



*Facultad de Metalurgia y Electromecánica*

*Departamento de Metalurgia- Química.*

# **Trabajo de Diploma**

*Tesis en Opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales.*

## **Influencia de la concentración de amoníaco en el sedimentador de CBNi usando floculante FA920.**

***Autor:** Juan Manuel Mora Morales*

*Moa, 2022*



*Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Departamento de Metalurgia- Química.*

# **Trabajo de Diploma**

*Tesis en Opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales*

## **Influencia de la concentración de amoníaco en el sedimentador de CBNi usando floculante FA920.**

*Autor:* Juan Manuel Mora Morales

Firma: \_\_\_\_\_

*Tutores:* Dra. C. María Caridad Ramírez Pérez

Firma: \_\_\_\_\_

Ing. Yuriannis Labrada Peña.

Firma: \_\_\_\_\_

*Moa, 2022*

**DECLARACIÓN DE AUTORIDAD**

*Yo: Juan Manuel Mora Morales*

*Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor de la Universidad de Moa “ Dr. Antonio Nuñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.*

\_\_\_\_\_

*Diplomante: Juan Manuel Mora Morales*

*Tutora: \_\_\_\_\_*

*Dra.C. María Caridad Ramírez Pérez*

*Tutor : \_\_\_\_\_*

*Ing. Yuriannis Labrada Peña.*

**PENSAMIENTO**



*Solo se respetan a los que combaten,  
solo vencen los que luchan,  
solo triunfan los que resisten...*

*Fidel Castro Ruz*

## AGRADECIMIENTOS

*Cuando quieres realmente una cosa, todo el **Universo** conspira para ayudarte a conseguirla. Son muchas las personas que forman parte de ese universo que hizo posible la transformación de este sueño en realidad. En especial quiero agradecer:*

*A **Dios**, el todo poderoso por haberme permitido vivir hasta este día, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias.*

*A mis tutores, Dra.C. María Caridad Ramírez Pérez y al Ing. Yuriannis Labrada Peña por haber brindado una atención especial, su dedicación de tiempo, sus exigencias y señalamientos para la confección del tema y la obtención de resultados de este trabajo.*

*A todos los profesores del Departamento de Metalurgia y Química que contribuyeron en mi preparación en especial, muchas gracias*

## RESUMEN

En la Planta de Calcinación y Sinter de la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara” el proceso productivo se ve continuamente afectado ante variaciones de concentración de amoníaco en el licor de reboso del sedimentador de carbonato básico de níquel. El propósito de esta investigación es determinar la influencia que tienen esas variaciones en el sedimentador del carbonato básico de níquel usando floculante FA920. Para dar cumplimiento del mismo se caracterizó la pulpa a la entrada del sedimentador utilizando el análisis gravimétrico e instrumentos como el densímetro; en el licor de reboso se analizó las concentraciones de níquel total y disuelto a través del empleo de la Espectroscopia de absorción atómica, comprobándose su correspondencia con los requisitos normalizados en el gráfico analítico de control y muestreo de la Planta de Calcinación y Sinter. Mediante un análisis estadístico de datos obtenidos por el laboratorio de dicha Planta en un periodo de tiempo se pudo demostrar a través del cálculo de la media y el coeficiente de correlación que la concentración de níquel disuelto en forma de carbonato aumenta cuando aumenta la concentración de amoníaco en el licor, esto provoca que al tratar de recuperarlo con el floculante, este no cumpla su función.

**Palabras clave:** Amoníaco, Sedimentador de CBNi, Licor de reboso, Floculante.

## SUMMARY

In Calcination and Sinter's plant of the Company Comandante Ernesto Che Guevara the productive process, looks continuously affected in front of variations of concentration of ammonia in the liquor of overflow purpose of this investigation, is to determine the influence that has those variations in the settler of the basic nickel carbonate using flocculant of nickel the sedimentator of basic carbonate FA920. The hitting pays a courteous visit to of the same the pulp was characterized to the settler entrance utilizing the gravity analysis and instruments like the densimeter; in the liquor of overflow you examined the concentrations of total nickel and dissolved through the job of the Spectroscopy of atomic absorption, comprobándose his mail with the requirements normalized in the analytical graphic of control and sampling of Calcination's and Sinter. Through a statistical analysis of data obtained by the said Plant laboratory, in a period of time it was possible to demonstrate through the calculation of the average and the correlation coefficient that the concentration of nickel, dissolved in the shape of carbonate increases when concentration of ammonia in the overflow liquor, this causes that when trying to recover it with the Flocculant, it does not fulfill its function.

**Keywords:** Ammonia, CBNi settler, Liquor of overflow, Flocculant.

## INDICE DE CONTENIDO

|  |      |
|--|------|
| PENSAMIENTO.....   | III  |
| AGRADECIMIENTOS.....   | V    |
| RESUMEN.....   | VI   |
| SUMMARY .....  | VII  |
| INDICE DE CONTENIDO.....   | VIII |
| INDICE DE TABLAS.....  | X    |
| INDICE DE FIGURAS .....  | XI   |
| INDICE DE GRÁFICOS .....   | XII  |
| INDICE DE ANEXOS.....  | XIII |
| ABREVIATURAS Y SIMBOLOS .....  | XIV  |
| INTRODUCCIÓN.....  | 1    |
| CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN .....   | 5    |
| 1.1 Generalidades sobre los procesos de sedimentación.....   | 5    |
| 1.2 Sedimentación floculenta .....   | 10   |
| 1.2.1 Tipos de Floclulantes.....   | 14   |
| 1.3 Antecedentes del trabajo .....   | 17   |
| 1.4 Breve descripción teórica del proceso de sedimentación en la Planta de Calcinación y Sinter  | 18   |
| 1.4.1 Funcionamiento de los sedimentadores de la Planta .....  | 19   |
| 1.5 Conclusiones Parciales .....   | 23   |
| CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS .....  | 24   |
| 2.2 Caracterización de la pulpa de CBNi a la entrada del sedimentador .....  | 24   |
| 2.2 Caracterización del licor de reboso del sedimentador del CBNi.....   | 26   |
| 2.3 Características del floclulante FA920 .....  | 30   |
| 2.3.1 Medios para preparación la solución de floclulante .....   | 32   |
| 2.4 Determinación de la concentración de NH <sub>3</sub> en licor de reboso.....   | 32   |
| 2.5 Análisis estadístico empleado para evaluar el impacto de la concentración del Amoniacó en el reboso de los sedimentador de CBNi..... | 33   |
| CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....  | 35   |

|   |    |
|---|----|
| 3.1 Resultados del análisis de la pulpa de CBNi a la entrada del sedimentador .....     | 35 |
| 3.2 Resultados del análisis del licor de reboso del sedimentador de CBNi .....          | 36 |
| 3.3 Influencia de la concentración de amoniaco en el sedimentador .....                 | 36 |
| 3.3.1 Comportamiento de la concentración de amoniaco en el reboso del sedimentador..... | 38 |
| 3.3.2 Comportamiento de la concentración de níquel disuelto en el reboso .....          | 39 |
| 3.3.3 Comparación de la concentración de níquel disuelto y amoniaco en el reboso .....  | 40 |
| 3.4 Resultados estadísticos que fundamentan los resultados obtenidos.....               | 41 |
| 3.6 Conclusiones parciales del Capítulo 3.....  | 43 |
| CONCLUSIONES GENERALES .....  | 44 |
| RECOMENDACIONES .....   | 45 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 47 |
| ANEXOS.....   | 49 |

## INDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1.4. Productos del proceso de sedimentación del CBNi .....  | 21 |
| Tabla 2.2. Características técnicas del Espectrofotómetro de Absorción Atómica.....   | 28 |
| Tabla 3.1. Características de la pulpa de CBNi a la entrada del sedimentador.....   | 35 |
| Tabla 3.2. Características del licor de reboso del sedimentador de CBNi. ....   | 36 |
| Tabla 3.3. Comportamiento promedio diario de los datos obtenidos por el laboratorio.....  | 37 |
| Tabla 3.4. Relación entre las concentraciones de las variables en cuestión a partir de los valores de Coeficiente de correlación..... | 42 |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Densímetro empleado en la caracterización de la pulpa de CBNi.....           | 24 |
| Figura 2. Balanza analítica utilizada en el análisis gravimétrico. ....                | 25 |
| Figura 3. Espectrofotómetro de Absorción Atómica empleado en la investigación. ....    | 28 |
| Figura 4. Instrumento empleado para las determinaciones del pH. ....                   | 29 |
| Figura 5. Balanza Analítica Digital utilizada en el ensayo de densidad del licor. .... | 30 |

## INDICE DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 1. Comportamiento promedio diario de la concentración de amoniaco en el licor de reboso del sedimentador. .... | 38 |
| Gráfico 2. Comportamiento promedio de la concentración de Níquel disuelto en el reboso.....                            | 39 |
| Gráfico 3. Comportamiento promedio de la concentración de Níquel disuelto y amoniaco en el reboso. ....                | 41 |

## INDICE DE ANEXOS

|   |    |
|---|----|
| ANEXO 1. Datos obtenidos por el laboratorio de la Planta de de Calcinación y Sinter. .... | 50 |
|---|----|

## **ABREVIATURAS Y SIMBOLOS**

**ECC:** Empresa Comandante Ernesto Che Guevara

**CBNi:** Carbonato básico de níquel

**NH<sub>3</sub>:** Amoniaco

**Ni:** Níquel

**LB:** Lateritas de Balance

**HPAL:** Tecnologia de Lixiviación a Presión

**CARON:** Tecnología de lixiviación Carbonato Amoniacal

## INTRODUCCIÓN

La industria cubana del níquel cuenta con más de seis (6) décadas de experiencia en la obtención del níquel y cobalto a partir de los minerales lateríticos, estos recursos han sido la base para el desarrollo de una prominente industria extractiva especializada en la recuperación de los valores de níquel y cobalto presentes en estos minerales.

Los minerales lateríticos de Cuba han sido estudiados considerando dos objetivos fundamentales: uno económico para la extracción del níquel y el cobalto y otro desde el punto de vista de su caracterización físico-mecánica para la construcción de obras civiles, infraestructuras y como materiales de construcción, entre otros usos, (Riverón Saldívar & José, 2021, p. 523).

Para su procesamiento, se utilizan dos tecnologías, la ácida basada en la Lixiviación a Presión (HPAL) por sus siglas en inglés, que utiliza el ácido sulfúrico como reactivo, y la tecnología Carbonato Amoniacal (CARON) por sus siglas en inglés, basada en la lixiviación a presión atmosférica que utiliza el amoníaco. Esta última se lleva a cabo a escala industrial en la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara” de Moa, (Mariño & al, 2009).

La tecnología amoniacal comienza con la extracción del mineral en las minas a cielo abierto de los yacimientos de níquel de Punta Gorda, incorporándose al flujo tecnológico por la Planta de Secaderos y Molinos, a partir de este momento el material circula por las diferentes plantas de proceso entre las que se encuentran: la Planta de Hornos de Reducción, la Planta de Lixiviación y Lavado y la Planta de Calcinación y Sínter, donde culmina la tecnología CARON con la obtención del sínter de níquel más cobalto, (Medrano, Espinosa, & Fernández, 2004).

Una de las operaciones que ocurre en dicha Planta es el proceso de sedimentación de la pulpa de carbonato básico de níquel (CBNi) donde se utiliza floculantes, los cuales aumentan la velocidad de sedimentación de las partículas para ser sometidas posteriormente a un proceso

de filtración y obtener la torta de carbonato básico níquel que se alimenta al horno de tambor rotatorio de dicha planta.

Así, al evaluar aspectos del beneficio mineral de la laterita de los depósitos del nordeste de Cuba deben considerarse los resultados obtenidos por Hernández (1997), Coello et al. (1998) y Hernández et al. (2000) a partir del análisis fraccional de los escombros lateríticos, utilizando como propiedades físicas para la separación de componentes el diámetro y la susceptibilidad magnética de las partículas, (Agyei & Rojas Puron, 2010, p. 37).

Coello advierte sobre la poca eficacia del empleo del criterio de Tjonov (1984) en materiales multicomponentes, como las lateritas, debido a que menas con distintos grados de beneficiabilidad, pueden tener igual índice de contraste, lo que conduce a la necesidad de valorar la separación de los componentes de la mena atendiendo a otras propiedades, que involucren la naturaleza química y mineralógica de las mismas y, a ampliar el rango del estudio granulométrico. Materiales asociados a la LB, como los escombros lateríticos, han sido valorados para su beneficiabilidad teniendo en cuenta su granulometría, (Ramírez, 2002).

Sin embargo, en ocasiones el proceso productivo puede verse afectado a causa de variaciones de la concentración de amoníaco en el sedimentador de CBNi, lo que traería como consecuencias desviaciones de los parámetros de operación establecidos.

A partir de lo expuesto se plantea como **Problema Científico:**

Es insuficiente el conocimiento sobre la influencia de las variaciones de la concentración de amoníaco en el sedimentador de carbonato básico de níquel (CBNi), cuando se usan floculantes como el FA920 en la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara”.

El **Objeto de estudio** lo constituye:

Concentración de amoníaco en el sedimentador de la planta de Calcinación de la ECG.

## **Y el Campo de acción:**

Variación de la concentración de amoníaco en el sedimentador de la planta de Calcinación de la Empresa Ernesto Che Guevara.

### **Objetivo general**

Evaluar la influencia de la concentración de amoníaco en el sedimentador del CBNi de la planta de Calcinación de la Empresa Ernesto Che Guevara, usando floculante FA920.

### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar el proceso de sedimentación de las pulpas de carbonato básico de níquel en la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara”.
- Determinar las regularidades físicas del proceso de sedimentación de las pulpas de carbonato básico de níquel con adición de floculantes.
- Realizar un análisis de la pulpa de CBNi a la entrada del sedimentador (densidad de la pulpa de CBNi, densidad del sólido, % Ni en CBNi y velocidad de sedimentación) y del licor de reboso (concentración de níquel total y níquel disuelto, pH y densidad del licor).
- Evaluar a partir de un análisis estadístico, el licor de reboso del sedimentador (la concentración de níquel total, disuelto y en sólidos en suspensión) a distintas concentraciones de amoníaco para determinar su influencia en el sedimentador cuando se usa floculante FA920.

### **Hipótesis de trabajo**

Si se determinan los principales efectos de la variación de la concentración de amoníaco por encima de lo establecido en los sedimentadores de CBNi cuando se usa floculantes como el FA920, se podrá conocer su influencia sobre el tamaño de partículas de CBNi, lo que incide en los indicadores técnico económico de los procesos posteriores de la Planta.

### **Tareas de investigación**

1. Revisión bibliográfica de trabajos investigativos relacionados con los procesos de sedimentación de pulpas de del CBNi, y en especial, cuando en estos se usa floculantes.
2. Realizar una caracterización de la pulpa de CBNi a la entrada del sedimentador y del licor de reboso.
3. Caracterizar el floculante FA920 utilizado en pulpas de CBNi.
4. Determinar el impacto de las variaciones en las concentraciones de amoniaco en el licor de reboso del sedimentador cuando se usa floculante FA920 a partir de un análisis estadístico.

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se exponen los aspectos teóricos fundamentales de los procesos de sedimentación con floculantes. Se describe cómo ocurre dicho proceso para las pulpas de carbonato básico de níquel en la Planta de Calcinación y Sínter de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” (ECG) y se realiza una revisión bibliográfica de los estudios realizados anteriormente sobre este tema.

### 1.1 Generalidades sobre los procesos de sedimentación

La sedimentación es una operación unitaria de transporte de la cantidad de movimiento, en la que intervienen las fases líquido-sólido; es la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido.

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. (Kasatkin, 1987, pág. 280)

A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. Se habla de *clarificación* cuando se pretende la eliminación de un material denso de su suspensión, siendo éste generalmente de escaso valor (un contaminante o una ganga metalúrgica), en cuyo caso el objetivo es eliminar la fase fraccionada, recuperando un disolvente lo más puro posible (virtualmente libre de partículas sólidas). Es decir, cuando hay un especial interés en el fluido clarificado.

Por otra parte, *espesamiento o concentración*, por el contrario, se utiliza cuando se requiere que el material en suspensión sea más valioso que el disolvente (una mena metalúrgica, por ejemplo) y que interese su recuperación acompañado de la menor cantidad posible de disolvente (con bajo contenido de líquido) es decir, una suspensión concentrada.

Lógicamente pueden perseguirse ambos objetivos simultáneamente, por ejemplo, si se trata de recuperar la fase particulada y recircular el fluido, aunque en los dos casos prevalece una finalidad de separación, (Mariño & al, 2009; Jiménez Guilarte, 2014).

Expresan los autores antes mencionados, que, de manera general, se considera que el objetivo de la operación de sedimentación en el contexto de un proceso industrial o de laboratorio puede ser diverso, y abunda en esta diferenciación de técnicas o suboperaciones de sedimentación.

Las partículas en suspensión sedimentan en diferentes formas, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.

Según (Jiménez Guilarte, 2014), los tipos de sedimentación son:

- *Sedimentación discreta*: tiene lugar cuando las partículas que sedimentan lo hacen de forma individualizada y no varían sus características (forma, tamaño, densidad) durante su descenso, llegándose a equilibrar las fuerzas que actúan sobre las partículas, sedimentando a velocidad constante.

A escala industrial esta forma de sedimentación se presenta en los desarenadores y en los sedimentadores de las plantas de tratamiento de agua.

- *Sedimentación retardada o zonal*: se observa cuando las materias floculadas forman una masa con una concentración relativamente elevada de partículas. La suspensión floculada sedimenta como una masa unitaria presentando una interface distinta durante su descenso. A escala industrial describe la sedimentación de los lodos activados biológicos y los lodos químicos concentrados.

- *Sedimentación por compresión o espesamiento*: se observa cuando las partículas están en contacto físico total unas con otras, que forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, y se produce una reducción del volumen debido a la evacuación del fluido.

A escala industrial este modo se da en la fase de consolidación del sedimento en los sedimentadores. No obstante, se pueden encontrar referencias respecto a los diversos mecanismos de movimiento de las partículas en el seno de un fluido, con relación a un conjunto de partículas sólidas que se encuentran en la corriente de un fluido que se mueve verticalmente, de abajo hacia arriba, a una determinada velocidad.

Se pueden distinguir dos tipos de sedimentación, atendiendo al movimiento de las partículas que sedimentan, (Jiménez Guilarte, 2014) las cuales son:

- *Sedimentación por zonas*: se observa en la sedimentación de suspensiones de alta concentración de partículas sólidas. Las interacciones entre las partículas son importantes, alcanzándose velocidades de sedimentación menores que en la sedimentación libre. La sedimentación se encuentra retardada o impedida. Dentro de los sedimentadores se desarrollan varias zonas, caracterizadas por diferente concentración de sólidos y, por lo tanto, diferente velocidad de sedimentación.
- *Sedimentación libre o individualizada*: se produce en suspensiones de baja concentración de sólidos. La interacción entre partículas puede considerarse despreciable, por lo que sedimentan a su velocidad de caída libre en el fluido.

escala industrial la sedimentación encuentra aplicación de diversos modos, de acuerdo a como operan los aparatos designados como sedimentadores o espesadores, en los cuales las partículas sólidas tienden a descender, siguen la ley de caída libre de un cuerpo en el seno de un fluido, se obtienen de esta forma, en el fondo, un lodo bastante denso y con una concentración de sólidos superior a la de la suspensión alimentada, mientras que, en la parte superior se obtiene un fluido claro que debe estar libre de partículas sólidas.

En tal sentido, dependiendo de cómo se realice la operación, la sedimentación puede clasificarse en los tipos siguientes, (Zelikman, 1982; Kasatkin, 1987):

- *Sedimentación discontinua:* el flujo volumétrico total de materia fuera del sistema es nulo, transcurre en régimen no estacionario. Este tipo de sedimentación es la que tiene lugar en una probeta de laboratorio, donde la suspensión se deja reposar.
- *Sedimentación continua:* la suspensión diluida se alimenta continuamente y se separa en un líquido claro y una segunda suspensión de mayor concentración. Transcurre en régimen estacionario.

Según (Domínguez Lechuga, 2013), existen diferentes factores que influyen de forma directa en la eficiencia de esta operación tales como:

- **Diferencia de densidades entre el fluido claro y el sólido:** La diferencia de densidades influye de forma positiva en la velocidad de separación de las fases, cuando se opera con una mayor diferencia de densidades entre los componentes referidos, de manera que pudiera producirse la separación por decantación del licor claro. Por lo tanto, la velocidad de separación se favorece con un aumento de la diferencia de densidades de estos componentes.
- **La viscosidad del fluido:** La viscosidad del fluido, al igual que la diferencia de densidades, influye de forma positiva en la velocidad de separación si se opera con valores relativamente bajos de esta, ya que para valores altos de viscosidad el líquido ofrece mayor resistencia al movimiento de descenso del sólido, y se dificulta la sedimentación.
- **La temperatura de operación:** La temperatura de trabajo, que aparentemente no se considera en esta operación, ejerce gran influencia en los factores anteriores, puesto que, cualquier variación de esta, provoca efectos marcados en la densidad y viscosidad de los componentes.
- **La estabilidad de la suspensión:** La estabilidad de la suspensión es un factor muy importante. La suspensión puede comportarse como inestable, en el caso de que las fuerzas de atracción de Van der Waals sean las responsables de promover la agregación entre partículas, que incrementa el tamaño de los flóculos lo que favorece el proceso de sedimentación, mientras que una suspensión estable prácticamente no sedimenta.

A consideración del autor, el predominio de la interacción repulsiva o de agregación obedece a la densidad de carga eléctrica superficial ( $\sigma_0$ ) y a la fuerza iónica del medio dispersante, lo cual puede expresarse también mediante el potencial zeta ( $\xi$ ). Tanto  $\sigma_0$  como  $\xi$  son funciones del pH y de la fuerza iónica del medio dispersante.

En los pH correspondientes a puntos de máximos valores absolutos de potencial zeta, las fuerzas repulsivas son más importantes, lo que debe dar lugar a suspensiones más estables con un comportamiento reológico ligeramente pseudoplástico con tendencia a newtoniano.

Por el contrario, al aproximarse el valor de potencial zeta a cero (i.e.p), es de esperar comportamientos plásticos o altamente pseudoplásticos, debido al predominio de las fuerzas atractivas las cuales inducen a la formación de agregados. La magnitud de la densidad de carga eléctrica de las partículas está relacionada con la formación de complejos iónicos en su superficie (en dependencia de las fases mineralógicas o compuestos químicos que forman la fase sólida), la adsorción de iones, la adición de electrolitos, etc.

Un aumento de la fuerza iónica del medio trae consigo un incremento de la densidad de carga y una disminución del potencial zeta, a pH distintos del punto isoeléctrico, debido a la compresión de la doble capa eléctrica, lo que facilita que las partículas se acerquen unas a otras al predominar las fuerzas de Van der Waals. La atracción entre partículas favorece la floculación y, por consiguiente, la sedimentación.

- **Velocidad de sedimentación:** Cuando las partículas son muy finas el proceso de sedimentación se dificulta, se hace muy lento, lo que conlleva al uso de aparatos muy grandes donde la suspensión debe someterse al proceso largo tiempo para obtener la capacidad de producción diaria deseada. Con el fin de incrementar la velocidad de sedimentación en estos casos, se emplean métodos de floculación, que consisten en provocar la formación de agregados de partículas, que tienen un mayor tamaño y peso que las partículas individuales.

La floculación puede ser de naturaleza física, cuando el agrupamiento de las partículas se logra por agitación mecánica leve, por medios magnéticos o por calentamiento; o química, cuando se usan reactantes especiales que forman flóculos grandes que atrapan las partículas pequeñas o que proporcionan cargas eléctricas que hacen atraerse a las partículas (polímeros de alto peso molecular).

## **1.2 Sedimentación floculenta**

La Sedimentación floculenta tiene lugar cuando se producen choques entre las partículas que sedimentan, se pueden agregar formando partículas de mayor tamaño, como resultado de la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas por la adicción de reactivos químicos llamados floculantes y se produce un incremento en la velocidad de sedimentación. Las características de las partículas, como: forma, tamaño y densidad, se cambian durante su descenso. A escala industrial se presenta en la clarificación de aguas y en la concentración de minerales. (Jiménez Guilarte, 2014, pág. 21).

El objetivo principal de la floculación es reunir las partículas desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia.

En la minería, los floculantes utilizados son polímeros sintéticos de alto peso molecular, cuyas moléculas son de cadena larga y con gran afinidad por las superficies sólidas. Estas macromoléculas se fijan por adsorción a las partículas y provocan así la floculación por formación de puentes entre partículas.

Estos floculantes se han desarrollado mucho, puesto que son eficaces a bajas concentraciones para activar la floculación, mejorar la cohesión de los flóculos, aumentar la velocidad de sedimentación y acelerar el tamaño de los lodos al producir grandes flóculos de considerable fuerza mecánica.

Comparados con los polímeros naturales, ofrecen la ventaja de tener una mayor pureza, mayor estabilidad, calidad y eficacia. No añaden sustancias insolubles a los lodos y no modifican las propiedades físico-químicas del agua con el objetivo de reciclar líquidos clarificados.

Para la aceleración y mejora del proceso de sedimentación y clarificación de los licores se utilizan floculantes, aumentando así la capacidad de los equipos de separación líquido-sólido.

Cuando se utilizan reactivos para aglomerar las partículas finas en los equipos de separación sólido-líquido, técnicamente se manifiesta una diferencia entre el efecto de coagulación y el de floculación, aunque muchos productos empleados en la separación sólido-líquido poseen los dos efectos. Un agregado coagulado se volverá a formar después de que haya sido destruido y por el contrario un floculo una vez destruido no volverá a formarse. Percibiendo mayor empleo los floculantes en los procesos de sedimentación ya que las pulpas en la zona de compresión estarán, entre 5 - 60 minutos, bajo una agitación suave. Además, el consumo del floculante es mucho menor que el del coagulante y son mucho más eficaces (mayor velocidad de sedimentación). Por efecto del floculante se puede obtener, más rápidamente, no sólo un sedimentado de mayor concentración en sólidos (menos líquido) sino también en clarificado (rebose) más limpio (menor contenido en sólidos). Según consideraciones de (Jiménez Guilarte, 2014), en un sistema coloidal la floculación no se puede aumentar indefinidamente porque por encima de una concentración óptima la adición de un polímero es contraproducente.

La velocidad de las de suspensiones floculentas depende de las características de las suspensiones, así como de las características hidráulicas de los sedimentadores y de la presentación de procesos concomitantes: floculación por diferencias de velocidades de sedimentación de los flóculos, influencia de la turbulencia y variación de gradientes de velocidad; factores que imposibilitan la preparación de un modelo matemático general, (R.B.Bhappu, 1982). Por este motivo se recurre a ensayos en laboratorios o plantas pilotos con el propósito de predecir la eficiencia teórica remocional en función de las cargas superficiales o velocidades de asentamiento preseleccionadas.

## **Factores que influyen en la floculación química**

Las partículas floculadas poseen dos características importantes de sedimentación. La primera es la estructura complicada de los flóculos. Los agregados tienen enlaces débiles entre las partículas y retienen una gran cantidad de agua dentro de la estructura que acompañan a los flóculos iniciales que sedimentan, aunque estos sedimentan según la sedimentación libre y en principio se cumplen las ecuaciones generales, no es práctico usar cuantitativamente las leyes de sedimentación porque no pueden definirse fácilmente el diámetro ni la forma de los flóculos. La segunda característica de una suspensión floculada es la complejidad de su mecanismo de sedimentación.

Para lograr una buena floculación, tomando como referencia la velocidad de sedimentación de la pulpa y clarificación de los licores, es necesario tener en cuenta una serie de factores como los siguientes:

- **Concentración de sólido:** La estabilidad de los flóculos crece simultáneamente con la densidad de la pulpa, como consecuencia del aumento de la probabilidad de recombinación de los pigmentos de los flóculos rotos. No obstante, para soluciones muy concentradas, la velocidad de sedimentación es muy pequeña debido a la corriente ascendente de fluido desalojado estableciéndose un equilibrio entre ambos fenómenos.
- **Forma de adicionar el floculante:** Con la adición del floculante en varias etapas se obtienen mejores resultados que con la adición en una etapa simple, para la misma suspensión y la misma dosis óptima en ambos casos. Uso de múltiples puntos de adición, reduce la duración de la agitación necesaria para completar la distribución del floculante y el mismo método favorece la floculación, (Rodríguez, 1986) .
- **Agitación:** La agitación prolongada puede causar una defloculación, ruptura mecánica de los flóculos, de toda forma es necesario un óptimo estado de agitación para lograr que las partículas se acerquen lo suficiente para formarse puentes, (Rodríguez, 1986).
- **Influencia de la temperatura de la pulpa:** Un aumento de la temperatura de la pulpa no mejora la floculación, estudios dicen que una pulpa a 35 °C da peores resultados que a 10 °C .Sin embargo estudios demuestran que en las pulpas de carbonato la temperatura influye directamente en la densificación de la pulpa, pulpas con densidades parecidas al aumentar la temperatura, el % de sólidos es mayor, (González, 1978).

- **Modificación de la pulpa, licor y floculante en función del tiempo**

Los estudios deben realizarse de forma inmediata, con el tiempo pueden cambiar su composición. Por ejemplo, el agua conservada después de algunos días sufre modificaciones, sin embargo, los floculantes no deben utilizarse inmediatamente después de preparada la solución, sino que es necesario un cierto tiempo de maduración para que su eficiencia sea óptima. Esto varía con el tipo de floculante.

Así, con los orgánicos naturales varía entre 2 y 15 horas y con los sintéticos del orden de 30 minutos, la temperatura del agua con la que se prepara el floculante juega un papel importante, con agua muy fría se necesita un tiempo de maduración más largo.

Además, se ha demostrado que existe un punto a partir del cual, el aumento de la temperatura produce peores resultados a la temperatura de ebullición del agua. Los envases donde se preparan necesitan estar bien limpios para evitar el desarrollo de microorganismos por lo tanto las cubas deben de ser de acero inoxidable y limpiadas periódicamente con formol.

- **El pH:** Puede afectar a la cantidad y tipo de cargas presentes en una superficie sólida y la cantidad de carga libre y por tanto a la configuración del polímero en solución, un polímero catiónico tiende a ser más eficazmente absorbido en una superficie aniónica que en una neutra. En un polímero aniónico, la fase de absorción es en gran parte, debida al mecanismo no específico de Van der Waals y puede no estar influenciado por consideraciones de carga y estos son más efectivos en soluciones alcalinas, (Domínguez Lechuga, 2013).

Habitualmente la eficacia máxima en medio muy ácido, a pH de 1 a 1,5, decrece a continuación hasta pH igual a 5 y vuelve a ascender hasta alrededor de un pH de 7,5 a 8 formando bien un pico, después presenta un mínimo a pH igual 10 pero posteriormente presenta un intervalo ascendente.

- **Peso molecular del floculante:** Un aumento del peso molecular conduce a un aumento en la relación óptima floculante/sólido.

- **Dosis óptima del floculante:** Para una cierta concentración de sólido todo el polímero añadido es absorbido sobre los mismos. El punto a partir del cual el polímero no es totalmente absorbido corresponde a la dosis óptima que será la cantidad máxima de polímero que puede ser absorbido sobre el sólido para producir un sistema floculado. Con el incremento de la dosis de floculante se ha comprobado que disminuye la máxima densificación de las pulpas.
- **Influencia de la superficie del sólido:** La dosis óptima de floculante es directamente proporcional a la superficie específica del sólido, es decir, el tamaño y la forma de los granos

**Otros factores:**

1. La capacidad de hinchamiento de algunas arcillas, o sea, su aumento de volumen a la entrada de agua a formar parte de su estructura.
2. La solubilidad del sólido en el líquido.
3. La viscosidad del líquido.
4. uso indiscriminado de polielectrolito, sin un estudio detallado, puede conducir a no conseguir los resultados esperados.

**1.2.1 Tipos de Floculantes**

Según (Domínguez Lechuga, 2013), los floculantes se clasifican en:

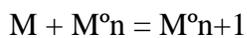
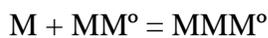
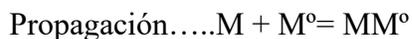
- **Floculantes inorgánicos o electrolitos:** Cuyo objetivo es disminuir las fuerzas de repulsión como consecuencia de la doble capa y de potencial electrocinético. Los electrolitos han sido los primeros floculantes usados.
- **Floculantes naturales:** Estos son compuestos orgánicos y están formados por polisacáridos cuyo principal representante es el almidón o sus derivados.
- **Floculante sintético:** La distinción entre polímeros naturales y sintéticos no está muy clara, es difícil establecer el límite entre ambos grupos. Los floculantes sintéticos son

polímeros lineales de elevado peso molecular, solubles en agua, efectivos generalmente a concentraciones muy pequeñas y poseen grupos activos distribuidos a lo largo de sus cadenas que tienen gran afinidad por la superficie sólida. El principal mecanismo de floculación de estos agentes es la formación de puentes, aunque los otros tipos contribuyen a la misma.

Por ejemplo, la reducción del potencial electrocinético mediante la absorción de iones del polímero cargado opuestamente en la doble capa, influyen la floculación, pero no es el mecanismo principal, esto se demuestra porque suspensiones cargadas negativamente son floculadas frecuentemente con éxito por floculante iónico, los cuales pueden solamente incrementar el potencial electrocinético. Se dividen en tres clases diferentes:

✓ Floculantes sintéticos no iónico:

Son casi exclusivamente poliacrilamidas preparadas por polimerización de la acrilamina bajo la acción de catalizadores de oxidación-reducción o iniciadores de cadena. Un esquema del mecanismo en cadena iniciada por radicales libres que crean lugares activos para el comienzo del crecimiento de la cadena es el siguiente:



donde:

$\text{X}^\circ$  : radical libre producido por adición del iniciador.

$^\circ$  : Lugar activo.

M = Monómero.

Los radicales libres se producen mediante pequeñas cantidades (miliequivalente por litro de solución acrilamida) de iniciadores químicos y su actividad se transfiere primero del iniciador al monómero y es retenida por la cadena creciente hasta que se termina. Las poliacrilamidas,

con un peso molecular comprendido entre 1 y 5 millones, tienen un grado de polimerización del orden de 15000.

✓ Flocculantes iónicos o polielectrolitos:

Estos poseen características de electrolitos simples tales como cargas eléctricas o grupo ionizables, capaces de experimentar disociación electrolítica o grupos ionizables, capaces de experimentar disociación eléctrica para los iones altamente cargados. La carga adquirida por una solución de polielectrolitos depende del grado de ionización y consecuentemente del pH del medio. A partir de una cadena de poliacrilamida estándar se puede volver positivo o negativo el polímero. Por tanto, estos pueden ser: aniónicos o catiónicos:

a) Los polielectrolitos aniónicos están representados por:

- Poliacrilamidas parcialmente hidrolizada, ejemplo: Los Separan, Aerofloc 3453.
- Ácidos poliacrílicos.
- Poliacrilnitrilos hidrolizados, tales como Aerofloc, Pang.
- Ácidos poliestirenos sulfónicos.
- Ácidos polivinilsulfónicos.
- Derivados de las celulosas.

b) Los polielectrolitos catiónicos están representados por:

- Poliacrilamida parcialmente sustituida con grupos amonio cuaternario.
- Polietileniminas.
- Polivinilaminas.
- Polivinilpiridinas.

**Floculantes copolímero** Estos pueden obtenerse por copolimerización directa de monómeros mezclados, o mediante modificación subsecuente de un homopolímero, entre estos se encuentran: copolímero estireno – ácido maleico, copolímero ácido acrílico – ácido maleico, copolímero acetato de vinilo – anhídrido maleico, como los Lytron.

### 1.3 Antecedentes del trabajo

Para la realización de este trabajo se ha hecho una intensa búsqueda bibliográfica, se han consultado una serie de artículos, revistas y otros materiales, donde se pudo comprobar que existe muy poco material para el objeto de estudio. Esta búsqueda estuvo dirigida en dos líneas fundamentales como son: la información relacionada con el enfoque teórico - metodológico y los trabajos efectuados sobre los procesos de sedimentación del CBNi con el uso de floculantes que se han realizado en los últimos años.

Al evaluar la velocidad de sedimentación, (Medrano, Espinosa, & Fernández, 2004, pág. 32) , realizaron pruebas en la descarga de los alambiques y en la línea de carbonato en la planta de Calcinación de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, demostrando que al disminuir el flujo de licor producto de los alambiques, desde 110 hasta 60 m<sup>3</sup>/h, se estabilizaron los parámetros relacionados con la calidad del CBNi en cuanto a velocidad de sedimentación, lográndose velocidades por encima de 6 m/h en la pulpa de CBNi. A nuestro juicio, los autores no definen con exactitud las causas de las mejoras obtenidas.

En la Empresa “René Ramos Latourt” (García & Rojas, 2006, pág. 46), evalúan en pulpa de mineral reducido y pulpa de sulfuro de níquel, cinco floculantes, los CHEMADD A-41, 42 y 43 de la firma CHEMATEK, con el IP-600 de la firma ZAR CIA y el Percol, versión canadiense del MAGNAFLOC R-155. En los experimentos se reportó incremento en la velocidad de sedimentación y una disminución del porcentaje de los sólidos en suspensión en el licor, pero no identifican el de mejor resultado; todos los floculantes se comportaron de forma similar. No se tiene conocimiento de similar comportamiento de la sedimentación para floculantes con diferentes formulaciones al aplicarlos en esta pulpa.

Un modelo estadístico-matemático de regresión ajustado obtuvo (Domínguez Lechuga, 2013), en su trabajo de grado, que se adecua al rango de las variables y los niveles experimentados para la sedimentación del carbonato de níquel y se obtiene una respuesta optimizada que permite alcanzar las mejores condiciones tecnológicas de sedimentación con la adición de

floculantes. Esta autora demostró que con la utilización de floculante en el proceso de sedimentación de las pulpas de CBNi se logra mayor eficiencia en este proceso.

Al realizar una evaluación a escala de laboratorio y en pulpas de CBNi lixiviadas en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” del comportamiento de la sedimentación al añadir los floculantes: PICIZ 7010, AN 910SH y Quimifloc N-30, (Beyris Mazar & Espinosa Espinosa, 2016, pág. 11), demostraron que con este último se incrementa la densidad de la pulpa ; se mejora la clarificación de los licores al disminuir los sólidos en suspensión hasta un 75 % y disminuye ligeramente el área unitaria requerida.

En las investigaciones antes relacionadas no se ha encontrado ninguna que logre explicar la influencia de la concentración del amoníaco en los sedimentadores de CBNi cuando se usan floculantes.

#### **1.4 Breve descripción teórica del proceso de sedimentación en la Planta de Calcinación y Sinter**

La pulpa de carbonato básico de níquel es una mezcla de carbonato básico de níquel con agua producto del proceso de destilación en las torres destiladoras (Alambiques de licor) de la Planta de Recuperación de Amoníaco.

El proceso comienza una vez que los alambiques descargan el carbonato básico de níquel a los sedimentadores a una temperatura de (90 a 102) °C aproximadamente, con una concentración de amoníaco menor a 2 g/L.; con un 98 % de líquido, evaporándose parte de éste a través del tanque flash.

El carbonato básico de níquel es descargado a los sedimentadores de 25 m de diámetro y con una profundidad nominal en el centro de  $h = 3,6$  m; donde ocurre la separación de dos fases, la líquida y la sólida, sedimentando el carbonato básico de níquel.

Los productos del proceso de sedimentación son el licor de reboso y la pulpa de carbonato básico de níquel.

El *licor de reboso* producto de la separación de dos fase, cuya concentración de níquel disuelto es menor o igual a 0,12 g/L y el total menor o igual a 0,20 g/L, sale por la canal de reboso del sedimentador hacia el tanque de reboso, cuya capacidad es de 75 m<sup>3</sup> cada uno; este licor es bombeado hacia el sedimentador clarificador, pasando previamente por un reactor tubular donde se adiciona Sulfuro de Amonio (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S o Hidrógenosulfuro de Amonio (NH<sub>4</sub>HS), recuperándose el níquel disuelto y en suspensión mediante la adición de floculante a la entrada del sedimentador clarificador.

La *pulpa de carbonato*: Se extrae por el fondo del sedimentador por medio de bombas que la envían a los filtros rotatorios al vacío, los cuales tienen la función de eliminar el agua presente en la pulpa hasta valores de 66 %.

#### **1.4.1 Funcionamiento de los sedimentadores de la Planta**

En los sedimentadores radiales con un llenado óptimo de pulpa y con un régimen de operación correcto existen varias zonas.

En la parte superior se encuentra la zona líquida clara (licor de reboso), donde ocurre la precipitación libre de las partículas. Abajo se encuentra una zona más oscura, comprimida. En esta zona, la separación del líquido del sólido ocurre como resultado de la presión existente producida por el material de la parte superior, (Gonzalez Cañivano, 1984, p. 19).

La capa de sedimento se comprime y apelmaza complementariamente por los rastrillos o brazos.

En el proceso de sedimentación que ocurre bajo la acción de la fuerza de gravedad, influyen inexorablemente la composición mineralógica y granulométrica del material (carbonato), forma de las partículas, el contenido de sólidos en la pulpa de entrada, la densidad de la fase

sólida y la líquida, la viscosidad del líquido, la temperatura de la pulpa, el pH del medio y la existencia de otros agentes reaccionantes como son: floculantes, etc.

La influencia del tamaño de las partículas, la densidad de las fases líquidas y sólidas, la viscosidad del líquido, sobre la velocidad de sedimentación de las partículas se caracteriza por la ecuación donde la velocidad de sedimentación es una función:

$$F = (r, d, q, v).$$
$$V = \frac{2 \cdot \tau^2 (d - d_1) \cdot g \cdot d_1}{9 \cdot v} \quad (1)$$

donde:

V - Velocidad de sedimentación de las partículas; cm/s

$\tau$  - Radio de las partículas; cm

g - Aceleración de la fuerza de gravedad; cm/s

d - Densidad de la fase sólida; g/cm<sup>3</sup>

d<sub>1</sub> - Densidad de la fase líquida; g/cm<sup>3</sup>

v : Coeficiente de viscosidad del líquido de puaza.

Como se puede observar, el trabajo de los sedimentadores continuos depende de las características propias de la suspensión.

En un sedimentador continuo tal y como se ha mencionado anteriormente, la alimentación llega por el dispositivo central de forma tal que provoque una agitación mínima, (Domínguez Lechuga, 2013, p. 24).

La suspensión original fluye hacia abajo y luego cambia de dirección, tomando la radial desde el centro y hacia arriba, hacia el reboso. Los sólidos en suspensión tienden a sedimentar en el seno del líquido que se encuentra relativamente tranquilo, aunque se mueve en sentido radial y hacia arriba alejándose del lado compacto. Este sedimento se comprime, apelmaza en la parte inferior del depósito y es trasladado por el rastrillo o brazos giratorios hacia el centro del fondo del sedimentador.

La acción del rastrillo consiste en empujar el sedimento hacia el orificio de descarga comprimiéndolo mucho más. Cuando la velocidad de alimentación no resulta excesiva y se obtiene un líquido efluente adecuadamente clarificado la zona superior o de clarificación en el proceso es una región en la cual los sólidos están presentes a tan escasa concentración que el mecanismo se asemeja al de la sedimentación libre.

La zona de espesamiento se encuentra inmediatamente debajo de esta región transparente. Cuando la velocidad de alimentación de un espesador continuo excede el valor máximo que el espesador puede tratar para producir un reboso clarificado, las partículas sólidas son incapaces de precipitar fuera de la zona normal de clarificación y por ello se eleva su concentración en la misma.

Esto provoca una sedimentación retardada con la correspondiente disminución respecto a la observada para la suspensión original. Este estado de cosas es un ejemplo de clarificación incompleta del reboso. La intensidad de la alimentación que precisamente deja de provocar dicha sedimentación obstaculizada o retardada representa la velocidad máxima de alimentación para lo cual los sólidos en suspensión pueden alcanzar la zona de compresión.

**Tabla 1.4.** Productos del proceso de sedimentación del CBNi

| <b>Pulpa de CBNi</b>   |             |     |
|--|-------------|-----|
|  |             | U/M |
| Concentración de níquel  | $\geq 48$   | %   |
| Concentración de $\text{NH}_3$   | $< 2$       | g/L |
| Velocidad de sedimentación entrada al Sedimentador<br>(mínimo)             | 6,0         | m/h |
| <b>Licor de reboso</b>   |             |     |
| Ni total   | $\leq 0,20$ | g/L |
| Ni disuelto  | $\leq 0,12$ | g/L |
| $\text{NH}_3$  | $< 2$       | g/L |
| Después de tratado con $\text{NH}_4\text{HS}$ o $\text{NaHS}$ y floculante |             |     |

|                 |        |     |
|-----------------|--------|-----|
| Ni total        | <0,05  | g/L |
| Ni disuelto     | <0,003 | g/L |
| NH <sub>3</sub> | < 2    | g/L |

De esta forma quedó descrito el proceso de sedimentación del CBNi en la Planta de Calcinación y Sinter de la empresa objeto de estudio, lo que permitió determinar las peculiaridades del proceso que nos ocupa en la presente investigación.

## **1.5 Conclusiones Parciales**

- Las investigaciones realizadas con anterioridad demuestran la efectividad del uso de floculantes para mejorar las condiciones de sedimentación de pulpas de CBNi.
- Aunque en la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" se emplea la floculación de las pulpas de carbonato de níquel con resultados favorables, no se ha estudiado la influencia de la concentración de  $\text{NH}_3$  en el sedimentador o en el licor floculado.

## CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo exponen los principales métodos, procedimientos y condiciones en las que se realizará el análisis estadístico y la gestión de los datos necesarios para la evaluación de la influencia de la concentración del amoníaco en el sedimentador de pulpas de carbonato básico de níquel.

### 2.2 Caracterización de la pulpa de CBNi a la entrada del sedimentador

Para caracterizar la pulpa de carbonato básico de níquel, proveniente de la destilación del licor producto, se tomaron muestras puntuales en la entrada del sedimentador con el objetivo de determinarle:

- ✓ **Densidad de la pulpa.** Se aplicó la norma de empresa NEIB- 61-03-02: 2021. Fue medida con el empleo de un Densímetro, la cual es una herramienta de medición que permite determinar la densidad relativa de un líquido. Se utiliza de la siguiente forma, (Jiménez Guilarte, 2014):

El líquido a ensayar se vierte en una probeta graduada o un vaso de precipitado suficientemente grandes que permita medir la densidad con este instrumento. El densímetro se introduce suavemente en el líquido hasta que este flote libremente. El punto donde la superficie del líquido toca el vástago del densímetro es posible ver la escala graduada del densímetro, lo cual permite realizar la lectura de la medida de la densidad relativa del líquido. La figura 1 muestra el densímetro empleado en la investigación.



**Figura 1.** Densímetro empleado en la caracterización de la pulpa de CBNi.

- ✓ Densidad del sólido. Se obtuvo utilizando una balanza analítica y una probeta graduada de 1 000 mL de capacidad.
- ✓ % de níquel en el CBNi. Fue obtenida a partir de un análisis gravimétrico utilizando la balanza analítica de alta precisión, que se ilustra en la figura 2.



**Figura 2.** Balanza analítica utilizada en el análisis gravimétrico.

El análisis gravimétrico se basa en dos medidas experimentales: el peso de la muestra tomada; y el peso del sólido obtenido a partir de esta muestra. Los resultados del análisis se expresan frecuentemente en porcentajes de analito, A:

$$\% \text{ Ni} = \frac{\text{Peso Ni}}{\text{Peso de la muestra de CBNi}} \quad (2)$$

- ✓ Velocidad de sedimentación. Fue medida utilizando una probeta de 1 000 mL de capacidad, con tapón, una cinta milimetrada, una fuente lumínica. y un cronómetro.

El ensayo se realizó bajo la norma de empresa NEIB- 64-10-11: 2021, que expresa que la porción de ensayos se toma directamente de la muestra de laboratorio previamente homogeneizada y para medir la velocidad de sedimentación se procede de la siguiente forma:

- Resalte la marca de la cinta milimetrada cada 10 cm.

- Ajuste la cinta milimetrada a la probeta, haciendo coincidir el cero de esta con la marca de 1 000 mL de la probeta.
- Homogeneice la muestra y viértala en la probeta hasta la marca de 1 000 mL
- Coloque el tapón a la probeta y agite bien el contenido, volteándola 10 veces seguidas. Al finalizar la agitación sitúe la probeta sobre una superficie plana y ponga a funcionar el cronómetro.
- Espere la definición de las fases líquido – sólido. Observe la altura a que se encuentra la cama de sólido y anote la lectura como H, a intervalos de tiempo de dos minutos, auxiliándose de una fuente lumínica.
- Continúe haciendo lecturas cada dos minutos hasta que se haga constante el valor de dos lecturas consecutivas, esta última lectura se corresponderá con la altura total (Ht).

La velocidad de sedimentación se basa en la medición de la altura total sedimentada de la cama de sólidos en función del tiempo. Por lo tanto la velocidad de sedimentación por la expresión:

$$V_s = \frac{H_{total}}{t} \cdot 0,06 \quad (3)$$

donde:

Vs: Velocidad de sedimentación (m/h)

H total: Altura total alcanzada por el sólido sedimentado (mm)

t: Tiempo total transcurrido hasta la última lectura (min)

0,06: Factor de cálculo para convertir la altura tomada de mm a m y el tiempo total de min a h.

## 2.2 Caracterización del licor de reboso del sedimentador del CBNi

Para caracterizar el licor de reboso del sedimentador de carbonato básico de níquel fue necesario tomar muestras de licor en el toma muestra colocado en la línea de reboso del sedimentador, a estas muestras se les determinó:

- ✓ Níquel total.
- ✓ Níquel disuelto.

Para la determinación del níquel total y el níquel disuelto se utilizó como instrumento un Espectrofotómetro de Absorción Atómica ubicado en el laboratorio central de la empresa.

El Análisis por Espectrofotometría de Absorción Atómica es una técnica de medición de magnitudes químicas de elementos químicos (análisis cuantitativo).

Se basa en la excitación de los electrones de un elemento determinado mediante la acción de una llama de oxígeno y acetileno también llamada llama de oxidación, posteriormente se emplea una lámpara de cátodo hueco del mismo elemento a analizar. No es más que la absorción selectiva de radiaciones electromagnéticas de diversas regiones del espectro por el sistema homogéneo.

Se realizó bajo la norma de empresa NEIB- 64-01-12: 2020 “*Determinación de níquel y cobalto – Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica con Cloruro de Amonio*”. Esta norma establece el procedimiento para la determinación por espectrofotometría de absorción atómica de níquel y cobalto en licores amoniacaes para concentraciones de níquel entre (0,001 a 2,99) g/L y concentraciones de cobalto entre (0,005 a 0,500) g/L.

Segun la norma de empresa NEIB- 64-01-12: 2020 La porción de ensayo es tratada con cloruro de amonio para disminuir la evaporación del amoníaco. En el caso que la muestra sea para la determinación del níquel total se adicionan además 5 mL de ácido clorhídrico diluido.

La lectura espectrofotométrica del níquel y el cobalto se realiza directamente del frasco volumétrico, empleando la longitud de onda de mayor sensibilidad, utilizando lámparas de cátodo hueco y como fuente de atomización la llama. La medición espectrofotométrica del níquel se realiza a una longitud de onda de 248,3 nm.

En la figura 3 se muestra el equipo para realizar los análisis de espectrofotometría de absorción atómica.



**Figura 3.** Espectrofotómetro de Absorción Atómica empleado en la investigación.

Las características técnicas del equipo se muestran en la tabla siguiente.

**Tabla 2.2.** Características técnicas del Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

| <b>Características</b>  | <b>Especificaciones</b> |
|-------------------------|-------------------------|
| Combustible             | Acetileno               |
| Oxidante                | Aire                    |
| Temperatura, K          | 2100 a 2400             |
| Velocidad de combustión | 158 a 266               |
| Tipo de cátodo          | Hueco                   |

- ✓ Determinación de pH.

Para la determinación se utilizó como instrumento de medición un pHmetro-mV de la marca Philips de precisión 0,001pH/ °C, como se refleja en la figura 4



**Figura 4.** Instrumento empleado para las determinaciones del pH.

- ✓ Densidad del licor.

Fue obtenida utilizando una probeta graduada de 1 L de capacidad y una balanza digital de 3 200 g, que se muestra en la figura 2.5. Se aplicó la norma de empresa NEIB 61-03-01:2021. Se calculó la densidad del licor de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$\rho_{licor} = \frac{P_{promedio} - P_{p.vacia}}{V_{licor}} \quad (4)$$

donde:

$\rho_{licor}$ : Densidad del licor, g/L.

$P_{Promedio}$ : Peso promedio obtenido, g.

$P_{Prob\ vácia}$  : Peso de la Probeta vácia ,g.

$V_{Probeta}$  : Volumen de la Probeta , 1L.



**Figura 5.** Balanza Analítica Digital utilizada en el ensayo de densidad del licor.

El licor de reboso de sedimentador de CBNi va un clarificador, donde se le inyecta floculante con el objetivo de recuperar la mayor cantidad de níquel disuelto en este licor e incorporarlo a la torta previamente obtenida.

### **2.3 Características del floculante FA920**

El floculante FA920 es un floculante aniónico a base de poliacrilamida de alto peso molecular, el mismo actúa de manera eficaz como ayuda de coagulación o agente acondicionador de lodos en procesos de separación líquido - sólido en una amplia gama de procesos a escala industrial.

Las soluciones madres se pueden preparar con una concentración de hasta 0,5 % a través de una unidad de preparación automática. Las soluciones deben añejarse unos 30 a 60 minutos para lograr la máxima eficacia.

Debe utilizarse agua de alta calidad y el agua para la disolución secundaria debe añadirse a la solución madre justo antes de dosificar, en una proporción al menos de 10:1, evitándose el uso de bombas centrifugas para el trasiego del polímero.

**Datos generales:** Polímero del ácido acrílico (poliacrilamida aniónica).

Formula química:  $(C_3H_5NO)_x$

### Propiedades típicas

- Apariencia: Polvo blanco granular.
- Peso molecular Alto:
- Medio Densidad, ( $kg/m^3$ ): 750 +/-50
- pH, (solución 0,5 %, 25 °C): 5 a 7
- Olor: Inodoro.
- Color: Incoloro.
- Viscosidad, (cps):

|        |     |
|--------|-----|
| 0,10 % | 10  |
| 0,25 % | 30  |
| 0,50 % | 100 |
- Acrimina Libre: >500 mg/kg
- Concentraciones recomendadas para la solución:
  - ✓ Solución madre: 0,25 - 0,5 % máx.
  - ✓ Solución para alimentación: 0,025 - 0,05 % máx.

En cuanto a su almacenamiento se recomienda no utilizar contenedores ni equipos de hierro, cobre o aluminio. Es un material hidroscópico y con el objeto de mantener su integridad no debe exponerse a la humedad ni a temperaturas superiores a 35 °C . El producto en polvo este envasado en sacos de 25 kg, en pallet de 1000 kg.

Tiempos de almacenamiento:

Sólido: hasta 3 años.

Solución madre: 24 – 48 horas.

### **2.3.1 Medios para preparación la solución de floculante**

En la Planta de Calcinación y Sinter de la ECG se utiliza una Probeta para preparar la solución de floculante FA920. En esta se fija la concentración según el flujo del licor a destilar

### **2.4 Determinación de la concentración de NH<sub>3</sub> en licor de reboso**

El esquema de la Tecnología Carbonato Amoniacal permite recuperar la máxima cantidad del Amoníaco a través de las torres destiladoras (Alambiques de licor) donde la pulpa de CBNi obtenida se envía hasta los sedimentadores de la Planta de Calcinación y Sinter con una baja concentración de Amoníaco.

Su determinación en el licor de reboso se realiza en el laboratorio de la Planta, empleando el método volumétrico que consiste en la valoración con solución de ácido clorhídrico de normalidad conocida. En este caso el licor residual de la pulpa de CBNi del alambique de Licor Producto, el contenido de amoníaco debe variar entre 0,1 g/L y 2,0 g/L, entonces, se aplica la norma NEIB 64-01-17. Esta norma establece el procedimiento para la determinación de amoníaco en licores amoniacales y expresa que el contenido de amoníaco expresado en g/L de NH<sub>3</sub> se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$V_{NH_3} = \frac{V_2 \cdot C \cdot 17}{V_1} \quad (5)$$

donde:

V<sub>1</sub>: Volumen de la solución valorada de HCl expresada en mL.

C: Concentración exacta de la solución valorada del HCl.

V<sub>2</sub>: Volumen de la porción de ensayo expresada en mL.

17: Equivalente químico del amoníaco

## **2.5 Análisis estadístico empleado para evaluar el impacto de la concentración del Amoniaco en el reboso de los sedimentador de CBNi**

A partir de datos obtenidos en el laboratorio de la Planta de Calcinación y Sinter después de analizar el licor de reboso del sedimentador de CBNi durante un período de tiempo comprendido desde el 1 al 16 de octubre de 2022 con respecto a la concentración de níquel total, níquel disuelto y amoniaco, se construyó una tabla resumen que representa la cantidad de repeticiones por día del análisis para obtener un resultado aproximado; la cual es mostrada en el Anexo 1.

La solución de floculante se le agrega a la concentración de níquel en sólidos en suspensión y al níquel disuelto en el licor de reboso. Esta se obtiene a partir de la diferencia de la concentración de níquel total y la concentración de níquel disuelto.

Se utilizó para el análisis estadístico las herramientas de análisis de datos y para gráficos que brinda Microsoft Office Excel 2010.

Dentro de esas herramientas se encuentra la media y el coeficiente de correlación. Estas se definen en Estadística como:

El coeficiente de correlación es la medida específica que cuantifica la intensidad de la relación lineal entre dos variables en un análisis de correlación. Puede tomar los siguientes significados.

$R=0$ , No hay correlación.

$R=1$ , Relación positiva. Indica que ambas variables tienden a incrementarse juntos

$R= -1$ , Relación negativa. Indica que una variable tienden a incrementarse con el descenso de la otra.

La media es el valor promedio de un conjunto de datos, calculada como la suma del conjunto de valores dividida entre el número total de valores.

## **2.6 Conclusiones Parciales del Capítulo 2**

- Se establecieron los métodos y procedimientos adecuados para realizar la investigación y alcanzar los objetivos que se propusieron.
- El Sistema de Gestión de la Calidad del laboratorio analítico permite que las determinaciones analíticas sean repetibles y reproducibles, elevando la confiabilidad de los resultados.
- Se expusó las herramientas estadísticas necesarias para analizar los datos obtenidos por el laboratorio del licor de reboso de los sedimentadores de CBNi y evaluar así el impacto de la concentración del amoniaco.

### CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se realiza el análisis de los resultados de la caracterización de la pulpa de CBNi a la entrada del sedimentador y del licor de reboso de este. Se exponen los principales resultados derivados del análisis estadístico realizado a partir de datos obtenidos por el laboratorio de la Planta del licor de reboso del sedimentador de de CBNi para determinar la influencia de las variaciones en las concentraciones de amoniaco en el sedimentador.

#### 3.1 Resultados del análisis de la pulpa de CBNi a la entrada del sedimentador

Después de realizar el análisis a la muestra de pulpa de CBNi tomada a la entrada del sedimentador, se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Características de la pulpa de CBNi a la entrada del sedimentador.

|                 | Densidad pulpa<br>(g/L) | Densidad del<br>sólido (g/L) | Ni en<br>CBNi (%) | Velocidad de<br>sedimentación<br>(m/h) |
|-----------------|-------------------------|------------------------------|-------------------|--|
| <b>Promedio</b> | <b>993,75</b>           | <b>2,70</b>                  | <b>48,35</b>      | <b>6,54</b>                            |
| Máximo          | 1012,70                 | 3,15                         | 50,30             | 8,88                                   |
| Mínimo          | 974,80                  | 2,24                         | 46,40             | 4,20                                   |

Las normas de operación de la Planta refieren que la pulpa de CBNi a la entrada al sedimentador debe tener una concentración de níquel mayor e igual a 48 % y una velocidad de sedimentación como mínimo debe ser 6,0 m/h.

A partir de los resultados anteriormente expuestos en la tabla 3.1, se puede apreciar que el contenido de níquel presente en el CBNi es 48,35 % y que la velocidad de sedimentación de la pulpa a la entrada al sedimentador es 6,54 m/h. Por lo tanto, los datos experimentales obtenidos están en correspondencia con las normas de operación de la Planta.

### 3.2 Resultados del análisis del licor de reboso del sedimentador de CBNi

Al realizar el análisis a la muestra tomada del licor de reboso del sedimentador de CBNi, se obtuvieron los resultados se muestran en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Características del licor de reboso del sedimentador de CBNi.

|                 | Cocentración de Ni total (g/L) | Cocentración de Ni disuelto (g/L) | pH          | Densidad del licor (g/L) |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------|--------------------------|
| <b>Promedio</b> | <b>0,18</b>                    | <b>0,12</b>                       | <b>8,43</b> | <b>955,2</b>             |
| Máximo          | 0,24                           | 0,21                              | 8,98        | 988,8                    |
| Mínimo          | 0,135                          | 0,03                              | 7,88        | 921,6                    |

Las normas de operación de la Planta refieren que la concentración de níquel disuelto es menor o igual a 0,12 g/L y de níquel total es menor o igual a 0,20 g/L en el licor de reboso del sedimentador.

A partir de los resultados presentados en la tabla 3.2, se puede apreciar que la concentración de níquel total en el licor de reboso es 0,18 g/L y el níquel disuelto es 0,12 g/L. Además, se aprecia que el pH mínimo está por encima de 7,88 y por debajo de 8,98, lo cual significa que los carbonatos disueltos forman mayoritariamente la alcalinidad total de este fluido. Por lo tanto, los datos experimentales obtenidos del licor de reboso están en correspondencia con las normas de operación de la Planta.

### 3.3 Influencia de la concentración de amoníaco en el sedimentador

Al calcular el promedio de las variables en cuestión por días (Anexo 1), a partir los datos obtenidos por el laboratorio de la Planta, se construyó la tabla 3.3; los resultados se muestran a continuación.

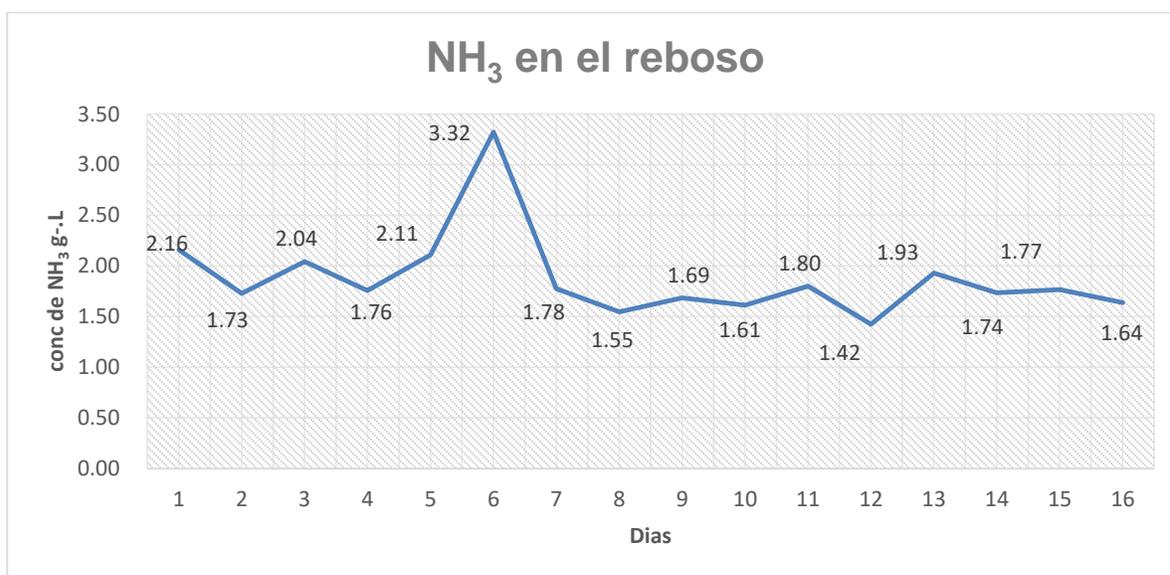
**Tabla 3.3.** Comportamiento promedio diario de los datos obtenidos por el laboratorio.

| <b>Días</b> | <b>Conc. de Ni total<br/>(g/L)</b> | <b>Conc. de Ni disuelto<br/>(g/L)</b> | <b>Conc. de Ni en sólidos en suspensión<br/>(g/L)</b> | <b>Conc. de NH<sub>3</sub><br/>(g/L)</b> |
|-------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|--|
| <b>1</b>    | 0,39                               | 0,19                                  | 0,20  | 2,16                                     |
| <b>2</b>    | 0,27                               | 0,13                                  | 0,14  | 1,73                                     |
| <b>3</b>    | 0,31                               | 0,15                                  | 0,16  | 2,04                                     |
| <b>4</b>    | 0,37                               | 0,18                                  | 0,19  | 1,76                                     |
| <b>5</b>    | 0,35                               | 0,15                                  | 0,20  | 2,11                                     |
| <b>6</b>    | 0,47                               | 0,26                                  | 0,22  | 3,32                                     |
| <b>7</b>    | 0,41                               | 0,21                                  | 0,20  | 1,78                                     |
| <b>8</b>    | 0,48                               | 0,23                                  | 0,25  | 1,55                                     |
| <b>9</b>    | 0,40                               | 0,19                                  | 0,21  | 1,69                                     |
| <b>10</b>   | 0,26                               | 0,12                                  | 0,14  | 1,61                                     |
| <b>11</b>   | 0,31                               | 0,15                                  | 0,17  | 1,80                                     |
| <b>12</b>   | 0,41                               | 0,18                                  | 0,23  | 1,42                                     |
| <b>13</b>   | 0,27                               | 0,11                                  | 0,16  | 1,93                                     |
| <b>14</b>   | 0,42                               | 0,21                                  | 0,21  | 1,74                                     |
| <b>15</b>   | 0,31                               | 0,15                                  | 0,16  | 1,77                                     |
| <b>16</b>   | 0,41                               | 0,20                                  | 0,22  | 1,64                                     |

Para una mejor comprensión, los gráficos que se muestran a continuación ilustran las variaciones de las concentraciones de amoníaco, níquel disuelto y níquel en suspensión y la relación entre ellos.

### 3.3.1 Comportamiento de la concentración de amoniaco en el reboso del sedimentador

El gráfico 1 muestra las variaciones de amoniaco en el licor de reboso del, en la data histórica ofrecida por el laboratorio.



**Gráfico 1.** Comportamiento promedio diario de la concentración de amoniaco en el licor de reboso del sedimentador.

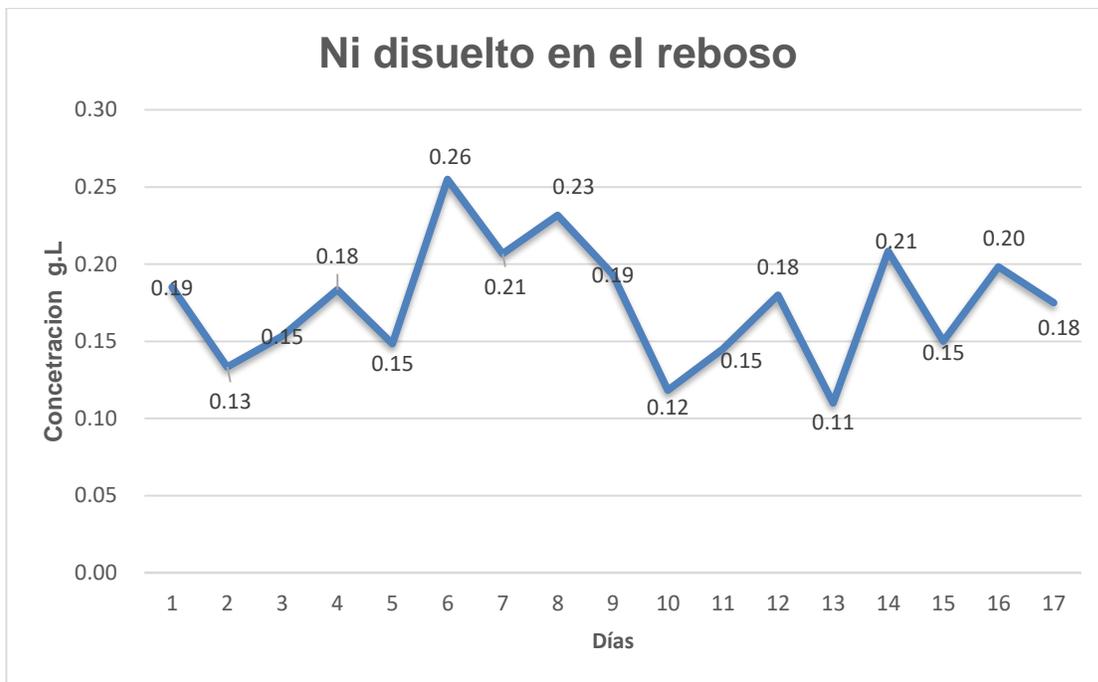
El incremento de la concentración de amoniaco cuando se analiza el licor de reboso del sedimentador, es consecuencia de la ineficiencia en las operaciones de las torres destiladoras. Se puede observar que durante los primeros días del mes de octubre la concentración promedio de amoniaco en el licor de reboso estuvo mayoritariamente fuera de los rangos permisibles, es decir mayor que 2 g/L. Este hecho corrobora que, en ese periodo de tiempo se incrementaron las pérdidas en el reboso de los sedimentadores, lo cual trajo como consecuencia un aumento de la producción de sulfuro de níquel en el sedimentador clarificador, producto que se vende con menor valor agregado en el mercado.

El incremento de la concentración de amoníaco significa pérdidas económicas a la empresa, pues de deha de reincorporar al proceso productivo, perdiéndose por el efluente de la Planta.

### 3.3.2 Comportamiento de la concentración de níquel disuelto en el reboso

El comportamiento de la concentración de níquel disuelto es consecuencia del efecto de las variaciones ya analizadas del amoníaco.

El gráfico 2 ilustra las variaciones de la concentración de níquel en el reboso, en el período analizado.



**Gráfico 2.** Comportamiento promedio de la concentración de Níquel disuelto en el reboso.

En el gráfico 2 se puede observar que la concentración de níquel disuelto en el licor de reboso estuvo mayoritariamente fuera de los rangos permisibles, es decir, que sea menor o igual que 0,12 g/L.

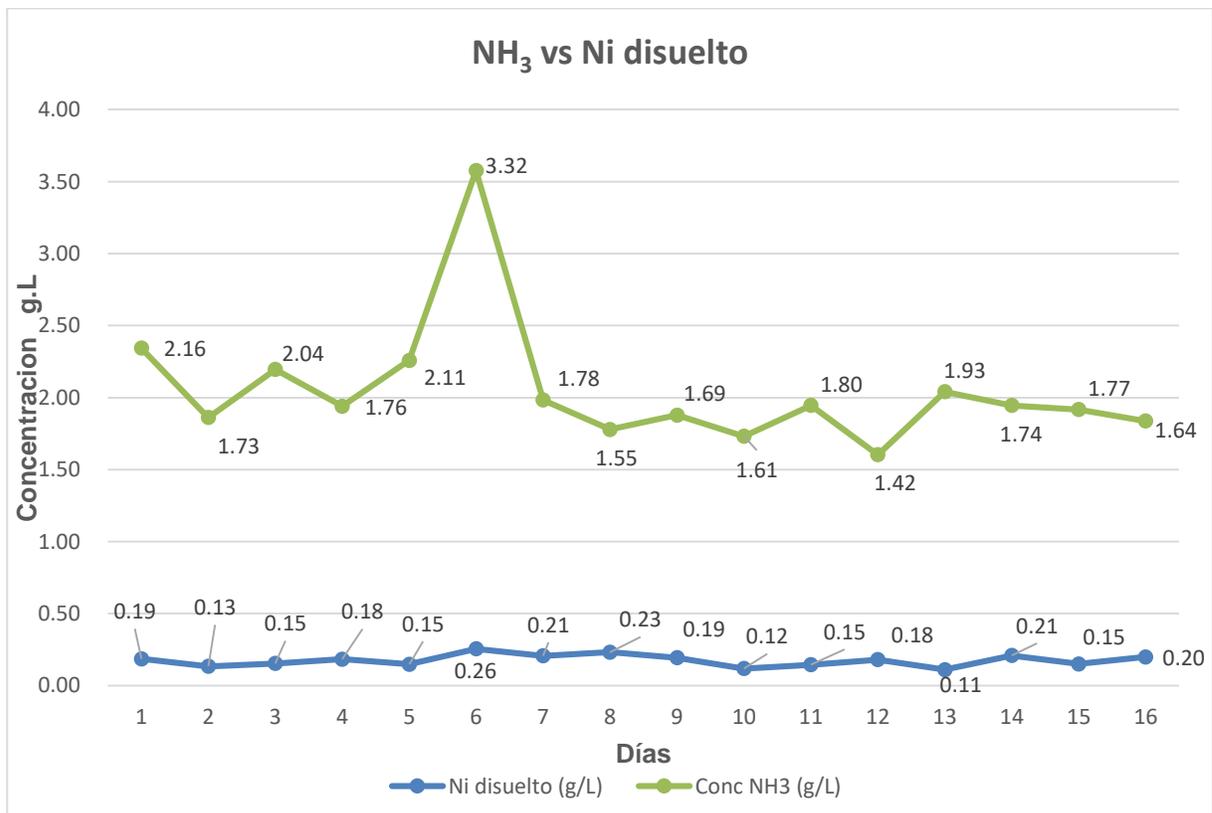
Se aprecia que el día 6 hubo un pico en la concentración de níquel disuelto en el reboso del sedimentador de CBNi, coincidente con el pico máximo de concentración de amoníaco. El

amoniaco en exceso disuelve al níquel en forma de carbonato, en mayor medida. Como ya se expuso, al incrementar la concentración de amoniaco por encima de los valores establecidos, supone que el licor reboso que pasa al sedimentador clarificador contenga mayor concentración de níquel disuelto, que puede recuperarse pero en forma de sulfuro de níquel, por el propio proceso que se realiza en ese sedimentador. Este es un producto que se vende a muy bajo precio, por lo tanto constituyó una ineficiencia en el proceso productivo durante el período de tiempo analizado.

El comportamiento de estos dos parámetros que sirven para medir de alguna manera la eficiencia en el sedimentador de CBNi, se analiza en el próximo epígrafe.

### 3.3.3 Comparación de la concentración de níquel disuelto y amoniaco en el reboso

El gráfico 3 ilustra el comportamiento promedio de la concentración de níquel disuelto y amoniaco en el reboso del sedimentador.



**Gráfico 3.** Comportamiento promedio de la concentración de níquel disuelto y amoniacado en el reboso del sedimentador.

En el gráfico 3 se puede observar que la concentración de níquel disuelto en el licor de reboso varía según varía la concentración de amoniacado. Se aprecia que el día 6 hubo una excesiva cantidad de níquel disuelto en el reboso del sedimentador de CBNi debido al aumento considerable de amoniacado en el licor de reboso.

Por lo tanto, el aumento de la concentración a niveles fuera de lo establecido de  $\text{NH}_3$  provoca que el níquel que está en forma de carbonato tienda a diluirse con lo cual el tamaño de partículas se hace más pequeño, lo que trae consigo una afectación a procesos posteriores, ya que al ser más fino el carbonato, la densidad disminuye y al llegar a los filtros no se logra disminuir el contenido de humedad necesario, afectándose por consiguiente el proceso de calcinación en el que se debe suministrar más calor para disminuir esa humedad excedente .

Por otra parte, al añadir el floculante al reboso del sedimentador de carbonato, este tiene un efecto inverso a lo normal, o sea, que no todas las partículas precipitaran por los altos contenidos de  $\text{NH}_3$  y se pierda níquel por el efluente de la Planta.

Todo lo antes expuestos incide sobre los indicadores técnicos económicos de la Planta y de la empresa.

### **3.4 Resultados estadísticos que fundamentan los resultados obtenidos.**

Al realizar el análisis estadístico mediante el coeficiente de correlación de los datos obtenidos por el laboratorio de la Planta durante el período de tiempo analizado, Anexo 1, con respecto al comportamiento de la concentración de níquel total, níquel disuelto, amoniacado y el cálculo realizado del níquel en sólidos en suspensión, se obtuvieron los resultados se muestran en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Relación entre las concentraciones de las variables en cuestión a partir de los valores de Coeficiente de correlación.

|  | <i>Conc.Ni Total</i><br>(g/L) | <i>Conc.</i><br><i>Ni Disuelto</i> (g/L) | <i>Conc.Ni en</i><br><i>sólidos susp.</i><br>(g/L) | <i>Conc.NH<sub>3</sub></i><br>(g/L) |
|--|-------------------------------|--|--|-------------------------------------|
| <i>Conc. Ni Total</i> (g/L)                      | 1                             |  |  |                                     |
| <i>Conc. Ni Disuelto</i> (g/L)                   | 0,9648                        | 1  |  |                                     |
| <i>Conc.</i><br><i>Ni en sólidos susp.</i> (g/L) | 0,9631                        | 0,86583                                  | 1  |                                     |
| <i>Conc. NH<sub>3</sub></i> (g/L)                | 0,2853                        | 0,3463                                   | 0,2029   | 1                                   |

A partir de los resultados anteriormente expuestos en la tabla 3.4, se puede afirmar que:

- ✓ El níquel total tiene una relación directa con el disuelto y en sólidos en suspensión, pero se hace más directa con níquel disuelto pues el valor de coeficiente de correlación es mayor, es decir, la concentración de níquel total aumenta cuando aumenta el níquel disuelto.
- ✓ El níquel en sólidos en suspensión tiene una relación directa con níquel total y el disuelto, pero esta relación se hace más directa con níquel total pues el valor del coeficiente de correlación es mayor.
- ✓ El amoníaco tiene una correlación más marcada con el níquel disuelto que con las demás variables, con un valor de 0,3463 g/L, es decir, la concentración de níquel disuelto aumenta cuando aumenta la concentración de amoníaco en el licor.

### **3.6 Conclusiones parciales del Capítulo 3**

- La concentración de níquel en el CBNi y la velocidad de sedimentación de la pulpa a la entrada al sedimentador, están en correspondencia con las normas de operación de la Planta.
- El contenido de níquel total y níquel disuelto, en el reboso de los sedimentadores de CBNi están de acuerdo a los requisitos normalizados en el gráfico analítico de control y muestreo de la Planta.
- Las variaciones en los contenidos de amoníaco en el sedimentador de CBNi, provoca ineficiencia en el proceso productivo de la Planta, ya que se pierde más partículas de níquel en forma de carbonato de lo normado y al tratar de usar flocculantes como el FA920 para recuperarlo, no cumple eficientemente con su función ocasionando su pérdida por el efluente de la Planta.

## CONCLUSIONES GENERALES

- Como resultado de la evaluación realizada se confirmó que las variaciones en la concentración de amoníaco en los sedimentadores, fuera de los rangos establecidos, provocan graves afectaciones en el proceso productivo, pues al aumentar éste se disuelve más el níquel en forma de carbonato presente en el sedimentador. Consecuentemente, al añadir al reboso los floculantes como el FA920 para tratar de recuperar esas partículas disueltas, tengan una acción inversa a su normal función.
- Se determinó que las variaciones en la concentración de amoníaco provoca variaciones en la densidad del carbonato en el sedimentador, el cual tiende a disminuir al aumentar el  $\text{NH}_3$  en este, debido al incremento de partículas disueltas de níquel lo que incide sobre los indicadores técnicos y económicos de los procesos posteriores.
- En la Planta de Calcinación y Sinter de la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara”, la eficiencia del proceso de sedimentación de las pulpas de carbonato básico de níquel está condicionada por la correcta operación de los alambiques de licor, los cuales controlan el paso de la concentración de amoníaco en los sedimentadores dentro de los rangos establecidos.

- La utilización de floculantes como el FA920 en pulpas de carbonato básico de níquel, permite recuperar partículas para reincorporarlo al proceso productivo y obtener otros subproductos exportables.
- Se demostró mediante un análisis de caracterización que la pulpa de CBNi a la entrada del sedimentador y el licor de reboso, cumplen con algunos parámetros medidos propios de ellos, comprobándose su correspondencia con los requisitos normalizados en el gráfico analítico de control y muestreo de la Planta de Calcinación y Sinter.

### **RECOMENDACIONES**

- Continuar los trabajos investigativos con el objetivo de proponer métodos que permitan recuperar el amoníaco que se pierde en el efluente de la planta.
- Evaluar en trabajos investigativos posteriores el comportamiento de otros metales presentes en el licor de reboso ante las variaciones en la concentración de amoníaco.
- Buscar una explicación científica lógica al fenómeno de que al aumentar el contenido de  $\text{NH}_3$  en el sedimentador clarificador, el floculante utilizado no cumple con su función.
- Hacer pruebas de velocidad de sedimentación en la Planta con el objetivo de poseer datos históricos.
- Chequear periódicamente la descarga de los alambiques para comprobar su correcto funcionamiento y evitar así el incremento del amoníaco en el sedimentador de CBNi.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agyei, G., & Rojas Puron, A. H. (2010). Distribución Fraccional de Metales y Minerales en la Laterita de Balance del Yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, 36-52.
- Beyris Mazar, P., & Espinosa Espinosa, E. (2016). *Comportamiento de la Sedimentación a Escala de Laboratorio en Pulpas Lixiviadas en la Empresa "Comdte Ernesto Che Guevara"*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Domínguez Lechuga, M. (2013). *Floculación Química en Pulpas de Carbonato de Níquel Producido en la Empresa "René Ramos Latour"*. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- García, P. A., & Rojas, A. (2006). Comparación de los floculantes Chemadd A-41, 42, y 43 de la firma Chematek, el IP-600 de la firma Zar Cia y el Percol, versión canadiense del Magnafloc R-155. *Tecnología Química*, 41 - 47.
- Gonzalez Cañivano, J. (1984). *Factores que Influyen en la Floculación por Polielectrolitos. Caso de Estudio Empresa Rene Ramos Latour de Nicaro*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- González, A. (1978). *Estudio de densificación de pulpas espesadas de carbonato de níquel*. Moa.
- Jiménez Guilarte, M. (2014). *Sedimentación de Pulpas Minerales Lateríticas en la Tecnología Carbonato Amoniacal y su influencia en el consumo de energía de los sedimentadores*. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Kasatkin, A. (1987). *Operaciones básicas y Aparatos en la tecnología química* (Vol. 1). La Habana: Pueblo y Educación.
- Mariño, A., & al, e. (2009). *Equipos de la Metalurgia no Ferrosa*. La Habana: Felix Varela.
- Medrano, I., Espinosa, E., & Fernández, N. (2004). *Pruebas de Velocidad de Sedimentación del Carbonato en la Empresa "Comdte Ernesto Che Guevara"*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

- R.B.Bhappu, M. y. (1982). *Diseño de Plantas de proceso de minerales*. (Segunda ed.). Rocas y Minerales Graficas Marbe,S.A.
- Ramírez, B. (2002). *Estudio de Beneficiabilidad de los Escombros Lateríticos de la Región Moa*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Tesis de Maestría.
- Riverón Saldívar, A., & José, C. F. (2021). Caracterización Geotécnica del Perfil de los Suelos lateríticos, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, 132 (4), 523-532.
- Rodríguez, M. C. (1986). *Informe sobre la aplicación de floculantes a la sedimentación y clasificación en lixiviación*.
- Rodríguez, M. C. (1986). *Utilización del floculante Praestol 2530 en la Planta de lixiviación*. Informe técnico, Moa.
- Zelikman, A. N. (1982). *Teoría de los Procesos Hidrometalúrgicos*. Moscú: Vneshtorgizdat.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1.** Datos obtenidos por el laboratorio de la Planta de de Calcinación y Sinter.

| Dias            |      |  |   |   |  |
|-----------------|------|--|---|---|--|
|                 |      | <b>Concentración<br/>de níquel Total<br/>(g/L)</b> | <b>Concentración<br/>de níquel<br/>Disuelto<br/>(g/L)</b> | <b>Concentración<br/>de níquel en<br/>sólidos en<br/>suspensión<br/>(g/L)</b> | <b>Concentración<br/>de NH<sub>3</sub><br/>(g/L)</b> |
| 1 de<br>octubre | 0,48 | 0,24   | 0,24  | 1,9   | 0,48   |
|                 | 0,47 | 0,23   | 0,24  | 1,8   | 0,47   |
|                 | 0,4  | 0,19   | 0,21  | 2,4   | 0,4  |
|                 | 0,37 | 0,17   | 0,20  | 2,5   | 0,37   |
|                 | 0,32 | 0,15   | 0,17  | 2,4   | 0,32   |
|                 | 0,27 | 0,13   | 0,14  | 2,0   | 0,27   |
| 2 de<br>octubre | 0,21 | 0,10   | 0,11  | 1,9   | 0,21   |
|                 | 0,24 | 0,12   | 0,12  | 1,9   | 0,24   |
|                 | 0,28 | 0,14   | 0,14  | 1,8   | 0,28   |
|                 | 0,29 | 0,14   | 0,15  | 1,9   | 0,29   |
|                 | 0,3  | 0,15   | 0,15  | 1,6   | 0,3  |
|                 | 0,3  | 0,15   | 0,15  | 1,3   | 0,3  |
| 3 de<br>octubre | 0,32 | 0,16   | 0,16  | 2,1   | 0,32   |
|                 | 0,31 | 0,16   | 0,15  | 2,0   | 0,31   |
|                 | 0,31 | 0,15   | 0,16  | 2,1   | 0,31   |
|                 | 0,3  | 0,15   | 0,15  | 2,0   | 0,3  |
|                 | 0,31 | 0,15   | 0,16  | 1,9   | 0,31   |
|                 | 0,3  | 0,15   | 0,15  | 1,7   | 0,3  |
| 4 de<br>octubre | 0,45 | 0,22   | 0,23  | 1,8   | 0,45   |
|                 | 0,47 | 0,24   | 0,23  | 1,9   | 0,47   |
|                 | 0,35 | 0,16   | 0,19  | 1,7   | 0,35   |
|                 | 0,32 | 0,16   | 0,16  | 1,9   | 0,32   |

|                 |      |      |      |     |      |
|-----------------|------|------|------|-----|------|
|                 | 0,32 | 0,16 | 0,16 | 1,7 | 0,32 |
|                 | 0,32 | 0,16 | 0,16 | 1,6 | 0,32 |
| 5 de<br>octubre | 0,28 | 0,11 | 0,17 | 2,1 | 0,28 |
|                 | 0,29 | 0,12 | 0,17 | 2,1 | 0,29 |
|                 | 0,4  | 0,18 | 0,22 | 2,1 | 0,4  |
|                 | 0,4  | 0,17 | 0,23 | 2,1 | 0,4  |
|                 | 0,36 | 0,16 | 0,2  | 2,2 | 0,36 |
|                 | 0,35 | 0,15 | 0,2  | 2,2 | 0,35 |
| 6 de<br>octubre | 0,72 | 0,36 | 0,36 | 4,4 | 0,72 |
|                 | 0,57 | 0,29 | 0,28 | 3,9 | 0,57 |
|                 | 0,6  | 0,3  | 0,3  | 3,5 | 0,6  |
|                 | 0,31 | 0,19 | 0,12 | 3,4 | 0,31 |
|                 | 0,31 | 0,2  | 0,11 | 2,4 | 0,31 |
|                 | 0,31 | 0,19 | 0,12 | 2,4 | 0,31 |
| 7 de<br>octubre | 0,53 | 0,27 | 0,26 | 3,3 | 0,53 |
|                 | 0,5  | 0,27 | 0,23 | 1,4 | 0,5  |
|                 | 0,48 | 0,24 | 0,24 | 1,6 | 0,48 |
|                 | 0,35 | 0,17 | 0,18 | 1,6 | 0,35 |
|                 | 0,3  | 0,15 | 0,15 | 1,4 | 0,3  |
|                 | 0,29 | 0,14 | 0,15 | 1,4 | 0,29 |
| 8 de<br>octubre | 0,47 | 0,23 | 0,24 | 1,6 | 0,47 |
|                 | 0,52 | 0,25 | 0,27 | 1,6 | 0,52 |
|                 | 0,47 | 0,23 | 0,24 | 1,7 | 0,47 |
|                 | 0,51 | 0,24 | 0,27 | 1,7 | 0,51 |
|                 | 0,46 | 0,22 | 0,24 | 1,7 | 0,46 |
|                 | 0,47 | 0,22 | 0,25 | 1,0 | 0,47 |

|                  |      |      |      |      |      |
|------------------|------|------|------|------|------|
| 9 de<br>octubre  | 0,37 | 0,17 | 0,20 | 1,7  | 0,37 |
|                  | 0,42 | 0,21 | 0,21 | 1,7  | 0,42 |
|                  | 0,44 | 0,21 | 0,23 | 1,6  | 0,44 |
|                  | 0,42 | 0,2  | 0,22 | 1,7  | 0,42 |
|                  | 0,4  | 0,2  | 0,2  | 1,7  | 0,4  |
|                  | 0,38 | 0,18 | 0,2  | 1,5  | 0,38 |
| 10 de<br>octubre | 0,33 | 0,16 | 0,17 | 1,8  | 0,33 |
|                  | 0,32 | 0,15 | 0,17 | 1,5  | 0,32 |
|                  | 0,33 | 0,16 | 0,17 | 1,6  | 0,33 |
|                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,7  | 0,00 |
|                  | 0,31 | 0,14 | 0,17 | 1,7  | 0,31 |
|                  | 0,29 | 0,11 | 0,18 | 1,5  | 0,29 |
| 11 de<br>octubre | 0,31 | 0,15 | 0,16 | 1,8  | 0,31 |
|                  | 0,3  | 0,13 | 0,17 | 1,6  | 0,3  |
|                  | 0,3  | 0,15 | 0,15 | 1,7  | 0,30 |
|                  | 0,23 | 0,11 | 0,12 | 2,0  | 0,23 |
|                  | 0,24 | 0,11 | 0,13 | 2,0  | 0,24 |
|                  | 0,31 | 0,15 | 0,16 | 2,0  | 0,31 |
| 12 de<br>octubre | 0,5  | 0,22 | 0,28 | 1,48 | 0,50 |
|                  | 0,52 | 0,23 | 0,29 | 1,4  | 0,52 |
|                  | 0,41 | 0,18 | 0,23 | 1,5  | 0,41 |
|                  | 0,36 | 0,15 | 0,21 | 1,5  | 0,36 |
|                  | 0,35 | 0,15 | 0,20 | 1,6  | 0,35 |
|                  | 0,34 | 0,15 | 0,19 | 1,0  | 0,34 |
| 13 de<br>octubre | 0,31 | 0,13 | 0,18 | 1,9  | 0,31 |
|                  | 0,3  | 0,13 | 0,17 | 2,0  | 0,3  |
|                  | 0,22 | 0,08 | 0,14 | 2,0  | 0,22 |

|                  |      |      |      |      |      |
|------------------|------|------|------|------|------|
|                  | 0,26 | 0,11 | 0,15 | 2,0  | 0,26 |
|                  | 0,3  | 0,11 | 0,19 | 1,9  | 0,30 |
|                  | 0,25 | 0,1  | 0,15 | 1,9  | 0,25 |
| 14 de<br>octubre | 0,34 | 0,17 | 0,17 | 2,0  | 0,34 |
|                  | 0,43 | 0,22 | 0,21 | 1,8  | 0,43 |
|                  | 0,42 | 0,21 | 0,21 | 1,7  | 0,42 |
|                  | 0,44 | 0,22 | 0,22 | 1,7  | 0,44 |
|                  | 0,42 | 0,21 | 0,21 | 1,7  | 0,42 |
|                  | 0,44 | 0,22 | 0,22 | 1,6  | 0,44 |
| 15 de<br>octubre | 0,28 | 0,14 | 0,14 | 2,0  | 0,28 |
|                  | 0,3  | 0,15 | 0,15 | 1,9  | 0,30 |
|                  | 0,29 | 0,14 | 0,15 | 1,8  | 0,29 |
|                  | 0,32 | 0,16 | 0,16 | 1,8  | 0,32 |
|                  | 0,32 | 0,15 | 0,17 | 1,5  | 0,32 |
|                  | 0,33 | 0,16 | 0,17 | 1,7  | 0,33 |
| 16 de<br>octubre | 0,36 | 0,17 | 0,19 | 1,7  | 0,36 |
|                  | 0,44 | 0,21 | 0,23 | 1,7  | 0,44 |
|                  | 0,42 | 0,2  | 0,22 | 1,6  | 0,42 |
|                  | 0,4  | 0,2  | 0,2  | 1,7  | 0,4  |
|                  | 0,44 | 0,21 | 0,23 | 1,56 | 0,44 |
|                  | 0,42 | 0,2  | 0,22 | 1,60 | 0,42 |