. Se observa que el porcentaje recuperado de cuarzo comienza a disminuir cuando se trabaja a valores elevados de pH.

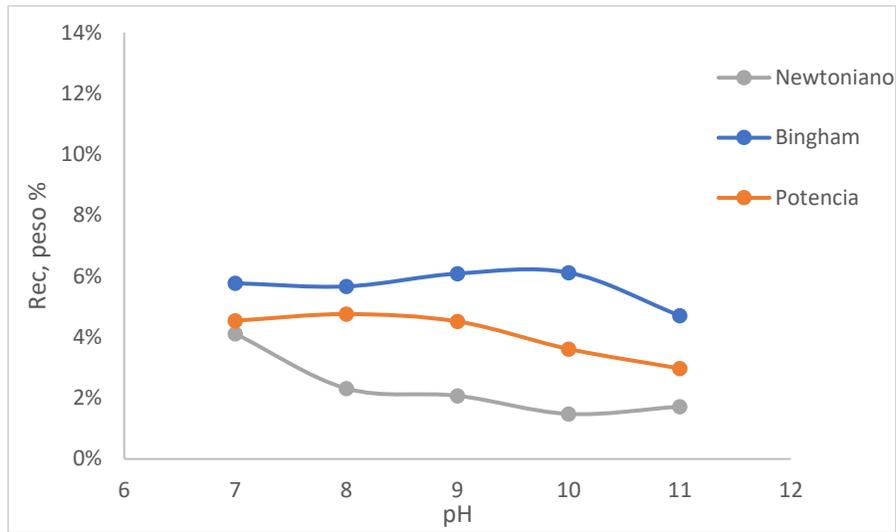
Los efectos atribuidos al aumento del pH están vinculados principalmente a la estabilidad de la espuma y la adherencia de especies a la superficie del mineral. El pH tiene directa incidencia en los modificadores a utilizados en el proceso, en este caso, MIBC. A niveles más altos de pH, el espumante muestra una eficacia mejorada, lo que resulta en una espuma más estable y en una disminución del colchón para obtener menores recuperaciones de minerales de ganga, lo que describe el fenómeno de la obtención de un menor arrastre mecánico. Por otro lado, cuando los minerales se exponen a medios ácidos o en este caso alcalinos, las superficies de estos minerales pasan a estar cargadas negativa y positivamente. A pH elevados, la posible formación de hidróxidos y una posterior adherencia a la superficie del mineral, puede provocar un aumento en el peso de las partículas, dificultando su ascenso hacia la zona de limpieza, provocando a su vez, la obtención de una menor cantidad de material recuperado.

### 4.3 Efecto reología en pruebas de microflotación

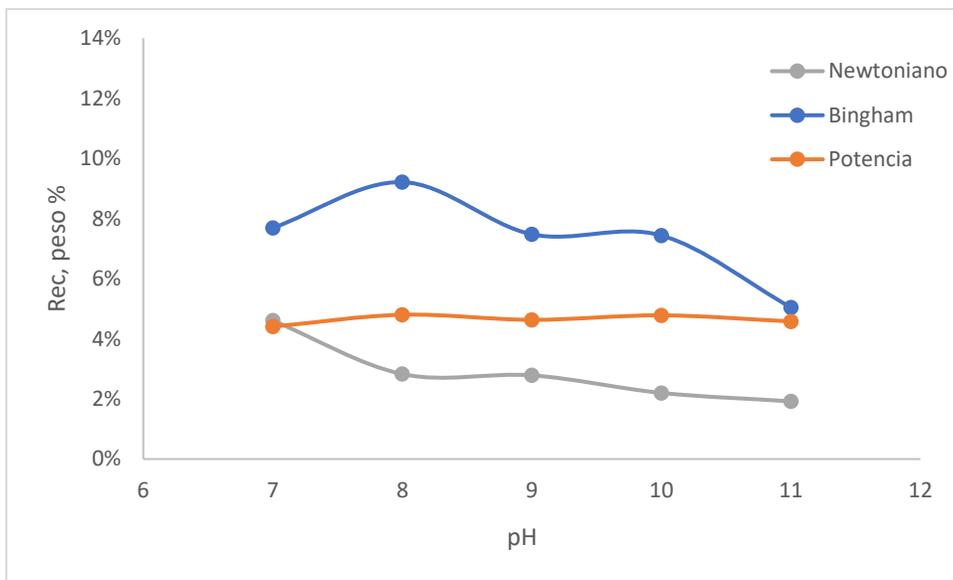
Para evaluar el efecto de la reología, se optó por analizar cada tamaño de partícula de forma separada, comparando su comportamiento en cada medio involucrado en el estudio. Las figuras 26, 27 y 28 revelan que, el porcentaje recuperado de cuarzo aumentó al pasar de un fluido newtoniano a uno no-newtoniano para todos los tamaños de partícula utilizados. Esto sugiere que, a una mayor viscosidad, el arrastre mecánico tendería a aumentar. Estudios previos (Wang et al., 2015b) han indicado que la reología incide directamente en el tiempo que permanecen las partículas suspendidas en la zona de colección al exponerse a medios con una viscosidad mayor. Esto permite que las partículas accedan a una mayor probabilidad de ascender a la espuma, convirtiendo la viscosidad en un factor determinante en el grado de arrastre mecánico obtenido en el proceso.

A modo de complemento de lo mencionado en el párrafo anterior, puede ser importante considerar que el fluido de Bingham tiene una mayor capacidad de suspensión gracias a su estructura más rígida y una viscosidad aparente constante por debajo de un umbral de esfuerzo cortante, lo que puede traducirse en una mayor estabilidad que puede permitir que las partículas de cuarzo se mantengan uniformemente inmersas en el fluido lo que puede facilitar su transporte hacia la superficie.

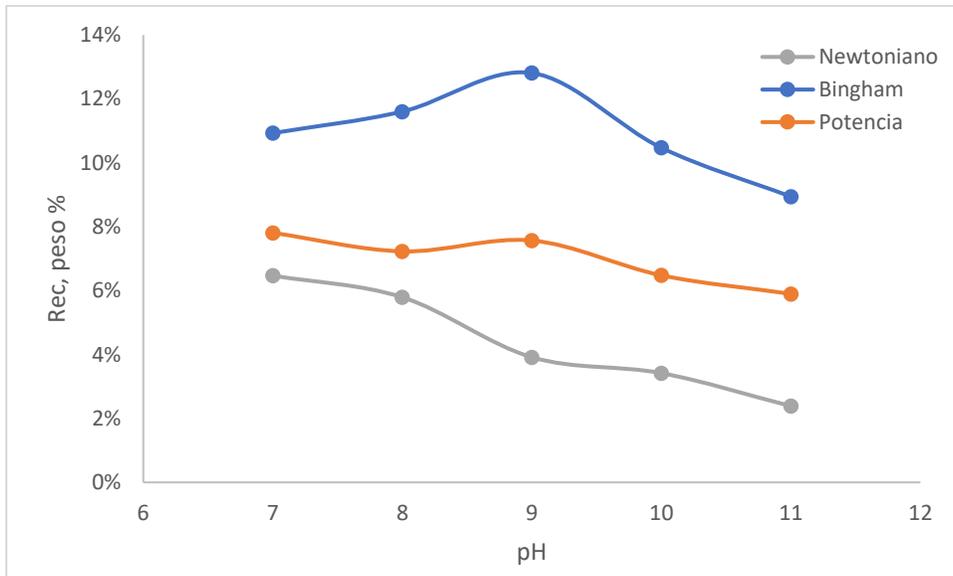
A pesar de que el movimiento del fluido es ascendente, lo que implica una fuerza de arrastre en dirección contraria que aumenta con el incremento de viscosidad como se muestra en la ecuación (4), esta no es suficiente para disminuir el arrastre. Esto se debe a que, producto del aumento de viscosidad, las partículas sumergidas tenderán a seguir con mayor facilidad el movimiento del fluido, aumentando las posibilidades para que sean captadas en la zona de limpieza. Al considerar el balance de fuerzas, se concluye que a pesar del aumento de la fuerza de arrastre y la acción de la fuerza peso de las partículas, la fuerza de empuje y el movimiento del fluido tienen una mayor influencia en las partículas sumergidas por lo que tiende a aumentar la recuperación del material.



**Figura 26. Comparación arrastre mecánico #140 en distintos medios.**



**Figura 27. Comparación arrastre mecánico #230 en distintos medios.**

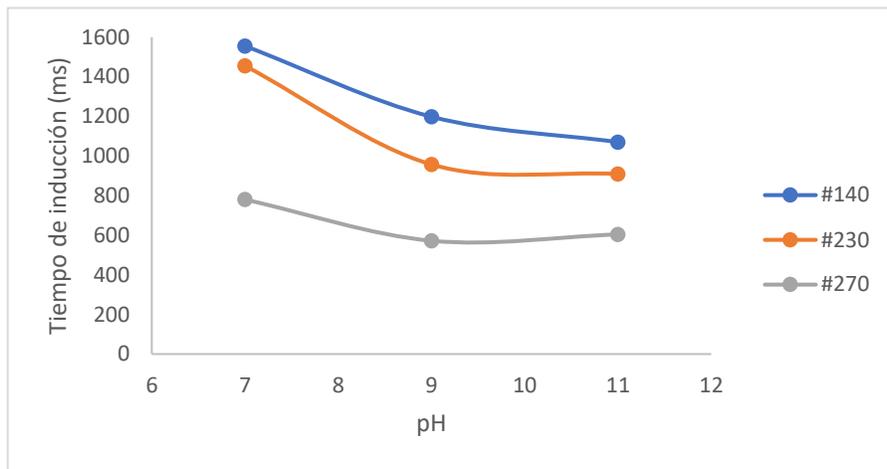


**Figura 28. Comparación arrastre mecánico #270 en distintos medios.**

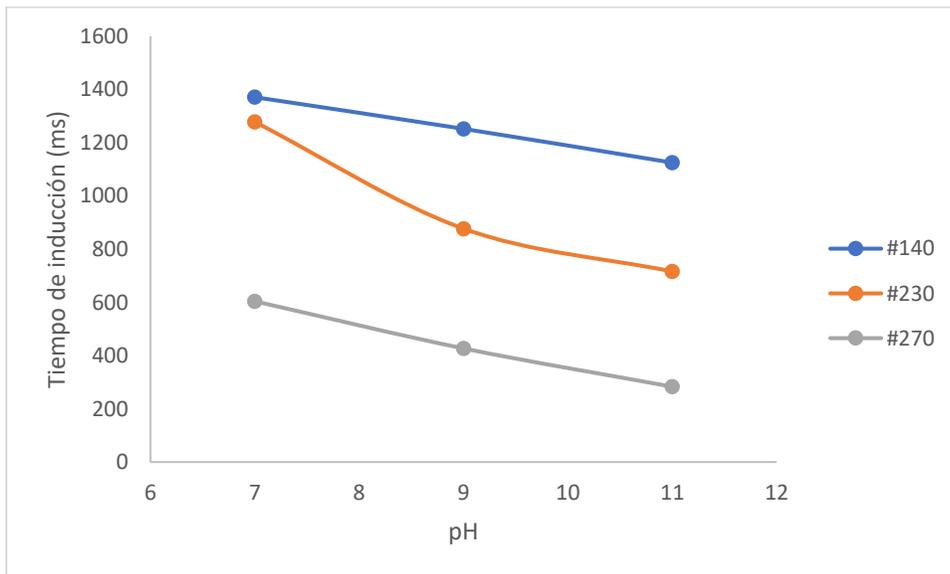
## 4.4 Resultados tiempo de inducción

### 4.4.1 Efecto tamaño de partícula y pH

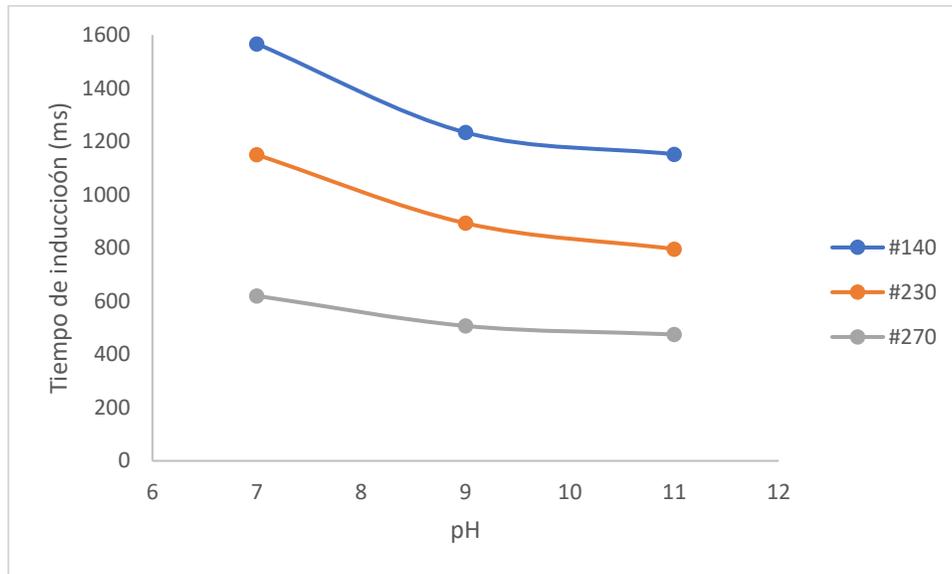
Las figuras 29, 30 y 31 muestran las variaciones de tiempo de inducción al trabajar con distintos tamaños de partícula expuestos a diferentes fluidos y a un aumento en la alcalinidad del medio. El número de adhesiones concretadas por prueba son mostradas en Anexo 7.2.



**Figura 29. Efecto tamaño de partícula en el tiempo de inducción presenta en fluido newtoniano.**



**Figura 30. Efecto tamaño de partícula en el tiempo de inducción presenta en fluido ley de potencia.**



**Figura 31. Efecto tamaño de partícula en el tiempo de inducción presenta en fluido Bingham.**

El primer gráfico, correspondiente al medio newtoniano, se observa que el tiempo de inducción aumenta a medida que la partícula es más grande. Este patrón se repite en el segundo y tercer gráfico, correspondientes a la ley de potencia y Bingham, respectivamente, comprobando la directa relación entre el tamaño de partícula y tiempo de inducción.

El aumento de tiempo de inducción en lo que se refiere al tamaño de partícula puede deberse al hecho de que, al aumentar el tamaño, también lo hará de la misma forma el área de contacto existente entre la burbuja y la partícula, lo que dificulta el adelgazar, atravesar y desplazar aquel film debido a su mayor extensión. En contraste, las partículas más pequeñas tienen un área de contacto menor, lo que facilita la ruptura y desplazamiento del film.

En términos generales, en relación con el pH, para los 3 gráficos se muestran resultados similares donde se observa una disminución en el tiempo de inducción conforme aumenta el pH. Sin embargo, se identifica un punto particular que no rige el comportamiento descrito, lo cual se atribuye posiblemente a un error experimental ya que, la diferencia es mínima.

Al variar el pH, la cinética puede alterarse debido a la exposición de las burbujas a diferentes medios, lo que lleva a variaciones en las cargas de burbujas y minerales, influenciadas por la alcalinidad o acidez de un medio, ya que se cargan positiva o negativamente. La diferencia que se presenta en el tiempo de inducción calculado puede deberse a la fuerza de atracción generada por la burbuja y la partícula al tener cargas contrarias, a medida que el pH va aumentando, la carga de la burbuja se vuelve más positiva y atrae con mayor fuerza a las partículas que tienen carga contraria como en este caso el cuarzo, el cual presenta un potencial zeta negativo a pH altos según (Yoon & Yordan, 1991).

Además, a pH elevados, se atrae a una mayor cantidad de iones, lo que resulta en la formación de especies moleculares de mayor peso que se adhieren al mineral producto de una mayor afinidad. Esta adhesión disminuye la estabilidad del film, provocando que el tiempo requerido para desplazar el film sea menor. En este contexto, es posible que la disminución reportada a medida que aumenta el pH, sea producto de la cantidad de iones que se adsorbieron en el proceso.

Cabe destacar, que los 3 medios evaluados muestran resultados similares a estudios realizados asociados al pH y tamaño de partícula (Yoon & Yordan, 1991), por lo que siguen un sentido lógico.

#### **4.4.2 Efecto reología en el tiempo de inducción**

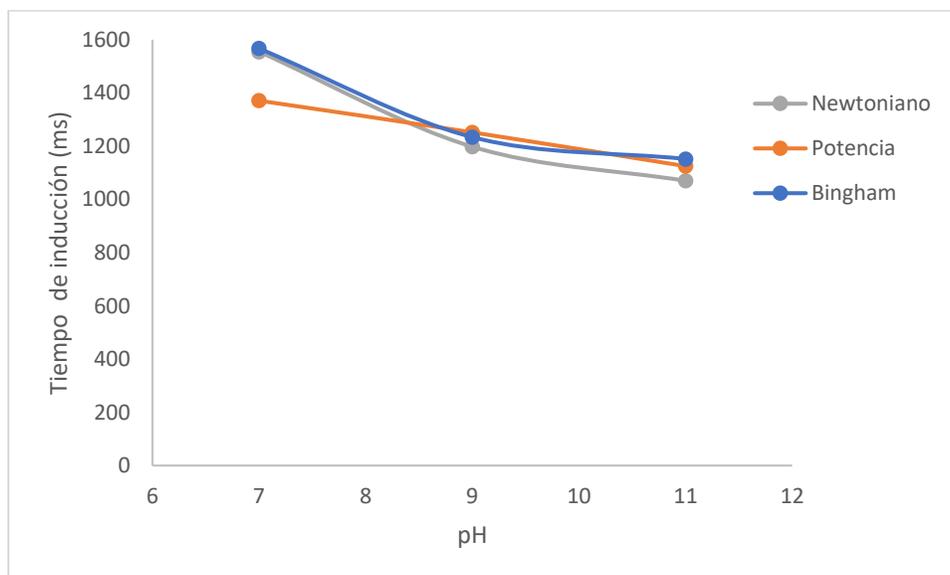
El cambio de reología se evaluó para cada tamaño de partícula de forma individual, así como su comportamiento en cada medio utilizado. En el gráfico presentado en la Figura 32, se puede observar que el fluido que sigue el modelo de ley de Potencia muestra tiempo de inducción menor a pH 7 para un tamaño de partícula correspondiente a la malla 140. Por otro lado, los fluidos Newtoniano y Bingham presentan comportamiento similar en todo el rango de pH, donde el tiempo de inducción del fluido con modificador de Goma Guar es ligeramente superior. Sin embargo, a pH 9 y 11, el fluido de potencia muestra un tiempo de inducción mayor.

Los gráficos presentados en las Figuras 33 y 34, muestran el comportamiento de partículas con tamaños de malla de 230 y 270, respectivamente. Se observa un patrón similar para los 3 medios, donde se ve un decrecimiento progresivo del tiempo de

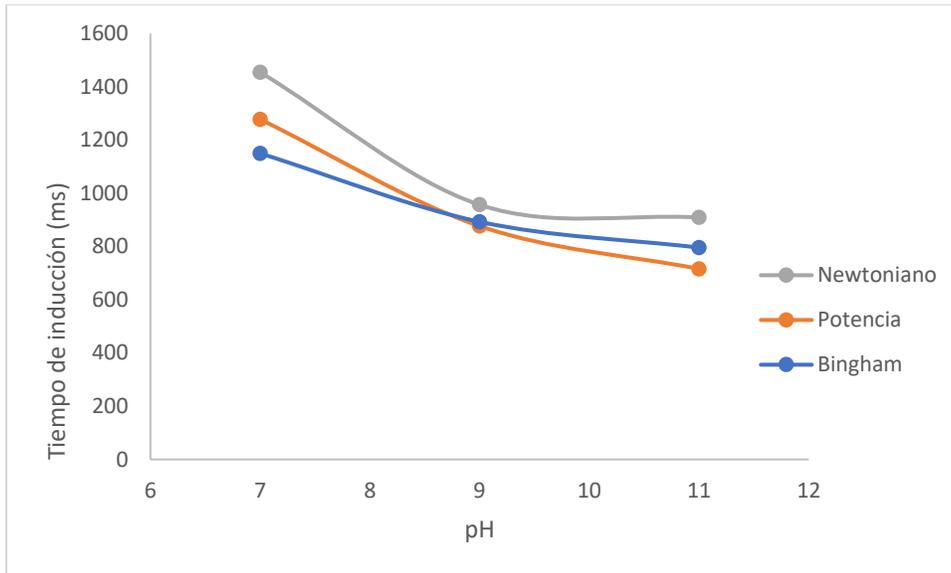
inducción al aumentar el pH, esto se puede deber a las adhesiones de especies producto de las cargas adquiridas por las burbujas como se mencionó en (4.4.1). Además, en esta ocasión, el fluido que presenta un mayor tiempo de inducción es el fluido newtoniano con seguimiento del fluido de Bingham y finalmente el de potencia. Sin embargo, se identifica un caso particular en pH 7 para partículas de malla bajo 230, donde el fluido de Ley de Potencia muestra un mayor tiempo de inducción que el fluido de Bingham.

Las mayores variaciones se reportan en las partículas de menor tamaño. Al utilizar pH 11, las diferencias de tiempo inducción alcanzaron valores aproximados de 300 ms entre el fluido Newtoniano y Ley de Potencia. En contraste, en las partículas de mayor tamaño, la diferencia fue nula, mientras que, para los otros tamaños, los tiempos de inducción se mantuvieron en una diferencia de 100 a 200 ms.

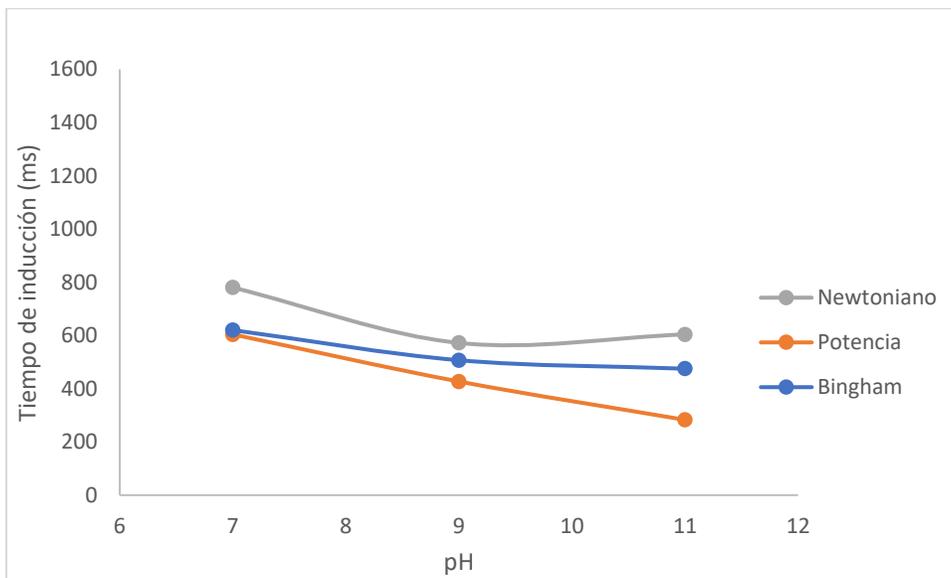
Desde una perspectiva más global, para una mejor comparación, se presenta la Figura 35, que muestra las 9 curvas estudiadas. En ella, se observar un comportamiento similar en todo el rango de pH. Lo más importante a destacar en los resultados obtenidos es que la cinética en el proceso de adhesión no se ve afectada en mayor medida por variaciones en las propiedades físicas del fluido, como la viscosidad, ni por cambios en las propiedades químicas debido al aumento de pH. En cambio, se ve influenciada por propiedades físicas del mineral, como puede ser el tamaño o la forma de las partículas.



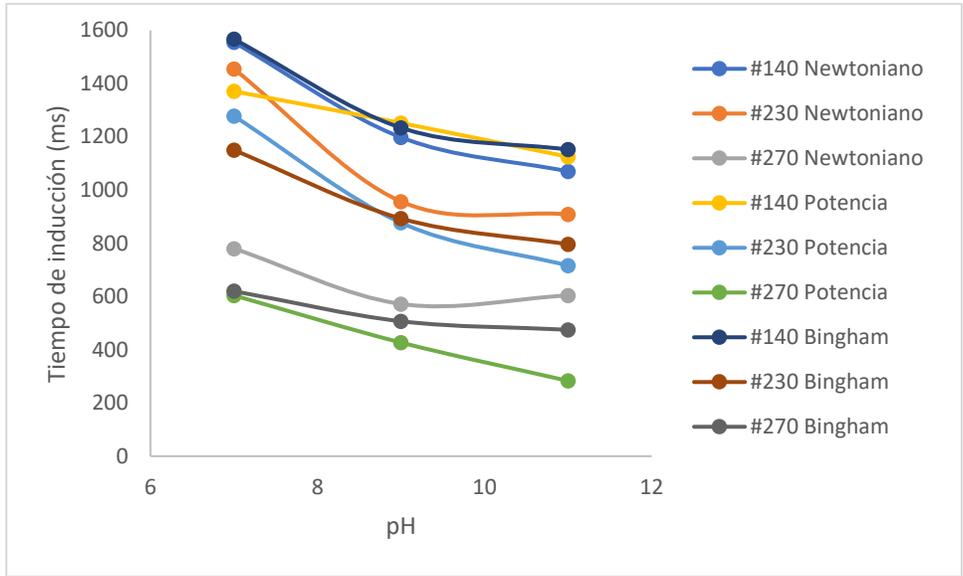
**Figura 32. Efecto reología en el tiempo de inducción para malla 140.**



**Figura 33. Efecto reología en el tiempo de inducción para malla 230.**



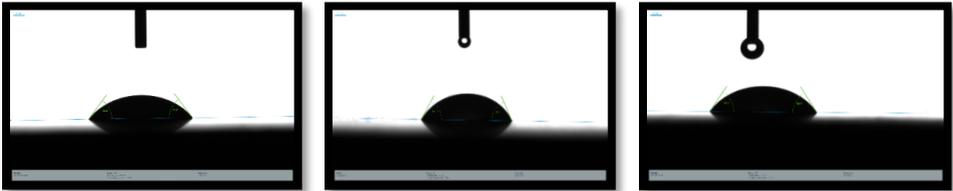
**Figura 34. Efecto reología en el tiempo de inducción para malla 270.**



**Figura 35. Comparación curvas tiempo de inducción.**

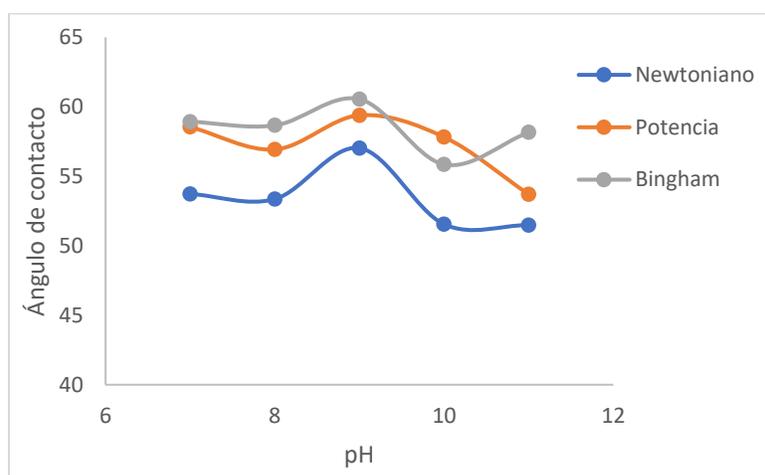
**4.5 Resultados ángulo de contacto**

Como se explicó anteriormente, se llevó a cabo la medición del ángulo de contacto depositando una gota del fluido sobre una pieza de cuarzo. La Figura 36 muestra la gota depositada de cada fluido una vez alcanzado el equilibrio de 3 fases donde se muestra de izquierda a derecha las gotas de fluido newtoniano, potencia y Bingham. Se observa que las gotas de los diferentes fluidos se comportan de forma similar, mostrándose de una forma extendida sobre la superficie del mineral. Esta observación sugiere a simple vista que la superficie es hidrofílica.



**Figura 36. Comparación gotas una vez alcanzado el equilibrio sobre la superficie de cuarzo.**

Después de que las gotas depositadas alcanzaran el equilibrio, el software se encargó de medir el ángulo de contacto izquierdo y derecho para luego promediarlos y dar un resultado final. Además, para ver de mejor manera el comportamiento, los resultados fueron graficados (ver Figura 37). En los tres casos, se observa una leve disminución en el pH 8 y un pico en pH 9, comportamiento que se repite en pH 10 y 11 para fluidos newtoniano y de Bingham. Sin embargo, en el caso del fluido en Potencia, el decremento continúa hasta el pH 11.



**Figura 37. Comparación ángulos de contacto.**

Los resultados exactos son mostrados en la tabla 6. En resumen, prácticamente ninguno de los ángulos evaluados supera los 60 grados. Esto sugiere en primera instancia la presencia de una superficie hidrofílica, ya que evidentemente no se superan los 90 grados. El valor indicado muestra que las fuerzas de cohesión entre las moléculas del líquido son menores que la fuerza de adhesión entre líquido y superficie. Además, se puede observar un leve aumento en el ángulo de contacto con el aumento de viscosidad al pasar del fluido newtoniano al de potencia y Bingham, lo que indica una mayor tensión superficial entre el líquido y el sólido.

**Tabla 6. Resultados ángulos de contacto.**

Fluidos	pH	AC(M), °	AC(I), °	AC(D), °
Newtoniano	7	53.73	53.92	53.55
	8	53.36	52.52	54.19
	9	57.03	56.6	57.47
	10	51.55	50.06	53.04
	11	51.49	51.06	51.91
Ley de Potencia	7	58.55	60.52	56.58
	8	56.93	57.24	56.61
	9	59.39	58.06	60.73
	10	57.82	58.08	57.565
	11	53.70	52.77	54.63
Bingham	7	58.93	58.98	58.87
	8	58.66	57.6	59.73
	9	60.55	62.45	58.65
	10	55.85	56.06	55.65
	11	58.17	57.97	58.36

Por otro lado, al considerar el ángulo de contacto constante debido a los leves cambios obtenidos, se puede inferir que la superficie del cuarzo tiene propiedades químicas o estructurales inertes en términos hidrofóbicos e hidrofílicos al exponerse a estos medios. Además, se puede deducir que las tensiones superficiales de igual manera se mantienen constantes, ya que no se ve afecta la capacidad del fluido para mojar la superficie.

Con respecto al pico mostrado en pH 9 puede deberse a factores que pueden estar afectando propiedades superficiales del mineral, posiblemente debido a cambios en la carga, en la estructura de la capa o adhesión de especies químicas.

A pesar de que el fluido base mostró menores ángulos de contacto, la diferencia con respecto a los demás puede considerarse insignificante, por lo que se vuelve a recalcar que la hidrofobicidad no experimenta cambios significativos según el medio empleado.

## 4.6 Discusiones generales

El objetivo principal de esta investigación fue estudiar el fenómeno del arrastre mecánico, utilizando fluidos no-newtonianos para luego comparar los resultados obtenidos con el fluido base newtoniano. El enfoque se centró en comprender factores como el tamaño de partícula, pH, cambios en la reología, cinética de adhesión entre partícula-burbuja e hidrofobicidad. A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer hallazgos claves que contribuyen al conocimiento en esta área de estudio.

Tomando como variable el tamaño de partícula, se observó que el material recuperado por arrastre en las pruebas de microflotación aumenta con la disminución del tamaño de partícula. Por otro lado, las pruebas de tiempo de inducción indicaron que, a mayor tamaño de partícula, el tiempo de adhesión entre partícula-burbuja lo hace de igual forma. Los comportamientos mencionados se repitieron en todos los fluidos estudiados.

Otro fenómeno que fue consistente, tanto en fluido newtoniano como en no-newtonianos fue la disminución de material recuperado a medida que se lograron niveles altos de pH, comportamiento que se repitió de igual manera en las pruebas de tiempo de inducción.

A modo de comparación, el impacto del cambio reológico al aumentar la viscosidad del fluido utilizado se vio en mayor medida en las pruebas de microflotación, donde se llegaron a valores de aumento en el arrastre del 3% al pasar de fluido newtoniano a fluido modelado por ley de potencia y en 6% al pasar de newtoniano a Bingham. Por otro lado, el cambio reológico para las pruebas de tiempo de inducción y ángulo de contacto indicaron que la cinética de adhesión entre partícula-burbuja e hidrofobicidad son variables independientes al cambio reológico del medio empleado ya que, los resultados no variaron en gran medida a nivel comparativo.

Basándonos en los párrafos anteriores, se puede concluir que el arrastre es predominantemente mecánico y las propiedades químicas no tienen mayores incidencias. El arrastre está principalmente regido por características físicas de las partículas, como su tamaño, así como por propiedades del fluido, como la viscosidad.

Los resultados de esta investigación tienen importantes implicaciones para el diseño de futuros procesos de flotación. Además, sugieren posibles áreas de investigación para futuros estudios. Por ejemplo, sería beneficioso profundizar en el estudio el

comportamiento que pueden tener los minerales de cobre tomando como referencia la calidad de los concentrados y las recuperaciones que se pueden obtener con el uso de fluidos no-newtonianos. Asimismo, investigaciones adicionales que podrían centrarse en la interacción de los fluidos empleados con los aditivos utilizados en flotación.

En resumen, esta investigación proporciona una comprensión adicional a lo que es el fenómeno de arrastre mecánico en flotación y establece una base para futuros avances en este campo.

## 5 CONCLUSIÓN

El estudio del arrastre mecánico en la implementación de fluidos no-newtonianos como alternativa para flotación columnar dejó las siguientes conclusiones:

Uno de los principales factores que aumentan el porcentaje de partículas finas recuperadas es el tamaño de partícula. Mientras más pequeñas sean las partículas, mayor será el arrastre gracias a la influencia que tienen las fuerzas hidrodinámicas generadas dentro de la celda en las partículas suspendidas. Al ser partículas de peso menor, adquieren una mayor facilidad para ascender a la zona de limpieza.

El pH es otro de los factores que tiene gran influencia en el proceso. Al llegar a niveles altos de alcalinidad, el arrastre disminuye significativamente, lo cual puede deberse a factores como la estabilidad de la espuma, esto resulta en una disminución en la recuperación de partículas. Además, en el medio alcalino, se ve favorecida la formación de hidróxidos, los cuales pueden adherirse a la superficie del mineral otorgando un mayor peso a las partículas y así dificultar el ascenso de estas.

Un aumento en el tamaño de las partículas provoca una mayor fuerza de arrastre debido al aumento de su área superficial, esto se ve reflejado en que las partículas de mayor tamaño obtuvieron menores recuperaciones debido al ascenso del fluido. Además, esto se ve reflejado en el balance de fuerzas, la sumatoria de la fuerza peso y arrastre es mayor que la fuerza de empuje por lo que las partículas tienden a permanecer en la parte inferior de la celda.

Un aumento de viscosidad en el fluido provoca una mayor fuerza de empuje por sobre la fuerza peso y arrastre, y dado el movimiento del fluido, las partículas tienden a seguirlo, lo que se traduce en mayores recuperaciones a medida que aumenta la viscosidad a pesar de que la fuerza de arrastre también lo hace.

En el proceso de adhesión, la cinética se ve afectada por el tamaño de partícula. Al ser partículas de mayor tamaño, el film generado entre burbuja-partícula es mayor debido a una mayor área de contacto, lo que tiende a ser más complicado desplazarlo, generando un mayor tiempo de inducción.

Distintos niveles de alcalinidad y acidez en los medios que se exponen las burbujas y los minerales pueden variar las cargas de estos, permitiendo un mayor número

de adhesiones de especies en las superficies lo que se traduce en una disminución de estabilidad en el film y así la obtención de una adhesión más rápida.

La variación de reología no muestra cambios significativos en la capacidad del fluido para mojar la superficie del mineral. Además, se concluye que al obtener ángulos de contacto similares, las tensiones superficiales se mantendrán sin mayores diferencias.

El arrastre es principalmente mecánico y la influencia en las características químicas no tienen mayor relevancia, por lo que se concluye que el cuarzo es completamente inerte al cambio reológico.

## 6 REFERENCIAS

1. Akdemir, Ü., & Sönmez, I. (2003). Investigation of coal and ash recovery and entrainment in flotation. *Fuel Processing Technology*, 82(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00248-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00248-5)
2. Ata, S. (2012). Phenomena in the froth phase of flotation — A review. *International Journal of Mineral Processing*, 102–103, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.MINPRO.2011.09.008>
3. Beneventi, D., Rousset, X., & Zeno, E. (2006). Modelling transport phenomena in a flotation de-inking column: Focus on gas flow, pulp and froth retention time. *International Journal of Mineral Processing*, 80(1), 43–57. <https://doi.org/10.1016/J.MINPRO.2006.01.004>
4. Chau, T. T., Bruckard, W. J., Koh, P. T. L., & Nguyen, A. V. (2009). A review of factors that affect contact angle and implications for flotation practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, 150(2), 106–115. <https://doi.org/10.1016/J.CIS.2009.07.003>
5. Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (2008). Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications. *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications*, 1–518. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8532-0.X0001-7>
6. Cutting, G. W., Watson, D., Whitehead, A., & Barber, S. P. (1981). Froth structure in continuous flotation cells: Relation to the prediction of plant performance from laboratory data using process models. *International Journal of Mineral Processing*, 7(4), 347–369. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(81\)90028-4](https://doi.org/10.1016/0301-7516(81)90028-4)
7. Danoucaras, A. N., Vianna, S. M., & Nguyen, A. V. (2013). A modeling approach using back-calculated induction times to predict recoveries in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 124, 102–108. <https://doi.org/10.1016/J.MINPRO.2013.04.013>
8. Engelbrecht, J., & Et, W. (1975a). The effects of froth height, aeration rate, and gas precipitation on flotation.
9. Engelbrecht, J., & Et, W. (1975b). The effects of froth height, aeration rate, and gas precipitation on flotation.
10. Gu, G., Xu, Z., Nandakumar, K., & Masliyah, J. (2003). Effects of physical environment on induction time of air–bitumen attachment. *International Journal of*

- Mineral Processing*, 69(1–4), 235–250. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00128-X](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00128-X)
11. Hernáinz, F., & Calero, M. (2001). Froth flotation: kinetic models based on chemical analogy. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 40(3), 269–275. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(00\)00125-2](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(00)00125-2)
  12. Johnson, & W., N. (1972). *The flotation behaviour of some chalcopyrite ores*.
  13. Kirjavainen, V. M. (1992). Mathematical model for the entrainment of hydrophilic particles in froth flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 35(1–2), 1–11. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(92\)90002-E](https://doi.org/10.1016/0301-7516(92)90002-E)
  14. Kirjavainen, V. M. (1996). Review and analysis of factors controlling the mechanical flotation of gangue minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 46(1–2), 21–34. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(95\)00057-7](https://doi.org/10.1016/0301-7516(95)00057-7)
  15. Kursun, H. (2014). Effect of Fine Particles' Entrainment on Conventional and Column Flotation. *Particulate Science and Technology*, 32(3), 251–256. <https://doi.org/10.1080/02726351.2013.855684>
  16. Laplante, A. R., Kaya, M., & Smith, H. W. (1989). The Effect of Froth on Flotation Kinetics-A Mass Transfer Approach. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 5(1–4), 147–168. <https://doi.org/10.1080/08827508908952648>
  17. Lightfoot, R. B. (1992). *Fenómenos de transporte*. Barcelona: Reverté, S.A
  18. Neethling, S. J., & Cilliers, J. J. (2009). The entrainment factor in froth flotation: Model for particle size and other operating parameter effects. *International Journal of Mineral Processing*, 93(2), 141–148. <https://doi.org/10.1016/J.MINPRO.2009.07.004>
  19. Pal, R., & Masliyah, J. (1989). Flow characterization of a flotation column. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 67(6), 916–923. <https://doi.org/10.1002/CJCE.5450670608>
  20. Paredes Garcés, Á. R. (2018). *Análisis superficial de secciones finas de pirita y potencial zeta de pirita expuesta a reactivos de flotación en aguas salinas*. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/2863>
  21. Sastri, S. R. S. (1998). *Column Flotation: Theory and Practice*. <http://eprints.nmlindia.org/4354>
  22. Savassi, & N., O. (1998). *Direct estimation of the degree of entrainment and the froth recovery of attached particles in industrial flotation cells*.

23. Shabalala, N. Z. P., Harris, M., Leal Filho, L. S., & Deglon, D. A. (2011). Effect of slurry rheology on gas dispersion in a pilot-scale mechanical flotation cell. *Minerals Engineering*, 24(13), 1448–1453. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2011.07.004>
24. Shi, F. N., & Zheng, X. F. (2003). The rheology of flotation froths. *International Journal of Mineral Processing*, 69(1–4), 115–128. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00120-5)
25. Smith, P. G., & Warren, L. J. (1989). Entrainment of Particles into Flotation Froths. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 5(1–4), 123–145. <https://doi.org/10.1080/08827508908952647>
26. Trahar, W. J. (1981). A rational interpretation of the role of particle size in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 8(4), 289–327. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(81\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0301-7516(81)90019-3)
27. Wang BEng, L. (n.d.). *Entrainment of Fine Particles in Froth Flotation*.
28. Wang, C., Sun, C., & Liu, Q. (2020). Entrainment of Gangue Minerals in Froth Flotation: Mechanisms, Models, Controlling Factors, and Abatement Techniques—a Review. *Mining, Metallurgy & Exploration* 2020 38:2, 38(2), 673–692. <https://doi.org/10.1007/S42461-020-00295-6>
29. Wang, L., Peng, Y., & Runge, K. (2016). Entrainment in froth flotation: The degree of entrainment and its contributing factors. *Powder Technology*, 288, 202–211. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2015.10.049>
30. Wang, L., Peng, Y., Runge, K., & Bradshaw, D. (2015a). A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation. *Minerals Engineering*, 70, 77–91. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2014.09.003>
31. Wang, L., Peng, Y., Runge, K., & Bradshaw, D. (2015b). A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation. *Minerals Engineering*, 70, 77–91. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2014.09.003>
32. Wang, L., Runge, K., & Peng, Y. (2016). The observed effect of flotation operating conditions and particle properties on water recovery at laboratory scale. *Minerals Engineering*, 94, 83–93. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2016.05.003>
33. Wang, L., Xing, Y., & Wang, J. (2020). Mechanism of the combined effects of air rate and froth depth on entrainment factor in copper flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, Vol. 56, iss. 1(1), 43–53. <https://doi.org/10.5277/PPMP19071>

34. Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). Froth Flotation. *Wills' Mineral Processing Technology*, 265–380. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097053-0.00012-1>
35. Yang, X. S., & Aldrich, C. (2006). Effects of impeller speed and aeration rate on flotation performance of sulphide ore. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16(1), 185–190. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(06\)60033-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(06)60033-2)
36. Yarar, B. (2000). Flotation. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0612152025011801.A01>
37. Yianatos, J., Bergh, L., Tello, K., Díaz, F., & Villanueva, A. (2008). Froth mean residence time measurement in industrial flotation cells. *Minerals Engineering*, 21(12–14), 982–988. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2008.05.004>
38. Yianatos, J., & Contreras, F. (2010). Particle entrainment model for industrial flotation cells. *Powder Technology*, 197(3), 260–267. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2009.10.001>
39. Yoon, R. H., & Jordan, J. L. (1991). Induction time measurements for the quartz—amine flotation system. *Journal of Colloid and Interface Science*, 141(2), 374–383. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(91\)90333-4](https://doi.org/10.1016/0021-9797(91)90333-4)
40. Zheng, X., Johnson, N. W., & Franzidis, J. P. (2006). Modelling of entrainment in industrial flotation cells: Water recovery and degree of entrainment. *Minerals Engineering*, 19(11), 1191–1203. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2005.11.005>

## 7 ANEXOS

### 7.1 Código tiempo de inducción

```
% Crear vectores de tiempo de contacto y número de adhesiones
t = [10 30 50 75 100 200 500 850 1200 1600]; %barrido tiempo de inducción
y = [0 0 0 2 2 3 3 3 3 3]; %número de adhesiones

% Crear una matriz con dos columnas que describa los datos
data = [t' y'];

% Crear un objeto "ft" que describa la función  $y_0 + a * (1 - b^x)$ 
ft = fitype('y0 + a * (1 - b^x)');
% Calcular los valores óptimos de los parámetros  $y_0$ ,  $a$  y  $b$ 
opts = fitoptions('Method', 'NonlinearLeastSquares');
opts.StartPoint = [3.5 1 0.9]; % Proporciona valores iniciales para  $y_0$ ,  $a$  y  $b$ 
fitresult = fit(data(:, 1), data(:, 2), ft, opts);

% Mostrar los parámetros  $y_0$ ,  $a$  y  $b$  después del ajuste de curva
disp(['y0: ' num2str(fitresult.y0) ', a: ' num2str(fitresult.a) ', b: '
num2str(fitresult.b)]);

% Predecir el número de adhesiones para un tiempo de contacto dado
t_pred = linspace(min(t), max(t), 100);
y_pred = feval(fitresult, t_pred);

% Mostrar el gráfico del ajuste de curva
plot(t, y, 'o', t_pred, y_pred, '-');
xlabel('Tiempo de contacto (ms)');
ylabel('Número de adhesiones');
title('Ajuste de curva: tiempo de contacto vs. número de adhesiones');
legend('Datos', 'Ajuste de curva');
```

### 7.2 Número de adhesiones en pruebas de tiempo de inducción

Tabla 7. Número de adhesiones para #140 en fluido newtoniano a pH 7.

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0

4	0
5	0
6	1
7	2
8	2
9	2
10	3

**Tabla 8. Número de adhesiones para #140 en fluido newtoniano a ph 9.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	1
7	2
8	2
9	2
10	2

**Tabla 9. Número de adhesiones para #140 en fluido newtoniano a pH 11.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	1
7	2

8	2
9	2
10	2

**Tabla 10. Número de adhesiones para #230 en fluido newtoniano a pH 7.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	1
6	2
7	2
8	2
9	2
10	3

**Tabla 11. Número de adhesiones para #230 en fluido newtoniano a pH 9.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	1
6	2
7	2
8	2
9	3
10	3

**Tabla 12. Número de adhesiones para #230 en fluido newtoniano a pH 11.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	1
7	1
8	2
9	2
10	2

**Tabla 13. Número de adhesiones para #270 en fluido newtoniano a pH 7.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	2
4	2
5	2
6	3
7	4
8	4
9	4
10	4

**Tabla 14. Número de adhesiones para #270 en fluido newtoniano a pH 9.**

Prueba	Número adhesiones
1	0

2	0
3	1
4	2
5	2
6	3
7	3
8	4
9	4
10	4

**Tabla 15. Número de adhesiones para #270 en fluido newtoniano a pH 11.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	1
5	2
6	3
7	3
8	3
9	4
10	4

**Tabla 16. Número de adhesiones para #140 en fluido Bingham a pH 7.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	1

6	1
7	2
8	2
9	2
10	3

**Tabla 17. Número de adhesiones para #140 en fluido Bingham a pH 9.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	2
8	2
9	2
10	2

**Tabla 18. Número de adhesiones para #140 en fluido Bingham a pH 11.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	1
7	2
8	2
9	2

10	2
----	---

**Tabla 19. Número de adhesiones para #230 en fluido Bingham a pH 7**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	2
7	2
8	2
9	3
10	3

**Tabla 20. Número de adhesiones para #230 en fluido Bingham a pH 9.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	2
7	2
8	2
9	2
10	2

**Tabla 21. Número de adhesiones para #230 en fluido Bingham a pH 11.**

Prueba	Número
--------	--------

	adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	2
7	2
8	2
9	2
10	2

**Tabla 22. Número de adhesiones para #270 en fluido Bingham a pH 7.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	2
5	3
6	4
7	5
8	5
9	6
10	6

**Tabla 23. Número de adhesiones para #270 en fluido Bingham a pH 9.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	1

4	1
5	1
6	4
7	4
8	4
9	4
10	4

**Tabla 24. Número de adhesiones para #270 en fluido Bingham a pH 11.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	2
5	2
6	3
7	3
8	3
9	3
10	3

**Tabla 25. Número de adhesiones para #140 en fluido Potencia a pH 7.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	2

8	2
9	2
10	2

**Tabla 26. Número de adhesiones para #140 en fluido en Potencia a pH 9.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	1
6	1
7	1
8	1
9	1
10	2

**Tabla 27. Número de adhesiones para #140 en fluido en Potencia a pH 11.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	2
8	2
9	2
10	2

**Tabla 28. Número de adhesiones para #230 en fluido en Potencia a pH 7.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	1
6	1
7	2
8	2
9	2
10	3

**Tabla 29 Número de adhesiones para #230 en fluido en Potencia a pH 9.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	2
7	2
8	2
9	2
10	3

**Tabla 30. Número de adhesiones para #230 en fluido en Potencia a pH 11.**

Prueba	Número adhesiones
1	0

2	0
3	0
4	0
5	0
6	2
7	2
8	2
9	2
10	2

**Tabla 31. Número de adhesiones para #270 en fluido en Potencia a pH 7.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	1
5	3
6	4
7	4
8	4
9	5
10	5

**Tabla 32. Número de adhesiones para #270 en fluido en Potencia a pH 9.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	0
4	1
5	2

6	3
7	3
8	3
9	3
10	3

**Tabla 33. Número de adhesiones para #270 en fluido en Potencia a pH 11.**

Prueba	Número adhesiones
1	0
2	0
3	1
4	3
5	3
6	3
7	3
8	3
9	3
10	3

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Departamento de Ingeniería Metalúrgica**  
 Hoja Resumen Memoria de Título

<b>Título: Estudio arrastre mecánico en flotación utilizando fluidos no-newtianos</b>
<b>Nombre Memorista: Ignacio Andres Blanco Millacura</b>

<b>Modalidad</b>		<b>Profesor(es) Patrocinante(s)</b>
<b>Concepto</b>		
<b>Calificación</b>		
<b>Fecha</b>	06.03.2024	<b>Prof. Fernando Betancourt Cerda</b>
Prof. <sup>a</sup> Eugenia Araneda H.		<b>Ingeniero Supervisor: Cristian Soto Peña</b>
		<b>Institución: Universidad de Concepción</b>

<b>Comisión (Nombre y Firma)</b>	
Prof. Andrés Ramírez Madrid	Prof. Luver Echeverry Vargas

<b>Resumen</b>
<p>El presente documento presenta los resultados de la evaluación del arrastre mecánico de partículas de cuarzo de distintos tamaños expuestas a distintos pH en fluidos no newtonianos y luego comparar los resultados al fluido newtoniano convencional utilizado en flotación. Además de las pruebas de flotabilidad, se estudió la incidencia de estos medios en la cinética de adhesión burbuja-partícula y la hidrofobicidad del material con el medio utilizado. Para la obtención de los fluidos mencionados se prepararon soluciones con CMC y Goma Guar, ambas a 50 ppm para asemejar fluidos regidos por la ley de potencia y Bingham respectivamente.</p> <p>Las pruebas de flotabilidad indican que, a menor tamaño de partícula, se obtiene una mayor recuperación. Lo anterior se debe a que las partículas más pequeñas se exponen en mayor medida a permanecer suspendidas en el interior de la celda por lo que son más susceptibles a ascender producto del movimiento ascendente del fluido y así llegar a la zona de limpieza en mayor cantidad que las partículas de mayor tamaño, ya que al ser más grande adquieren un mayor peso, y una mayor fuerza de arrastre debido a su mayor área superficial por lo que tienden a quedarse en el fondo de la celda. En lo que respecta al aumento de la viscosidad, en promedio las recuperaciones aumentaron entre un 2 y 3% al aumentar la viscosidad en un 5%. Esto se debe a que las partículas tienen una mayor facilidad de seguir el movimiento del fluido a pesar de que la fuerza de arrastre también lo hizo. Haciendo el balance de fuerzas, sin un cambio en la reología, la fuerza de arrastre aumenta considerablemente al aumentar el tamaño de partícula y sumándola con la fuerza peso, provoca que la fuerza de empuje no sea lo suficiente para permitir su ascenso. Al aumentar la viscosidad, la fuerza de arrastre también aumenta, no obstante, haciendo el mismo balance, podemos ver que la fuerza de arrastre y peso se ven opacadas por el empuje y el movimiento ascendente de un fluido mayormente viscoso.</p> <p>Se comprueba que el arrastre en las pruebas realizadas es netamente mecánico y no químico, ya que las pruebas de hidrofobicidad no mostraron mayores diferencias, llegando a valores máximos de diferencia de 7° entre fluido newtoniano y Bingham a valor de pH 11. Las pruebas de cinética mostraron que el tiempo de inducción se ve afectado mayormente por el tamaño de partícula y no por la reología.</p>