

Trabajo de Diploma

Título: Uso de la tamización como estrategia de beneficio
de una muestra de cola de Nicaro para la
valoración del potencial de elementos
de interés metalúrgico

Autor: Marcos Alejandro Cruz Ávila
Tutor: Dr.Cs. Rafael Quintana Puchol
Mr.Cs.Yuneydi Paumier Castañeda

Moa, 2016



AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente:

A mis tutores Dr.Cs. Rafael Quintana Puchol y Mr.C. Yunaydi Paumier Castañeda por su constancia, por haber sido la fuente de donde surgió este trabajo y por la confianza que han depositado en mí para la realización del mismo.

A mis padres, a mi hermana, a mis tíos, a mis sobrinas y sobrinos, a mis primos. A mi gran familia.

A mis compañeros y amigos que realmente me han brindado su apoyo en todos estos años.

A mis compañeros y amigos de cuarto, por soportar con paciencia mis locuras desestresantes.

Por la orientación y apoyo que me brindaron. A todos aquellos que han hecho posible la culminación de este trabajo.

Muchas gracias.

PENSAMIENTO

Que te importe más tu carácter que tu reputación; porque tu carácter es lo que realmente eres, mientras que tu reputación es meramente lo que otros piensan de ti.

John Wooden

RESUMEN

En la actualidad existen 70 000 000 t de desechos sólidos industriales (Colas) generados por la “Empresa Comandante René Ramos Latour”, los cuales afectan el entorno. El presente trabajo se plantea como objetivo la determinación de la cantidad potencial de elementos existentes en las colas de interés metalúrgico usando el método de tamización como estrategia de beneficio.

Para el desarrollo de la investigación se realizó una toma y preparación de una muestra de cola, la cual fue sometida al proceso de tamizado. A partir del tamizado se procede a la construcción de las curvas de sumatoria ascendente, descendente y de frecuencia las cuales nos proporcionan los valores necesarios para determinar diferentes parámetros estadísticos que permitieron la caracterización granulométrica de la muestra, alguno de estos son la media, mediana, curtosis y la desviación estándar, se determinó también la velocidad de fluidez, densidad picnométrica y aparente.

Dándole cumplimiento al objetivo de esta investigación se calculó la cantidad potencial de los elementos de interés metalúrgico (hierro, cromo, cobalto y níquel) que existen actualmente en las colas almacenadas en el dique de la empresa Rene Ramos Latour de Nicaro.

Palabras claves: Análisis granulométrico, potencial de elementos metalúrgicos.

SUMMARY

As the present moment exist 70 000 000 t the solid waste matter industrials (Tails) generated for the Empresa Comandante René Ramos Latour, which affect the surroundings. The present work presents like objective the determination the potential quantity of existent elements in the tails metallurgic interest using the method the tamization like strategy of benefit itself.

You accomplished a take and preparation a sign tail for the development the investigation, which was submitted to the process of sieved. One proceeds to the construction the curves of ascending, descending and frequency indictment as from the sieved which provide us the necessary moral values to determine different statistical parameters that allowed to the characterization granulometric the sign, the stocking, median, curtosis and standard deviation are any one these, picnometric determined also the velocity of fluidity, density itself and show off .

Giving fulfillment to the objective of this investigation the potential quantity of the elements metallurgic interest was calculated (iron, chrome, cobalt and nickel) than exist at present in the tails stored at the company's dike Rene Ramos Latour the Nicaro.

Key words: Granulometric analysis, potential of the metallurgic elements.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y ACTUALIDAD DEL TEMA.....	5
1.1. Antecedentes del método de tamización y los diferentes parámetros que caracterizan una muestra granulométrica.....	6
1.2 Parámetros utilizados para la caracterización granulométrica de la muestra..	7
1.2.1. Método gráfico.....	7
1.2.2. Mediana.....	8
1.2.3. Media.....	8
1.2.4. Medidas de dispersión.....	10
1.2.5. Medida de asimetría.....	12
1.2.6. Curtosis gráfica.....	13
Conclusiones parciales.....	15
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
2.1 Características de las colas de la “Empresa Cmdte. René Ramos Latour”	16
2.1.1. Composición granulométrica.....	16
2.1.2. Composición química.....	17
2.1.3. Composición mineralógica.....	19
2.1.4. Porosidad.....	20
2.1.5. Gravedad específica y peso volumétrico.....	20
2.2 Diseño del experimento.....	20
2.2.1 Tratamiento previo.....	22
2.2.2 Caracterización granulométrica.....	23
2.2.3 Densidad aparente y aparente compactada.....	25
2.2.4 Velocidad de fluidez y ángulo de reposo.....	26
2.2.5 Densidad picnométrica.....	27
2.2.6 Porosidad.....	31
Conclusiones parciales.....	32

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	33
3.1 Caracterización de la distribución granulométrica obtenida, usando parámetros estadísticos.....	33
3.2 Determinación de las densidades aparente, aparente concentrada de la muestra de cola seleccionada.....	38
3.2.1 Densidad aparente y aparente concentrada.....	38
3.3 Velocidad de fluidez y ángulo de reposo.....	38
3.4 Densidad picnométrica.....	39
3.5 Análisis de la porosidad de las colas de Nicaro.....	40
3.6 Recálculo de la cantidad potencial de los elemento metálicos seleccionados (Fe, Cr, Ni y Co).....	40
3.6.1 Cromo.....	45
3.6.2 Hierro.....	47
3.6.3 Cobalto.....	48
3.6.7 Níquel.....	49
Conclusiones parciales.....	51
CONCLUSIONES GENERALES.....	52
RECOMENDACIONES.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	54
ANEXOS.....	57

INTRODUCCIÓN

Cuba ocupa un lugar cimero en las reservas mundiales de minerales lateríticos de níquel. Estos minerales están caracterizados por una distribución desigual de los valores metálicos en las distintas capas que componen el perfil ferruginoso. De esto último se deriva, que las tecnologías diseñadas para el procesamiento de estas menas no logren un aprovechamiento racional de las mismas, generando grandes volúmenes de residuales de los procesos mineros y tecnológicos.

Los yacimientos lateríticos cubanos se encuentran ubicados fundamentalmente en el noroeste de la provincia de Holguín, donde se encuentran actualmente las dos industrias hidrometalúrgicas que procesan estos minerales, una con la tecnología ácida a presión y la otra restantes con la tecnología carbonato amoniacal, (proceso CARON). Además existe un proyecto en ejecución para la producción de Ferro-Níquel (FeNi). La tecnología Carbonato Amoniacal, logra extracciones de níquel de un 86 % y de cobalto de hasta un 20–30 %, pasando gran parte de estos metales a los sólidos no lixiviados de este proceso.

Debido a esto la obtención de concentrados de níquel a partir de menas lateríticas en nuestro país lleva aparejado la deposición de un volumen considerable de sólidos no lixiviados del proceso extractivo de la industria del níquel, llamado colas; las cuales son almacenadas en presas para su futuro aprovechamiento donde este depende en gran medida de la composición granulométrica que posean estas.

Para el Grupo Empresarial Cuba-Níquel, la producción de colas por las industrias de níquel cubanas con alto contenido de hierro y metales pesados por más de 50 años, constituye uno de los problemas de mayor impacto ambiental, transformándose en una fuente de contaminación que afecta la flora, la fauna terrestre y marina aledañas a la zona de los depósitos, y las aguas superficiales y subterráneas como consecuencia del alto régimen de precipitación en la región. Además de las molestias y contaminaciones atmosféricas ocasionadas en los asentamientos poblacionales cercanos a los depósitos en las épocas de sequía.

Algunos especialistas dedicados al desarrollo económico futuro de la región

Moa–Nicaro, consideran que el proceso minero futuro de la región estará indisolublemente ligado a la explotación de los minerales almacenados en las presas de cola, ya que la actual explotación de los minerales lateríticos de níquel y cobalto tiene un tiempo de vida limitado y constituyen recursos no renovables. De ahí la importancia de desarrollar investigaciones que posibiliten dicha transformación futura y una mayor eficiencia en el aprovechamiento de los recursos en la actualidad con el objetivo de lograr una sustentabilidad económica en la región.

La demanda creciente de los minerales de hierro en el mercado abre una posible alternativa para la solución de este residual; ya que este representa aproximadamente el 45 % de la masa total de colas almacenadas en sus respectivas presas.

Después de los ajustes necesarios en los contenidos de hierro, níquel, cobalto y cromo, este residual sólido pudiera ser comercializado como un nuevo producto con alto valor agregado para los consumidores de minerales de hierro, pudiendo convertirse en un producto codiciado por los clientes aceristas.

La creatividad de los científicos y tecnólogos cubanos en función de desarrollar una alternativa tecnológica que permita convertirlos en productores y suministradores de materias primas de minerales de hierro, pudiera ser la solución más viable para la disposición y uso de los residuales sólidos no lixiviados de la industria de níquel cubana.

Hasta ahora se han desarrollado varias investigaciones encaminadas a obtener metodologías para el tratamiento de este residual, destacándose autores como: (Presilla 1969); (Ponce 1979); (ZAMORA, Véliz et al. 1981); (Turro 2002); (MAVROMMATIS, Hernández et al. 2002); (HERNÁNDEZ 2003-2004); (PURON and Turro 2003.); (PALACIOS and Toro 2003); (ARIZA, Salazar et al. 2003); (RODRÍGUEZ 2004); (BALDOQUÍN 2004); (PEÑA 2010); (Hernández 2011), entre otros. Estas investigaciones fundamentalmente están realizadas con las colas amoniacaes obtenidas como resultado del Proceso CARON, debido a que de las tres empresas niquelíferas de la región, dos emplean esta tecnología y por consiguiente los volúmenes almacenados de residuales sólidos son mayores.

Según lo antes expuesto se declara como **situación problemática**, la existencia de grandes volúmenes de desechos industriales generados por la “Empresa Comandante René Ramos Latour”.

Relacionado con lo, anterior y teniendo en cuenta los problemas que ocasionan la acumulación de estos residuos se define como:

Problema científico: ¿Cómo valorar la cantidad potencial de elementos de interés metalúrgico usando la tamización como estrategia de beneficio?

El **objeto de investigación** recae sobre la valoración de la cantidad potencial de los elementos de interés metalúrgico existente en los residuos sólidos (colas) del proceso de la “Empresa René Ramos Latour”.

El **objetivo del trabajo** es la valoración de la cantidad potencial de los elementos de interés metalúrgico existentes en las colas de Nicaro usando la tamización como estrategia de beneficio.

Se enuncia como **hipótesis**:

Es posible la valoración de la cantidad potencial de los elementos de interés metalúrgico existentes en las colas de Nicaro si usa la tamización como estrategia de beneficio.

Para cumplir con el objetivo trazado se realizan las siguientes **tareas**:

1. Toma y preparación de la muestra
2. Realizar a muestras de colas una tamización selectiva ($< 2 \text{ mm}$) con previo calentamiento a $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para su posterior análisis granulométrico por tamización.
3. Realizar una selección de un juego de tamices según la serie $2^{-n/2}$.
4. Realizar la tamización y determinación de la masa de cada clase granulométrica.
5. Construcción de la curva de frecuencia y sumatoria ascendente y descendente.
6. Seleccionar los parámetros estadísticos más adecuados para describir la población granulométrica

7. Calcular los valores de los parámetros estadísticos seleccionados que describan la población granulométrica de las colas.
8. Determinar la densidad aparente, aparente concentrada y picnométrica de la muestra de las colas y de sus clases granulométricas.
9. Determinar la velocidad de fluidez de la muestra original.
10. Recalcular la cantidad potencial de hierro, cromo, níquel y cobalto existente en el dique de cola.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y ACTUALIDAD DEL TEMA

En la búsqueda de soluciones para darle un uso racional a las colas del proceso CARON y eliminar el impacto ambiental negativo que éstas producen en el territorio de Moa y Nicaro donde se encuentran ubicadas las Empresas Metalúrgicas “Comandante Ernesto Che Guevara y Comandante René Ramos Latour” generadoras de estas colas, numerosos investigadores han realizado trabajos encaminados a darle una utilización industrial a este residual.

En el ámbito mundial una de las posibles soluciones encontradas para la disminución de los volúmenes de este residual sólido es su empleo en la industria de la construcción; como relleno en la fabricación de carreteras, caminos, terraplenes y ferrocarriles. Además como aditivo en la fabricación de cemento, asfalto y concreto y en la manufactura de ladrillos de silicato de hierro o como componente de material puzolánico, aunque muchas veces su uso se ve limitado por su fineza, alto contenido de impurezas y deslave de metales trazas (Mineral Processing Wastes, 2006).

En el informe existente en el centro de investigaciones siderúrgicas de Nicaro, titulado “Informe sobre las investigaciones de obtención de semiacero a partir de las colas de Nicaro” se notó una reacción endotérmica al realizarle análisis térmico a dichas colas, o sea, la absorción de calor, en la zona de 300 y 700 °C, por lo que se previó que en las colas existe no sólo humedad interna, sino la humedad cristalina y además de sales carbónicas en pequeñas cantidades.

En otro informe existente en el centro de investigaciones siderúrgicas de Nicaro “Estudio sobre el beneficio de colas de la fábrica de Nicaro y la sinterización de concentrados ferrosos”, apreciamos que en este trabajo en cooperación con especialistas de la antigua URSS llegaron a obtener, en el proceso de beneficio con separación por vía húmeda, concentrados en los cuales la beneficiabilidad del hierro desde las colas frescas ha constituido el 68,6% y la de las colas depositadas un 67-71,1%.

La humedad del coke durante la filtración de los concentrados alcanzó un 29 % Se ha notado que existe una cantidad remanente de petróleo en las fases sólidas y líquidas de las colas de cabeza, las cuales ejercen una influencia

perjudicial en la estabilidad de los procesos de separación y filtración, así como en los índices tecnológicos correspondientes.

En el Instituto Mejanobr, se realizaron pruebas de sinterización y peletización al concentrado de Fe, y al comparar los resultados, se concluyó que el método de peletización es poco efectivo en comparación con la sinterización, debido a su baja productividad específica (0,30 t/h), (INFORME 1971 -1972).

1.1. Antecedentes del método de tamización y los diferentes parámetros que caracterizan una muestra granulométrica

A continuación se brinda una breve reseña del método a utilizar y los diferentes parámetros que están vinculados con él.

La tamización o tamizado es un método físico para la clasificación de poblaciones de partículas. Este se puede definir como la técnica de clasificar partículas de una muestra en términos de su capacidad o incapacidad que presentan para pasar a través de un orificio de dimensiones regulares. La técnica consiste en colocar la muestra de polvo en la parte superior de un juego de tamices, uno debajo del otro con una secuencia de reducción sucesiva del tamaño del orificio de la malla. El juego de tamices junto con la muestra se agita y las partículas con las dimensiones adecuadas pasaran a través de las diferentes mallas, reteniéndose sobre aquellas las partículas que no presenten la capacidad de atravesarlas. Existen mallas con orificios hasta de 37 μm tejidas comúnmente con finos alambres de bronce. Es muy difundido el termino mesh para identificar la cantidad de orificios que existen en una pulgada lineal (25,4 mm).

La relación entre el tamaño del orificio y el diámetro del alambre empleado definen el número de orificios por pulgada (número de mesh). La calibración del orificio de la malla se realiza usando un micrómetro óptico. Mallas de orificios uniformes hasta 2 μm se obtienen por técnicas de electrodeposición o perforaciones con rayos láser en láminas metálicas.

La tamización es la técnica más ampliamente usada para clasificar partículas hasta 44 μm . En la elección de un juego de tamices, el tamaño del orificio de las mallas en mm puede seguir una secuencia según la progresión $2^{\frac{n}{2}}$ o 2^{-n} , donde $n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$ etc. En nuestro caso la serie utilizada fue la

de $2^{-n/2}$, obteniéndose la serie 1,40 mm, 1,00 mm, 0,71 mm, 0,5 mm, 0,3 mm, 0,15 mm y 0,063 mm.

1.2 Parámetros utilizados para la caracterización granulométrica de la muestra

Para la realización de este trabajo se seleccionaron una serie de parámetros estadísticos basados en el nivel de eficiencia dado por sus autores, se utiliza el método grafico por ser un método de una complejidad sencilla además de permitirnos la determinación de dichos parámetros con más sencillez y efectividad que otros métodos estadísticos como el aritmético siendo este más trabajoso y de difícil comprensión.

1.2.1. Método gráfico

El método grafico consiste en una lectura a través de curvas granulométricas (en escala aritmética (mm) o de probabilidades (%)), donde los valores de los diámetros corresponden a determinados porcentajes, dicho método se basa en la construcción de un gráfico donde los dos ejes se intersectan de forma perpendicular, el que está de forma horizontal se le conoce como ordenadas donde se colocaran los valores de las masas iniciales que quedaron por tamices con su respectivo porcentaje, y en el vertical conocido como abscisa los valores de los diámetros en forma de ϕ , a consecuencia de esto y trazando dos líneas, una horizontal y otra vertical y haciéndola coincidir con la curva de frecuencia formada por la unión de los puntos creados por las masas iniciales y sus respectivos diámetros es posible calcular distintos criterios de distribución. A continuación son expuestos alguno de ellos:

1.2.2. Mediana

Es un valor característico del diámetro de las partículas de una muestra, la cual representa la división en dos partes iguales de la masa de la muestra. En la curva de frecuencia este está dado por el valor correspondiente a un 50% de distribución (d_{50} o Φ_{50}). De acuerdo con TRASK (1930) y SUGUIO (1973), ella está representada por:

$$M_d = d_{50} \quad (1.1)$$

KRUMBEIN (1936) y MULLER (1967) proponen una nueva unidad de escala adimensional denominada ϕ (ϕ) basada en los logaritmos de base 2 del diámetro en mm (d_{mm}). Con el objetivo de evitar números negativos que no clasificaran una serie de áreas y partículas muy finas, el logaritmo fue multiplicado por -1, llegando a la conclusión que la escala ϕ (ϕ) puede ser definida por:

$$\phi = -\log_2 \frac{d(mm)}{mm} \quad (1.2)$$

Es válido resaltar que es necesario la división entre la misma unidad ya que el logaritmo solo se le puede determinar a números adimensionales.

1.2.3. Media

La **media aritmética** (también llamada **promedio** o simplemente **media**) de un conjunto de diámetros de partículas es igual a la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

Una de las limitaciones de la media aritmética es que se trata de una medida muy sensible a los valores extremos; valores muy altos tienden a aumentarla mientras que valores muy bajos tienden a reducirla, lo que implica que puede dejar de ser representativa de la población.

INMAN (1952), FOLK y WARD (1957) originalmente determinaron ese estadístico a través de la media aritmética de los valores correspondientes a los porcentos 16 y 84, ya que ellos muestran una distribución normal, además de ser simétricos y corresponder a la media cero.

$$M_{\phi} = \frac{\phi_{16} + \phi_{84}}{2} \quad (1.3)$$

Con la interacción de la media se describe la distribución granulométrica asimétrica o binaria de una muestra dada, por lo que FOLK Y WARD (1957) expresaron que el diámetro medio M_z viene dado por:

$$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad (1.4)$$

Donde el 50 por ciento del peso, muestra la posición central de curva. Los valores de media calculados según INMAN (1952) y FOLK y WARD (1957) van a representar resultados idénticos para las distribuciones normales.

McCAMMON (1962) en conjunto con CARVER (1971) propusieron otras dos formas para la determinación de la media, considerando 5 y 10 puntos de la curva, tal como se muestra a continuación:

$$M_1 = \frac{\phi_{10} + \phi_{30} + \phi_{50} + \phi_{70} + \phi_{90}}{5} \quad (1.5)$$

$$M_2 = \frac{\phi_5 + \phi_{15} + \phi_{25} + \phi_{35} + \phi_{45} + \phi_{55} + \phi_{65} + \phi_{75} + \phi_{85} + \phi_{95}}{10} \quad (1.6)$$

Las fórmulas de INMAN (1952), FOLK y WARD (1957) y McCAMMON (1962) para la estimación de la media están propuesta para diferentes diámetros, los cuales están representados por la variable Φ los cuales se muestran en la abscisa del gráfico, siendo comparados con los pesos retenidos y acumulados en una escala de probabilidades no ordenadas.

Las fórmulas de FOLK e WARD (1957) que están basadas en las de INMAN (1952) van siendo plenamente usadas, aunque la fórmula propuesta por McCAMMON (1962) brinda una mayor precisión en comparación con las demás, ya que la media está estimada a partir de un mayor número de puntos, entre tanto, lo que más trabajoso que se torna es la lectura de varios porcentajes adicionales. Los diámetros medios de YANG (1996), a pesar de ser

estimados en milímetros, consideran dos puntos de distribución al igual que en la fórmula de INMAN. De acuerdo con estas consideraciones, se considera el uso de las fórmulas de FOLK y WARD por ser más eficiente.

1.2.4. Medidas de dispersión

Las **medidas de dispersión**, también llamadas medidas de variabilidad, muestran la variabilidad de una población granulométrica, indicando por medio de un número, si los diferentes valores de los diámetros están muy alejadas de su mediana, pues cuanto mayor sea ese valor, mayor será la variabilidad, cuanto menor sea, más homogénea será a la mediana medida. Así se sabe si todos los casos son parecidos o varían mucho entre ellos.

Para el cálculo de esta medida INMAN (1952) y FOLK y WARD (1957) propusieron la determinación de la dispersión a través de la tangente de una curva usando los porcentajes de 84 y 16, ya que entre ellos no existe la probabilidad de comprender intervalos entre estas dos dispersiones.

$$\sigma_{\phi} = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{2} \quad (1.7)$$

INMAN (1952) junto a FOLK y WARD (1957) con los instintos de incluir las extremidades de la curva a la medida de selección, propusieron el cálculo de la desviación estándar con la base de los porcentajes 5 y 95. Como ese intervalo involucra el 90% de toda la curva, y sabiendo que la distancia entre ellos es de 3,3 definió que la desviación estándar podría determinarse por:

$$\sigma_{\phi_e} = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{3,3} \quad (1.8)$$

FOLK y WARD (1957) sugirieron un estimado capaz de contemplar el grado de selección de un 90% de distribución, incluido los extremos y el por ciento central. La desviación estándar inclusiva σ_1 está dado por la medida de los valores expresados en las ecuaciones anteriores, o sea:

$$\sigma_1 = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6} \quad (1.9)$$

FOLK y WARD (1 957) presentan una escala cualitativa del grado de dispersión de la selección de 2 sedimentos a partir de los resultados obtenidos por la ecuación (1.9).

Tabla 1.1 Escala cualitativa del grado de dispersión, δ_1	
Valor	Criterio
< 0,35	muy bien seleccionado
0,35 - 0,50	bien seleccionado
0,50 - 1,00	moderadamente seleccionado
1,00 - 2,00	mal seleccionado
2,00 - 4,00	muy mal seleccionado
> 4,00	extremadamente mal seleccionado

McCAMMON (1962) y CARVER (1971) propusieron dos medidas para la dispersión, D_I y D_{II} basadas en 4 y 8 puntos de distribución respectivamente. Como el experimento da una curva en torno a una media entre los porcentajes 5 y 95 incluyendo 3,3 y entre los porcentajes 15 y 85, aproximadamente 2,1 δ , destinaron para la determinación de D_I la siguiente ecuación:

$$D_I = \frac{\phi_{85} + \phi_{95} - \phi_5 - \phi_{15}}{5,4} \quad (1.10)$$

Análogamente, la suma de los intervalos entre los porcentajes 3 y 97, 10 y 90, 20 y 80, y 30 y 70 comprende aproximadamente 9,1 δ , por lo que para determinar D_{II} proponen:

$$D_{II} = \frac{\phi_{70} + \phi_{80} + \phi_{90} + \phi_{97} - \phi_3 - \phi_{10} - \phi_{20} - \phi_{30}}{9,1} \quad (1.11)$$

En nuestro trabajo se determinaran las desviaciones estándar según FOLK y WARD (1957) con un porcentaje de efectividad de 79 % y la de McCAMMON (1962) y CARVER (1971) pero solo D_{II} por poseer mayor porcentaje de efectividad que D_I (79% - 89%) respectivamente.

1.2.5. Medida de asimetría

Las medidas de **asimetría** son indicadores que permiten establecer el grado de simetría (o asimetría) que presenta una población granulométrica en cuanto a la distribución de sus clases sin tener que hacer su representación gráfica.

Como eje de simetría consideramos una recta paralela al eje de ordenadas que pasa por la media de la distribución. Si una distribución es simétrica, existe el mismo número de valores a la derecha que a la izquierda de la media, por tanto, el mismo número de desviaciones con signo positivo que con signo negativo. Decimos que hay asimetría positiva (o a la derecha) si la "cola" a la derecha de la media es más larga que la de la izquierda, es decir, si hay valores más separados de la media a la derecha. Diremos que hay asimetría negativa (o a la izquierda) si la "cola" a la izquierda de la media es más larga que la de la derecha, es decir, si hay valores más separados de la media a la izquierda.

La asimetría es la descripción de una curva, pues correlaciona los porcentos de los extremos con el porcentaje central. INMAN (1952), FOLK y WARD (1957) sugirieron dos fórmulas para determinar la asimetría, una para la parte central y otra para los extremos, estas están dadas por:

$$\alpha_{1\phi} = \frac{\phi_{84} + \phi_{16} - 2\phi_{50}}{\phi_{84} - \phi_{16}} \quad (1.13)$$

$$\alpha_{2\phi} = \frac{\phi_{95} + \phi_5 - 2\phi_{50}}{\phi_{84} - \phi_{16}} \quad (1.14)$$

o sea

$$\alpha_{2\phi} = \frac{\frac{\phi_{95} + \phi_5}{2} - M_{d\phi}}{\sigma_{\phi}} \quad (1.15)$$

FOLK y WARD (1 957) proponen el cálculo de la asimetría gráfica inclusiva S_{KI} basados en el promedio de las fórmulas propuestas por INMAN (1 952) por lo que esta puede ser determinada por la siguiente expresión:

$$S_{KI} = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad (1.16)$$

La asimetría es una medida que varía entre -1 y +1. Una curva normal y asimétrica esta en cero; las distribuciones de frecuencia con asimetría positiva indican la predominancia de partículas finas, y la asimetría negativa indica la predominancia de partículas gruesas, esto cuando se plantean en una escala de valores crecientes en las abscisas.

Una escala cualitativa para la descripción del grado de asimetría de una muestra de colas apoyadas en las fórmulas de FOLK y WARD (1957) fueron sugeridas por estos mismos autores, (véase Tabla 1.2):

Tabla 1.2 Escala cualitativa para la descripción del grado de asimetría, S_{KI}	
Valor	Criterio
+1,00 +0,30	asimetría muy positiva
+0,30 +0,10	asimetría positiva (exceso de granos pequeños)
+0,10 -0,10	simétrica
-0,10 - 0,30	asimetría negativa (exceso de granos grandes)
-0,30 -1,00	asimetría muy negativa

WARREN (1974) simplificó la estimación de la asimetría presentada por FOLK y WARD (1957) y definió ese estadístico a través de:

$$S_{Kw} = \frac{\phi_{84} - \phi_{50}}{\phi_{84} - \phi_{16}} - \frac{\phi_{50} - \phi_5}{\phi_{95} - \phi_5} \quad (1.17)$$

1.2.6. Curtosis gráfica

La curtosis en unidades ϕ propuesto por INMAN (1952) y CARVER (1971) puede ser determinado por:

$$\beta_\phi = \frac{(\phi_{95} - \phi_5) - (\phi_{84} - \phi_{16})}{\phi_{84} - \phi_{16}} \quad (1.18)$$

En una curva normal, el desplazamiento representado por los intervalos entre las clases de tamaño, expresadas en ϕ , corresponden a los porcentajes 5 y 95 correspondiéndoles 2,44 veces lo de los intervalos entre ϕ_{25} y ϕ_{75} . Partiendo de este postulado, FOLK y WARD (1957) introdujeron la medida de la curtosis gráfica K_G .

$$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2,44(\phi_{75} - \phi_{25})} \quad (1.19)$$

FOLK y WARD (1957) estipularon límites para la clasificación de una curva de acuerdo con los valores de la curtosis gráfica K_G , (véase Tabla 1.3).

Tabla 1.3 Clasificación de la curva de acuerdo a los valores de la curtosis gráfica, K_G	
Valor	Criterio
< 0,67	muy platicúrtica
0,67 - 0,90	platicúrtica
0,90 - 1,11	mesocúrtica
1,11 - 1,50	leptocúrtica
1,50 - 3,00	muy leptocúrtica
> 3,00	extremadamente leptocúrtica

Como las curvas normales tienen la curtosis igual a 1 y los sedimentos dan una naturaleza que muestran una amplitud de valores de curtosis gráfica K_G de 0,50 – 8,0, se torna claro que la distribución de este parámetro es intensamente no normal (FOLK y WARD, 1957).

En la tabla 1.1 de los anexos se muestra un resumen de las fórmulas presentadas anteriormente que describen el método gráfico para la determinación de los parámetros estadísticos.

El grado de eficiencia de algunas fórmulas de estimación medida por el método gráfico está representadas por un porcentaje entre paréntesis en la columna de autores de la Tabla. Estos valores fueron determinados por McCAMMON (1962) seguido por SUGUIO (1973), en cuanto a la estimación del grado de eficiencia la selección fue establecido por FOLK (1966) seguido de SUGUIO (1973).

Conclusiones parciales

1. Existen 70 000 000 t de colas del proceso hidrometalúrgico carbonato amoniacal en Cuba, las cuales son una fuente de recursos siderúrgicos y un medio contaminante por lo que es necesario el estudio de estas en busca de darle una alternativa de utilización.
2. El análisis granulométrico por tamización permite caracterizar granulométricamente las colas de Nicaro, lo cual brinda un criterio de beneficio para concentrar elementos de interés metalúrgico por clase granulométricas y ,así, poder darle un uso adecuado y eficiente a este recurso
3. Los parámetros estadísticos caracterizan la distribución de la población granulométrica de las colas y sirve como criterio de comparación entre distintas poblaciones granulométrica.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de toda investigación necesita de herramientas para poder arribar a buenos resultados. La correcta selección de los métodos y materiales empleados validan los resultados obtenidos (Ramírez 2002), es por eso que en el presente capítulo se describen los métodos y las técnicas empleadas para la caracterización de las colas y las investigaciones realizadas con el propósito de aprovechar este importante recurso.

2.1 Características de las colas de la “Empresa Cmdte. René Ramos Latour”

De varias investigaciones se conoce que las colas de Nicaro para su explotación industrial es una mena compleja, debido a sus características físico-químicas y mineralógicas. En el año 1977 existían en el dique alrededor de 43 millones de toneladas y se considera que actualmente existen más de 70 millones de toneladas de este material. El objetivo de este capítulo es brindar la información disponible acerca de la caracterización de esta posible fuente de materia prima para la industria nacional, en la obtención de subproductos que a la vez sirvan de materia prima en algunas de las ramas de la economía.

2.1.1. Composición granulométrica

La Tabla 2.1 ofrece la composición granulométrica de una muestra de colas de Nicaro, PAUMIER, (2015) donde se muestra el contenido y la distribución, por clases granulométricas, de diferentes elementos de interés metalúrgico: Fe, Cr, Ni y Co.

Tabla 2.1 Composición química por clases granulométricas de las colas								
Clases (mm)	d _p (mm)	Rendimiento (%)	Contenido en % :					Total
			Cr	SiO ₂	Fe	Co	Ni	
+0,25	0,25	8,23	2,02	16,60	41,0	0,054	0,325	60,00
-0,25+0,20	0,225	14,8	2,53	17,02	36,02	0,192	0,337	56,10
-0,20+0,105	0,153	18,3	4,17	20,69	43,8	0,061	0,343	69,06
-0,105+0,09	0,098	12,0	3,03	15,01	44,68	0,084	0,350	63,15
-0,09+0,08	0,085	7,53	3,16	16,41	43,80	0,09	0,335	63,80
-0,08+0,05	0,065	7,96	2,78	14,77	44,95	0,078	0,345	62,92
-0,05+0	0,026	31,18	2,15	17,74	43,0	0,09	0,352	63,33
Total		100	2,80*	17,42*	42,37*	0,095*	0,344*	62,62
*: valor promedio de los contenido de cada elemento								

Como se puede observar las colas son un mineral de fina granulometría, esto está dado por que el mineral de cabeza que se procesa en la planta de níquel es previamente triturado hasta 80% de las partículas menores a 0,074mm.

El contenido y la distribución del Fe aumenta con la disminución del tamaño de las partículas, mientras que para el cromo los mayores contenidos y distribución están entre 0,125 mm y 0,030 mm; los contenidos de Al_2O_3 no presentan una regularidad bien definida, pero la distribución presenta una variación muy parecida a la del cromo.

Los valores de la Tabla 2.1 auguran la posibilidad de ser utilizados para la coloración de los elementos de interés metalúrgico.

2.1.2. Composición química

La composición química de las colas, varía en dependencia de las características del mineral alimentado a la planta de extracción de níquel y de su eficiencia (PAUMIER 2015), se ha podido determinar que esta oscila en un amplio rango (ver Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Composición química promedio de las colas de Nicaro.			
Elementos u óxidos.	Contenido, %	Elementos u óxidos.	Contenido, %
Fe_{TOTAL}	42,55	SiO_2	17,97
FeO	15,84	CaO	0,40
Fe_2O_3	41,38	MnO	1,45
Al_2O_3	4,28	Ni	0,37
MgO	11,67	P_2O_5	0,05
Cr_2O_3	3,18	Cl	0,28
S	0,14	Na_2O	0,15
CoO	0,05	K_2O	0,18
CuO	0,01	As	0,01
Fe^0	0,28	H_2O	1,93
	76,83		22,79

En el trabajo “Introducción al estudio de la caracterización física de las colas de la empresa René Ramos Latour” presentado por Mojena; García (1988) en el Evento Científico “250 Aniversario de Fundación de la Universidad de La Habana”, se estudió una muestra de colas tomada directamente del producto de rechazo de la planta de recuperación de amoníaco. A esta muestra se determinó, además de los elementos reportados en la Tabla 2.2, otros elementos químicos por análisis espectral cualitativo, los cuales se reproducen

en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Resultados del análisis espectral a una muestra de colas de Nicaro.			
ELEMENTOS	CONTENIDOS, %	ELEMENTOS	CONTENIDOS, %
Cadmio	Centésimas	Molibdeno	Trazas
Calcio	Décimas	Titanio	Milésimas
		Fósforo	Trazas

Del análisis espectral se puede plantear lo siguiente, las colas de Nicaro están constituidas fundamentalmente por Fe, Si, Al, Mg, Cr, en menor cantidad existe níquel y pequeñas cantidades de Co, Cd, Ti, Mo, y P. Fernández A J en 1979 y Ponce N en 1986 encontraron otros elementos más; K, Na, S, y C en el orden de las centésimas el K y en el de las décimas los restantes. Lo que demuestra que las colas son fuentes de materia prima formadas por diversos componentes, lo cual permite, así, trazar una estrategia para su explotación, dejando de ser una fuente contaminante y pasar a ser una fuente atractivamente económica.

La composición química de las colas utilizadas en la investigación (Tabla 2.4) fue determinada por FRX según FERNANDEZ, (2002).

Tabla 2.4 Composición química de las Colas de Nicaro			
Elementos	m-%	óxidos	m-%
Ni	0,39	NiO	0,50
Co	0,072	CoO	0,09
Fe	40,9	Fe ₂ O ₃	58,48
Cr	1,87	Cr ₂ O ₃	2,72
Mn	0,56	MnO	0,72
Mg	7,55	MgO	12,52
Al	2,32	Al ₂ O ₃	4,38
SiO ₂	19,49		19,49
SO ₃	0,2		0,4
Total	73,702		99,79

2.1.3. Composición mineralógica

A nuestro juicio uno de los estudios mineralógico más completo de los que se han realizados a las colas de Nicaro, es el efectuado por la NIPPON STEEL CORPORATION en 1977 "Informe sobre las características mineralógicas de los subproductos ferríferos de la fábrica René Ramos Latour", según el mismo, los minerales que hacen presencia por difracción de rayos X (DRX) se relacionan en la Tabla 2.5

Tabla 2.5. Minerales encontrados por DRX			
Fase Mineral	Fórmula Química	Contenido, %	Densidad, g/cm ³
Magnetita	Fe ₃ O ₄	40,20	5,2
Hematita	α-Fe ₂ O ₃	6,3	5,26
Cromita	Fe(Cr, Al) ₂ O ₄	8,20	4,65
Forsterita	2(Mg _{0,96} Fe _{0,04})O.SiO ₂	25,10	3,5
Andalucita	Al ₂ SiO ₅	4,80	3,2
Maghemita	γ- Fe ₂ O ₃	15,2	5,24

El examen al microscopio reveló la presencia de las llamadas pseudopartículas en las cuales la magnetita o la cromita forman el núcleo rodeada por finas partículas de ganga adheridas a este.

En el análisis químico realizado a una muestra de colas frescas realizadas en el instituto Mejanobr de Leningrado en el año 1972 se pudo determinar por el método de difracción por rayos X que el cobalto existente en las colas se encuentra en las fases:

Cobalto cromita (CoCr₂O₄) y en la espinela de hierro y cobalto (CoFe₂O₄)

Existen otros trabajos que aunque su objetivo específico no era el estudio de la composición mineralógica de las colas, si contribuyen a confirmar resultados obtenidos en investigaciones anteriores y en el mejor de los casos constituyen aportes al conocimiento de este complejo recurso mineral. Tal es el caso de los estudios realizados desde 1990 hasta 1994 en el CIS, CENIM y CEADEN, donde se estudiaron muestras tomadas en una instalación de beneficio combinado (clasificación – separación magnética – concentración gravimétrica) a escala de laboratorio ampliado.

Los estudios antes mencionados confirmaron que el principal mineral ferroso es del tipo magnetita, la cual aparece en granos irregulares de color negro, brillo de semimetálico. Del análisis de elementos por micro sonda electrónica (ME) se pudo apreciar que los granos contienen pequeñas cantidades de Cr, Al y Si.

Resumiendo se puede decir: que las colas de Nicaro presentan magnetita como su principal componente mineral, acompañada de forsterita y cromita en menor cantidad y otros minerales en pequeñas cantidades. El contenido de la magnetita, el mineral principal es de 51,20%.

Así mismo, las partículas de cromita presentan magnesio y aluminio en solución sólida y el contenido de cromo no va más allá de 25 – 34%.

2.1.4. Porosidad

El análisis picnométrica de las colas brindado por PAUMIER (2015) da que esta posee un 42,50% de poros, la misma posee una humedad molecular capilar de 42,40%. Esto debe ser a que en los hornos de la planta de níquel la hematita (fase ferrosa fundamental) se reduce a magnetita, producto de esta reducción escapa del mineral parte del oxígeno contenido, dejando pequeños poros en los granos de magnetita, lo que provoca una configuración esponjosa en los granos.

2.1.5. Gravedad específica y peso volumétrico

La gravedad específica se encuentra en el rango de 3,60 a 3,85 t.m⁻³ y su peso volumétrico entre 1,30 y 1,46 t.m⁻³ según datos aportados por Fernández J A (EGSC) en 1979 al Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Nicaro.

2.2 Diseño del experimento

El propósito fundamental de esta investigación es determinar mediante la tamización los diferentes parámetros estadísticos que describan el comportamiento granulométrico de las colas de la Empresa René Ramos Latour, partiendo de las posibilidades que brinda el método gráfico en correspondencia con las propiedades de los materiales a los cuales se les realizó la tamización, en función de lograr un tratamiento de este residual para su aprovechamiento más integral.

El esquema del estudio experimental se observa en las figura 1

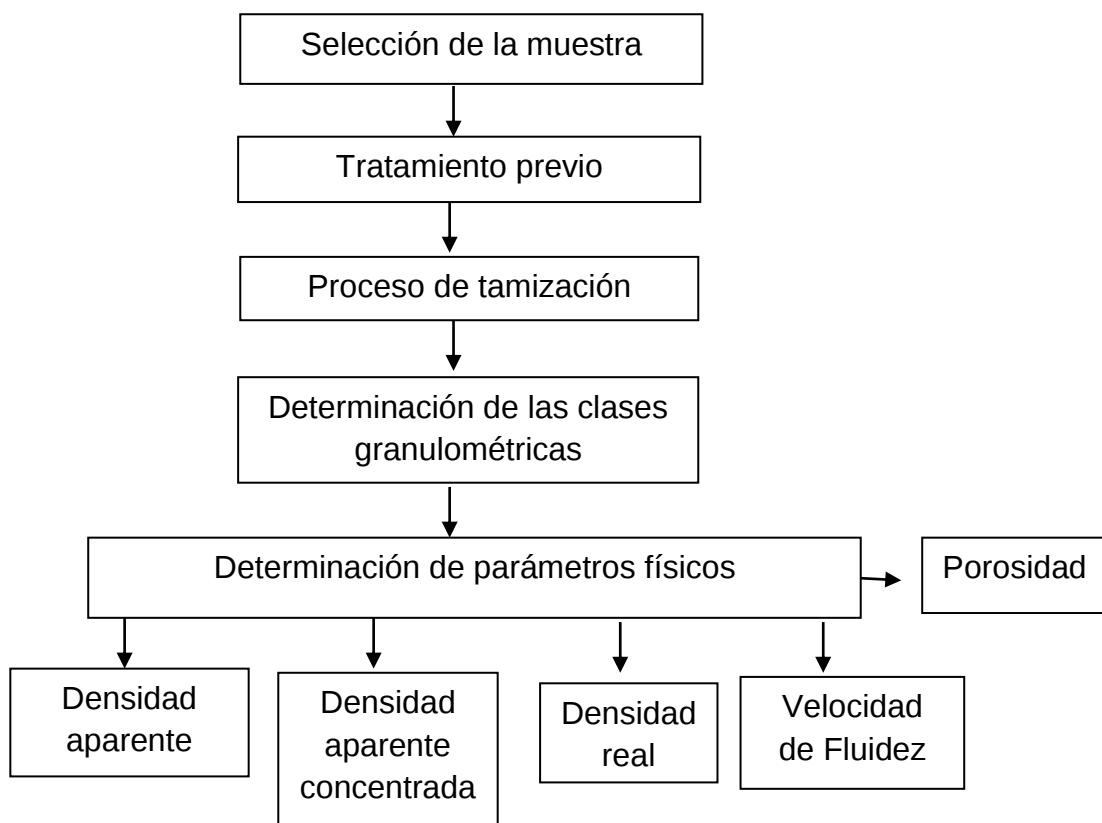


Figura 2.1 Esquema del diseño de experimento

Teniendo en cuenta el conocimiento para la determinación de los parámetros estadísticos que describan el comportamiento granulométrico de las colas de la Empresa René Ramos Latour mediante el uso de la tamización, en la figura 1 se observa que la muestra de cola fue sometida a una tamización inicial por debajo de 2 mm, un secado preliminar a una temperatura de 90 °C y posteriormente a otra tamización, siendo seleccionado un juego de tamices según la serie $2^{-n/2}$ con el objetivo de obtener información sobre el residual estudiado.

El estudio granulométrico y las técnicas analíticas aplicadas para la caracterización de las colas fueron realizados en el Laboratorio de farmacia en la UCLV (Universidad Central de las Villas) en Villa Clara, Cuba y la preparación de la muestra fue procesada en el Centro de Investigación de Soldadura de la misma universidad.

2.2.1 Tratamiento previo

Para realizar el estudio se tomó una muestra representativa de 5 kg de una muestra de 50 kg que representa una zona de cinco años de ser vertida las colas de la tecnología carbonato amoniacal de la Empresa René Ramos Latour. La muestra inicial de 5 kg fue homogenizada y cuarteada. Una porción de 200 g de esta muestra inicial fue secada a 90 °C durante 1 hora para evitar que la humedad provocara el aumento de la fuerza de adhesión mutua de las partícula finas, ya que estas desvirtúan los resultados del proceso de tamización. Posteriormente se realizó una tamización de la muestra inicial secada por debajo de 2 mm. La balanza para el pesaje (Figura 2.3), y la estufa utilizada para el secado (Figura 2.2) se muestra a continuación:

Estufa

El secado de la muestras inicial, se realizó en una estufa de control digital modelo DH6-9146A, ubicada en el Laboratorio de Farmacia de la UCLV, la misma se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Estufa utilizada para el secado de la muestra.

Balanza

Como técnica para contabilizar la cantidad de material inicial y los productos obtenidos, se utilizó una balanza digital modelo Sartorius BS 124S mostrada en la Figura 2.3, con una desviación de 0,0001 g.



Figura 2.3. Balanza utilizada para el pesaje de la muestra.

2.2.2 Caracterización granulométrica

El análisis granulométrico constituye el elemento básico para la caracterización granulométrica de las colas, objeto de estudio, para este análisis fue seleccionando el siguiente juego de tamices según la serie de $2^{-n/2}$, (1,40; 1,00; 0,71; 0,50; 0,30; 0,150; 0,063) mm. En la Figura 2 se muestra el esquema de trabajo utilizado.

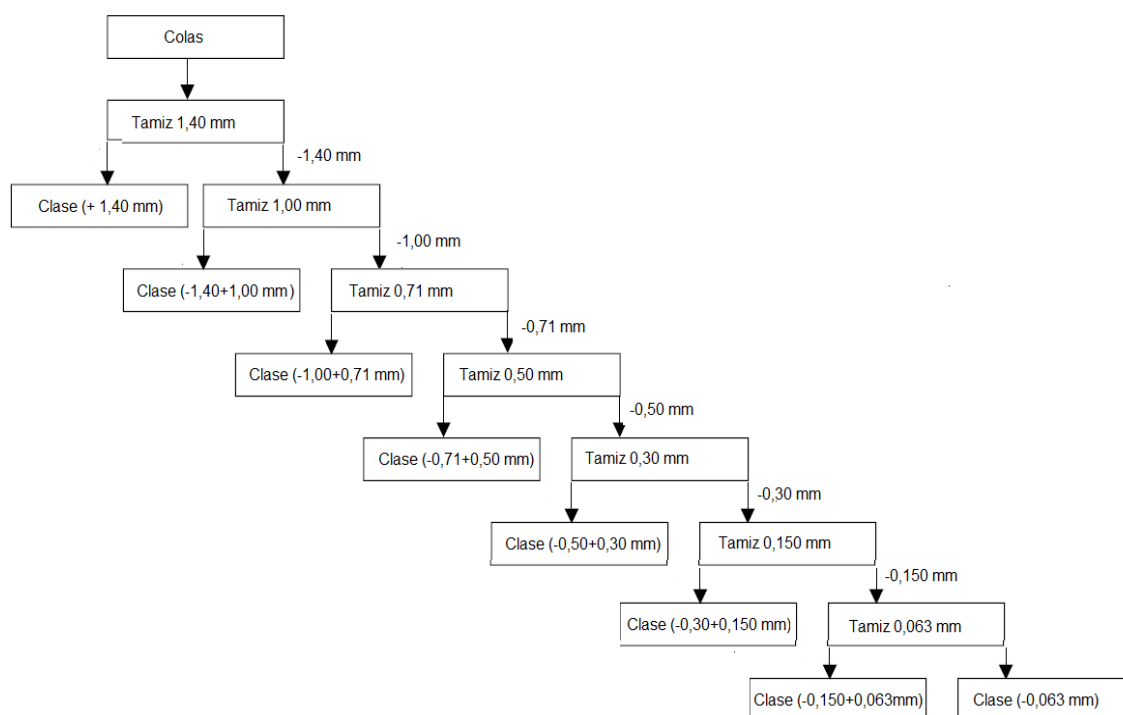


Figura 2. Esquema de flujo para el análisis granulométrico

El análisis granulométrico fue realizado en el Laboratorio de farmacia de la UCLV, utilizando una tamizadora digital marca Cusa como se muestra en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Tamizadora digital Cusa

Para la realización de este experimento primeramente se seleccionó el juego de tamices a utilizar según la serie $2^{-n/2}$, contando así con un total de siete tamices, luego se depositó la muestra de cola con un peso de 200 g, se colocó el juego de tamices en la tamizadora digital y se puso en funcionamiento durante 10 min lográndose la separación de las clases granulométricas.

n- número entero que va desde $22\ \mu\text{m}$ hasta $22\ \text{cm}$.

2.2.3 Densidad aparente y aparente compactada

La densidad aparente es una magnitud aplicada en materiales porosos y granulados, los cuales forman cuerpos heterogéneos con intersticios en los granos los cuales están llenos de aire, de forma que la densidad total del cuerpo es menor que la densidad del material poroso si se compactase.

Otra definición viene dada por ser la densidad que proporciona el volumen aparente, siendo determinada experimentalmente.

En nuestro caso la densidad aparente se determinará por la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \frac{P_{\text{pllena}} - P_{\text{pvacia}}}{V_{\text{aparente}}} \quad (2.1)$$

Donde:

$P_{\text{p-llena}}$ – peso de la probeta llena de cola, g.

$P_{\text{p-vacia}}$ – peso de la probeta vacía, g.

V_a – Volumen aparente que ocupa la muestra dentro de la probeta, cm^3 .

Para poder lograr la determinación de este parámetro se procede de la siguiente manera:

1. Pesar la probeta vacía
2. Tomar la muestra y dejarla caer en la probeta hasta un volumen de $100\ \text{cm}^3$.
3. Pesar la probeta llena

Obtenido los valores medidos se procede a su cálculo determinando el peso de la probeta el cual es la diferencia que existe entre la probeta vacía y la llena.

En el caso de la densidad aparente concentrada se procede de una manera similar, primero teniendo el peso de la probeta vacía se procede a llenar la probeta hasta un volumen de 100 cm³ dándole un tiempo de 10 min en un vibrador con frecuencia de 7 rpm , luego se mide el volumen final y se determina la diferencia entre dichos volúmenes obteniéndose así el volumen real, la fórmula para el cálculo es la misma que en la densidad aparente, con la diferencia de que la masa se mantiene constante y lo que varía es el volumen.

2.2.4 Velocidad de fluidez y ángulo de reposo

Para la determinación de estos parámetros se procede de la siguiente manera:

- 1- Se fija la masa de la muestra a utilizar
- 2- Se deja caer esa masa por un dispositivo en forma de embudo y se toma el tiempo con un cronómetro que demora en llegar esa masa a la superficie.
- 3- Medir la altura de la pila creada por la muestra al caer.
- 4- Medir los diferentes radios de la pila formada por la muestra depositada.
- 5- Se mide el diámetro de salida del dispositivo en forma de embudo.

Obtenido ya los datos necesarios la determinación de estos parámetros se realizará por las ecuaciones siguientes:

$$V_{fluidez} = \frac{m}{0,785.t.d_{sal}^2} \quad (2.2)$$

Donde:

m– masa de la muestra, g

t – Tiempo de flujo, s

d_{sal} – Diámetro de salida del embudo, cm

Otro de los parámetros que se puede determinar es el ángulo de reposo.

Se denomina **ángulo de reposo** de la muestra de cola al ángulo formado entre el copete y la horizontal de la base, cuando el material se estabiliza por sí mismo. Al acumularse la muestra de cola sobre el plano, ésta queda apilado en

forma de cono. El ángulo formado entre la generatriz del cono y su base se denomina ángulo de reposo.

Existen varios factores que disminuyen el ángulo de reposo estos son expuestos a continuación.

- Menor tamaño de la partícula
- Menor rugosidad de la superficie de la partícula
- Mayor esfericidad de la partícula
- Menor humedad de la pila
- Mayor homogeneidad de la pila

La ecuación que nos permite la determinación del mismo es la siguiente:

$$\alpha_{\text{reposo}} = \text{cont} \frac{h}{r_p} \quad (2.3)$$

Donde:

h- Altura, cm

r_p – radio promedio, cm

2.2.5 Densidad picnométrica

La densidad de un material es la masa por unidad de volumen que ocupa. Son unidades habituales de densidad el g/cm³, kg/m³ o t/m³.

Sin embargo, los materiales porosos no rellenan todo el espacio. En el volumen que ocupan dejan unos espacios vacíos o huecos que se denominan poros. Normalmente los poros se encuentran llenos de gas o de líquido y van a dificultar la determinación del volumen y de la masa real de sólido a la hora de medir su densidad.

La presencia de porosidad también introduce pequeñas desviaciones de los valores de la masa que se determina por pesada en una balanza, ya que los poros están llenos de aire, y además la pesada se hace en aire donde el objeto está sometido al empuje del fluido. No obstante, estos efectos son despreciables y no suelen ser tenidos en cuenta, sobre todo cuando el gas es el aire.

El volumen de un material también varía con la temperatura (dilatación térmica) por lo que la densidad varía con la temperatura. Por tanto, los datos de densidad deben ir acompañados de la temperatura a la cual se han medido.

Material e instrumental necesarios

Picnómetros de Gay-Lussac de 50 ml (tres unidades)

Embudo de cuello fino y largo

Jeringa de plástico con aguja larga

Vaso de precipitado o recipiente de boca ancha

Balanza de precisión 0,001 g

Paño seco

Muestra de cola (200 g)

Agua destilada

Procedimiento para la determinación de esta propiedad

Se dispone de la muestra de cola (tamaño de partícula menores de 2 mm) debidamente seleccionado y secado. La temperatura del ensayo será la temperatura del laboratorio (32 °C), esta fue determinada con el uso de un termómetro.

Se realizan tres experimentos independientes, por lo que los pasos siguientes se repetirán tres veces, una vez con cada uno de los tres picnómetros.

El volumen de cada picnómetro está calibrado con su cuello, por lo que ambas partes (cuerpo y cuello) fueron marcados con un número para identificarlos. Se comprueba que los cuellos de los picnómetros están colocados correctamente y que no se borrará el número durante el experimento.

Enrasado del picnómetro con agua y determinación de M_{P+L}

- Se retira el cuello del picnómetro y se llena hasta arriba con agua destilada.
- Introducir el cuello verticalmente con un movimiento rápido para que el agua ascienda por el capilar del cuello.

Una vez que el cuello esté bien encajado, se enrasa el picnómetro retirando el exceso de agua (utilizando la aguja introducida por el capilar del cuello) hasta la marca que tiene en el cuello.

Si han quedado burbujas atrapadas hay que eliminarlas dándole golpecitos con el dedo al picnómetro o bien pinchándolas o absorbiéndolas con la aguja.

- Vertir agua en un vaso de precipitado para poder llenar cómodamente la jeringa de agua cuando lo necesites.

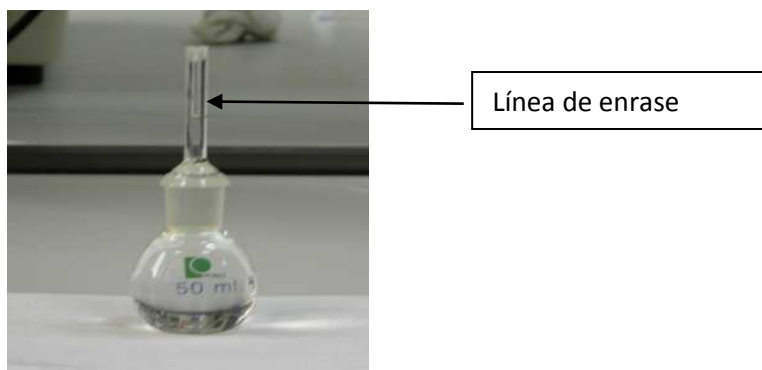


Figura 2.2. Picnómetro de 50 ml.

- Secar el exterior del picnómetro con un paño y pesarlo en la balanza de sensibilidad 0,001 g, esta es la M_{P+L}

Determinación de M_p

- Para la determinación de la masa del picnómetro primeramente se seca y posteriormente se pesa.

Determinación de M_{P+S}

- Introducir la muestra de cola con ayuda del embudo en el picnómetro vacío.
- Limpiar el picnómetro y pesarlo en la balanza de 0,001 g para determinar M_{P+S}

Determinación de M_{P+L+S}

La masa M_{P+L+S} es la del picnómetro con agua y el sólido

- Introducir el embudo en el picnómetro de forma que el extremo inferior se sitúe por debajo de la parte donde ajusta el cuello del picnómetro pero sin tocar el agua.
- Vertir la muestra en el embudo poco a poco para introducirla en el picnómetro.
- Una vez introducida la muestra, agitar circularmente el picnómetro para que el material se moje bien y se eliminen las burbujas de aire atrapadas entre las partículas de la muestra.
- Secar el picnómetro por fuera y pesarlo para determinar M_{P+L+S}

Luego se repite este proceso para los otros 2 picnómetros, de modo que en total, tendremos 3 experimentos independientes.

Lavar el material utilizado en la práctica:

Los picnómetros se lavan con abundante agua del grifo, luego se enjuagan con un poco de agua destilada y se dejan secando en el lugar de trabajo.

La aguja se enjuaga bien utilizando la jeringa y el agua destilada sobrante del experimento y se deja secando en la estufa a 60 - 70 °C.

El resto de material se deja secando en el lugar de trabajo.

Sustituyendo en la siguiente expresión obtenemos la densidad de la muestra de colas así como la de las clases granulométricas:

$$\rho = \frac{M_{P+S}-M_P}{[M_{P+S}+M_{P+L}]-[M_{P+S+L}+M_P]} \cdot \rho_L \quad (2.4)$$

Donde:

M_{P+S} – Peso del picnómetro más la muestra de cola, g

M_P – Peso del picnómetro, g

M_{P+L} – Peso del picnómetro más el líquido (agua), g

M_{P+S+L} – Peso del picnómetro más la muestra de cola más el líquido, g

ρ_L – Densidad del líquido, g/cm³

2.2.6 Porosidad

La porosidad de la muestra seleccionada viene dada por el porcentaje de intersticios existentes en la misma frente a su volumen total. Esta se determina a partir de las densidades aparente y real de dicha muestra según la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\rho_R - \rho_A}{\rho_R} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Donde:

P- Porosidad de la muestra de cola, %.

ρ_R –Densidad real de la muestra de cola, g/cm³.

ρ_A - Densidad aparente de la muestra de cola, g/cm³.

Conclusiones parciales

1. Químicamente son una mena polimetálica constituidas fundamentalmente por Fe, Si, Al, Mg, Cr encontrándose en menor cantidades el níquel y pequeñas cantidades de Co, Cd, Ti, Mo.
2. Granulométricamente predominan las partículas finas menores de 0,225 mm (78,68 %), donde se concentra la mayor cantidad potencial de hierro hasta 92,85 %; cromo hasta 6,20 %; níquel hasta 0,75 % y de cobalto hasta un 0,20 % .
3. La tamización separa a la muestra de cola en clases granulométricas las cuales presentan una distribución no homogénea e irregular de los elementos de interés metalúrgico (Fe, Cr, Ni y Co).
4. Conociéndose la composición química de las colas de Nicaro mediante el uso de la tamización se puede valorar la cantidad potencial de Fe, Co, Ni y Cr que existe en ellas.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el estudio de las colas del proceso Carbonato Amoniaco de Nicaro, reviste gran importancia la aplicación de los métodos de beneficio, debido a que aportaría la información necesaria sobre la cantidad potencial de los diferentes elementos presentes en las colas, en este caso cuando se aplica el proceso de beneficio de tamizado; y con ello la definición para su posible aprovechamiento.

3.1 Caracterización de la distribución granulométrica obtenida, usando parámetros estadísticos.

Para caracterizar una distribución granulométrica se han introducido los “momentos” conocidos del cálculo estadístico. Los momentos son ciertas cantidades numéricas calculados a partir de una distribución. Mientras más parámetros y/o momentos de distribución se conozcan mayor información se tiene sobre la distribución granulométrica.

Los parámetros más usados en el análisis granulométrico son los siguientes:

Tabla 3.1 Parámetros más usados en el análisis granulométrico	
Dominación	Designación
Mediana	M_d
Media	M_2
Desviación estándar	D_{II}
Asimetría gráfica	S_{K_I}
Curtosis	K_G

Para la determinación de los momentos de esta distribución granulométrica hay que determinar los parámetros designados como clase granulométrica y valor medio de las clases granulométricas que se ponen en función de su contribución másica.

La clase granulométrica es el conjunto de granos que se encuentra en un rango acotado por dos tipos de tamaño de granos: el tamaño de gramo límite superior (d_i) y el correspondiente al del límite inferior (d_{i-1}): $d_i > d_{i-1}$

El valor medio del tamaño de una clase granulométrica d_c es la semisuma de de los tamaño de grano límite superior (d_i) y el correspondiente al límite inferior (d_{i-1}) que define dicha clase.

La contribución másica de cada clase granulométrica en el colectivo de granos se puede representar gráficamente por dos tipos de curvas: la curva sumatoria granulométrica (ascendente o descendente según el tamaño del grano, d_c) y la curva de frecuencia (distribución).

La curva sumatoria se confecciona al adicionar de forma ascendente la contribución másica de la clase granulométrica inferior a la superior en función del valor medio del tamaño de grano de cada clase granulométrica en cuestión (ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Resultados de la tamización de la muestra de cola de Nicaro. Secuencia de tamices $2^{-n/2}$.						
Malla de los Tamices (mm)		d_c (mm)	m (%)	Σ m (asc), %	Σ m (desc), %	$\phi = -\log_2(d)$
2,00	1,40	1,7	3,26	3,26	96,74	-0,77
1,40	1,00	1,20	2,51	5,77	94,23	-0,26
1,00	0,71	0,86	2,21	7,98	92,02	0,23
0,71	0,50	0,61	3,26	11,24	88,76	0,72
0,50	0,30	0,40	10,09	21,32	78,68	1,32
0,30	0,15	0,23	31,11	52,43	47,57	2,15
0,15	0,063	0,11	36,83	89,26	10,74	3,23
0,063	0,001	0,03	10,74	100,00	0	4,97
Total			100,00			

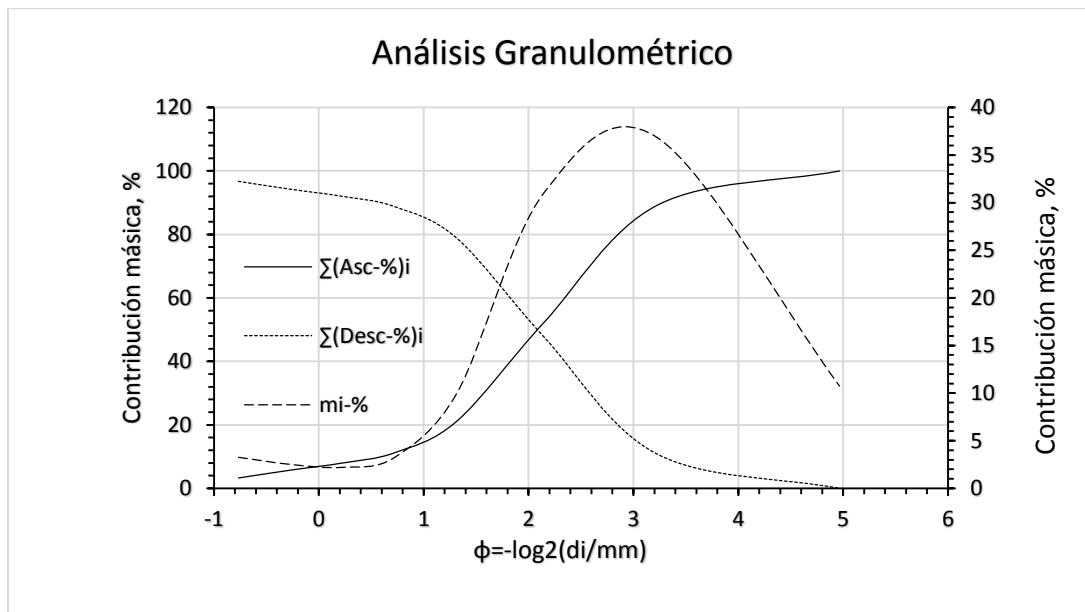


Figura 3.1 Representación de la curva de frecuencia y las sumatorias de ascendente y descendente.

La curva granulométrica de frecuencia se construyó sobre la base de graficar la contribución individual másica porcentual ($C[m\%]$, eje de las ordenadas) de cada clase granulométrica en función del valor medio del tamaño de grano (d_c ; eje de las abscisas) : $C[m\%] = f(d_m)$.

Tanto en la Tabla 3.2 como en la Figura 3.1 se expone los resultados del análisis granulométrico por tamización realizado a la muestra de cola seleccionada para la realización de este trabajo.

La representación de la curva de frecuencia y las sumatoria de ascendente y descendente de la distribución granulométrica realizada con el diámetro en milímetro se muestra en la Figura 1.1 de los Anexos.

Para la determinación de estos estadísticos se utilizaron las ecuaciones:

Mediana: ecuación (1.1) del epígrafe 1.2.2.

Media: ecuación (1.6) del epígrafe 1.2.3.

Desviación estándar: ecuación (1.11) del epígrafe 1.2.4.

Asimetría gráfica: ecuación (1.16) del epígrafe 1.2.6.

Curtosis gráfica: ecuación (1.19) del epígrafe 1.2.7.

A partir de los datos brindados en la Tabla 3.2 se construye la Figura 3.2 la cual permite determinar los diámetros involucrados en los cálculos, los valores obtenidos de estos diámetros se muestran en la Tabla 3.3.

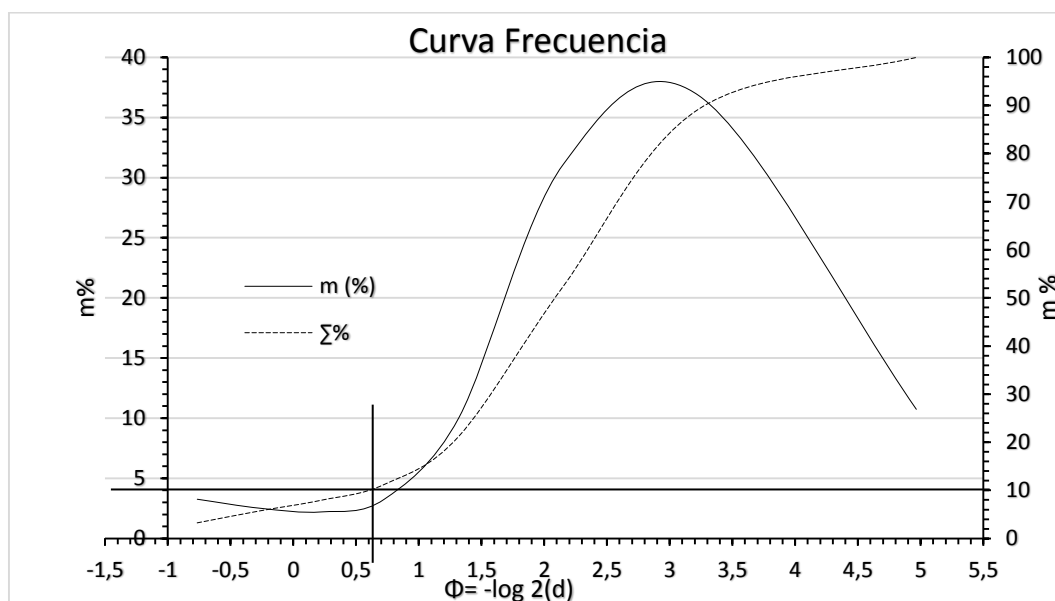


Figura 3.2 Distribución granulométrica de las colas de Nicaro.

Utilizando la curva de sumatoria de porciento ascendente ($\Sigma\%$) de la Figura 3.1 se determinan los diámetros en función de Φ necesarios para la realización de los cálculos de los diferentes parámetros estadísticos usados para la descripción de las colas de Nicaro (véase Tabla 3.3).

La distribución granulométrica de las colas de Nicaro con el diámetro expresado en milímetros se muestra en la Figura 1.2 de los Anexos.

Tabla 3.3 Valores de los diámetros en función de Φ necesarios para los cálculos.										
$\Phi_{0.05}$	$\Phi_{0.10}$	$\Phi_{0.16}$	$\Phi_{0.25}$	$\Phi_{0.30}$	$\Phi_{0.35}$	$\Phi_{0.45}$	$\Phi_{0.50}$	$\Phi_{0.55}$	$\Phi_{0.65}$	$\Phi_{0.70}$
-0,52	0,59	0,98	1,35	1,48	1,60	1,82	1,93	2,08	2,31	2,42
$\Phi_{0.75}$	$\Phi_{0.84}$	$\Phi_{0.90}$	$\Phi_{0.95}$	$\Phi_{0.15}$	$\Phi_{0.85}$	$\Phi_{0.80}$	$\Phi_{0.97}$	$\Phi_{0.20}$	$\Phi_{0.3}$	
2,58	2,8	2,97	3,1	0,91	2,82	2,7	3,15	1,18	-0,78	

Para la determinación de los diámetros de las partículas que limitan la acumulación de masa de las otras granulometrías (Φ), se traza una línea perpendicular desde el porcentaje ubicados en el eje las ordenadas, dicha línea

corta a la curva de $\Sigma \%$ en un punto, a partir del cual se traza una línea perpendicular hasta el eje de las abscisas determinándose así el diámetro de la partícula correspondiente a ese porcentaje. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo para la determinación del diámetro ϕ_{10} el cual tiene un valor de 0,59 mm correspondiéndole un 10 % en el eje de las ordenadas.

Con los valores de los diámetros de las partículas expuestos en la Tabla 3.3 y al ser sustituidos en las ecuaciones anteriormente mencionadas, los valores de los parámetros estadísticos calculados son:

Tabla 3.4 Valores de los parámetros estadísticos calculados		
Parámetros estadísticos	Resultados	
	$\phi = -\log_2(d)$	
Mediana (TRASK (1930) y SUGUIO (1973))	1,94	0,26
Media (McCAMMON (1962))	1,81	0,286
Desviación estándar II (CARVER (1971))	0,96	0,513
Asimetría gráfica inclusiva (FOLK Y WARD (1957))	-0,20	1,148
Curtosis gráfica(FOLK Y WARD (1957))	0,39	1,36

En la tabla 3.4 se muestran los valores de los parámetros estadísticos utilizados para describir la muestra de cola seleccionada en este trabajo, el valor obtenido de la media nos indica la existencia de un predominio de las fracciones granulométricas más finas ($\leq 0,232$ mm) las cuales representan más del 80 % de la masa total de las colas.

El valor de la asimetría gráfica ($S_{KI}=1,148$ mm) según la clasificación brindada por FOLK y WARD (1957) da como resultado que la muestra de cola seleccionada es asimétrica muy positiva, lo que nos indica un predominio de granos finos ($\leq 0,232$ mm).

La curtosis gráfica con un valor de 0,36 mm nos permite clasificar la curva de frecuencia de la muestra según FOLK y WARD (1957) como muy platicúrtica los que nos indica que existe un desplazamiento hacia las partículas con diámetros pequeños.

3.2 Determinación de las densidades aparente, aparente concentrada de la muestra de cola seleccionada.

3.2.1 Densidad aparente y aparente concentrada

Para la determinación de estos parámetros se procede según la metodología planteada en el epígrafe 2.2.3 obteniéndose:

- Peso de la probeta vacía – 102,2 g
- Peso de la probeta con la muestra de cola – 250, 2 g
- Volumen aparente – 100 cm³

Luego de obtenidos los valores necesarios para la determinación de este parámetro se sustituyen en la ecuación (2.1) obteniéndose como resultado que la muestra de cola seleccionada posee una densidad aparente de 1,48 g/cm³.

Para la determinación de la densidad aparente concentrada se procede de la misma manera obteniéndose:

- Peso de la probeta vacía – 77,4 g
- Peso de la probeta con la muestra de cola – 177,4 g
- Volumen aparente – 70 cm³

Obtenidos los valores necesarios y sustituyéndolos en la ecuación (2.1) se obtiene que la muestra presenta una densidad aparente por asentamiento de 1,43 g/cm³.

3.3 Velocidad de fluidez y ángulo de reposo

Para la determinación de la velocidad de fluidez de la muestra de cola se procede según la metodología planteada en el epígrafe 2.2.4 por lo que se obtiene:

- Masa de la muestra fijada – 100 g
- Tiempo que demora la muestra en depositarse – 2 s
- Diámetro de salida del embudo – 1,2 cm

Sustituyendo estos valores en la ecuación (2.2) se obtiene que la muestra de colas seleccionada posee una Velocidad de fluidez de 44,232 g/cm² .s

Para la determinación del ángulo de reposo se procede según la metodología del epígrafe anteriormente mencionado, donde se obtiene que:

- Altura de la pila formada por la muestra sobre la superficie – 1,7 cm
- Radios de la pila $r_1=6,1$ cm, $r_2=5,2$ cm, $r_3=5,3$ cm, $r_4=3,8$ cm, $r_5=3,5$ cm, $r_6=4$ cm, $r_7=4,9$ cm y $r_8=5,6$ cm.

Al determinar el promedio de estos radios se obtiene que el radio promedio r_p posee un valor de 4,8 cm.

Obtenido los valores necesarios y sustituyéndolos en la ecuación (2.3) se tiene que el ángulo de reposo posee un valor de 19,50 grados.

3.4 Densidad picnométrica

Para la determinación de la densidad picnométrica se procede según la metodología planteada en el epígrafe 2.2.5 obteniéndose:

- Masa del picnómetro vacío (M_p) – 26,04 g
- Masa del picnómetro más la muestra de cola (M_{p+s}) – 27,04 g
- Masa del picnómetro más la muestra de cola más el líquido – 76,76 g
- Densidad del líquido (agua) – 1g/cm^3

Obtenido los valores necesarios para el cálculo y sustituyéndolos en la ecuación (2.4) se tiene que la muestra de cola seleccionada posee una densidad picnométrica de $3,68\text{ g/cm}^3$.

Relacionando la densidad que presenta las colas y sus clases granulométricas respecto a su distribución granulométrica se obtiene:

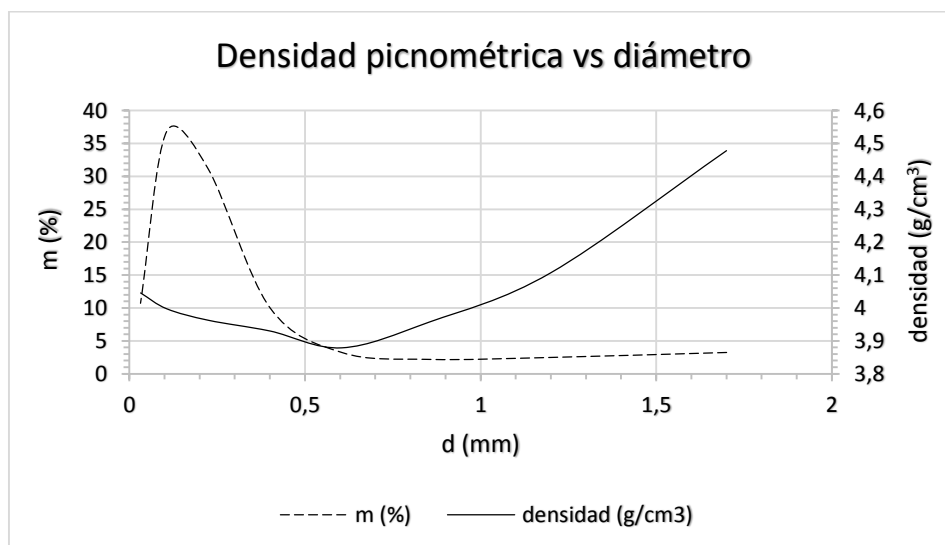


Figura 3.3 Comportamiento de la densidad respecto al diámetro de partícula

Analizando la Figura 3.3 se muestra que al producirse un aumento de la granulometría se produce también un aumento de la densidad de las colas lo que brinda la presencia de micro perdigones en el yacimiento con el hierro concentrado, lo cual se debe a que la muestra de cola seleccionada para el análisis era una muestra depositada en el dique hace varios años.

3.5 Análisis de la porosidad de las colas de Nicaro.

La porosidad posee una gran importancia en el análisis granulométrico, ya que nos brinda la posibilidad de conocer la cantidad de intersticios existente en la muestra de cola en torno a su volumen total, razón por la cual es necesario hacer una comparación entre el valor de la porosidad calculada (59,80 %), valor que fue determinado según la ecuación (2.5) del epígrafe 2.2.6, y el expuesto en el epígrafe 2.1.4 (42,40 %), como se puede apreciar claramente el valor determinado en este trabajo es superior al expuesto en dicho epígrafe, lo que nos demuestra una mayor existencia de intersticios entre las partículas gruesas y las finas causa que puede estar determinada por la presencia de agua en la muestra seleccionada y por la distribución granulométrica que esta presenta.

3.6 Recálculo de la cantidad potencial de los elementos metálicos seleccionados (Fe, Cr, Ni y Co).

Criterio de selección

Con el objetivo de realizar un análisis de los elementos que componen las colas de Nicaro, y determinar los potenciales de alguno de estos se seleccionaron cuatro elementos principales en su composición química (Fe, Cr, Ni y Co). Estos fueron seleccionados ya que para la industria siderúrgica son de suma importancia debido a que son elementos básicos para la obtención de aceros inoxidables de la serie 300, los cuales son muy usados en Cuba y el resto del mundo.

Fundamento del porque tomar la tamización como criterio de beneficio

Se seleccionó el método de la tamización como criterio de beneficio debido a que este método es sencillo, barato y de alto grado de eficiencia, el cual nos permite separar las colas en determinadas clases granulométricas, lográndose la comparación del contenido de los elementos de carácter siderúrgico por clases granulométricas, lo cual consiente proponer una metodología de beneficio para logra una mayor concentración de estos elementos (Fe, Cr, Ni y Co) en determinadas clases granulométrica.

A partir del análisis de la composición química y granulométrica de la Tabla 2.1 se seleccionaron los elementos químicos Cr, Fe, Ni y Co, que representan el 73,03 % de los reportados por PAUMIER (2015) en dicha Tabla. Además, se estableció la dependencia entre contenido de estos elementos químicos con el diámetro de la clase. Conociéndose los contenidos porcentuales de estos elementos metálicos (Tabla 2.1) existentes en las $70 \cdot 10^6$ t se puede determinar la cantidad potencial de cada uno de estos elemento químicos correspondientes a las colas acumuladas en el dique. En la Tabla 3.5 se muestran las cantidades potenciales de estos cuatro elementos metálicos.

Tabla 3.5 Cantidad potencial de cada uno de los elementos químicos en las colas.					
Elementos químicos	Fe	Cr	Ni	Co	Total
Cantidad potencial (t)	29 725 000	1 984 000	238 700	64 900	32 012 600

En la Tabla 3.5 se expone la cantidad potencial de estos cuatro elementos metálicos, que representa 32012600 t, potencial que puede ser valorado para trazar una posible estrategia para la obtención de ciertos aceros aleados con contenidos hasta un 6,12 % de Cr.

En la recopilación bibliográfica de PAUMIER (2015) se expone un análisis granulométrico asociado a la composición química por clases granulométricas. La granulometría expuesta en esa recopilación bibliográfica se muestra en la Tabla 2.1. y en la Figura 3.4.

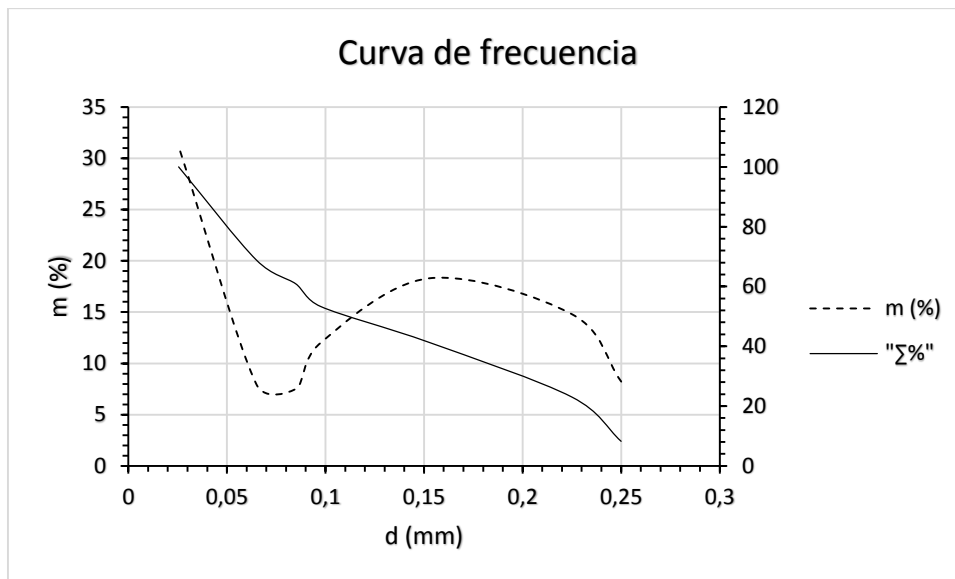


Figura 3.4. Representación de la curva de frecuencia y la sumatoria ascendente.

Al valorar los datos de la Tabla 2.1 y el desarrollo de la curva de frecuencia se puede considerar que la granulometría reportada es una alteración de la original (natural), lo que indica que ésta es obtenida, probablemente, por un proceso de molienda o de trituración.

La granulometría de la muestra seleccionada (Figura 3.5 y Tabla 3.6) en este trabajo se obtuvo según los procedimientos expuestos en los incisos 2.2.1 y 2.2.2, la cual difiere en el desarrollo de la distribución granulométrica de la curva de frecuencia de la reportada (Figura 3.4) (por PAUMIER (2015) (véase Figura 3.4).

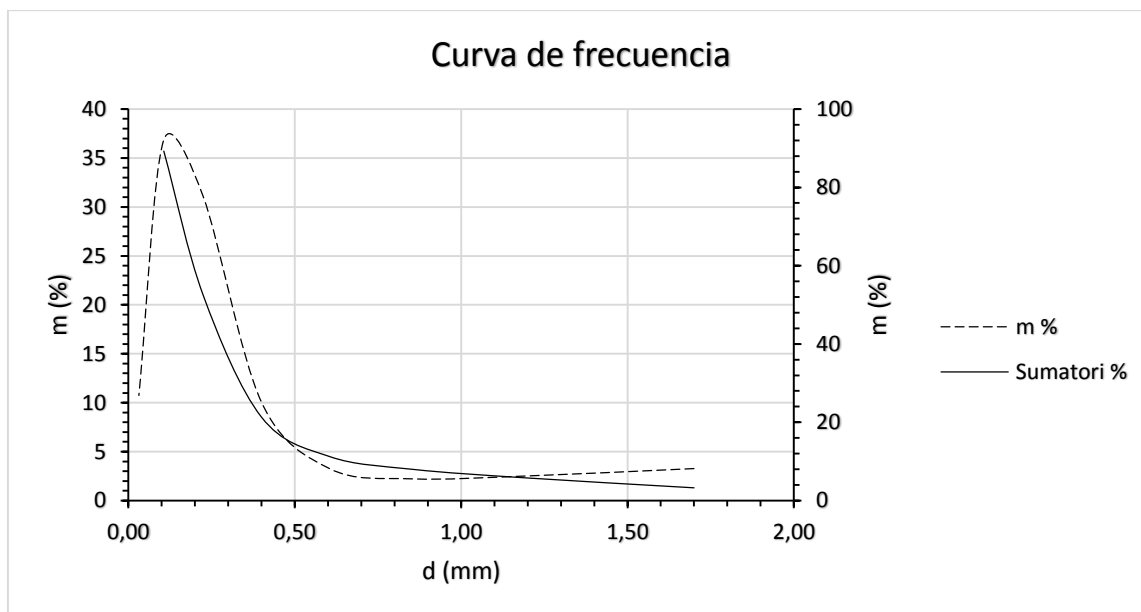


Figura 3.5. Representación de la curva de frecuencia y la sumatoria ascendente

Tabla 3.6 Distribución granulométrica de las colas NC por tamices									
Malla de los Tamices (mm)		Tamices, m (g)		Masa de la clase granulométrica.		d_c (mm)	Σ Asc (%)	Σ Desc (%)	
		Vacíos	con cola	m, (g)	m, %				
2,00	1,40	388,5	395	6,5	3,26	1,7	3,26	96,74	
1,40	1,00	366,5	371,5	5,0	2,51	1,20	5,77	94,23	
1,00	0,71	361,0	365,4	4,4	2,21	0,86	7,98	92,02	
0,71	0,50	335,4	341,9	6,5	3,26	0,61	11,24	88,76	
0,50	0,30	325,7	345,8	20,1	10,09	0,40	21,32	78,68	
0,30	0,15	298,8	360,8	62,0	31,11	0,23	52,43	47,57	
0,15	0,063	297,2	370,6	73,4	36,83	0,11	89,26	10,74	
0,063	0,001	349,2	370,6	21,4	10,74	0,03	100,00	96,74	
Total		2722,3	2921,6	199,3	100,00				
d_c – diámetro promedio de las clases granulométricas									

Tanto en la Tabla 3.6 como en la Figura 3.5 son expuestos los resultados del análisis granulométrico por tamización realizado a la muestra de cola seleccionada en este trabajo, la cual proviene de la empresa Comandante Rene Ramos Latour de Nicaro.

Al comparar la granulometría reportada (Figura 3.4) con la obtenida en este trabajo se observa que la masa de la primera se enmarca granulométricamente en un 78,68 % de la masa total de la segunda. La

superposición granulométrica de estos dos resultados de tamización se expone en la Figura 3.6. Esta comparación de los resultados de la tamización reportada con la realizada tiene como objetivo recalcul, en el sector granulométrico seleccionado de la curva de frecuencia experimental obtenida (1), la cantidad potencial de los elementos metálicos más utilizados en la siderurgia.

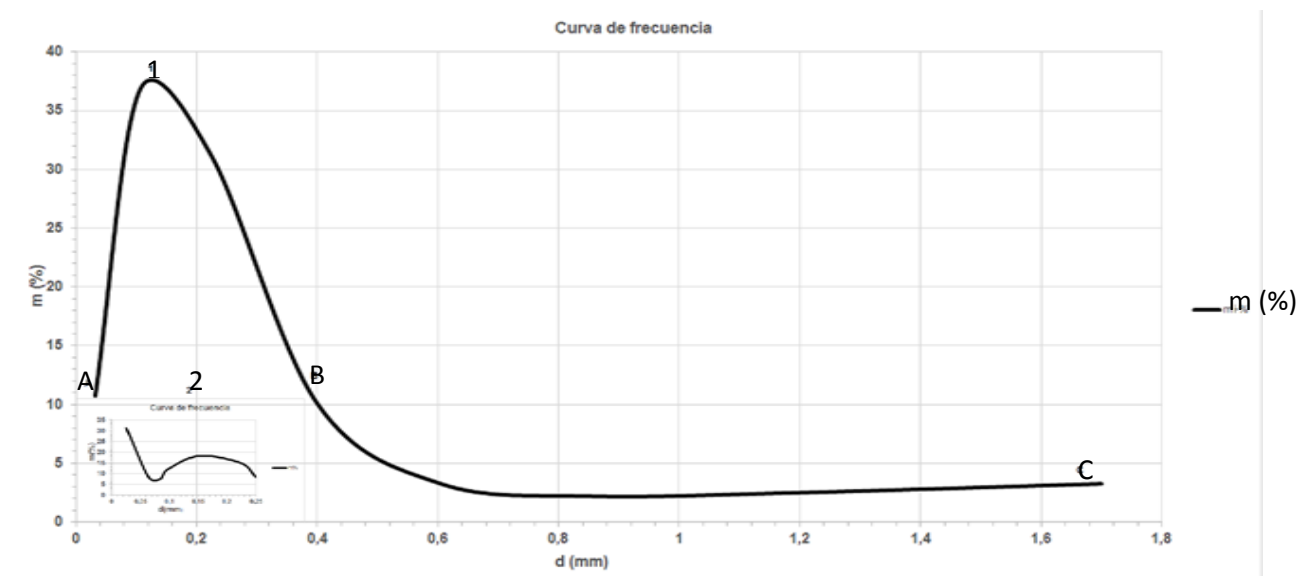


Figura 3.6 Superposicion de la granulometría reportada (1) con la obtenida en este trabajo (2).

En la Figura 3.6 obtenida por la superposicion de la granulometria reportada (Figura 3.4), y la obtenida en este trabajo (Figura 3.5) con el objetivo de mostra la enmarcacion de estas dos granulometrias, se muestra el segmento granulometrico AB el cual nos indica la enmarcación de la granulometría reportada con la obtenida, el segmento BC se desecha debido a que este representa la fracción gruesa de la muestra seleccionada (21,32 %), en la cual se encuentran los menores contenidos potenciales de Fe, Cr, Ni y Co.

Para la recalculación de los potenciales de estos elementos se considera que el 100% de la masa de cola es de 70 millones de toneladas, lo cual quiere decir que en ese 100 % de masa están presentes todos los elementos mostrados en la tabla 2.1. De elementos reportados en la cola, se seleccionaron cuatro (Fe, Cr, Ni y Co) que representan el 45,73 % de la masa total de las colas como se muestra en la Tabla 2.1.

En el estudio realizado de la composición granulométrica total (Tabla 3.6) solo se escogieron las tres clases granulométrica más finas (0,3-0,15 mm; 0,15-0,063 mm; 0,063-0,001 mm), las cuales representan el 78,68 % de la masa total de las colas ($70 \cdot 10^6$ t), y estas involucran las partículas menores de 0,232 mm que son las que muestran el mayor potencial de estos elementos químicos.

Por lo tanto todas las clases granulométricas en su conjunto contienen:

$$70 \cdot 10^6 \cdot 0,7868 = 55072755 \text{ t} .$$

Como estos cuatro elementos representan el 45,73 % de la masa, entonces la masa total de las colas que involucran a estos elementos será:

$$55072755 \cdot 0,4573 = 25186030 \text{ t} .$$

3.6.1 Cromo

A partir de la composición química y granulométrica reportada por PAUMIER (2015), Tabla 2.1 se puede apreciar que el valor promedio ponderado del contenido de cromo en todas las clases granulométricas es de 2,83 % ubicado en el eje de las ordenadas, valor que permita trazar la línea divisora inferior AB, la cual indica el contenido mínimo de este metal en la masa total de cola, por lo que se considera que a partir de esa línea divisora hacia arriba se va a encontrar la mayor cantidad potencial de dicho elemento. El valor máximo de contenido a lo largo de la curva de frecuencia va a estar delimitado por la línea superior divisora DC. Entre estas dos líneas formadas, queda encerrado un 52,4 % del contenido de cromo en la masa total (25186030 t). A lo largo de la trayectoria de estas dos rectas y planteándose como estrategia de beneficio la selección de dos tamices (0,18 mm - 0,028 mm) la curva de frecuencia va a ser cortada en dos puntos, a partir de los cuales se trazará una línea perpendicular a cada punto hasta hacerla coincidir con el eje de las abscisas quedando encerradas entre esta línea (AD Y BC) el rango de granulometría donde se encuentra la mayor cantidad potencial de este elemento metálico, (ver Figura 3.6).

Este procedimiento se seguirá de igual manera para la determinación de la cantidad potencial del hierro, níquel y el cobalto.

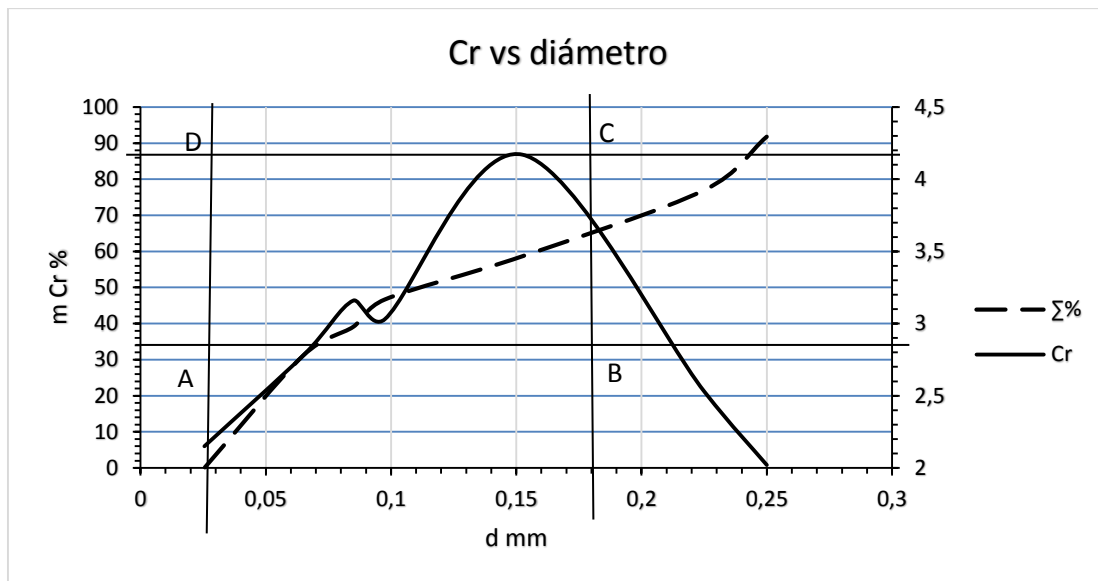


Figura 3.6 Dependencia de la masa de cromo respecto al diámetro de la clase granulométrica.

Para la determinación del contenido de cromo presente en la masa total de cola en este trabajo es necesario conocer el porcentaje que existe considerando ya el 100 % de masa que representan los cuatro elementos analizados, por lo que es necesario realizar la ponderación de estos porcentajes los cuales nos permitirá conocer la cantidad potencial de este elemento dentro de la masa total de cola donde están involucrados estos cuatro elementos metálicos:

$$\% Cr = \frac{2,83 \cdot 100}{45,73} = 6,20 \%$$

Obtenido el porcentaje de Cr la cantidad potencial de este metal en las 25186030 t de colas será:

$$m(Cr) = \frac{6,20 \cdot 25186030}{100} = 1560919 \text{ t}$$

Mediante el análisis de la Figura 3.6 se determina la cantidad potencial de Cr que existe en la granulometría seleccionada como estrategia de beneficio (0,18 mm – 0,028 mm), siendo esta la cantidad potencial que queda delimitada en la curva de sumatoria desde un 0 % hasta un 66 % con valor de 1030207 t, aprovechándose así un 66 % de la masa total, este valor es determinado por la multiplicación del porcentaje obtenido mediante la curva de sumatoria de por ciento (66%) y la cantidad potencial total de cromo (1560919 t) dividido

entre un 100 %. Este procedimiento se seguirá de igual manera para los restantes elementos de interés metalúrgico (Fe, Co y Ni).

3.6.2 Hierro

Para la determinación de la cantidad potencial de este elemento se procede de la misma manera que en el inciso anterior, obteniéndose como valor promedio ponderado del contenido de hierro en todas las clases granulométricas un 42,46 %, donde su mayor potencial se va a encontrar en el rango de las clase granulométrica 0,18 mm - 0,028 mm, clases granulométrica que fue seleccionada como estrategia de beneficio representando el 24 % de la masa total de los elementos de interés (25186030 t), como se muestra en la Figura 3.7.

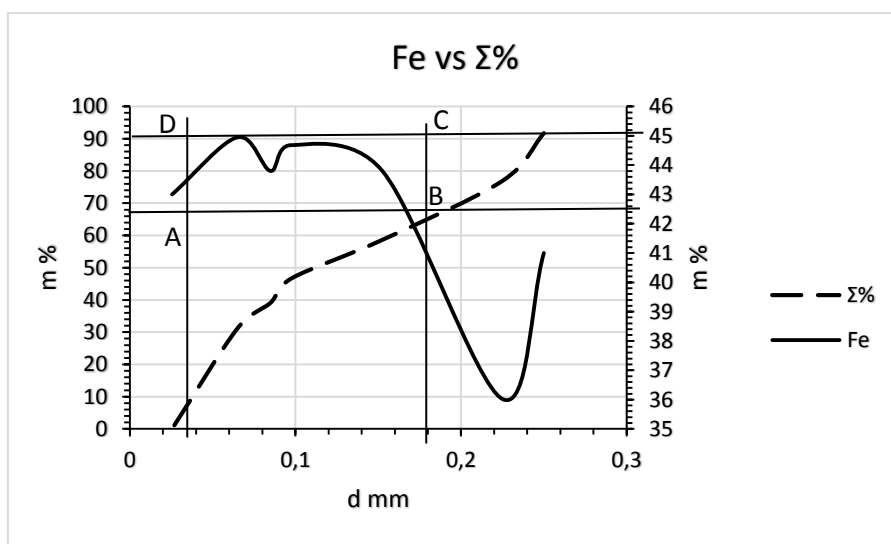


Figura 3.7 Dependencia de la masa de hierro respecto al diámetro de la clase granulométrica.

Al igual que en el caso del cromo para poder determinar la cantidad potencial de hierro que existe en la masa total de colas (25186030 t) de este estudio granulométrico es necesario conocer el porcentaje ponderado de este elemento químico vinculado a un 100 %.

$$\% Fe = \frac{42,46 \cdot 100}{45,73} = 92,85 \%$$

Obtenido el porcentaje de Cr la cantidad potencial de este metal será:

$$m(Fe) = \frac{92,85 \cdot 25186030}{100} = 23386252 \text{ t}$$

Mediante la Figura 3.7 y siguiendo la metodología del inciso anterior se determina que la cantidad potencial de hierro el cual tiene un valor de 14733339 t lo cual nos muestra que se aprovecha un 63 % de su masa total (23386252 t).

3.6.3 Cobalto

Para la determinación de la cantidad potencial de cobalto se procede de la misma manera que en los incisos anteriores donde el valor promedio ponderado del contenido de cobalto en todas las clases granulométricas es de 0,09 %, encontrándose su mayor potencial en el rango de las clases granulométricas entre 0,18 mm y 0,028 mm, las cuales representan el 65 % de la masa total (25186030 t), como se muestra en la Figura 3.8.

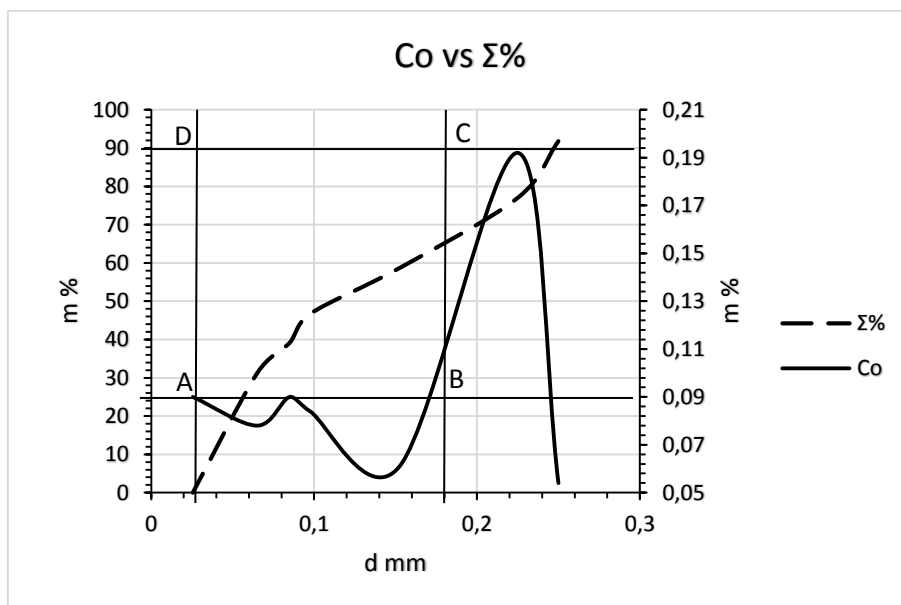


Figura 3.8 Dependencia de la masa de cobalto respecto al diámetro de la clase granulométrica.

El porcentaje ponderado de cobalto relacionado a un 100 % será:

$$\% Co = \frac{0,09 \cdot 100}{45,73} = 0,20 \%$$

La cantidad de este metal para un 0,20 % será:

$$m(Co) = \frac{0,20 \cdot 25186030}{100} = 51060 \text{ t}$$

La cantidad potencial de Co con un valor de 32679 t, lo que muestra que de la cantidad total de Co (32679 t) presente en la masa total que representa a estos cuatro elementos químicos en las colas (25186030 t) se aprovecha el 64 %, valor que fue determinado siguiendo el procedimiento de los incisos anteriores.

3.6.7 Níquel

Siguiendo la metodología de los incisos anteriores el valor promedio ponderado del contenido de níquel en todas las clases granulométricas es de 0,34 %, donde su mayor potencial se va a encontrar en el rango de las clases granulométricas entre 0,028 mm y 0,18 mm, las cuales representan el 40 % de la masa total (25186030) t, como se muestra en la Figura 3.9. Para la determinación de la cantidad potencial de níquel en las colas se procede de igual manera que en los incisos anteriores.

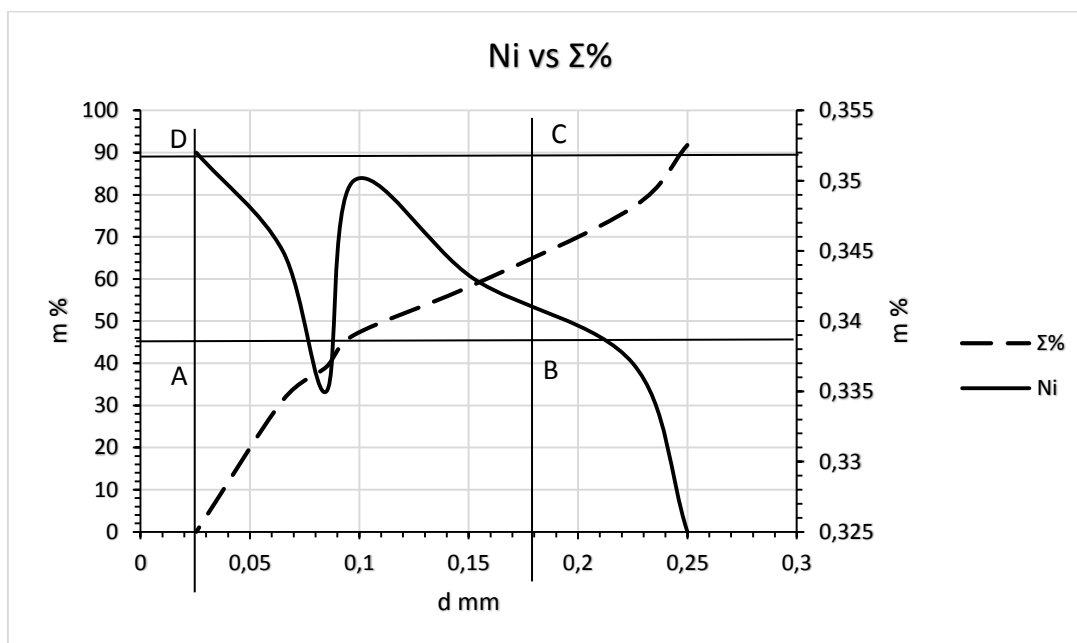


Figura 3.9 Dependencia de la masa de níquel respecto al diámetro de la clase granulométrica.

El porcentaje ponderado de níquel relacionado a un 100 % será:

$$\% Ni = \frac{0,34 \cdot 100}{45,73} = 0,75 \%$$

La cantidad de este metal para un 0,75 % será:

$$m(Ni) = \frac{0,75 \cdot 25186030}{100} = 187798 \text{ t}$$

La cantidad potencial de Ni con un valor de 120191 t, muestra que de la cantidad potencial total de Ni (187798 t) se aprovecha el 64 %.

Después de concluido los cálculos se llega a la conclusión de que las mayores concentraciones de Fe, Cr, Co y Ni se encuentran en las clases granulométricas más finas (- 0,3 + 0,15, -0,15 + 0,063 y -0,063 + 0,001 todas expresadas en mm), las cuales representan más del 70 % de la masa total de la cola almacenada en los diques. Por tal razón es válido destacar que las clases más finas de las colas de Nicaro son las que poseen las mayores cantidades potenciales de estos metales, por lo que es recomendable darles un tratamiento que nos permita extraer estos metales con eficiencia y que sea económicamente rentable.

Conclusiones parciales

Una vez concluido el Capítulo 3 se llega a las siguientes conclusiones:

1. La determinación de los parámetros estadísticos como criterio de caracterización granulométrica sirve como criterio de comparación con otras muestras de otros sectores del yacimiento.
2. La comparación de la granulometría obtenida con la reportada que incluye la composición química difieren, pero esta última se encuentra incluida en más de un 70 % en la distribución granulométrica obtenida, por lo que se pudo tomar como referencia aproximada los contenidos de los elementos por clases y transferirlos a la granulometría obtenida para realizar los cálculos de la cantidad potencial de los elementos químicos de interés metalúrgicos (Fe, Cr, Ni y Co).
3. El cromo es uno de los elementos químicos que presenta una distribución más regular con respecto a la granulometría y la fracción de 0,15 mm es la que mayor concentración de este metal posee.
4. El hierro es el elemento que presenta la distribución más irregular respecto a su granulometría, además presenta dos máximos en 0,068 mm y 0,1 mm y un mínimo en 0,23 mm, aspectos que influyen en la distribución de otros elementos que se encuentran isomórficamente dentro la estructura de los minerales portadores de hierro.
5. El cobalto presenta dos nodos a diferentes granulometrías uno a 0,088 mm y el otro a 0,228 mm donde el primero y su contorno está por debajo de la granulometría reportada, mientras que el segundo nodo y su contorno está enmarcado en más de un 65 % de su distribución.
6. El níquel presenta un comportamiento irregular donde presenta un mínimo en 0,071 mm y un nodo en 0,1 mm donde la mayor cantidad potencial de este elemento químico se enmarca en el nodo y su contorno.

CONCLUSIONES GENERALES

Las colas de la empresa “Comandante René Ramos Latour” se comportan de la manera siguiente:

1. Se comprobó a través del método de tamización que en las colas de la Empresa Comandante René Ramos Latour de Nicaro existe un predominio de las partículas finas, representadas por un 78,68 % de las partículas menores de 0,225 mm.
2. Se realizó el cálculo de la cantidad potencial del Fe (23386252 t), Cr (1560919 t), Ni (187798 t) y el Co (51060 t) existente en las 25186030 t.
3. Como estrategia de beneficio se seleccionó la tamización para la cual se seleccionan dos tamices (0,028 mm y 0,18 mm) lo cual posibilitó la determinación aproximada de la cantidad potencial de estos elementos de interés metalúrgico en dicha granulometría, obteniéndose como resultado una apreciación de cantidad potencial de cromo de 1030207 t, níquel 120191 t, hierro 14733339 t y de cobalto 32679 t.
4. Se determinaron las densidades aparente ($1,48 \text{ g/cm}^3$), aparente concentrada ($1,43 \text{ g/cm}^3$) y la picnométrica con un valor de $3,68 \text{ g/cm}^3$, así como diferentes parámetros estadísticos que permitieron brindar una caracterización de las colas que puede servir como criterio tecnológico de almacenamiento y transportación.

RECOMENDACIONES

1. Este estudio sirve como plataforma a tener en consideración para la realización de un estudio económico de beneficio por este método sencillo (tamización) para compararlo con otros métodos o con etapas de esos mismos procesos de beneficio con el propuesto.
2. Valorar la cantidad potencial de estos elementos de interés metalúrgico presente en el yacimiento para la fabricación de aceros de media aleación con un 6,20 % de cromo.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARIZA, S. M., Y. Salazar, N. B. J. Capote and G. A. (2003). Lixiviación química de colas producto del proceso carbonato amoniacal con ácidos orgánicos. Informe técnico. Moa, CEINNIQ: 22 h.
2. CAPUTO, H. P. (1973). "Mecânica dos Solos e suas Aplicações." 3a ed., Rio de Janeiro, Livros Técnicos Científicos Editora: 242p.
3. CARVER, R. E. (1971). "Procedures in Sedimentary Petrology." New York, Wiley - Interscience.
4. DERCACH, V. G. (1981). "Métodos especiales de enriquecimiento de minerales." 419 p.
5. FERNANDEZ, C. H. (2002). "Panorama y estado actual de la biolixiviación de minerales oxidados para la extracción de níquel y cobalto." Centro de Investigaciones del Níquel (CEINNIQ), **ISMM "Dr. Antonio Núñez Jiménez".
6. Fernández, J. A. (1979). "Datos aportados sobre las colas de la empresa "René Ramos Latour"." [Informe técnico].
7. FOLK, R. L., WARD, W.C., (1957). "Brazos River Bar: a Study in the Significance of Grain Size Parameters ". Journal of Sedimentary Petrology, v. 27, n.1 (Mar): pp.3-26.
8. FOLK, R. L. (1974). "Petrology of Sedimentary Rocks." Austin, Hemphills: 182p.
9. INFORME, T. (1952). "Aprovechamiento de las colas de Nicaro." Nacional Lead Company.
10. INFORME, T. (1961). "Investigación sobre las características de concentración de una muestra de colas de la planta de Nicaro para la producción de concentrado de hierro de grado normal." Instituto Mejanobr, Leningrado.
11. INFORME, T. (1977). ""Informe sobre las características mineralógicas de los subproductos ferríferos de la fábrica René Ramos Latour"." Nippon Steel Corporation.
12. INFORME, T. (1979 – 1981). "Estudio sobre el beneficio de colas de la fábrica de Nicaro y la sinterización de concentrados férreos." Instituto Mejanobr, Leningrado.

13. JONES, D. G. (1988). "Estudio preliminar de la obtención del concentrado de cromo a partir de las colas de Nicaro." [Instituto superior Mineros Metalúrgicos]. Moa (Trabajo de Diploma) 71 p.
14. KRIBOI, R. (1991 – 1992). "Elaboración de una tecnología de enriquecimiento de los residuos que contienen hierro de los complejos minero - metalúrgicos de Nicaro y Moa."
15. KRUMBEIN W.C., P., F. J., (1938). "Manual of Sedimentary Petrography." New York, Appleton-Century-Crofts Inc.: 549p.
16. MAVROMMATIS, K., A. Hernández, R. Zaragoza and E. Leyva (2002). Operación sostenible al reciclado de colas de la producción metalúrgica en Cuba en el ciclo de producción de acero en horno de arco eléctrico. Memoria del evento Mecánica. .
17. MOJENA, R., GARCÍA, D. (1988). "Estudio preliminar de la obtención del concentrado de cromo a partir de las colas de Nicaro." Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico.: 71 p.
18. MÜLLER, G. (1967,). "Sedimentary Petrology: Methods in Sedimentary Petrology." Stuttgart, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
19. PALACIOS, A. and A. D. Toro (2003). "Consideraciones sobre la posible recuperación del cobalto contenido en las colas de la tecnología carbonato amoniacal." Tecnología Química.
20. PAUMIER, Y. (2015). "Reporte bibliográfico sobre las colas níquelíferas cubanas." Dpto. de Metalurgia, ISMM: 16 pp.
21. PEÑA, E. G. (2010). Extracción de cobalto por lixiviación ácida de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal Tesis de maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico.
22. PONCE, N. (1986). "Mineralogía y composición sustancial del yacimiento artificial Colas de Nicaro." Revista "La minería en Cuba" Vol 5: 30-36.
23. Presilla, D. (1969). Producción de hierro esponja y arrabio en Cuba. Informe técnico Nicaro, CIS: 14h.
24. PURON, A. R. and A. B. Turro (2003.). "Composición mineralógica de las colas del proceso CARON en Moa, Holguín, Cuba." Minería y geología Vol 18 No 3-4.
25. SUGUIO, K. (1973). "Introdução à Sedimentologia." São Paulo (Editora Edgard Blucher): 317p.

26. WARREN, G. (1974). "" Simplified Form of the Folk - Ward Skewness Parameters"." Journal of Sedimentary Petrology, v. 44, n. 1 (Mar): pp.259.
27. WEB, P. (2006). "Material Description, MINERAL PROCESSING WASTES." <http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/mwst1.htm>.
28. YANG, C. T. (1996). "Sediment Transport-Theory and Practice." The McGraw-Hill Companies, Inc.

ANEXOS

Tabla 1.1 Resumen de las fórmulas para la estimación de los parámetros estadísticos que permiten la descripción de una población de granos.		
Fórmula	Parámetro	Autor
$M_d = d_{50}$	Mediana	TRASK (1930) (64%)
$M_2 = \frac{\phi_5 + \phi_{15} + \phi_{25} + \phi_{35} + \phi_{45} + \phi_{55} + \phi_{65} + \phi_{75} + \phi_{85} + \phi_{95}}{10}$	Media	McCAMMON (1962), (97%)
$D_{II} = \frac{\phi_{70} + \phi_{80} + \phi_{90} + \phi_{97} - \phi_3 - \phi_{10} - \phi_{20} - \phi_{30}}{9,1}$	Desviación estándar II	McCAMMON (1962) (87%)
$S_{KI} = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$	Asimetría gráfica inclusiva	FOLK y WARD (1957)
$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2,44(\phi_{75} - \phi_{25})}$	Curtosis gráfica	FOLK y WARD (1957)

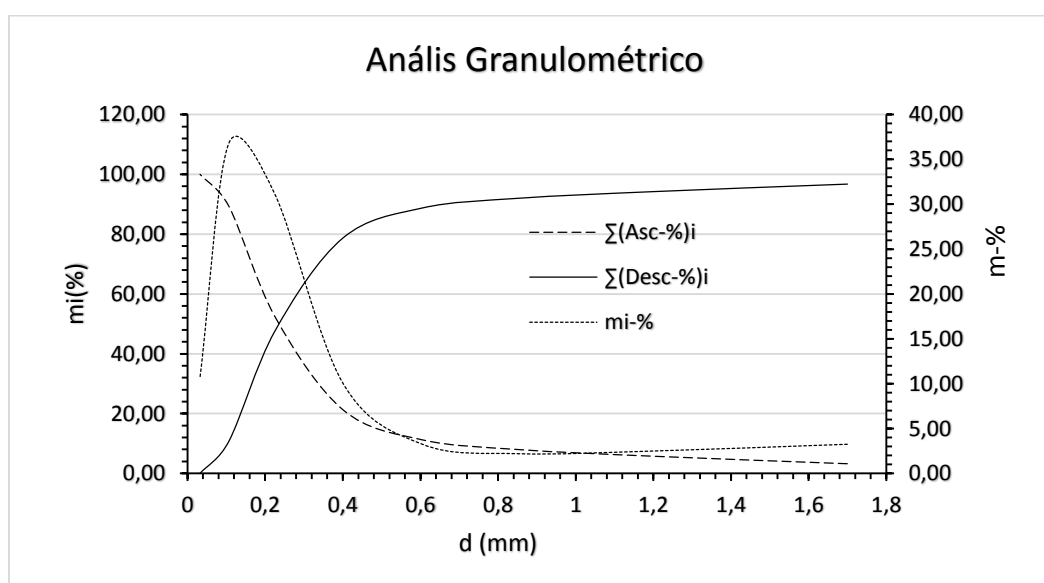


Figura 1.1 Representación de la curva de frecuencia y de la sumatoria ascendente y descendente de la distribución granulométrica realizada.

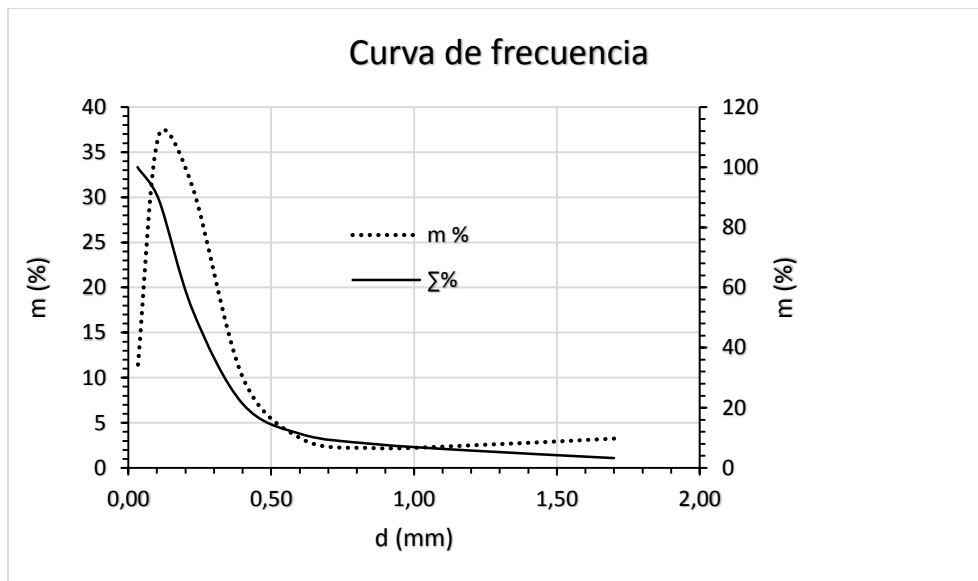


Figura 1.2 Distribución granulométrica de las colas