

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS MINEROS-
GEOMECÁNICOS PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LOS
EQUIPOS DE CLASIFICACIÓN Y TRITURACIÓN DE LA
PLANTA III, CANTERAS DEL DISTRITO CAPITAL S.A**

TUTORA ACADÉMICA: Dra. Katherine Silva

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Acosta G. Magda C.,
Para optar al título de Ingeniero de Minas

Caracas, junio 2017

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS MINEROS-
GEOMECÁNICOS PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LOS
EQUIPOS DE CLASIFICACIÓN Y TRITURACIÓN DE LA
PLANTA III, CANTERAS DEL DISTRITO CAPITAL S.A**

TUTORA ACADÉMICA: Dra. Katherine Silva

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Acosta G. Magda C.,
Para optar al título de Ingeniero de Minas

Caracas, junio 2017

Caracas, junio de 2017

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Magda C. Acosta G. titulado:

**“ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS MINEROS-
GEOMECÁNICOS PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LOS
EQUIPOS DE CLASIFICACIÓN Y TRITURACIÓN DE LA
PLANTA III, CANTERAS DEL DISTRITO CAPITAL S.A”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Minas, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. José Luis de Abreu
Jurado

Prof. María Teresa Artigas
Jurado

Prof. Katherine Silva
Tutor Académico

DEDICATORIA

A Dios.

A mis padres, mis pilares fundamentales.

A mis ángeles que siempre me guiaron desde el cielo:

Mis abuelas: Manuela y Emilia

Mi abuelo Raúl

*Y a ti padrino Rolando, porque -sé que en vida tu apoyo hubiese sido
incondicional.*

Este logro es por Uds.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Ilustre Universidad Central de Venezuela, por haber sido mi segunda casa, por haberme dado una educación de calidad, por haber sido ejemplo ante tantas adversidades en tiempos tan difíciles, por siempre demostrar que somos la casa que vence las sombras, por su equipo administrativo, obrero y docente quien día a día con su ejemplo y carisma nunca me hicieron dudar de que formaba parte de ellos.

A mi tutora académica la Dra. Katherine Silva, quien siempre fue un apoyo no solo en el trabajo especial de grado, sino a lo largo de la carrera, y que a pesar de que siempre me dice que soy de poco amor con todo el mundo (risas), debo agradecer por su carisma y carácter tan peculiar, gracias por exigirme lo que sabía que podía dar y por darme las responsabilidades que debía asumir ante cualquier situación.

A la empresa Canteras del Distrito Capital, S.A. por su personal que me recibió como una empleada más, y me proporciono la información y colaboración necesaria para la realización de este trabajo de investigación.

A los profesores del Departamento de Minas, por el aporte de sus conocimientos sin limitaciones, especialmente a las profesoras Aurora Piña, Sasha Cazal y la profesora Alba Castillo; También un agradecimiento especial Al profesor del Departamento de Geología Lenin González por todo su apoyo y colaboración en los últimos semestres de la carrera.

A mis Padres Eliberto Acosta y Lesbia de Acosta quienes fueron mis pilares fundamentales antes y durante la carrera, a los que les debo la vida y un poco más, los que siempre confiaron que si podía alcanzar esta meta, gracias por siempre tener una palabra que me alentara a continuar, ojala y me duren para siempre. A mi Angelito Diego por llenarme de toda su energía positiva y travesuras que me animaban a continuar, gracias a Dios por colocarte en mi camino TE ADORO ENANIN.

A mi familia, a mi hermano que siempre estuvieron siguiendo cada uno de mis paso y aplaudiendo mis triunfos, mis tías, mis primos los que me consienten Oscar y Yoe.

A mis amigos no son muchos, pero si los necesarios, con los cuales compartí altos y bajos, alegrías y tristezas. Están los que llegaron al principio del camino y aún se mantienen: Jey Prado y Stefanie Álvarez las quiero mis negritas. Los que me acompañaron en todo el recorrido de la carrera y con su apoyo hacían cada día que el camino fuese más agradable: Yoel Gómez, Ángel M, Carlos Utches, María Labrador; finalmente esas personas que simplemente se convirtieron en mi familia, mi apoyo incondicional, los que conocen cada detalle de mi vida y mi personalidad, los que siempre están para cambiar mi mal genio por grandes sonrisas: Fernanda Gracia, Alexandra Ledezma, Luis Medina, José Hernández, los quiero, a Ustedes ¡Muchas Gracias!

Acosta G., Magda C.

**ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS MINEROS-
GEOMECÁNICOS PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS
DE CLASIFICACIÓN Y TRITURACIÓN DE LA PLANTA III,
CANTERAS DEL DISTRITO CAPITAL**

Tutora Académica: Prof. Katherine Silva

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y
Geofísica. Departamento de Minas. Año 2017, 102 p.

Palabras Claves: Balance de Masa, agregados, beneficio mineral, equipos de
trituration.

Resumen. Canteras del Distrito Capital S.A ubicada en la carretera nueva hacia el junquito, en el Distrito Capital, tiene como objeto la comercialización de agregados finos y gruesos para la industria de la construcción en su jurisdicción. Esta cantera realiza labores de explotación de minerales no metálicos con labores de arranque por medio de voladuras, que finalmente será procesado por dos plantas de beneficio mineral, una para la producción de agregados gruesos y otra de agregados finos. Este trabajo de investigación presenta una evaluación de la planta de agregados finos tomando en cuenta las características mecánicas y petrográficas del yacimiento para mejorar el funcionamiento de los equipos de clasificación y trituración en dicha planta, además de hacer un diagnóstico de los equipos de trituración y clasificación tomando en cuenta las distribuciones granulométricas y así definir un balance de masa en el cual se establezcan propuestas técnicas con las que se pueda garantizar el aumento de la producción de material. El estudio determina el balance de masas de la planta obteniendo aspectos críticos como cantidad de carga circulante de al menos el 59,88% de la alimentación diaria del circuito, debido a que los equipos de trituración secundaria y terciaria no están configurados para la producción de finos, trayendo como consecuencia, pérdidas en la producción de la planta. El trabajo genera propuestas de tipo gerencial en las que se deben estudiar las posibilidades de hacer inversiones en la planta, mientras que por otro lado manejamos propuestas estructurales que nos refieren cambio en las configuraciones de equipos que mejoren la productividad en la planta en sus condiciones actuales.

ÍNDICE

ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS	XII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I - GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Objetivos de la Investigación	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Justificación.....	4
1.4 Alcances y Limitaciones	5
CAPÍTULO II - GENERALIDADES DE LA EMPRESA	6
2.1 Ubicación del área de explotación	6
2.2 Misión	6
2.3 Visión	7
2.4 Características de medio Físico.....	7
2.5 Proceso de Producción de la Cantera	8
CAPÍTULO III - GEOLOGIA DEL YACIMIENTO	11
3.1 Geología Regional.....	11
3.2 Geología Local	12
3.3 Descripción estructural del Yacimiento	14
CAPÍTULO IV - MARCO TEÓRICO	16
4.1 Antecedentes de la Investigación	16
4.2 Bases Teóricas.....	18
4.2.1 Circuitos de Trituración	18
4.2.2 Etapas de Trituración	22
4.2.3 Relación de reducción.....	27
4.2.4 Clasificación de productos	27
4.2.5 Eficiencia o rendimiento de cribado	29
4.2.6 Distribución Granulométrica.....	30

4.2.6 Balance de Masas	30
4.3 Mecanismos de abrasión, compresión e impacto para la fragmentación de rocas	32
4.4 Caracterización Geomecánica	32
4.4.1 Descripción de Macizos Rocosos	34
4.5 Caracterización Petrológica de rocas metamórficas	37
4.6 Desgaste de materiales	39
4.6.1 Desgaste de equipos de trituración.....	40
4.6.2 Correlación de las características de los macizos rocosos con los desgastes de elementos.....	41
4.6.3 Revestimientos	42
4.6.4 Efecto de las propiedades de las partículas	43
4.7 Requisitos para concretos y agregados (COVENIN 277:200).....	45
CAPÍTULO V - MARCO METODOLÓGICO	47
5.1 Tipo y diseño de la Investigación.....	47
5.2 Objeto de Estudio	48
5.3 Etapas metodológicas y procedimiento experimental	48
5.4 Diagrama de la metodología a emplear	55
CAPÍTULO VI - PRESENTACION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
6.1 Características geomecánicas del yacimiento	56
6.2 Estudio petrográfico y composición mineralógica del macizo rocoso.....	62
6.3 Relación de las características geomecánicas y petrográficas del yacimiento con los equipos de clasificación y trituración de la planta III.....	67
6.4 Condiciones actuales de los equipos de trituración.....	70
6.4.2 Diagrama de procesamiento indicando los puntos de toma de muestras	72
6.4.3 Dimensión del material de alimentación.....	77
6.4.4 Distribución granulométrica del producto de los equipos de trituración	79
6.5 Balance de masa en la planta III	87
6.5.1 Alimentación del Balance de Masas	87
6.5.2 Desarrollo del Balance de Masas	88

6.5.3 Evaluación de los puntos críticos del sistema	93
6.6 Propuestas en función de la relación obtenida los parámetros más convenientes en los equipos de trituración y clasificación, para mejorar la eficiencia del circuito	97
CONCLUSIONES	103
RECOMENDACIONES	105
BIBLIOGRAFÍA	107
ANEXOS	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 02. Descripción del Proceso de Producción.....	9
Figura 03. Sistema Paralelo de Diaclasas. Fuente: Cantera Del Distrito Capital.....	15
Figura 04. Vista lateral de planta de trituración Primaria.....	19
Figura 05. Circuito de trituración Mixto.	19
Figura 06. Circuito de trituración cerrado.	20
Figura 07. Esquema del movimiento. Fuente Fueyo (1999).	24
Figura 08. Triturador de Mandíbula de doble efecto. Fuente: <i>Formats Construction Machinery Co</i> , trituradora de mandíbula kue ken.	25
Figura 10. a) Geometría de la cámara de trituración del cono. Fuente Manual general de minería y metalurgia (2006) y b) diferentes configuraciones fuente Fueyo (1999).....	27
Figura 11. Mecanismos de abrasión, compresión e impacto para la fractura de Rocas. Fuente: Guía de aplicación de piezas de desgaste (Metso 2012)	32
Figura 12. Desgaste para la relación de dureza partícula (Ha)-superficie (Hs). Fuente Perdomo (2013).....	43
Figura 13. Forma de partículas erosivas. Fuente: Perdomo (2013).....	44
Figura 14. Desgaste en función del tamaño de la partícula. Fuente: Perdomo (2013)...	44
Figura 15. Diagrama de flujo para llevar a cabo la investigación	55
Figura. 16. Secuencia litológica del área de afectación.....	56
Figura 17. Representación de las secciones en la zona de estudio. Fuente Castillo y Ledezma (2016).....	58
Figura 18. Tipos de rocas presentes en el yacimiento.	62
Figura 19. Roca Anfibolita, muestra M1-17.....	63
Figura 20. Roca Mármol cuarcífero, muestra M2-17.....	64
Figura 21. Esquisto muscovítico grafitoso, muestra M3-17.....	65
Figura 22. Esquisto calcáreo muscovítico, muestra M4-17.....	66
Figura 23. Trituradoras y características de producción. Fuente: <i>M.S. Guimaraes et al. / Int. J. Miner. Process. 81 (2007) 237–247</i>	69
Figura 24. Configuración del circuito para la obtención de arena lavada	70
Figura 25. Diagrama de trituración, mostrando los puntos de toma de muestra.	72
Figura 26. Trituradora de Mandíbulas.....	73
Figura 27. Criba Vibratoria de 2 mallas (1 ¼” y 3/8”).....	74

Figura 28. Triturador de cono.....	74
Figura 30. Tornillo lavador de finos.....	76
Figura 31. Distribución de tamaños de rocas provenientes de las voladuras.....	78
Figura 32. Distribución granulométrica del material producto de las voladuras.....	78
Figura 33. Productos de la trituración Primaria.....	79
Figura 34. Distribución granulométrica de la trituración primaria.....	79
Figura 35. Distribución granulométrica de la trituración secundaria.....	81
Figura 36. Distribución granulométrica de la trituración terciaria.....	82
Figura 37. Distribución granulométrica de la trituración secundaria y terciaria.....	83
Figura 38. Distribución granulométrica del producto final.....	84
Figura 39. Comparación de la distribución granulométrica del producto final con los límites COVENIN para agregados finos.....	85
Figura 41. Etapa I del balance de masas.....	89
Figura 42. Etapa II del balance de masas.....	89
Figura 43. Etapa III del balance de masas.....	90
Figura 44. Diagrama con Balance de Masas con respecto a la capacidad teórica de los equipos.....	91
Figura 45. Diagrama con Balance de Masas con respecto a la alimentación de la planta por hora.....	92
Figura 46. Puntos Críticos del circuito para la obtención de arena lavada.....	93
Figura 48. Factores ilustrativos que pueden causar cambios en el rendimiento de la planta. Fuente: G. Asbjörnsson et al. / Minerals Engineering (2012).....	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01. Clasificación de los procesos de fragmentación. Fuente Blanco (2014).....	21
Tabla 02. Comparación entre la resistencia a la fragmentación y la dureza mineralógica. Fuente: Nobregas (2016) pág. 21	23
Tabla 03. Clasificación geológica general de las rocas. Fuente González de Vallejos (2002)	36
Tabla 04. Clasificación de las rocas a partir de su resistencia a compresión simple. Fuente González de Vallejos (2002).	37
Tabla 05. Rocas metamórficas comunes, minerales típicos y protolito. Fuente: Petrología, José Baamonde (2006) pag. 324	39
Tabla 06. Límites en la granulometría. Fuente: Normas COVENIN (277:200) (2000). 45	
Tabla 07. Límites de los porcentajes en peso que pasan los dos (2) cedazos de aberturas cuadradas. Fuente: Normas COVENIN (277:200) (2000).	46
Tabla 08. Tamaño de la muestra para tamizado según tamaño del agregado. Extraído de la norma ASTM D75M-14	51
Tabla 09. Características de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso. Fuente: Castillo y Ledezma (2016)	57
Tabla 10. Resultados de ensayos de Resistencia a la compresión simple. Fuente: Lab. Mecánica de Rocas, Miguel Castillejo	59
Tabla 11. Resultados de ensayos de Tracción Indirecta. Fuente: Lab. Mecánica de Rocas, Miguel Castillejo	60
Tabla 12. Resultados de ensayos de los Ángeles. Fuente: Canteras Del Distrito Capital S.A	61
Tabla 13. Clasificación cualitativa de rocas según su abrasividad. Fuente: Ensayos geotécnicos de suelos y rocas Universidades de Alicante y de La Laguna. Tomás, R., Santa marta, J.C., Cano, M. Hernández-Gutiérrez, L.E., García-Barba, J. (2013).....	67
Tabla 14. Especificaciones técnicas de los equipos de trituración.	71
Tabla 15. Especificaciones técnicas de la criba #01.....	71
Tabla 16. Especificaciones técnicas del tornillo lavador de finos.	72
Tabla 17. Variables utilizadas para las labores de perforación y voladura. Fuente: Canteras del Distrito Capital (2016).....	77
Tabla 18. Datos de distribución granulométrica de la trituración secundaria.	80
Tabla 19. Datos de distribución granulométrica de la trituración terciaria.	82

Tabla 20. Datos de distribución granulométrica del producto final.	84
Tabla 21. Flujo de material que alimenta la planta.....	87
Tabla 22. Etapas del circuito para el cálculo del balance de masas.	88
Tabla 23: a) tabla de capacidades específicas en función de la luz de malla para cálculos por alimentación. b) Factores de corrección del sobre tamaño o rechazo y del tamaño mitad para cálculos por alimentación. Tomado del Fueyo (1990).	95
Tabla 24. Parámetros de los equipos de clasificación y trituración	96

INTRODUCCIÓN

Las empresas productoras de agregados para la construcción, es decir, arena o rocas fragmentadas a tamaños específicos, son uno de los subsectores básicos de la minería en Venezuela. Normalmente los productos obtenidos de las operaciones de extracción tienen una distribución de tamaño muy diferentes a los deseados, lo que hace necesario, en la mayoría de los casos abordar esta situación, utilizando los procesos de fragmentación a través de la trituración y molienda.

Los equipos empleados para la variedad de procesos que intervienen en la fragmentación, son susceptibles a sufrir un desgaste marcado en poco tiempo, ya que estos están en contacto directo con el material extraído del yacimiento. Las partes encargadas de transmitir la fuerza para conseguir la reducción de tamaño deseada, están fabricadas en su mayoría de aceros de alta resistencia, mientras que, para los equipos de clasificación, como los tornillos lavadores, es necesario proteger la hélice del tornillo, para que no se desgaste por la acción del material lavado y estas a su vez no sufran los efectos de la abrasión. Por estas razones, las canteras requieren mejorar los procesos de preparación mecánica, involucrando las características del yacimiento explotado, para definir los parámetros que permitan obtener elementos claves en el diseño adecuado de los procesos de fragmentación y clasificación de rocas; generando operaciones de plantas efectivas, controladas mediante una adecuada planificación, disminución de costos y aumento de los niveles de producción.

Un porcentaje muy importante de la energía consumida para producir agregados de construcción se usa en la reducción de tamaño. Por ello un grupo de investigadores entre los que destacan Guimaraes, Valdesb, J.R, Palominoc, A.M & Santamarina J.C. (2007), evaluaron datos recolectados durante las visitas a canteras, encuesta y experimentos de laboratorio para explorar el papel fundamental que juega la mineralogía y la mecánica de fractura en la producción de finos durante la trituración de agregados. Por otro lado, Irene Gonzalo (2008) afirma que la “trituración no es únicamente un proceso mecánico; es también un proceso cinético, en el cual los efectos moleculares ordinarios y químicos influyen de forma importante”. De acuerdo a esta afirmación, se puede decir que un estudio completo y favorable para establecer los parámetros adecuados con los que debe cumplir una planta de procesamiento mineral y

su operatividad, debe incluir los mecanismos de fractura y la mineralogía del material a tratar.

Canteras del Distrito Capital S.A, perteneciente al Gobierno del Distrito Capital, cuenta con dos plantas de procesamiento de minerales no metálicos utilizados como agregados para la construcción, los productos generados por estas son: piedra número uno (1”), piedra $\frac{3}{4}$, polvillo y ripio en la planta II, mientras en las que ellos definen como planta III el producto final es arena lavada. En un diagnóstico realizado por Acosta M. (2015), en la planta III, se demostró que la producción de la misma es de apenas el 60% de su capacidad instalada, significando esto un problema para la empresa, debido a la demanda de materiales para la construcción que se está presentando en el Distrito Capital actualmente. Por esta razón, se desarrolla este trabajo especial de grado, donde se establezcan los parámetros mineros-geomecánicos para mejorar el funcionamiento de los equipos de clasificación y trituración en dicha planta partiendo de las características físicas del yacimiento; además de poder definir un balance de masa en el cual se establezca la carga circulante del circuito de trituración, esto a su vez permitirá definir propuestas técnicas con las que se pueda garantizar el aumento de la producción de material y la toma de decisiones para establecer las medidas adecuadas en el circuito de trituración.

La investigación se estructuro en seis (6) capítulos en los cuales se presenta capítulo I las generalidades de la investigación, capítulo II generalidades del área de estudio, capítulo III geología del yacimiento, capítulo IV el marco teórico necesario para el desarrollo de la investigación, capítulo V metodología a utilizar y finalmente capítulo VI donde se presentan los resultados y análisis de los mismos.

CAPÍTULO I - GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

En el siguiente capítulo se presenta la definición del contexto de la investigación, comenzando con el planteamiento del problema, objetivo principal del trabajo, los objetivos específicos que permitirán cumplir con esta investigación, justificación, alcances y limitaciones de la misma.

1.1 Planteamiento del Problema

La planta III de Canteras del Distrito Capital productora de arena lavada, según estudios previos (2015) está en el 60% de su capacidad instalada, debido al estado que presentan los consumibles de los equipos de trituración y las condiciones de deterioro actual de la planta en general, significando esto una dificultad para la empresa, con respecto al compromiso adquirido para satisfacer el mercado en su jurisdicción, generando así un aumento en la demanda de materiales para la construcción que está presentando el Distrito Capital actualmente.

La adquisición de equipos de trituración o en su defecto, la sustitución de los forros de los mismos a un costo accesible, actualmente se ven dificultadas por las condiciones económicas y de importación que vive el país, por lo tanto, la empresa se ve en la necesidad de disminuir el ritmo en la producción de agregados finos, adaptando está a las condiciones de los equipos. Motivado a esta situación, se propone este trabajo especial de grado, el cual tiene como objetivo principal establecer los parámetros con los que deben cumplir los equipos de trituración y clasificación de dicha planta para mantener un flujo continuo de material, partiendo de las características físicas del yacimiento, además realizando un balance de masa en el cual se establezca la carga circulante del circuito de trituración y los puntos críticos que generan la recirculación del material antes llegar a la fase final de procesamiento (tornillo lavador de finos), se podrá definir diversas propuestas técnicas con las que se pueda garantizar el aumento de la producción de material y a su vez tomar decisiones para establecer las modificaciones adecuadas en el circuito de trituración sin que la empresa se vea en la necesidad de continuar disminuyendo su producción o en su defecto de adquirir nuevos equipos de trituración para mejorar el circuito.

1.2 Objetivos de la Investigación

1.2.1 Objetivo General

Establecer los parámetros mineros-geomecánicos para el funcionamiento de los equipos de clasificación y trituración de la planta III, Canteras del Distrito Capital.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Determinar las características geomecánicas del yacimiento, para obtener información sobre la calidad y resistencia del macizo.
2. Establecer mediante análisis petrográfico la composición mineralógica del yacimiento.
3. Relacionar las características geomecánicas y petrográficas del yacimiento con los equipos de clasificación y trituración de la planta III, Canteras del Distrito Capital S.A
4. Diagnosticar las condiciones actuales de los equipos de trituración en la planta III, Canteras de Distrito Capital S.A
5. Realizar un balance de masa en la planta III, con el fin de obtener la eficiencia actual de la misma, según las condiciones de los equipos.
6. Proponer en función de la relación obtenida los parámetros más convenientes en los equipos de trituración y clasificación, para mejorar la eficiencia del circuito.

1.3 Justificación

La demanda que se ha generado en el Distrito Capital en cuanto a materiales de construcción para abastecer a la gran misión Vivienda Venezuela, hace que las empresas se vean en la necesidad de aumentar las producciones actuales en las plantas procesamiento de minerales no metálicos en esta jurisdicción.

“La producción de arena lavada en Canteras del Distrito Capital S.A se está viendo afectada debido a las condiciones de deterioro en la que se encuentran los equipos de trituración” Acosta, M (2015), significando esto una pérdida de al menos el 40% de la producción teórica definida por los catálogos de los equipos con los que cuenta la planta actualmente; disminuyendo así la posibilidad de satisfacer las necesidades exigidas por el mercado para la fabricación de mezclas asfálticas, concreto premezclado y la construcción de obras civiles, que incluye todas las obras sociales que se están desarrollando en el Distrito Capital.

El desarrollo de este trabajo especial de grado pretende generar alternativas de mejoras,

a través del establecimiento de los parámetros con los que deben cumplir los equipos de trituración y clasificación de dicha planta, para mantener un flujo continuo de material, partiendo de las características físicas del yacimiento, además realizando un balance de masa en el cual se establezca la carga circulante del circuito de trituración y los puntos críticos que generan la recirculación del material en el proceso de obtención de la arena lavada actualmente, se podrá definir diversas propuestas técnicas con las que se pueda garantizar el aumento de la producción de material y a su vez tomar decisiones para establecer las modificaciones adecuadas en el circuito de trituración, para así lograr satisfacer la demanda que se tiene actualmente; además de reforzar la línea de investigación de beneficio de minerales, del Departamento de Minas de la Universidad Central de Venezuela, generando las bases para relacionar adecuadamente las propiedades mineralógicas y geomecánicas del material en estudio, con el proceso de reducción de tamaño. Permitiendo seguir realizando estudios de este estilo con otros tipos yacimientos.

1.4 Alcances y Limitaciones

Este trabajo plantea como alcance un estudio de los equipos de clasificación y trituración, el cual se desarrolló con datos prácticos y teóricos de los equipos presente en la planta III de procesamiento de minerales no metálicos en Canteras del Distrito Capital S.A; las condiciones actuales de los equipos está fundamentada en la determinación de un balance de masa del proceso de trituración, partiendo del flujo de alimentación-descarga de los equipos, tomando como base de estudio el trabajo realizado por Valencia (2013).

Este estudio fue realizado de forma que los parámetros establecidos para los equipos de clasificación y trituración, al igual que las propuestas de mejoras del circuito, solo se adapten a las características físicas del yacimiento que se describe a lo largo de la investigación.

CAPÍTULO II - GENERALIDADES DE LA EMPRESA

El presente capítulo tiene como finalidad dar a conocer la información relacionada con la historia, misión, visión y objetivos de la empresa, así como la ubicación y características físicas de la zona de explotación.

2.1 Ubicación del área de explotación

La ubicación geodésica de la planta se encuentra enmarcada entre las siguientes coordenadas UTM: Este: 717.000 al 718.500 y Norte: 1.156.000 al 1.157.500.

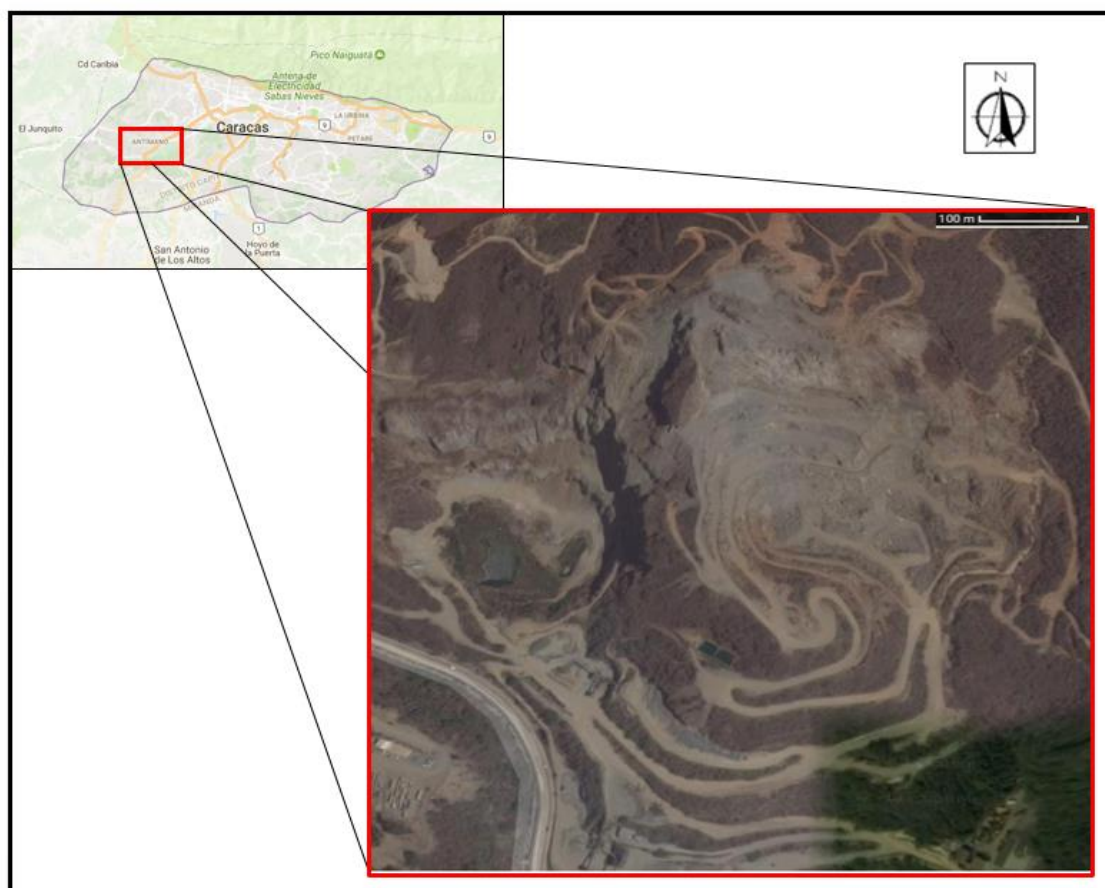


Figura 01. Mapa de ubicación de la Cantera.

2.2 Misión

Según Plan de explotación (2016), “Desarrollar el aprovechamiento de la industria de los minerales no metálicos y sus derivados (Concreto, Asfalto, Pego, Adoquines y Lajas), de forma sostenible y sustentable, para abastecer con calidad y oportunidad, al sector construcción del Distrito Capital, garantizando la rentabilidad de la empresa y contribuyendo al desarrollo económico del país”.

2.3 Visión

Según Plan de explotación (2016), “Ser una Empresa con gestión de calidad, oportuna en el suministro especializado de agregados minerales no metálicos y sus derivados (Concreto, Asfalto, Pego, Adoquines y Lajas) destinadas al mejoramiento del hábitat y la calidad de vida de los ciudadanos del Distrito Capital, en armonía y preservación del medio ambiente”.

2.4 Características de medio Físico

2.4.1 Clima

Instituto Nacional de Estadísticas INE (2013). El Distrito Capital cuenta con la cadena de la Costa como barrera natural que impide la influencia de los factores climáticos del Litoral Central. Ello, asociado con la altura de 1.000 metros sobre el nivel del mar, le permite contar con un clima bastante benigno. El Distrito Federal cuenta con un clima tropical lluvioso caracterizado por alta temperatura durante todo el año, con una media superior a los 18°C en el mes más frío. La temperatura media anual del valle de Caracas es de 22°C. Tiene períodos de lluvia y de sequía bien definidos; el período lluvioso se presenta de mayo a noviembre en la mayoría de las localidades, pero puede ser también entre abril y noviembre o entre mayo y octubre. El período de lluvias coincide con la época de mayor radiación solar y con la acción de la convergencia intertropical, asociada a vientos inestables, mientras que el período seco coincide con los meses de menor radiación y con la acción de masas de aire mucho más estables y más secas. La precipitación media anual es de 870 mm.

2.4.2 Suelos

Instituto Nacional de Estadísticas INE (2013). Los suelos del Distrito Capital son de tipo aluvial y de origen cuaternario. Cubren todo el valle de Caracas y gran parte de los lechos de los ríos y las quebradas. Los suelos, en las zonas de montaña, son residuales perteneciente a la formación geológica del grupo Caracas.

2.4.3 Vegetación predominante en el área en estudio

Dengo (1951), indica que, el paisaje predominante en la región natural donde funciona la Canteras del Distrito Capital S.A., es de montaña y se encuentra ubicada en la

Cordillera de la Costa. El área en estudio está a una altitud que varía entre los 1.300 metros en la zona alta de la Cantera y de los 900 metros en la entrada a Mamera.

El clima de la zona se caracteriza por su patrón biestacional con dos períodos bien marcados, la temporada de lluvias de seis meses y una de sequía de seis meses, los cuales son muy determinantes en el tipo de vegetación que predomina. La precipitación promedio anual es de 789 mm y una temperatura media anual de 21 °C, con una evapotranspiración potencial (1405,5 mm) siempre mayor que la precipitación. Estas características junto con la edafología y el uso de la tierra permiten explicar la presencia de los tipos de vegetaciones. Se demarcaron las 14 principales unidades de vegetación utilizando técnicas aerofotográficas y reconocimiento de campo. Así, en el área en estudio se distinguieron cuatro unidades de vegetación: bosque semidecidual; matorrales mezclados con vegetación de transición; sabana secundaria y bosque de galería.

2.5 Proceso de Producción de la Cantera

2.5.1 Generalidades

El sistema de explotación de Canteras del Distrito Capital S.A. se realiza a cielo abierto, con bancos diseñados acorde cada frente la inclinación de los taludes a unos 70° aproximadamente y 12 metros de altura ya que la geología local fue altamente activa, lo que generó zonas de alto diaclasamiento, fractura de la roca y cambios litológicos.

El proceso de producción de la empresa comienza con la etapa de arranque y extracción que consiste en la conformación de pisos o área casi horizontales para comenzar la etapa de perforación y voladura en cada sector programado en los diferentes bancos de caliza.

Actualmente se cuenta con dos sectores denominados mina 1 y mina 2, la primera no tiene actividad alguna en los últimos once años debido a una clausura establecida por el ministerio de Ambiente y la empresa se ha concentrado en la extracción del material disponible en la mina 2.

Ya estando el material en las plantas de procesamiento, es llevado a través de procesos de trituración y clasificación de productos comerciales de agregados finos (arena) y agregados gruesos (piedra) (según norma las normas covenin 255: 1988) a los tamaños comerciales que son piedra 1", piedra $\frac{3}{4}$, polvillo y ripio o rechazo de la planta.



Figura 02. Descripción del Proceso de Producción.

2.5.2 Descripción del Proceso de Producción de la planta III en Canteras Del Distrito Capital

De acuerdo al plan de explotación a continuación, se presenta la descripción del tratamiento del material para la planta de producción de arena lavada:

- El material (todo uno) obtenido en las operaciones de perforación y voladura utilizando un patrón de 4,00 x 3,50m, es colocado en una tolva de alimentación con una capacidad de 200 m³.
- A través de un alimentador vibratorio este material cae en la trituradora de mandíbula marca **XCMG** tipo **PE 800X1060** con una capacidad instalada de 52-88 m³ /h; la configuración de salida del equipo es para obtener un material con un diámetro promedio de máximo 6".
- Este material es trasladado por medio de una cinta transportadora con una longitud de 20m, rodillos de 10,3m, ocho estaciones con tres (3) rodillos cuyo diámetro es de 13"; hasta una criba vibratoria marca **Loro e Parisini 516** con un solo nivel cuyo corte es de 1 1/4".
- El material retenido ($\geq 1 \frac{1}{4}$ "), en esta criba cae en un **cono Symons**, modelo **3Ft** serial **41742**, cuyo diámetro promedio de salida está cerrado a aproximadamente 1/2", el pasante ($\leq 1 \frac{1}{4}$ "), al igual que el del cono caen a una banda de 23m de longitud y 76 cm de ancho con rodillos de 1m de longitud con 10 estaciones de 3 rodillos cada una.

- Este material cae a una criba vibratoria *Loro e Parisini* 516 de dos mallas (220x 137 cm.), la apertura de la superior es de 1 ¼ ” y la inferior de 3/8”, el material pasante de la malla inferior va directamente al tornillo lavador, de donde se obtiene el producto final (arena), mientras que el retenido de esta cae a una banda de 90 cm. de ancho, 55m de longitud con rodillos de 1m de longitud y 15 estaciones de 3 rodillos cada una y cae a una tolva de distribución, el retenido de la primera malla va a una banda de 25 metros y cae nuevamente al cono principal para dar paso al circuito cerrado de esta operación de trituración.
- El material ubicado en las tolvas de distribución este cae a un triturador de cono de la serie de *Gyradisc* Trituradora de Cono modelo GD75 cuyo diámetro de alimentación es de 1 ¼” y la salida es de 3/8” este material cae a una banda de 17m y posteriormente a la otra de 23m hasta llegar nuevamente a la segunda criba vibratoria descrita anteriormente.

CAPÍTULO III - GEOLOGIA DEL YACIMIENTO

3.1 Geología Regional

Dengo (1951) establece la localidad tipo a 0,5 km al norte de Antímano, Distrito Federal (Hoja 6847, escala 1:100.000, Cartografía Nacional), cuyos afloramientos hoy en día están totalmente cubiertos por el urbanismo de la ciudad de Caracas. Muy buenos afloramientos aún están visibles en las canteras de la quebrada Mamera.

Dengo (1951) describe esta Formación como un mármol masivo de grano medio, color gris claro, con cristales de pirita, alternando con capas de esquistos cuarzo micáceos, y asociadas con cuerpos concordantes de rocas anfibólicas, algunas con estructuras de "boudinage". El mármol está formado de un 85-95% de calcita, con cantidades menores de cuarzo detrítico, muscovita (2,5%), grafito (2,5%) y pirita (2%).

Dengo (1950) describe con detalle las anfibolitas glaucofánicas de esta Formación, incluyendo análisis químicos, indica que los mármoles son rocas estructuralmente competentes en relación a los esquistos que las rodean, pero incompetentes en relación con las rocas anfibólicas, mostrando pliegues de flujo alrededor de ellas y resultando así la estructura de "boudinage".

En la cartografía geológica de la zona de Puerto Cruz-Mamo, Talukdar y Loureiro (1982) reconocen su Unidad de anfibolitas y mármoles, que posteriormente Urbani y Ostos (1989) la denominan como Fase Antímano, allí ocurre la asociación de anfibolita, mármol, esquistos calcáreo-muscovítico $\pm$ grafitoso, esquistos cuarzo-muscovítico $\pm$ granatífero, esquistos cuarzo-muscovítico-graucofánico-granatífero.

Urbani et al. (1997) estudian la mineralogía carbonática de los mármoles de los afloramientos de la punta oeste de la bahía de Chichiriviche, Distrito Federal, encontrando que carecen de dolomita, mientras que aquellos de Mamera lo presentan en muy pocas muestras y en muy bajas concentraciones. En los trabajos ya mencionados de Ostos, Urbani y otros, el criterio para cartografiar esta Fase es la presencia de la asociación de rocas anfibólicas con mármoles.

3.1.1 Extensión Geográfica

Se han descrito afloramientos aislados desde la zona de Antímamo, hacia el oeste en San Pedro y hacia el este hasta La Florida (afloramientos hoy cubiertos por el urbanismo de la ciudad de Caracas), continúa la zona de afloramientos en una franja en el valle de la quebrada Tacagua, y de ahí hacia el oeste como una franja entre Mamo, Carayaca y Tarma, Distrito Federal. Los últimos afloramientos se han reconocido en la zona de El Palito, estado Carabobo.

3.1.2 Expresión Topográfica

En las zonas donde afloran mármoles masivos y gruesos se nota una topografía abrupta, con estructuras kársticas superficiales.

3.1.3 Contactos

Esta formación presenta contactos estructuralmente concordantes con las formaciones adyacentes: Las Brisas y Las Mercedes. En la zona de Antímamo y Mamera, los lentes de mármoles y rocas anfibólicas, que alcanzan a veces grandes dimensiones longitudinales, se hallan embutidos en esquistos de diversos tipos, especialmente los correspondientes a la Formación Las Brisas (Cantisano, 1989).

3.2 Geología Local

Localmente el marco geológico consiste de una secuencia estratigráfica transicional, de intercalaciones de esquistos cuarzo-micáceos, esquistos cuarzo-calcáreos-micáceos, mármoles lenticulares piritosos grises, mármoles cuarcíticos, anfibolitas granatíferas y/o piritosas de tonos verdosos y cuarcitas de grano fino gris claro también lenticulares, conformando en conjunto un sinclinal asimétrico fallado y diaclasado hacia la parte noroeste de la mina, cuyo eje tiene un rumbo general Noroeste-Sureste y buzando hacia el sureste. No obstante esta estructura sinclinal desaparece hacia la parte media de la cantera hacia el sureste donde la estratificación presenta un rumbo general NE con un buzamiento medio a moderado hacia el Sureste. Los flancos del sinclinal se presentan suavemente plegados en ambos costados del eje conformando secuencias de pequeños anticlinales y sinclinales destacados por la diferencias en los colores de las distintas litologías de la formación geológica. Hacia el sureste de la mina la estructura sinclinal desaparece y la secuencia en su conjunto adopta localmente una estructura monoclinual con inclinación general hacia el sur-este (Canteras Del Distrito Capital S.A, 2015).

3.2.1 Secuencia Litológica

Localmente, la secuencia litológica consiste de tope a base (noroeste a sureste), de una intercalación de esquistos cuarzo-micáceos muy meteorizados de colores rojizos, un mármol masivo de grano medio, color gris claro con cristales de pirita, una intercalación de esquistos cuarcítico-muscovítico-grafitosos, lentes delgados de mármol gris oscuro, Anfibolitas (a veces intercaladas paralela y concordantemente a la foliación de la secuencia y a veces claramente intrusionando a la misma), cuarcitas delgadas gris claro y una gruesa capa de esquistos muy cuarzosos, calcáneos, micáceos con pirita y muy compactos, que ha sido la fuente principal de roca para agregados que se ha extraído en esta mina. Toda la secuencia expuesta en la cantera, mide litoestratigráficamente, de tope a base, unos 280 metros de espesor, es decir, desde la cota 1.300 a 1.020, la cual ha sido intensamente fallada y diaclasada. La secuencia litológica continúa por debajo de la cota 1.020, pero debido a restricciones de orden ambiental, la explotación se hará tomando como base esta cota (Canteras Del Distrito Capital S.A, 2015).

3.2.2 Descripción Litológica

El mármol de grano medio y de color gris oscuro, está formado en general de un 85-95% de calcita, con cantidades menores de cuarzo detrítico, muscovita (2,5%), grafito (2,5%) y pirita (2%), aunque en algunos lentes locales el mármol se observa con más del 90%) de calcita el cual se observa en sectores en forma de láminas de pocos centímetros de espesor junto con los esquistos que lo envuelven y también en espesores mayores, pero de pocos metros y de poca continuidad lateral. Los esquistos presentes son esencialmente: esquistos calcáreo- muscovíticos $\pm$ grafitosos, esquistos cuarzo-muscovíticos $\pm$ granatíferos, esquistos cuarzo- muscovítico-graucofánico-granatíferos, predominando en la secuencia los esquistos cuarzo-muscovíticos generalmente calcáneos (Canteras Del Distrito Capital S.A, 2015).

Las rocas anfibólicas se observan como pequeños cuerpos hacia el noroeste de la cantera con estructuras de "boudinage" y con cristales de pirita. Hacia el sureste, existe un gran cuerpo de anfibolita con porfiroblastos de granate que se observan especialmente en las zona de contacto con los esquistos cuarzo-calcáneos que la envuelven. Esta roca se distingue claramente por su color verdoso y porque se presenta en forma de una roca masiva, localmente sin foliación, muy compacta y

está asociada, en sus zonas de contacto, con vetas y vetillas irregulares de cuarzo, calcita y/o cuarzo y calcita con piritita, que evidencian zonas de alteración de contacto de hasta medio metro de espesor (Canteras Del Distrito Capital S.A, 2015).

3.3 Descripción estructural del Yacimiento

Estructuralmente el área de Mina 2 se encuentra plegada, fallada y diaclasada intensamente. Hacia la parte norte se evidencia una estructura sinclinal asimétrica cuyo eje se inclina hacia el sur y sus flancos se presentan suavemente plegados en secuencias de pequeños y sucesivos anticlinales y sinclinales que se distinguen por la diferencia de tonos grises visibles en los taludes de los frentes de arranque. Esta estructura sinclinal desaparece gradualmente hacia el sur de la mina y se transforma en un monoclinal de rumbo general E-W con buzamiento alto a medio al sur. La estructura está fallada principalmente con fallas sinestrales y dextrales de rumbo general E-W de ángulo alto al sur, cuyos planos o espejos de falla con estrías se observan a nivel de las cotas 1.040 a 1080 msnm (Canteras Del Distrito Capital S.A, 2015).

Las diaclasas son abundantes debido a los intensos efectos tectónicos que ha sufrido la región y debido también a las características físicas de las rocas, que son muy compactas por su composición mineralógica eminentemente cuarzosa y/o calcárea, propensas a quebrarse o romperse en fragmentos grandes o bloques en vez de plegarse, como sería el caso de los esquistos micáceos y/o grafitosos de las formaciones Las Brisas y Las Mercedes que envuelven transicionalmente a estas rocas de la formación Antímano. Las diaclasas conforman sistemas paralelos en diferentes direcciones e inclinaciones como se muestra en la figura 03; Las más recientes son abiertas, formando grietas y las más antiguas están generalmente rellenas de calcita cristalizada y en algunos casos forman cavernas producto de disolución por el agua que se infiltra de la superficie, cuando se trata de las rocas calcáreas (Canteras Del Distrito Capital S.A, 2015).



Figura 03. Sistema Paralelo de Diaclasas. Fuente: Cantera Del Distrito Capital.

CAPÍTULO IV - MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presentan las diferentes definiciones, formulas, antecedentes y datos teóricos que sustentan la investigación y permiten el desarrollo de la misma

4.1 Antecedentes de la Investigación

Hernández, Teobaldo (2000). “Análisis Granulométrico y Balance de masas en el proceso de la planta de trituración los barrancos de la empresa C.V.G Ferrominera Orinoco”.

Objetivo: realizar un estudio de clasificación granulométrica en el proceso de trituración, motivado a que se registraba una gran cantidad de material recirculando en el proceso.

Fuenmayor, Oswaldo (2001). Caracterización geomecánicas de las rocas de la cantera perteneciente a la Corporación de Cemento Andino C.A. ubicada en el municipio Candelaria, estado Trujillo.

Objetivo: Caracterizar geomecánicamente las rocas ubicadas en el yacimiento explotado por la Corporación de Cemento Andino C.A.

Torres, Pablo (2006) “Avances en el estudio sobre recuperación de partes de equipos de carga usados en la minería”.

Objetivo: Estudio preliminar para optimizar los procesos de recuperación de piezas de acero de gran espesor, considerando las características del metal original de la pieza y el material de relleno

Díaz, Eduardo (2013) “Evaluación de electrodos para la fabricación de blindaje laterales de molinos de trituración de áridos”.

Objetivo: estudiar el comportamiento de electrodos revestidos para recubrimiento duro manual por arco eléctrico, utilizados en la fabricación de blindajes laterales de molinos para la trituración de áridos.

Valencia, Evaristo (2013) “Proyecto para el incremento de capacidad de operación de la planta de beneficio, compañía minera La Negra, Maconí Querétaro”.

Objetivo: Ampliar la planta de beneficio, para pasar de una alimentación de 1500 a 2000 t/día ajustando el diseño actual de la misma y sin interrumpir las operaciones.

Acosta, Magda (2015) “Determinación de los parámetros del ciclo de carga y acarreo y balance de masa en la planta III de beneficio mineral, en canteras del distrito capital”.

Objetivo: Determinar los parámetros de los ciclos de carga - acarreo y del balance de masa en la planta III de beneficio mineral en Canteras del Distrito Capital.

Nobregas, Ricardo (2016) “Propuesta para reducción de tamaño de minerales no metálicos: Caso charnockita, cerro la danta Sector cambalache, estado Bolívar”.

Objetivo: Proponer el circuito de reducción de tamaño de minerales no metálicos: caso Charnockita del cerro La Danta- sector Cambalache, estado Bolívar. Con el fin de generar condiciones óptimas de aprovechamiento mineral.

Melo, Yondert (2016) “Propuesta metodológica para la planificación de soporte de mina, en Canteras del Distrito Capital”.

Objetivo: Proponer una Metodología para la Planificación de Soporte de Mina, en Cantera del Distrito Capital.

Pimentel, Reinaldo (2016) “Desarrollo de una propuesta de adecuación de las plantas de agregados de la cantera Carayaca, Distrito Capital, para disminuir la producción de finos”.

Objetivo: Desarrollar una propuesta de adecuación de las plantas de agregados de la cantera Carayaca, Distrito Capital, para disminuir la producción de finos.

Labrador, María (2017) “Evaluación de la planta de trituración y clasificación de tamaño de la roca caliza en la cantera agua viva II, San Sebastián de los Reyes, estado Aragua”.

Objetivo: Evaluar los puntos de generación de finos en operaciones de reducción y clasificación de tamaño de la caliza en la cantera Agua Viva II Ubicada en San Sebastián de los Reyes, estado Aragua.

4.2 Bases Teóricas

4.2.1 Circuitos de Trituración

“Los circuitos de trituración y de molienda son una combinación en serie y paralelo de trituradores, clasificadores, silos, cintas, sistemas de control, etc., que en general representan fuertes inversiones. Se adaptan al mineral, al mercado por capacidad, a la posibilidad de fluctuaciones del mineral o del mercado en el tiempo, por lo que deben disponer de capacidad de adaptación, y su diagrama de flujo debe permitir elegir adecuadamente cada máquina”. (Blanco, Eduardo (2014) pág. 78).

En el diseño de una planta de trituración según Ken Boyd, el diseño del proceso, selección del equipo y disposición, son dos pasos fundamentales. Los mismos están dictados por requisitos de producción y parámetros de diseño, pero el diseño puede reflejar la entrada, las preferencias y la experiencia operacional de varias partes. Esto aunado al conocimiento y experiencia del profesional o grupo de profesionales a cargo del proyecto, proporcionar un diseño de planta equilibrado, viable, seguro y económico.

Los parámetros críticos de diseño, así como la consideración de las características del mineral, la ubicación geográfica, condiciones climáticas, la vida operativa esperada, potencial de expansión, seguridad, medio ambiente, la operatividad y mantenimiento, son fundamentales al momento de diseñar un circuito de reducción de tamaño. El objetivo fundamental del diseño de una planta de trituración es una instalación que cumpla con los requisitos de producción requeridos, que opere a un costo competitivo, cumpla con las regulaciones ambientales, y se pueda construir a un precio razonable a pesar de los crecientes costos de los equipos. En la figura 04, se muestran una vista lateral de una planta

con trituración primaria, mientras que en las figuras 05 y 06 se presentan flujogramas de circuitos de trituración con configuración cerrado y mixto.

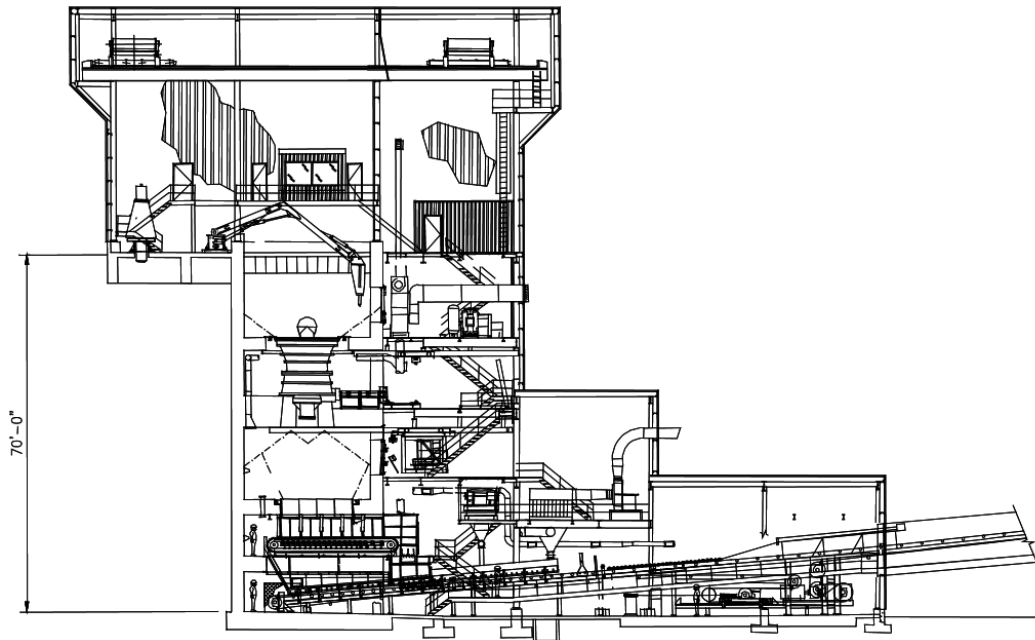


Figura 04. Vista lateral de planta de trituración Primaria

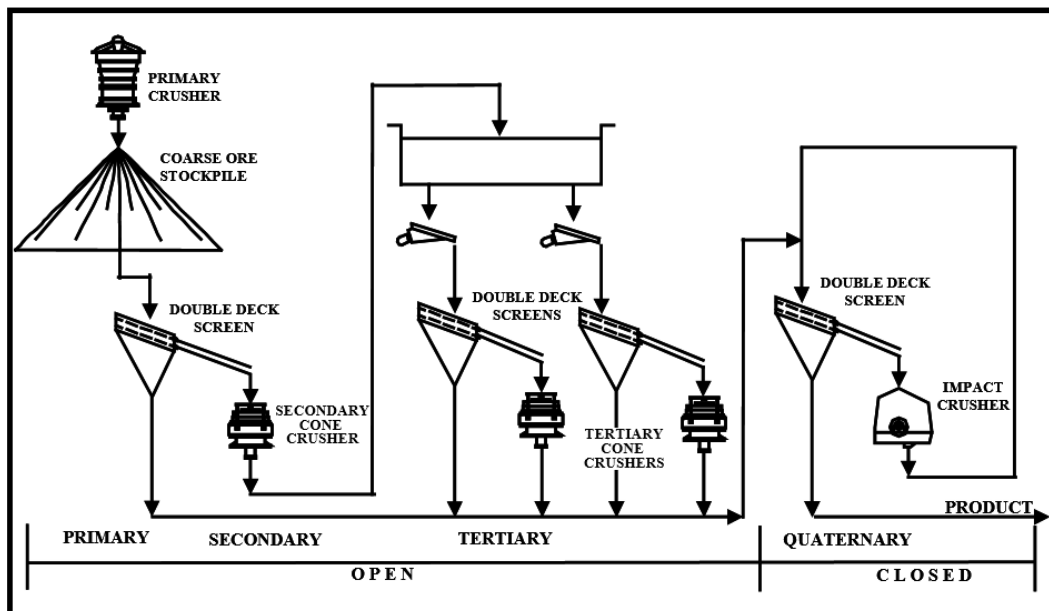


Figura 05. Circuito de trituración Mixto.

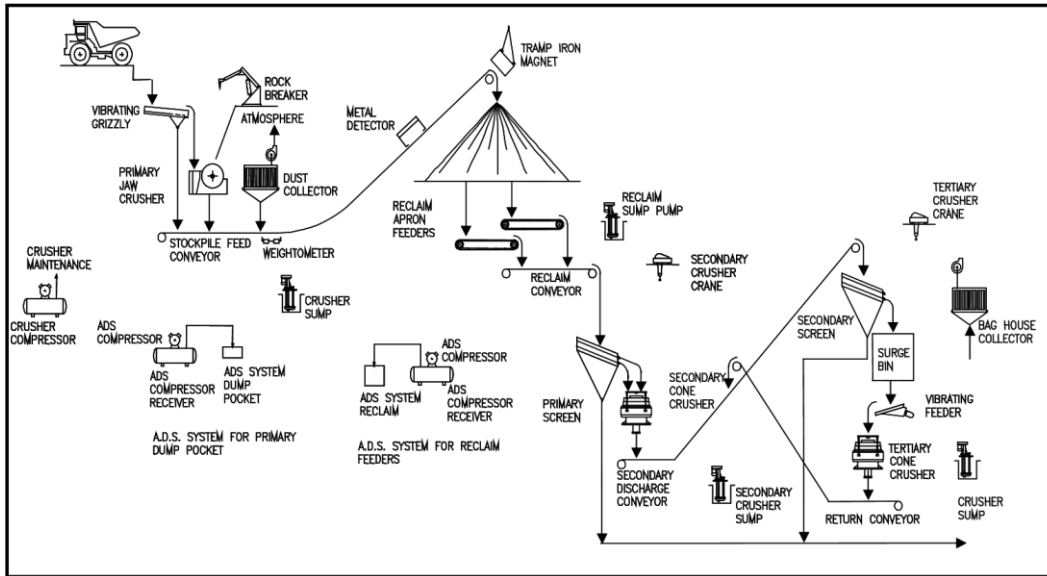


Figura 06. Circuito de trituración cerrado.

Según Kelly (1990). Los métodos de reducción de tamaño pueden agruparse de varias maneras, pero como la reducción ocurre en etapas, el tamaño de las partículas aporta el método primario de agrupamiento. Si el cuerpo de mineral es de carácter masivo, el minado o extracción es en realidad la primera etapa de reducción de tamaño, y generalmente se realiza con explosivos, aunque pueden usarse medios mecánicos en los minerales más blandos. El termino trituración se aplica a las reducciones subsecuentes de tamaño hasta alrededor de 25mm, considerándose las reducciones a tamaños más finos como molienda. Tanto la trituración como la molienda pueden subdividirse aun en más etapas. La fragmentación se divide en dos grandes bloques en base a la tecnología utilizada, trituradoras y molinos. Para las primeras, trituradoras, se consideran habitualmente tres escalones, 1º, 2º y 3º, y la molienda se divide en gruesa, media, fina y micronización.

Con la intención de normalizar criterios en minería, los tamaños y sus denominaciones, Hükki (1975) propone la clasificación que se muestra en la tabla 01.

Tabla 01. Clasificación de los procesos de fragmentación. Fuente Blanco (2014)

	Propuesta de Hukki	Según el tamaño de los productos - triturados / molidos (descargas o salidas de máquina)		
Concepto	Rango de tamaño (mm)	Tamaño (orientación)	Denominación	Equipos utilizados
Arranque	De infinito a 1.000	Técnicas de arranque		
Trituración Primaria	De 1.000 a 100	de 150 a 100	Muy grueso	Trituradoras de mandíbulas, giratorias, de choque, impacto o percusión.
Trituración Secundaria	De 100 a 10	de 40 a 30	Grueso	Conos trituradores, Trituradoras de mandíbulas AF, Giratorias, Impacto, choque o percusión, molinos de cilindros.
Trituración Terciaria		de 15 a 5	Medianos	Conos de cabeza corta, hidroconos, molinos de martillos, o de impactos, molinos de cilindros.
Molienda Gruesa	De 10 a 1	de 5 a 2	Finos	Molinos de impacto, choque o percusión. Molinos SAG ³ .
Molienda Media		de 2 a 1		Molinos de barras, Molinos SAG, molinos de bolas.
Molienda Fina	De 1 a 0,1	de 1 a 0,1		Molinos de bolas.
Molienda Ultrafina	De 0,1 a 0,01	< 0,1	Ultrafinos	Molinos de bolas.
Micronización	De 0,01 a 0,001			Molinos de bolas.

Los circuitos de fragmentación son combinaciones de equipos, de acuerdo con Blanco (2014), básicamente un clasificador (CL) y un fragmentador (F) a los que se introduce la alimentación (A) y se descarga el producto (P). El producto, salvo excepciones como el caso del circuito abierto tipo (F), no coincide con el fragmentado (B). Se clasifican en dos grandes grupos:

- Circuitos abiertos: Se caracterizan por una alimentación directa y una salida, están formados por un equipo de fragmentación, sólo o un fragmentador y un clasificador con un funcionamiento sin recirculación.
- Circuitos cerrados: La característica básica de los circuitos cerrados es la existencia de un flujo de material entre el clasificador y el fragmentador, que circula a través de ellos en un circuito de ida y retorno, un sistema de circulación interno cerrado, produciendo una carga circulante entre ambos equipos.

Elección de los equipos

La elección de la trituradora depende del tipo y cantidad de material a triturar. Las trituradoras giratorias y de mandíbulas representan la mayor parte de las trituradoras primarias utilizadas en las operaciones mineras de hoy, aunque

algunas operaciones utilizan trituradoras de impacto por rodillo, rodillos de baja velocidad y trituradores de alimentación. Las trituradoras de cono siguen siendo las más populares para aplicaciones de trituración fina, aunque algunas minas utilizan trituradoras de impacto verticales para trituración terciaria y cuaternaria. La elección de los equipos está ligado íntimamente a la cantidad de material que se va a procesar y la forma de alimentación de planta.

Equipos Principales

El equipo principal en un circuito de trituración primaria normalmente incluye solamente una trituradora, alimentador y transportador. Los circuitos de trituración secundarios y terciarios tienen los mismos elementos de equipo básico, junto con cribas y tolvas de almacenamiento.

En la trituración secundaria se están introduciendo cribas tipo banana mucho más amplias, con tamaños de hasta 4 x 8 m. La seguridad y el entorno de trabajo siguen siendo las dos áreas de diseño de la planta, que requieren más atención. La reducción del ruido y la reducción de las emisiones de polvo son los objetivos de la mayoría de los operadores y diseñadores de plantas de trituración. A medida que los diseñadores se entrenan y se familiarizan mejor con los *software* 3D, el diseño de la planta 3D puede convertirse en el método de elección para optimizar los diseños de plantas más económicas. El mayor cambio, que ahora se está introduciendo en el diseño de las plantas de trituración, es el diseño del proceso minero como un sistema completo, desde la cantera hasta el producto final.

4.2.2 Etapas de Trituración

“En la construcción de carreteras, edificios, presas y demás obras de ingeniería civil, se emplean áridos con una granulometría adecuada que intervienen para la fabricación de productos resistentes mediante su mezcla con aglomerantes. Para solventar este problema se utilizan los procesos de trituración y molienda. En ellos se dan los fenómenos de reducción de tamaño y en muchos casos también se le da una cierta forma a la roca, estos equipos se pueden clasificar en función a la gama de reducciones volumétricas en trituradoras primarias, secundarias, terciarias, arenadores, etc.” (Fueyo (1999) pág. 23).

La escala de fragmentación de un material varía de uno a otro, por ello se presenta de la siguiente forma; tomando en cuenta la comparación con la escala de dureza de Mohs, como se muestra en la tabla 02.

Tabla 02. Comparación entre la resistencia a la fragmentación y la dureza mineralógica. Fuente: Nobregas (2016) pág. 21

<i>Material</i>	<i>Resistencia a la fragmentación (kg/cm²)</i>	<i>Dureza Mineralógica</i>
Cuarzo	1000	7
Pirita	0.785	6.0-6.5
Horblenda	0.311	3.5-4
Galena	0.192	2.5

– Trituración Primaria

Es donde se inicia las operaciones de reducción de tamaño, de manera que las máquinas de este grupo deben ser capaces de admitir el trozo más grande de mineral que la mina envíe. Los aparatos que se emplean son diferentes, de acuerdo con la dureza del material a fragmentar, para rocas duras o medianamente duras, se usan las machacadoras de mandíbula y las trituradoras giratorias; para rocas blandas, las trituradoras de cilindro y de impacto. (Peláez, Eduardo (1981) pág. 35).

Trituradora de Mandíbula

“Estos equipos utilizan como fuerza predominante la compresión y la aplican de forma discontinua por atrapamiento entre dos mandíbulas, una fija y otra móvil mediante diferentes sistemas de actuación. Pueden ser de simple o de doble efecto, denominación que se corresponde con la traducción del inglés de *single toggle* (teja, palanca o placa de articulación) o *double toggle* (doble palanca)” (Blanco, Emilio (2014) pág. 01). En la figura 07 se presenta un esquema del movimiento de las placas.

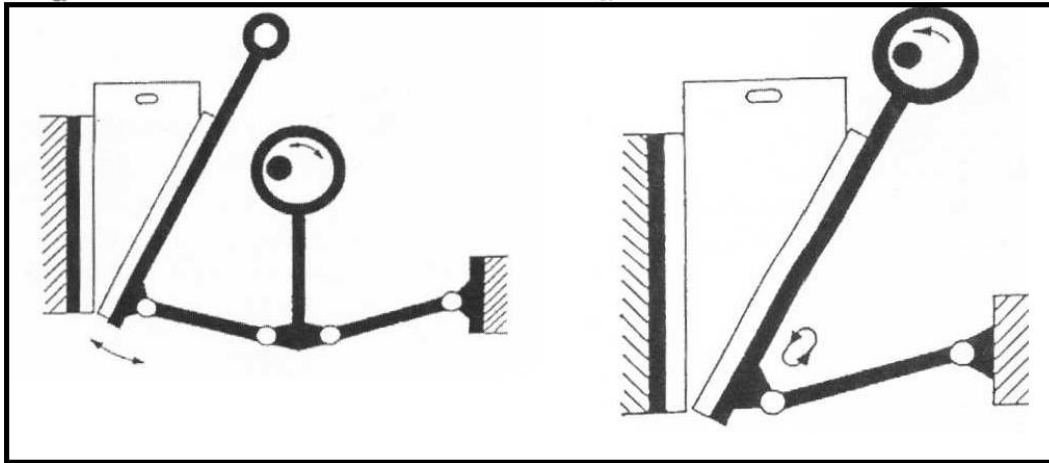


Figura 07. Esquema del movimiento. Fuente Fueyo (1999).

Trituradoras de mandíbulas Blake o de doble efecto

Consta de una mandíbula fija y una móvil que está articulada en su parte superior y que, por oscilación sobre este eje, se puede acercar y alejar de la mandíbula fija (como se muestra en la fig. 08), comprimiendo la roca entre ambas en este movimiento.

La fuerza para la compresión se comunica a la mandíbula móvil mediante el giro de un segundo eje excéntrico, con un gran volante de inercia, que mueve una biela y esta acciona dos placas o tejas entre la mandíbula móvil y un punto fijo. Este tipo de dispositivo es un eficiente multiplicador de fuerzas que permite fragmentar las rocas y minerales entre las mandíbulas del equipo cuando estas se acercan y liberar la presión cuando se separan.

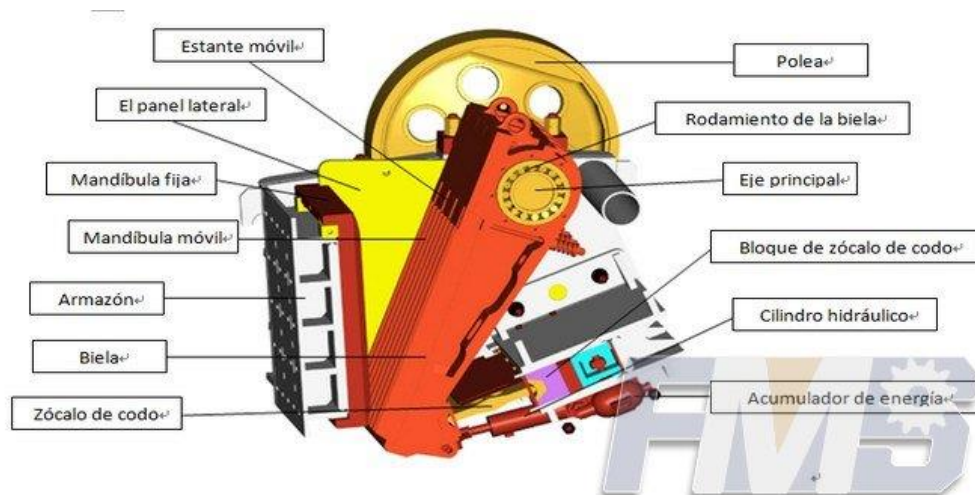


Figura 08. Tritrador de Mandíbula de doble efecto. Fuente: *Formats Construction Machinery Co*, trituradora de mandíbula kue ken.

Trituradora de mandíbulas de simple efecto

Para Blanco (2014) en este tipo de trituradoras un solo eje hace a la vez de articulación para el giro de la mandíbula móvil y de excéntrica para transformar el movimiento lineal en movimiento cuasi lineal. En este caso el movimiento describe una elipse en la zona de la boca de salida.

En este diseño, la mandíbula móvil hace las funciones de biela y se suprime una de las placas de articulación. El resto de mecanismos descritos anteriormente son válidos y similares en su función, pero se simplifica notablemente el diseño y la construcción de los equipos reduciendo el peso de acero y se abarata el notablemente la trituradora.

– Trituración Secundaria

“Proceso que toma el género que descargan las trituradoras primarias una vez clasificados y lo reducen hasta un tamaño que sea apropiado para alimentar los aparatos de molienda o que pueda llevarse a una concentración previa, en tamaño de granzas o gandingas, como es por ejemplo la separación en medios densos. El tamaño máximo de las partículas en la alimentación está comprendido entre 200mm (8”) y 100mm (4”) mientras que el de la descarga suele ser inferior a 13mm (1/2”) si se continúa la fragmentación en molinos. Los equipos que más se utilizan para esta etapa para trituración secundaria fina, donde el objetivo es una

gran cantidad de finos (arena artificial, alimentación de molinos, etc.) son los conos y trituradoras de rodillos”. (Peláez, Eduardo (1981))

Trituradora de Cono

Sánchez (2012) lo define como “un equipo giratorio utilizado para triturar piedra y material duro hasta un tamaño determinado por la configuración del equipo. Consiste en un manto de manganeso el cual gira de manera excéntrica presionando en cada giro a las piedras en contra de un manto superior o anillo cóncavo”. La abertura del cono en la parte superior (ver Fig. 09) determina la configuración de descarga del mismo, es decir que si la abertura inferior es de 1” (1 pulgada, 2,54cm) la piedra que triturada tendrá esa medida.



Figura 09. Triturador de Cono. Fuente: Roberto Sánchez (2012) Pág. 31

– Trituración terciaria o molienda

Según Peláez (1981) esta constituye la última etapa de la fragmentación, aunque el tamaño de los géneros con que se alimentan los aparatos depende del tipo de equipo que se utiliza en la trituración secundaria, el trozo máximo suele ser inferior a 19mm (3/4”) o 13mm, mientras que los productos están comprendidos entre 0,417mm (35 mallas) y 0,074mm (200mallas), aunque hay excepciones.

Comparado con otros equipos de trituración, la trituradora de cono cuenta con algunas ventajas, que lo coloca en ventaja con respecto a los otros equipos y lo hace muy adecuado para la reducción de tamaño y forma del producto final. La razón, es la forma de la cámara de trituración y las posibilidades que posee para cambiar las aberturas de alimentación y descarga durante la operación. Como se muestra en la figura 10.

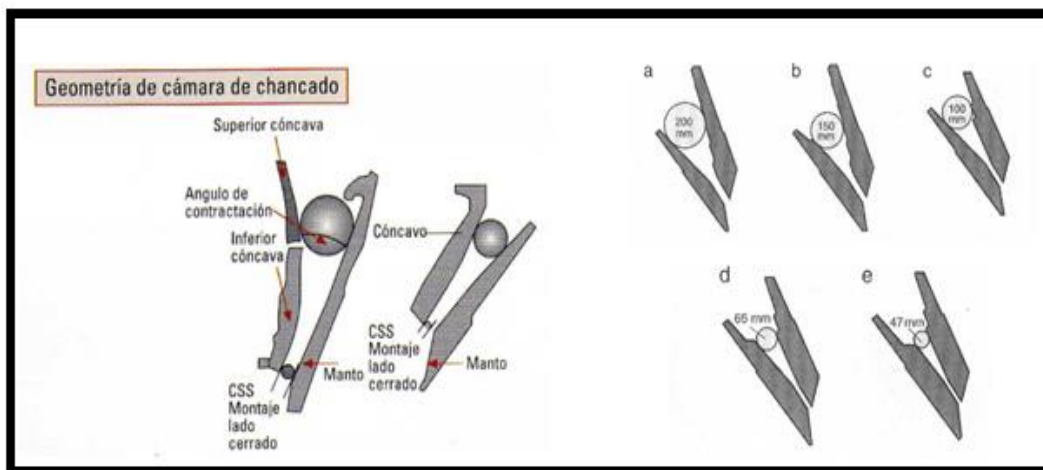


Figura 10. a) Geometría de la cámara de trituración del cono. Fuente Manual general de minería y metalurgia (2006) y b) diferentes configuraciones fuente Fueyo (1999)

4.2.3 Relación de reducción

La relación de reducción, también conocida como grado de trituración y de molienda, es una característica cuantitativa del proceso, que indica en cuantas veces ha disminuido el tamaño de partícula del material durante la trituración o molienda. Es conocida como la relación entre el tamaño de alimentación y el tamaño de descarga de cualquier equipo de conminución. Otra definición dice que es la relación existente entre el tamaño de mineral, correspondiente al tamaño al cual se halla el 80 % del material que se alimenta a un equipo de reducción de tamaño (trituradora o molino) y el de su descarga, correspondientes al tamaño al cual se halla el 80% del producto.

4.2.4 Clasificación de productos

“La clasificación es una operación mineralúrgica cuyo objetivo básico es separar los productos que ya tienen un determinado tamaño o rango de tamaños, de

aquellos que no reúnen las dimensiones adecuadas; este proceso va generalmente asociado a la fragmentación en algunas de sus etapas y se utiliza, además para diseñar circuitos cerrados con los equipos de fragmentación (conos y molinos) con el claro objetivo de optimizar los procesos en consumos de energía y en costes”. (Blanco, Andrés (2014) pág. 01)

La medida del tamaño de las partículas se realiza por uno de los sistemas indicados, clasificados por el principio de operación. Blanco (2014) afirma que los márgenes más usuales en el proceso de clasificación son los siguientes:

Cribado

“se utiliza un obstáculo físico para realizar la clasificación. Utilización de cribas de mallas cuadrada calibrada para tamaños adecuados a la alimentación y de robustez suficiente”.

Tamizado

“El principio corresponde al paso o rechazo (probabilidad) por una malla tipo (estándar) del conjunto de partículas. Se emplean tamices (mallas calibradas) y es apto para tamaños entre 0,1mm y 200mm”.

Cernido

“Es una operación continua a diferencia de la tamización y puede llevarse a cabo en seco o en húmedo. Si la operación se realiza en seco, el tamaño de corte o separación puede llegar hasta aproximadamente 28 mallas tyler (0,6mm), por debajo de este tamaño se tiene una sustancial disminución en la capacidad de la máquina. Si la operación es en húmedo, el tamaño de corte puede llegar hasta 50 micras”.

Tornillo lavador de finos:

Para Sánchez (2012), es un equipo que consiste en un tornillo sin fin ubicado dentro de un cajón de lavado, accionado por un motor eléctrico y que posee una inclinación entre 15° a 20°. El tornillo recibe el material en la base y mediante el movimiento de rotación hace que el mismo se vaya desplazando hacia la parte superior donde se encuentran los bajantes o chutes de descarga. Al mismo tiempo un suministro constante de agua desde la parte superior del tornillo hace que el material se vaya lavando dejando las partículas muy finas, así como la basura y desperdicios, en un tanque de agua ubicado en la parte inferior del equipo. Los

tornillos lavadores son utilizados en la industria de los agregados para la limpieza de la arena, separar la arena del polvillo, y para el lavado de las piedras de diversos tamaños. Dependiendo del tipo de material a trabajar y de la cantidad que se procese en función del tiempo se pueden utilizar tornillos lavadores dobles, que consiste en tener dos tornillos en un mismo cajón de lavado.

4.2.5 Eficiencia o rendimiento de cribado

Para Fueyo (1999), los factores que influyen en el rendimiento de paso se pueden resumir en los siguientes:

- factores propios de la superficie de cribado: dimensión y forma de las aberturas, perfil de la sección de paso, inclinación, superficie libre de paso, etc.
- factores propios del producto a cribar: granulometría, coeficiente de forma, distribución de tamaño, humedad, plasticidad, etc.
- factores propios al movimiento de la criba: frecuencia del movimiento, amplitud, coeficiente de aceleración, ángulo de trabajo, etc.

Todos estos factores permiten determinar un coeficiente de cribado:

$$Kv = \frac{an^2 \cdot \sin(\alpha + \beta)}{90.000 \cdot \cos \beta} \text{ Ecuación 01}$$

Dónde:

a: amplitud del movimiento (cm)

n: velocidad angular (revoluciones/minuto)

α : ángulo de reposo del material a cribar

β : ángulo del paño respecto a la horizontal

Kv: puede estar comprendido entre 1,5 y 2 para un cribado fácil, entre 2 y 2,5 para un cribado normal y 3-3,5 para uno difícil.

Otros factores propios a las condiciones de trabajo de la criba: número de paños, ritmos de alimentación, coeficiente de disponibilidad, eficiencia, etc. Si “m” es la abertura de la malla de la criba, “A” la masa de alimentación, “P” la masa de material pasante, “R” la masa de rechazo y “a”, “p” y “r” los porcentajes de

partículas con dimensiones inferiores a “m”, respectivamente en la alimentación, pasante y rechazo, el rendimiento o eficiencia de cribado viene dado por la fórmula: como $A = P + R$, $Aa = Pp + Rr$

$$E(\%) = 100 * (100(a-r) / a(100-r)) \text{ Ecuación 02}$$

Se establece que los granos de dimensiones críticas son los granos de dimensiones comprendidas entre “m” y “m/2”

4.2.6 Distribución Granulométrica

Fueyo (1999) afirma que es imposible obtener, a través de los procesos de trituración, granos que en su totalidad sean de volumen igual y uniforme. La trituración, realizada de forma que ninguno de los fragmentos obtenidos sobrepase una dimensión previamente definida, conduce a la obtención de toda una gama de tamaños comprendidos entre dicha dimensión y la infinitamente pequeña.

Mientras que Peláez (1981) explica que para determinar la distribución por tamaños de una muestra se emplea en el laboratorio, un conjunto de tamices circulares, de 20cm aproximadamente de diámetro, en los que la malla de fondo en cada tamiz corresponde a un número de la serie Tyler o A.S.T.M. al final de esta operación se habrá dividido la muestra en una serie de porciones retenidas sobre cada uno de los tamices utilizados en el análisis, y estos pesos se transforman en porcentajes, que finalmente se representaran en forma gráfica que permitirá hacer comparaciones rápidas y que a simple vista dará una idea de la distribución de tamaño, pues en algunos casos, son más valiosos los tamaños gruesos mientras que en otros casos los materiales adquieren valor al ser más finos. Estas curvas reciben el nombre de curvas granulométricas y existen varias formas de representación. Una muy empleada es la escala logarítmica que permite la representación de granos gruesos y granos finos.

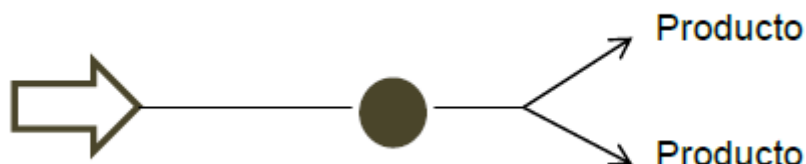
4.2.6 Balance de Masas

Kelly E (1990) nos hace referencia a un aspecto fundamental de un diagrama de proceso como lo es el Balance de materiales o balance de masa, este se basa en

“los puntos en los que se dividen y se combina las corrientes”, este se basa en principio de la conservación de la material de donde obtenemos la siguiente relación

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

Partiendo de esto el autor establece que debe existir una base que fundamenta el resto de los cálculos que puede ser una masa, un régimen de flujo, un gasto o un volumen, así mismo tiene como ejemplo un caso hipotético en el que un molino representa la separación de una alimentación dada, lo que da como resultado varios productos que a su vez representan la masa total de la operación



$$\text{Toneladas de Alimentación} = \text{Producto 1} + \text{Producto 2}$$

Este es el principio según Kelly E. (1990) para la realización de un balance de masa, donde nos indica que es importante una elaboración “clara y limpia del diagrama del proceso en donde se indican todos los datos conocidos” (pág. 32) además de que existen errores básicos para que estos balances de masa arrojen valores anormales, estos pueden ser una mala toma de muestra, errores de ensayo en las muestras, para ello el autor recomienda que se debe aprovechar el exceso de datos que nos pueden proporcionar información adicional para los cálculos.

La empresa Telesmith (2010) cuya principal actividad es la fabricación en equipos de reducción y clasificación de tamaño, realizó un informe que habla de la importancia de la eficiencia en el balance de masa para las operaciones de reducción y clasificación de tamaño en cualquier planta de beneficio mineral, en donde el mal en un balance de masa para este estudio, representa gastos energéticos, haciendo de las operaciones procesos ineficientes. El estudio hace una revisión del desgaste de energía ocasionado por los equipos y la comparación entre los molinos semi-autógenos y los molinos autógenos, en donde solo se

puede saber dicho desgaste energético con la cuidadosa y adecuada toma de muestras en la entrada y salida de los equipos.

4.3 Mecanismos de abrasión, compresión e impacto para la fragmentación de rocas

Para Guerra (1999) las partículas se rompen principalmente por tres causas: abrasión, compresión e impacto, como se muestra en la figura 11, la potencia requerida en cualquier unidad de trituración está dada en función de tres factores: la resistencia del material que va a ser triturado, la magnitud de la reducción de tamaño que se llevará a cabo y la cantidad de material que será triturado por unidad de tiempo.



Figura 11. Mecanismos de abrasión, compresión e impacto para la fractura de Rocas. Fuente: Guía de aplicación de piezas de desgaste (Metso 2012)

“Las trituradoras de impacto aplican golpes a altas velocidades causando un alto grado de fracturación por impacto. Las máquinas de tipo compresión de mandíbula y giratorias aplican su energía de una manera más lenta, produciendo abrasión y compresión mientras que las de tipo cono tienen un ciclo recíprocante de aproximadamente el doble que las trituradoras de mandíbulas y giratorias acentuando la fracturación por compresión”. (Guerra (1999) pág. 08).

4.4 Caracterización Geomecánica

Para Fueyo (1999). Los ensayos geomecánicos representan una etapa imprescindible en el proceso de caracterización del macizo rocoso, los valores obtenidos a partir de estos permiten cuantificar de una manera aproximada los estados de esfuerzos máximos que puede soportar dicho cuerpo rocoso.

La problemática de la ingeniería mecánica en todos los diseños estructurales es la predicción del comportamiento de la estructura bajo las cargas actuantes o durante

su vida útil. Esta práctica aplicada a la ingeniería de minas, busca parámetros cualitativos y cuantitativos de los fenómenos naturales y su relación con el comportamiento de los materiales.

Con el fin de obtener los estados de esfuerzos máximos de la roca en estudio y con ello realizar el diseño teórico-práctico, de los elementos que componen el circuito de reducción mecánica, los ensayos a profundizar son:

– **Compresión Uniaxial:**

“La resistencia a la compresión uniaxial está definida como la sollicitación $\sigma_1 = C_o$ máxima que una muestra cilíndrica de roca es capaz de soportar. El valor determinante para C_o depende de la rugosidad de la superficie, del no paralelismo y la perpendicularidad entre las caras” Castillejo, (1993). Debe tomarse en cuenta además las dimensiones de la muestra, tal es el caso del diámetro “D”. En este ensayo la muestra cilíndrica de roca es colocada entre dos piezas cilíndricas de metal y por medio de una prensa se somete a una sollicitación creciente de σ_1 .

– **Ensayo de los Ángeles Resistencia al desgaste**

Este ensayo de resistencia al desgaste por rozamiento con superficies metálicas, permite de medir la pérdida de masa que sufre un árido al someterlo a un proceso continuo de desgaste. Se fundamenta en someter una determinada cantidad de muestra (previamente lavada y convenientemente separada) a la acción de la máquina de Los Ángeles, compuesta por un cilindro hueco de acero (tambor) atravesado longitudinalmente por un eje en su parte central que posibilita su giro. En ella se introduce tanto la muestra de árido como una carga abrasiva, compuesta por un número variable de esferas de acero macizo en función de la granulometría ensayada. Una vez dentro, se hace girar el tambor con una velocidad angular constante, dando entre 500 y 1000 vueltas, según la granulometría del árido. Una vez acabado este proceso, se separa la fracción retenida por el tamiz. 12° para lavarla y descargarla en estufa antes de efectuar su pesada. El coeficiente de desgaste de los ángeles vendrá dado por la relación entre la masa perdida (diferencia entre la masa inicial y final) y el peso inicial de la muestra de árido, expresada en tanto por ciento.

Un índice superior a 50 indica la mala calidad y escasa resistencia al desgaste de un árido, lo hace inservible para su uso en carreteras. En cambio, un valor inferior a 20 da idea de la excelente calidad y bajo desgaste del árido, pudiendo emplearse en firmes, especialmente en la capa de rodadura.

– **Ensayo tracción indirecta (brasileiro)**

Este ensayo, consiste en medir la resistencia a la tracción uniaxial de una probeta de roca indirectamente, asumiendo que la ruptura se produce por tracción cuando la roca se somete a un estado de esfuerzos biaxial, con un esfuerzo principal fraccional y otro compresivo de magnitud no superior a 3 veces el esfuerzo traccional. Se aplica una carga vertical compresiva sobre un disco o cilindro de roca, que se coloca en horizontal entre dos placas a través de las cuales se transmite la fuerza para conseguir su ruptura. Se pueden emplear placas planas o esféricas cóncavas para transmitir las cargas.

4.4.1 Descripción de Macizos Rocosos

“La descripción y caracterización de los macizos rocosos en afloramientos es una labor necesaria en todos los estudios de ingeniería geológica cuyo objetivo sea el conocimiento de las propiedades y características geotécnicas de los materiales rocosos. Estos trabajos se realizan durante las primeras etapas de las investigaciones *in situ*”. (González de Vallejos (2002) pág. 238).

La sistemática para la descripción de los afloramientos de macizos rocosos se puede resumir en las siguientes etapas:

- Descripción de las características generales del afloramiento.
- División en zonas y descripción general de cada zona.
- Descripción detallada de cada zona.
 - Matriz rocosa.
 - Discontinuidades.
- Descripción de los parámetros del macizo rocoso.
- Caracterización global y clasificación geomecánica del macizo rocoso.

“La descripción general del afloramiento debe incluir la identificación, condiciones y características generales del afloramiento y la de cada uno de sus componentes: rocas, suelos, zonas con agua, discontinuidades singulares, etc. La división en zonas más o menos

homogéneas se realiza a partir de criterios fundamentalmente litológicos y estructurales. El número de zonas que se establezca y la extensión de las mismas dependerán del grado de heterogeneidad de los materiales y estructuras que formen el macizo rocoso, de la extensión del afloramiento y del grado de detalle y finalidad de la investigación. Se deben describir las características generales de cada zona. La descripción de cada zona se lleva a cabo por separado y detalladamente, y deberá ser lo más objetiva y clara posible, utilizando terminología estandarizada, de manera que distintos observadores lleguen a la misma descripción, evitando que puedan aparecer diferencias en la interpretación de las observaciones o medidas realizadas en una misma zona. A lo largo de esta fase se describen las características y propiedades físicas y mecánicas de la matriz rocosa y de las discontinuidades. La descripción de los parámetros del macizo rocoso se realiza a partir de los datos recogidos en cada estación; se establecerán los parámetros referentes al número de familias de discontinuidades, orientación y características representativas de cada una de ellas, determinando su importancia relativa, tamaño y forma de los bloques que conforman el macizo, grado de fracturación, etc., así como otros factores que influyen en el comportamiento, como el grado de meteorización y las propiedades hidrogeológicas. Por último la caracterización global del macizo rocoso constituye la fase final del proceso descriptivo, y debe proporcionar las condiciones geológicas y geomecánicas del macizo en su conjunto. A partir de estos resultados se aplican las clasificaciones geomecánicas, que proporcionan información sobre la calidad y resistencia del macizo, así como datos cuantitativos para su aplicación a diferentes fines constructivos". Gonzáles de Vallejos (2002).

Clasificación de las rocas con fines ingenieriles

Las clasificaciones geológicas o litológicas como se muestra en la tabla 03, según Vallejos (2002), son fundamentales en ingeniería geológica, ya que aportan

información sobre la composición mineralógica, la textura y la fábrica de las rocas, así como sobre la isotropía o anisotropía estructural en rocas de determinado origen, como es el caso de las rocas masivas frente a rocas laminadas o foliadas. Así, el término de roca ígnea o metamórfica indica una determinada estructura, textura, composición, tamaño de grano, etc. Estos factores, que se emplean para subclasificar los grupos principales, condicionan las propiedades físicas y resistentes de las rocas. Sin embargo, las clasificaciones litológicas no son suficientes en ingeniería geológica, en cuanto que litologías similares pueden presentar grandes variaciones en sus propiedades físicas y mecánicas, como por ejemplo en la resistencia. Además no aportan información cuantitativa sobre sus propiedades.

Tabla 03. Clasificación geológica general de las rocas. Fuente González de Vallejos (2002)

Clasificación geológica general de las rocas		
Clasificación de las rocas por su origen		
Rocas sedimentarias	Detríticas: Químicas: Orgánicas:	cuarcita, arenisca, lutita, limolita, conglomerado. evaporitas, caliza dolomítica. caliza, carbón, rocas coralíferas.
Rocas ígneas	Plutónicas: Volcánicas:	granito, gabro, diorita. basalto, andesita, riolita.
Rocas metamórficas	Masivas: Foliadas o con esquistosidad:	cuarcita, mármol. pizarra, filita, esquistos, gneiss.

González de Vallejos (2002), también afirma que la clasificación de las rocas para usos ingenieriles es una tarea compleja, ya que deben cuantificarse sus propiedades con el fin de emplearlas en los cálculos de diseño. Así, los términos cualitativos de roca dura o resistente, blanda o débil deben acotarse mediante determinados valores de su resistencia a compresión simple: 500 a 1.000 kp/cm² para una roca dura y 50 a 250 kp/cm² para una roca blanda. La dificultad para la clasificación geotécnica estriba tanto en el hecho de la alta variabilidad de las propiedades rocosas como en las limitaciones de los métodos y procedimientos para su determinación.

La resistencia a compresión simple es la propiedad más frecuentemente medida en las rocas, y en base a su valor se establecen clasificaciones en mecánica de rocas, en la tabla 04 se incluyen diferentes clasificaciones basadas en este parámetro. Otro valor empleado para la clasificación mecánica de la matriz rocosa es el modulo relativo, o relación entre su módulo de elasticidad E y su resistencia a compresión simple, σ_{rc} , relación que varía en función de la litología.

Tabla 04. Clasificación de las rocas a partir de su resistencia a compresión simple.

Fuente González de Vallejos (2002).

Clasificación de las rocas a partir de su resistencia a compresión simple				
Resistencia a la compresión simple (MPa)	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)	Ejemplos
< 1	Suelos			
1-5	Muy blanda	Blanda > 1,25	Muy baja	Sal, lutita, limolita, marga, toba, carbón.
5-12,5	Blanda	Moderadamente blanda		
12,5-25		Moderadamente dura		
25-50	Moderadamente dura		Baja	Esquisto, pizarra.
50-100	Dura	Dura	Media	Rocas metamórficas esquistosas, mármol, granito, gneiss, arenisca, caliza porosa.
100-200	Muy dura	Muy dura	Alta	Rocas ígneas y metamórficas duras, arenisca muy cementada, caliza, dolomía.
> 200		Extremadamente dura	Muy alta	Cuarcita, gabro, basalto.
> 250	Extremadamente dura			

4.5 Caracterización Petrológica de rocas metamórficas

Metamorfismo

José Baamonde (2006) lo define como la transformación de un tipo de roca en otra. Se define como los cambios en la composición mineral y textural de una roca sometida a elevadas temperaturas y presiones. También se puede definir como los cambios mineralógicos y estructurales en las rocas solidas por las condiciones químicas y físicas a las cuales han sido impuestas en profundidades donde difieren de los procesos de meteorización y diagénesis.

Tipos de metamorfismo

Generalmente existen tres grandes tipos de metamorfismo, según Baamonde (2006) estos están relacionados con ambientes específicos: metamorfismo de contacto, metamorfismo dinámico o cataclástico y metamorfismo regional; otros que también deben ser considerados son el metamorfismo hidrotermal y metamorfismo de soterramiento. Igualmente, este autor considera otro tipo de metamorfismo ocasional como lo es el metamorfismo de impacto.

El metamorfismo de contacto, según José Baamonde (2006) este ocurre cuando la roca está cerca de una masa ígnea (magma) o en contacto con esta. Los cambios son causados fundamentalmente por las altas temperaturas del material fundido y el calentamiento de las rocas circundantes. Por otra parte este autor define el Metamorfismo regional como el que genera el mayor volumen de roca metamórficas y generalmente está asociado a la formación de cadenas de montañas, Baamonde afirma que en este proceso grandes cantidades de rocas están sometidas a presiones dirigidas y elevadas temperaturas; de igual forma asevera que el metamorfismo hidrotermal está asociado con las dorsales oceánicas sobre los basaltos originados de la extrusión, los cuales van formando una nueva corteza oceánica.

Clasificación de rocas metamórficas

Baamonde (2006) afirma que la clasificación de una roca metamórfica depende del grado de metamorfismo y visibilidad de los minerales presentes en la roca. Generalmente los nombres que se utilizan se adoptan con el objeto de facilitar la descripción general. Tres clases de criterios son normalmente empleados:

- Mineralógicos. Los minerales que más se distinguen se usan para determinar un término textural y mineralógico. Un esquistito conteniendo biotita, granate, cuarzo y feldespato, se denomina esquistito biotítico granetífero. Baamonde también asegura que un esquistito con porfidoblastos de feldespato potásico, se puede indicar como un esquistito porfidoblástico de feldespato potásico.

- Químicos. La composición química general puede ser determinada del ensamblaje mineral y el nombre se indica de la forma siguiente. Un esquisto con proporciones más o menos similares de cuarzo y feldespato, así como algo de granate y moscovita, se denomina: esquisto cuarzo feldespático con granate y moscovita.
- Protolito. Si una roca posee un metamorfismo de bajo grado y se observa la textura y la roca original, la roca se puede denominar con el prefijo “meta”: metabasalto, metaandesita, metagranito, etc.

Rocas metamórficas comunes, minerales típicos y protolito

Tabla 05. Rocas metamórficas comunes, minerales típicos y protolito. Fuente: Petrología, José Baamonde (2006) pag. 324

Nombre	Minerales típicos	Textura	Protolito
Pizarra y filita	Moscovita, clorita, cuarzo	Grano fino con clivaje bien desarrollado	Pelitas
Esquistos	Micas, anfíboles, clorita, cuarzo	Grano grueso y esquistosidad	Pelitas, máficas, calcáreas
Gneis	Cuarzo, feldespatos, biotita, hornblenda	Grano grueso y bandeamiento	Varios
Hornfels	Cuarzo, micas, feldespatos, anfíboles, piroxenos, cuarzo	Grano fino sin foliación	Pelitas, máficas, calcáreas
Cuarcita	Cuarzo	Grano grueso sin foliación	Areniscas cuarzo feldespáticas
Anfibolita	Hornblenda, plagioclasa	Grano grueso, bandeamiento o esquistosidad	Máficas, calcáreas
Serpentinita	Serpentina	Grano fino sin foliación	Ricas en magnesio
Granulita	Cuarzo, feldespatos, piroxenos	Grano grueso y semibandeado	Areniscas cuarzo feldespáticas y pelitas
Eclogita	Granate, omfacita	Grano grueso y no foliadas	Máficas

4.6 Desgaste de materiales

Este fenómeno, al igual que la corrosión y la fatiga, es una de las formas más importantes de degradación de piezas, elementos mecánicos y equipos industriales. El desgaste puede ser definido como “El daño superficial sufrido por los materiales después del trabajo al que son sometidos, deterioro que se

manifiesta por lo general en la parte exterior de las diferentes piezas, aunque puede llegar a afectar su sub-superficie”. (Rosero (2013) pág. 65). El resultado del desgaste, es la pérdida de consistencia del material por la disminución de las dimensiones originales. Los daños en los distintos materiales se deben principalmente a su deformación plástica y a la formación y propagación de grietas, corrosión y/o desgaste.

Torres (2012) afirma que “El desgaste en la maquinaria es uno de los factores que más influye en la depreciación de una fábrica. Por lo tanto, se pueden reducir los costos o aumentar los beneficios prolongando la vida de la maquinaria”.

En el mundo existen una serie de aleaciones que, empleadas adecuadamente, pueden contribuir a evitar paros de producción, gastos por reparación, retraso de las entregas, reclamaciones y pérdida de ventas. El aspecto fundamental en la solución de este problema es el anticiparse a los tipos de desgaste a los cuales estarán sujetos los componentes.

En una superficie sólida solo existen tres vías para remover material: por fundición, por disolución química y por separación química y mecánica de los átomos de la superficie. El último método puede ser efectuado por la aplicación al mismo tiempo de una alta deformación o deformaciones cíclicas de bajas magnitudes. Los procesos mecánicos y químicos pueden operar separadamente o juntos, tales como la abrasión en medios corrosivos.

En las operaciones unitarias de la minería y el procesamiento de minerales, por su naturaleza, implican fuertes interacciones mecánicas entre metales, así como entre materiales no metálicos abrasivos y metálicos. Por ello la naturaleza abrasiva de la mayoría de los minerales puede causar un desgaste significativo tanto en el equipo de carga y transporte como en el de procesamiento.

4.6.1 Desgaste de equipos de trituración

Los dos mecanismos principales de desgaste de las cámaras de trituración son: desgaste por abrasión y desgaste por fatiga. El principal motivo de desgaste en las piezas en las cámaras de trituración es el desgaste por abrasión. El desgaste por fatiga también está presente en las piezas de desgaste al ser sometidas a compresión múltiple y cargas de impacto las piezas de trituración.

Las trituradoras típicamente comprimen el material entre las piezas de desgaste fijas y las móviles. Además de la rotura del material de alimentación también se producen desgaste de material de las piezas de trituración. Hay muchos factores que afectan al desgaste de las piezas de desgaste. Algunos de ellos son: el tipo de desgaste, los factores medioambientales, los parámetros de funcionamiento del triturador, el material de alimentación y propiedades de la pieza de desgaste. Sin embargo, uno de los factores más importantes en el desgaste de las piezas de desgaste del triturador es la abrasividad del material a tratar.

4.6.2 Correlación de las características de los macizos rocosos con los desgastes de elementos

Evaristo Valencia en el 2013 presenta un estudio llamado en el cual muestra las consideraciones técnicas aplicadas a una planta de benéfico, para lograr un incremento en su producción diaria, elaborando estudios de factibilidad técnica y financiera, balance de masa de cada una de las etapas del proceso de producción y finalmente propone los posibles arreglos de equipos para lograr los objetivos de producción.

En el año 2013 Eduardo Díaz realiza una investigación donde estudia el comportamiento de electrodos revestidos para recubrimiento duro manual por arco eléctrico, en esta investigación Díaz evaluó tres materiales de aporte de diferentes fabricantes y recomendados para este tipo de aplicación, además determino las características técnico-operativas de los consumibles de soldadura estudiados y estableció las propiedades de estructura metalográfica y dureza de los depósitos. Este análisis posibilitó la selección del metal de aporte más adecuado, así como la mejor corriente de soldadura; finalmente se desarrolló un ensayo de desgaste comparativo en condiciones reales de servicio demostrando de esta manera la factibilidad de la sustitución de un elemento por otro. Igualmente en el año 2013 Luís Perdomo desarrollo un Trabajo Especial de Grado el cual consistió en un estudio del comportamiento técnico-operacional de electrodos revestidos para el recubrimiento duro por arco manual, con posibilidad de ser utilizados en la protección de álabes de los exhaustores para el enfriamiento del clinker, para ello Perdomo evaluó tres materiales de aporte recomendado para la protección de elementos sometidos al desgaste abrasivo en su modalidad erosivo; en este trabajo

al igual que el presentado anteriormente también se desarrolló un ensayo de desgaste comparativo, demostrando de esa manera la factibilidad de la protección de manera satisfactoria de este tipo de elementos; el análisis integrado de esas características le posibilitó al autor la selección del metal de aporte más adecuado, así como la mejor corriente de soldadura para esta aplicación concreta. Así mismo en el año 2006, Pablo Torres realizó una investigación en el cual presento un estudio preliminar para optimizar los procesos de recuperación de piezas de acero de gran espesor, considerando las características del metal original de la pieza y el material de relleno, dada que ambos actúan como material de base, para esto utilizo ensayos de dureza y metalográficos. En general, Torres buscó correlacionar los cambios microestructurales con las propiedades mecánicas para optimizar las uniones soldadas en estudio con el fin de recuperar las partes gastadas por abrasión mediante el uso de aceros nacionales y recubrimientos con soldaduras.

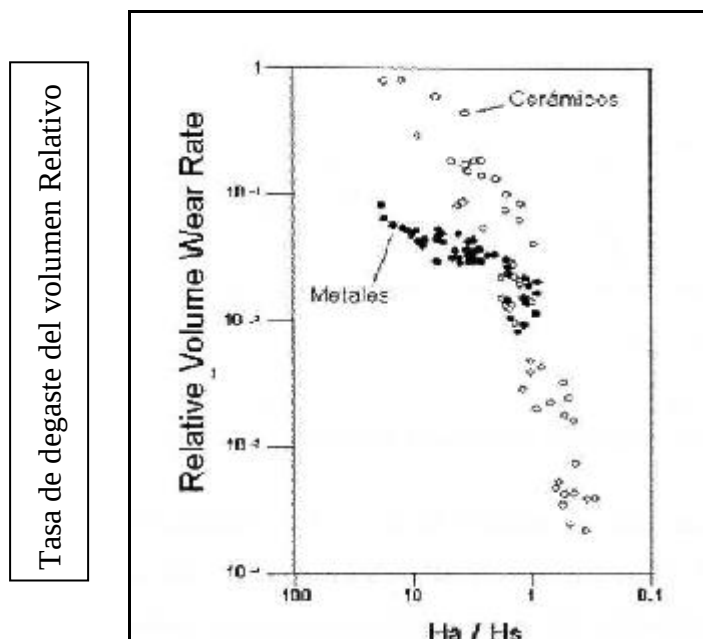
4.6.3 Revestimientos

Errol (1990). Indica que los revestimientos de trituradores de mandíbula y los trituradores de cono están fabricados generalmente en acero al manganeso Hadfiel., una proporción de manganeso del 12 % al 14 %, denominado austenítico, se caracteriza por su gran resistencia al desgaste y por su alta tenacidad. Aunque este acero es el que ha dado los resultados más satisfactorios hasta hoy en día, se sigue investigando en otras aleaciones como, de cromo, molibdeno, etc. E incluso con manganeso pero con otras proporciones. Estas aleaciones son 12-14 % Mn+Cr, 12-14 % Mn+Cr+Mo y 16-18 % Mn+Cr. Las investigaciones han demostrado que si la proporción de manganeso disminuye por debajo de 12 % la aleación se vuelve muy blanda y aguanta poco el desgaste, mientras que si se aumenta la proporción por encima del 14 % incrementa considerablemente su resistencia al desgaste, pero se vuelve poco tenaz rompiéndose con facilidad. Por encima de 14% el acero se debe utilizar en masa para evitar su rotura, como en el caso del eje central troncocónico y los forros de las mandíbulas, el cual está formado por una sola pieza de acero al manganeso de 12-14 % al igual a la cámara de trituración, una sola pieza denominada aro de trituración.

4.6.4 Efecto de las propiedades de las partículas

Dureza

“Es una de las propiedades esenciales de las partículas en relación a la cantidad de desgaste obtenido. Las partículas con mayor dureza que la superficie a impactar causará más desgaste que aquellas partículas de menor dureza. Este comportamiento es mostrado en la (Figura 12) donde las magnitudes de desgastes de metales y cerámicos, para el sistema de abrasión de dos cuerpos, empiezan a ser muchos mayores cuando la relación de la dureza de la partícula (H_a) y la dureza de la superficie a impactar (H_s) es mayor a 1”. (Perdomo, Luis (2013) pág. 14)



**Figura 12. Desgaste para la relación de dureza partícula (H_a)-superficie (H_s).
Fuente Perdomo (2013)**

Forma

“Los rangos de desgastes dependen fuertemente de la forma de la partícula, donde partículas angulares causaran mayores desgastes que partículas redondeadas” Perdomo, (2013). Algunas de las formas en que pueden ser representadas las partículas erosivas son mostradas en la figura 13.

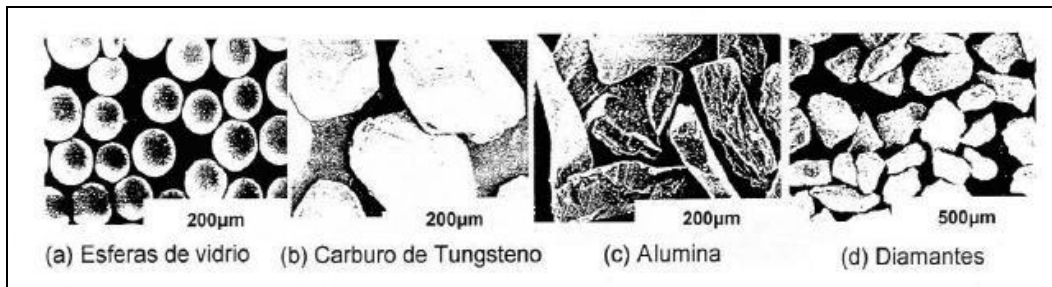


Figura 13. Forma de partículas erosivas. Fuente: Perdomo (2013)

Tamaño

Perdomo, Luis (2013). Afirma que se han encontrado diferentes patrones de comportamiento en el desgaste por partículas sólidas tanto en abrasión como en erosión de materiales dúctiles, donde está involucrado el tamaño de la partícula. En su estudio, Perdomo hace referencia a estudios realizados por Lain Finnie, quien demostró que la cantidad de desgaste es menor cuando el tamaño de la partícula es menor de 100 μm .. La figura 14 muestra los resultados obtenidos, donde partículas de 10 μm causan alrededor de una cuarta del desgaste que acusan las partículas de 100 micrómetro.

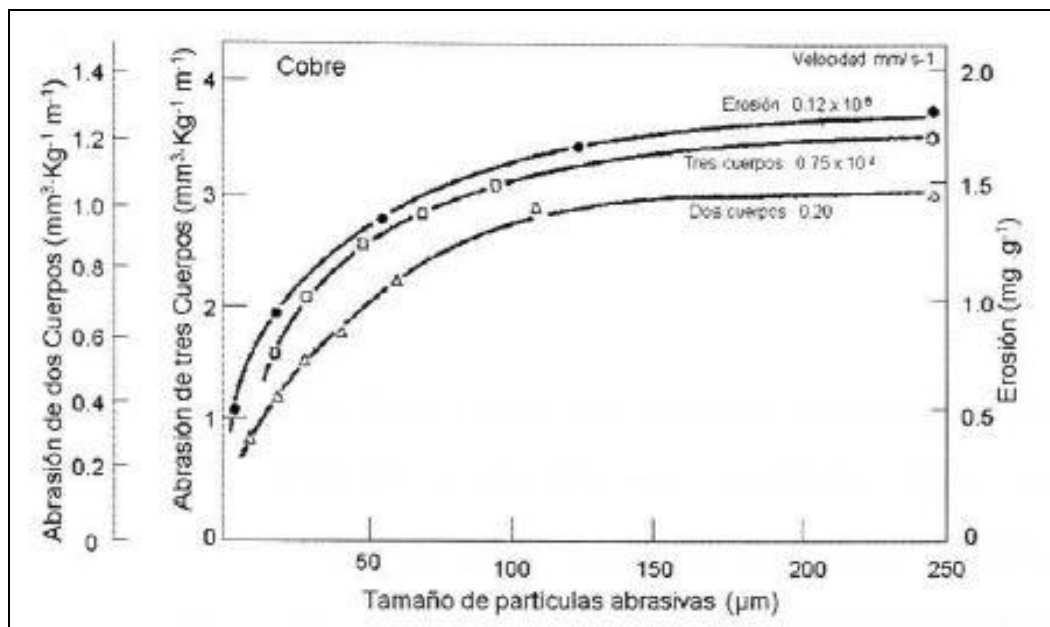


Figura 14. Desgaste en función del tamaño de la partícula. Fuente: Perdomo (2013)

4.7 Requisitos para concretos y agregados (COVENIN 277:200)

El agregado fino debe estar constituido por arena de río, de mina o proveniente de piedras trituradas; de otra fuente o de arena de mar siempre que cumplan con los requisitos que establece la normativa COVENIN 277:200 para la obtención de concretos y agregados. Esta normativa resalta en sus notas #01 y #02 respectivamente que “las arenas micáceas debido a su constitución, son poco apropiadas para utilizarse en la fabricación de concreto y por lo tanto deben evitarse” y que “las arenas de mar suelen contener altas propiedades de sales, las cuales deben ser eliminadas para que cumplan los límites establecidos en la presente norma venezolana”.

Granulometría

Las normas COVENIN establecen que la granulometría de los agregados finos debe estar comprendida entre los límites que se indican en la tabla 06. de igual forma puede ser necesario usar por motivos técnicos, materiales con desgaste distinto que no estén dentro de los límites establecidos en dicha tabla, en estos casos deben establecerse de acuerdo a las normas establecidas o por acuerdos entre las partes involucradas, manteniendo siempre el módulo de finura menores a 0,20.

Tabla 06. Límites en la granulometría. Fuente: Normas COVENIN (277:200) (2000).

Cedazos COVENIN ^(*)	Porcentaje que pasa		
9,51 mm; (3/8")	100		
4,76 mm; (#4)	85	-	100
2,38 mm; (#8)	60	-	95
1,19 mm; (#16)	40	-	80
595 µm; (#30)	20	-	60
297 µm; (#50)	8	-	30
149 µm; (#100)	2	-	10
75 µm; (#200)	0	-	5

Tabla 07. Límites de los porcentajes en peso que pasan los dos (2) cedazos de aberturas cuadradas. Fuente: Normas COVENIN (277:200) (2000).

Piedra picada ó grava COVENIN	75 mm (3")	64,0 mm (2 1/2")	50,8 mm (2")	38,1 mm (1 1/2")	25,4 mm (1")	19,0 mm (3/4")	12,7 mm (1/2")	9,51 mm (3/8")	6,35 mm (1/4")	4,76 mm (N° 4)	2,38 mm (N° 8)	1,19 mm (N° 16)	595 µm (N° 30)	297 µm (N° 50)
N° 0	-	-	-	-	-	100	100 a 80	85 a 50	60 a 25	40 a 15	20 a 5	10 a 0	5 a 0	-
N° 1	-	-	-	100	100 a 90	90 a 50	45 a 15	20 a 0	7 a 0	-	-	-	-	-
N° 2			100 a 95	90 a 75	70 a 35	30 a 5	10 a 0	5 a 0	-	-	-	-	-	-
N° 3	100	100 a 90	95 a 65	60 a 20	10 a 0	5 a 0	-	-	-	-	-	-	-	-

CAPÍTULO V - MARCO METODOLÓGICO

En el capítulo siguiente se definirá el tipo y diseño de investigación, objeto de estudio y la metodología de investigación empleada mediante la presentación de un esquema de trabajo durante las fases de la de la misma.

5.1 Tipo y diseño de la Investigación

El tipo de investigación es de campo ya que según los describe la Universidad Pedagógica Libertador (2003) este tipo de investigaciones “realiza un análisis sistemático de problemas en la realidad, con el propósito bien sea de describirlos, interpretarlos, entender su naturaleza y factores constituyentes”, lo cual podemos relacionar al diagnóstico de los equipos de trituración de la planta de procesamiento de arena lavada en Canteras del Distrito Capital, descripción sistemática del proceso para la obtención de datos técnicos claves para el desarrollo de la investigación y toma de muestras para su posterior análisis. Por otra parte la investigación es correlaciona, según Tamayo (2003) este tipo de investigaciones “persigue fundamentalmente determinar el grado en el cual las variaciones en uno o varios factores son concomitantes en la variación de otro u otros factores”, lo que nos lleva a comparar el estatus actual de la capacidad de trituración de los equipos, así como su razón de reducción de los mismos con respecto a la descripción de los fabricantes en los catálogos, así como relacionar las características físicas y mineralógicas del yacimiento con los forros de los equipos. Este tipo de investigación “es indicado en situaciones complejas en que importa relacionar variables, pero en las cuales no es posible el control experimental”.

El diseño de la investigación es no experimental exploratorio, no experimental porque solo se describirán diversas variables y se analiza su incidencia en un momento dado; es decir no se modifican las variables encontradas a lo largo de la investigación, exploratorio porque es un estudio que permitirá descubrir las bases y recabar información que permita como resultado del estudio, la formulación de una nuevas hipótesis incluso tomando como zona de estudios otros yacimientos

con diferentes características, y creando de esta forma en nuevos investigadores el interés por el estudio de un nuevo tema o problema relacionado con el tema.

5.2 Objeto de Estudio

El objeto de estudio en esta investigación está representado por Canteras del Distrito Capital S.A quien permitió el desarrollo del trabajo técnico y la adquisición de datos en la Planta III de procesamiento de arena lavada, sobre la cual se busca desarrollar un plan de mejoras en los elementos de desgaste de los equipos de reducción de tamaño, mediante la caracterización mecánica y petrográfica del macizo rocoso.

5.3 Etapas metodológicas y procedimiento experimental

A continuación, se presentan las técnicas e instrumentos a emplear a lo largo del desarrollo de la investigación, así como el proceso experimental que se llevara a cabo para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos planteados.

5.3.1 Caracterización geomecánica y petrográfica del yacimiento

Técnicas e Instrumentos

Para realizar el análisis petrográfico se llevó a cabo la recolección de muestras de mano, que reunieran la mayor cantidad de elementos a identificar y además, contaran con las características necesarias para obtener la sección fina de las mismas y así posteriormente poder realizar el análisis petrográfico correspondiente a los distintos afloramientos del yacimiento utilizando para esto los siguientes instrumentos:

- Mapa de la zona de estudio
- Sistema Global de Posicionamiento (GPS)
- Libreta de campo
- Bolsas para la recolección de muestra
- Microscopios de luz polarizada convencional
- Planilla para petrografía de rocas Ígneas y Metamórficas utilizadas en el lab.330 del departamento de geología de la escuela de Geología, Minas y Geofísica UCV

Una vez tomadas las muestras de roca en el yacimiento se procedió a la preparación de las mismas, para luego realizar la caracterización petrográfica en el laboratorio de petrografía ubicado en las instalaciones del departamento de Geología de la Facultad de Ingeniería U.C.V. esto con la finalidad de obtener datos de la composición mineralógica del yacimiento.

Para la Caracterización mecánica del yacimiento se analizaron los datos de ensayos realizados por el Br. Daniel Seijas, elaborados en el laboratorio de mecánica de rocas “Miguel Castillejo” del Departamento de Minas. Dichos resultados fueron suministrados por el Br. Seijas a través de comunicación personal. Es importante considerar que las muestras a las que se les realizaron los ensayos, fueron tomadas de cantos rodados, es decir ya habían sido sometidas a las operaciones de extracción por voladura.

Los ensayos de desgaste Los Ángeles fueron suministrados por la empresa, de estudios realizados a cuatro muestras de piedra picada de este yacimiento en (2015), por el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la facultad de Ingeniería de la UCV.

Cuya descripción de muestras de agregados es la siguiente:

M1: Esquisto Cuarzo Micáceo

M2: Esquisto Cuarzo Calcáreo

M3: Anfibolita

M4: Esquisto Micáceo

5.3.2 Evaluación de las Condiciones actuales de los equipos de trituración en la planta III

Técnicas e Instrumentos

Se recolecto la información teórica de los equipos suministrada por los fabricantes a través de los manuales, se observó en campo el comportamiento de los equipos de trituración, se midió la apertura de alimentación y descarga, una vez descritos los equipos en su totalidad, se procedió a recolectar muestras en la entrada y salida de cada uno de ellos para finalmente realizar los análisis granulométricos.

Para el análisis granulométrico se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Libreta de campo
- Instrumentos de medición (cinta métrica) Marca Fermetel (3m x 5/8") CIN-03
- Cámara fotográfica Marca Samsung, Modelo ES15
- Bolsas para recolectar muestras
- Batería de tamices serie Tyler (Covenin 277:2000) 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", #4, #8, #16, #30, #50, #100 y #200.
- Balanza Scout Pro. Peso máximo 6000g
- Hojas de cálculos y elaboración de gráficos

La toma de muestra para los ensayos granulométricos se rigió por las siguientes normativas:

- Normas Covenin:

Covenin 254:1998 cedazos de ensayos.

Covenin 255:1998 Agregados. Determinación de la composición granulométrica.

Covenin 277:2000 Concreto. Agregados Requisitos.

- Normas para la toma de muestras

NTC 695, para la toma de muestras en las cintas.

La toma de muestra a utilizar para llevar a cabo los ensayos granulométricos se realizó de forma aleatoria en la salida de cada uno de los equipos de clasificación y reducción de tamaño, la cantidad de las mismas se definió según la normativa establecida por la norma ASTM D75M-14 como se observa en la tabla 08.

Las normas se pueden consultar en los anexos de este trabajo.

Tabla 08. Tamaño de la muestra para tamizado según tamaño del agregado.

Extraído de la norma ASTM D75M-14

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DE LOS AGREGADOS, MM (PUL)	PESO MÍNIMO APROXIMADO DE LAS MUESTRAS DE CAMPO (KG)
Agregado Grueso	
9,50 (3/8)	1
12,50 (1/2)	2
19,00 (3/4)	5
25,00 (1)	10
37,50 (1 ½)	15
50,00 (2)	20
63,00 (2 ½)	35
75,00 (3)	60
90,00 (3 ½)	100
100,00 (4)	150
125,00 (5)	300

Los ensayos de granulometría se desarrollara en el laboratorio de preparación y concentración del departamento de minas, empleando una batería de tamices serie Tyler para clasificación de agregados gruesos, los resultados obtenidos fueron presentados de forma analítica y gráfica, señalando sus respectivos rangos de tamaños y fracciones porcentuales de cantidad de material pasante y retenido en cada uno de los tamices, para posteriormente realizar la comparación de las curvas granulométricas obtenidas en el estudio y así realizar el análisis del comportamiento actual de los mismos.

5.3.3 Balance de masa de la planta de producción de arena lavada

El balance de materia o de energía, se realizará con el fin de definir los flujos en los puntos de entrada y salida en cada una de las etapas del proceso, con ello identificar los parámetros de alimentación y descargas en cada punto, y de esta forma establecer la carga circulante dentro del circuito.

Para llevar a cabo esta actividad se utilizaron los siguientes Instrumentos:

- Libreta de campo
- Instrumentos de medición (cinta métrica)
- Hojas de cálculos y elaboración de gráficos

Una vez realizada la caracterización con el muestreo y análisis granulométricos en los puntos de alimentación- descarga y definidos los parámetros del circuito de trituración a través de los ítems descritos anteriormente, se procedió a determinar el balance de masa siguiendo la metodología utilizada en el trabajo de Valencia (2013) la cual será descrita a continuación:

- a) Detallar el diagrama en el que se muestren los equipos de trituración, sus dimensiones y capacidades.
- b) Identificar la dirección de los flujos y la relación que existe entre ellos.
- c) Trazar un diagrama donde se indican los puntos del proceso donde se realizarán las mediciones.
- d) Tomar muestras para las operaciones de trituración.
- e) Determinar la granulometría del circuito de trituración (realizada en ítems 5.2.2).
- f) Estimación de la carga circulante de trituración

Finalmente, para determinar el balance de masa se calculó la cantidad de material que está alimentando a la planta de procesamiento y se comparó esta cantidad con la cantidad de material producido en una jornada de trabajo, tomando en cuenta que se estén desarrollando todos los procesos de trituración y clasificación de una forma adecuada para así obtener la eficiencia actual de la misma, según las condiciones de los equipos. Es importante considerar que durante el estudio, la planta estaba haciendo alimentada con material proveniente de voladuras anteriores y debido a condiciones operativas de la empresa este material era arrastrado desde los niveles más altos de la mina, disminuyendo así su tamaño debido a la actividad de transporte que sufrían, generando así, partículas de alimentación con un diámetro máximo de 7”.

5.3.4 Relación de las características geomecánicas y petrográficas del yacimiento con los equipos de clasificación y trituración de la planta

Partiendo de los parámetros que se han evaluado y las características obtenida en las distribuciones granulométricas de los equipos de trituración primaria y secundaria, balance de masa y estimación de carga circulante utilizando las diferentes geologías presentes en la cantera para este estudio se puede proceder a relacionar las características físicas del yacimiento con los equipos de clasificación y trituración.

Los parámetros y factores tomados en cuenta para relacionar las características del yacimiento que juegan un papel fundamental en el desgaste de piezas de acero en equipos de trituración se agruparon en tres grupos para su posterior análisis:

- Relacionados con el material a triturar: estudio petrográfico, desgaste de los ángeles, ensayos de abrasión, triturabilidad del material, resistencia a la compresión y contenido de sílice.
- Relacionados con el equipo de trituración y las condiciones de operación del mismo: modo de alimentación, abertura de alimentación, velocidad de trituración, tipo de forros, capacidad instalada y capacidad real.
- Relacionados con el tipo de material empleado en los forros de los equipos.

5.3.5 Proponer los parámetros más convenientes en los equipos de trituración y clasificación, para mejorar la eficiencia del circuito.

En esta etapa se establecerá en función a la caracterización del macizo obtenida en los ítems anteriores, los parámetros con los que deben cumplir los equipos de trituración y clasificación de dicha planta para mantener un flujo continuo de material, generando para esto una ficha técnica donde se le facilite a la empresa la descripción de las características mineras con las que deben cumplir los equipos de trituración y consumibles de los mismos al momento de la adquisición de los mismos para que el proceso se lleve a cabo de forma eficiente; por otra parte una vez realizado el balance de masa descrito anteriormente y establecidos los puntos críticos que generan la recirculación del material antes llegar a la fase final de

procesamiento (tornillo lavador de finos) se definirán las diversas propuestas técnicas con las que se pueda garantizar el aumento de la producción de material y a su vez tomar decisiones para establecer las modificaciones adecuadas en el circuito de trituración

5.4 Diagrama de la metodología a emplear

La metodología empleada para llevar a cabo el trabajo de investigación comprende cuatro (4) etapas que se describen a continuación.

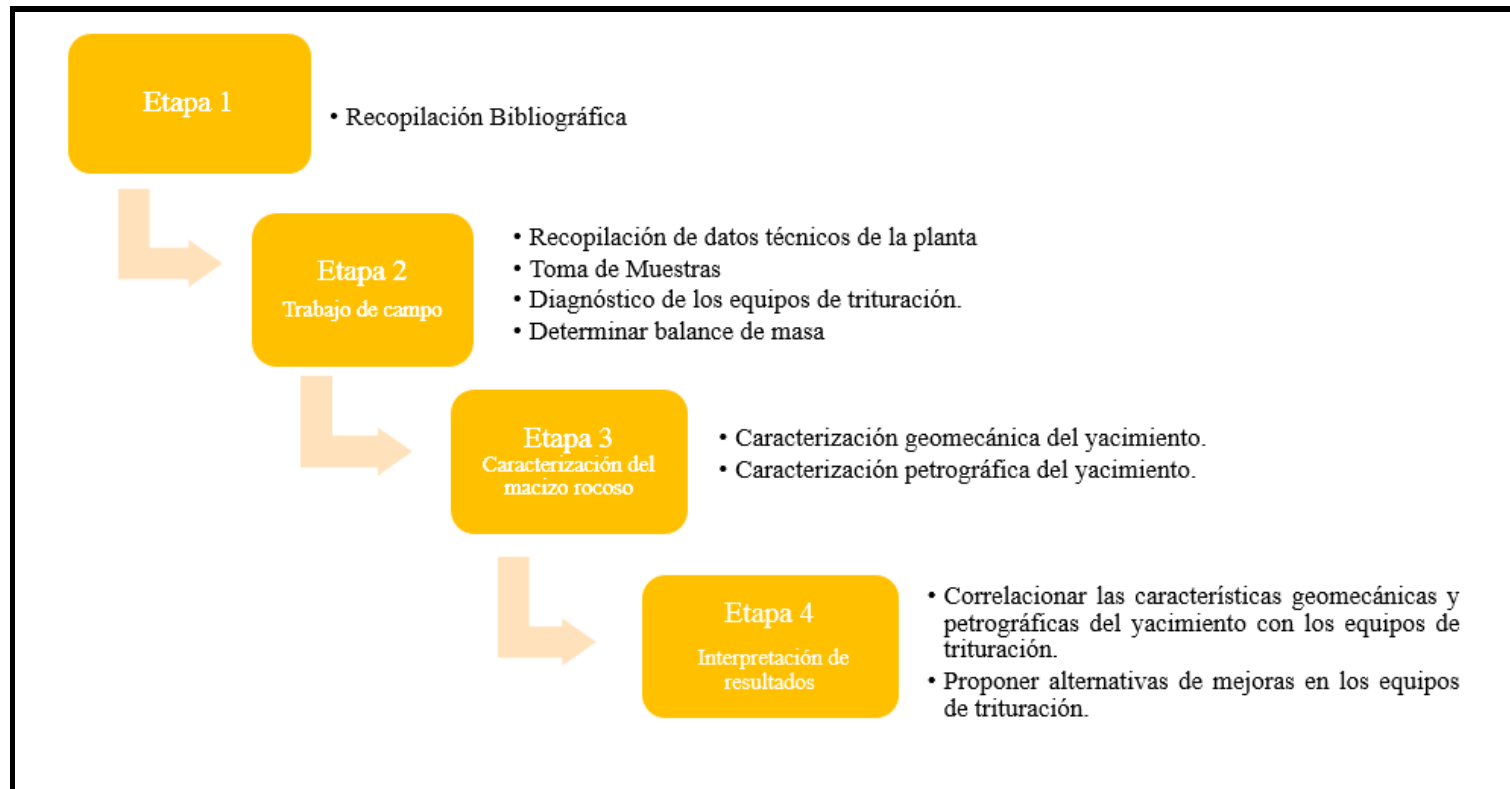


Figura 15. Diagrama de flujo para llevar a cabo la investigación

CAPÍTULO VI - PRESENTACION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se desglosan los resultados recopilados en levantamientos de campo que se llevó a cabo en la empresa Canteras del Distrito Capital, así como los resultados obtenidos luego de los diversos ensayos realizados en el desarrollo de la investigación y el análisis de los mismos

6.1 Características geomecánicas del yacimiento

Actualmente Canteras del Distrito Capital, desarrolla sus operaciones en un área total de 90 hectáreas aproximadamente, las cuales se encuentran divididas en 2 sectores denominados Mina 1 y Mina 2, siendo este último donde se están llevando a cabo las labores de afectación de recursos y en el cual según el Plan de Explotación (2016) se tiene previsto para este año ampliar dicha afectación, con la apertura de once bancos de trabajo en un periodo de siete (7) años. En la figura 16 se observa la secuencia de capas alternadas de esquistos y anfibolita, siendo esta la fuente principal de rocas para agregados que se extraen en esta mina.



Figura. 16. Secuencia litológica del área de afectación.

Entre las estructuras presentes en el macizo rocoso, destacan Castillo y Ledezma (2016) presencia de diaclasas y foliaciones, como estructuras físicas características de rocas metamórficas foliadas, como es el caso del esquisto, lo que permite definirlo como un macizo fracturado destacado por las diferentes litologías de la formación geológica. Según el Plan de Explotación (2016), se indica que la estructura esta fallada principalmente con fallas sinestrales y destrales de rumbo general E-W con ángulo de buzamiento alto hacia el Sur. Siendo las discontinuidades estructuras que según sus características suelen condicionar el comportamiento del macizo rocoso, en la tabla 09 se describen las principales características de las diaclasas y foliaciones presentes en esta zona, según lo descrito por Castillo y Ledezma (2016)

Tabla 09. Características de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso.

Fuente: Castillo y Ledezma (2016)

PUNTO	COORDENADAS	DIRECCIONES	DESCRIPCIÓN	SECCIÓN
1	717672N 1156958E	N53E36SE	Foliación	1
2	717667N 1156956E	N64E76NW	Diaclasa 1	1
3	717667N 1156956E	N82E64SE	Diaclasa 2	1
1	717703N 1156957E	N17E48SE	Foliación	2
2	717703N 1156960E	N46E55SE	Diaclasa 1	2
3	717703N 1156960E	N42W47SW	Diaclasa 2	2
1	717748N 1156990E	N61E49SE	Foliación 1	3
2	717748N 1156990E	N11E455SE	Foliación 2	3
3	717753N 1156991E	N66E48SE	Diaclasa 1	3
4	717753N 1156991E	N73W60SW	Diaclasa 2	3
1	717823N 1156985E	N61E47SE	Foliación	4
2	717820N 1156983E	N57E47SE	Diaclasa 1	4
3	717820N 1156983E	N74W45SW	Diaclasa 2	4



Figura 17. Representación de las secciones en la zona de estudio. Fuente Castillo y Ledezma (2016)

La variedad discontinuidades que conforman sistemas paralelos en diferentes direcciones, actualmente según lo observado en campo, las generadas recientemente se encuentran abiertas, generando grietas, formando en algunos casos cavernas producto del agua que percola de la superficie, mientras que las más antiguas están generalmente rellenas de material cristalizado.

6.1.1 Resistencia a la compresión simple

De anteriores ensayos realizados a cuatro (4) muestras de este yacimiento en el laboratorio de mecánica de roca, se muestran a continuación en la tabla 10 los resultados de interés para el desarrollo de este trabajo especial de grado.

Tabla 10. Resultados de ensayos de Resistencia a la compresión simple. Fuente: Lab. Mecánica de Rocas, Miguel Castillejo

Muestra	Esfuerzo Axial (Mpa)	Deformación Volumétrica (%)	Deformación Axial (%)	Módulo de elasticidad tangente al 50% (Mpa)
2117-TRX	142,1	0,47	1,39	108,78
2116-TRX	63,9	0,30	0,90	93,61
2147-TRX	55,2	0,29	0,87	66,7
2148-TRX	4,00	0,63	1,83	19,8

Con los resultados obtenidos en estos ensayos, podemos describir un tipo de roca con sus extremos de Resistencia a la Compresión Simple entre 4 Mpa y 142,1 Mpa, de acuerdo con la tabla 04 donde se muestra la clasificación de las rocas a partir de sus valores de resistencia a la compresión Simple y tomando como referencia la teoría presentada por *La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas* (ISRM) (1981), dichos valores son característicos de un tipo de roca que varía de **Dura a Muy blanda**.

Conocer las características físicas de las rocas presentes en este afloramiento, es importante ya que permite establecer las variaciones que estas pueden presentar en cuanto a su resistencia; Vallejos (2002) asegura que el comportamiento mecánico del macizo rocoso, su modelo de deformación y sus mecanismos de rotura están condicionados por el número de familias de discontinuidades, además la fracturación del macizo rocoso está definida por el número, espaciado y condiciones de las discontinuidades, cualquiera que sea su origen y clase.

Dado que la investigación se centra en el diseño y mejora de un circuito de trituración, con el fin de establecer los parámetros para el funcionamiento de los equipos de clasificación y trituración de la planta III, los resultados mostrados en la tabla 10, son esenciales tomarlos como referencia al momento de la escogencia

de los equipos de reducción de tamaño, ya que estos representan las fuerzas actuantes durante el proceso de interacción del material a triturar y el equipo, Nobregas (2016) afirma que “El módulo de elasticidad tangencial, es un parámetro utilizado para la adquisición y diseño de los elementos de desgaste en los equipos de reducción de tamaño y su optimización”.

En su Trabajo Especial de Grado Pimentel (2016) sugiere tomar como referencia el valor de RCS más alto, de esta forma los equipos estarán adecuados para fragmentar tanto la roca definida como roca dura y al mismo tiempo a la roca muy blanda, de no ser así, los mismos corren el riesgo de estar en desventaja frente a la variación litológica del yacimiento.

6.1.2 Ensayo de Tracción Indirecta

A continuación se muestran en la tabla 11 los resultados de interés para el desarrollo de este trabajo especial de grado.

Tabla 11. Resultados de ensayos de Tracción Indirecta. Fuente: Lab. Mecánica de Rocas, Miguel Castillejo

Muestra	Carga Axial Pico (KN)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Resistencia a la compresión
2119-3	17,77	6,60	19,80
2113-1	9,84	3,30	9.90
2119-1	19,42	7,42	22,25
2119-2	20,01	7,05	21,15

Los ensayos de tracción indirecta (brasileño) arrojaron los parámetros que podemos apreciar en la tabla 11, donde el promedio de carga axial que admiten las rocas tomadas para los ensayos de este yacimiento, va desde 9,84 KN hasta 20,01 KN. La resistencia a la tracción es en promedio de aproximadamente 6,09 Mpa y la clasificación de roca según *La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas* (ISRM, 1981) de “R3” o de “dureza baja”.

Los cambios muy notables en los valores obtenidos en los ensayos mecánicos realizados a diferentes muestras de este yacimiento, se deben principalmente a las características propias mineralógicas del material, así como también al método de utilizado por Seijas al momento de llevar a cabo la toma de estas muestras.

6.1.4 Ensayo de Resistencia al desgaste Los Ángeles

De acuerdo a los resultados de ensayos de desgaste los ángeles realizados a cuatro muestras de agregados de este yacimiento en (2015) por el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la facultad de Ingeniería de la UCV se muestran los resultados obtenidos en la tabla 12.

Tabla 12. Resultados de ensayos de los Ángeles. Fuente: Canteras Del Distrito Capital S.A

Muestra	Grado	N° Esferas	Peso Inicial (Kg)	Peso Final (Kg)	Desgaste (%)
M1	A	12	5000	3800	24
M2	A	12	5000	3650	27
M3	A	12	5000	3900	22
M4	A	12	5000	3500	30

Se puede observar que el porcentaje de desgaste de cada una de las muestras analizadas se encuentra entre 30% y 22%, siendo así, del material presente en los diversos frentes de este yacimiento, la roca anfibolita se puede considerar como la más resistente al desgaste, por otra parte, el esquisto micáceo es la que mayor desgaste sufrió durante el ensayo, coincidiendo entonces los resultados de RCS, el cual la define como una roca **Muy Blanda**.

6.2 Estudio petrográfico y composición mineralógica del macizo rocoso

Generalmente la geología que se observa en los diversos frentes de explotación de la cantera consiste en cuerpos alternados de mármol, anfibolita y esquistos con diferente composición mineralógica, como se muestra en la figura 18.

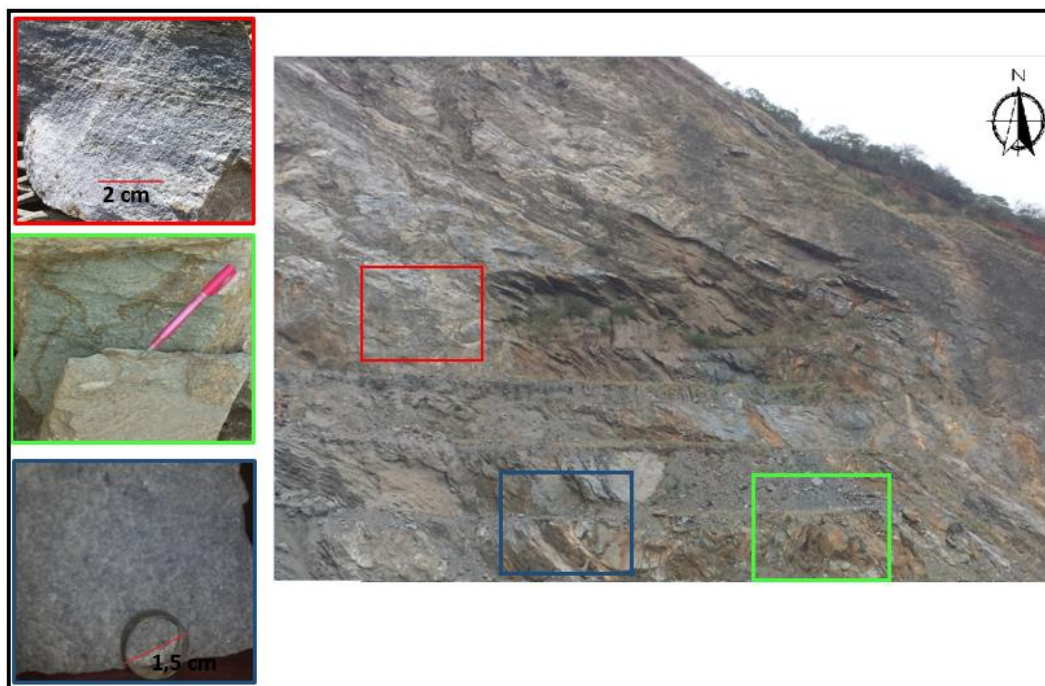


Figura 18. Tipos de rocas presentes en el yacimiento.

A continuación, se muestran los resultados del estudio petrográfico y descripción de las muestras extraídas para este estudio.

– Muestra M1-17

Roca no foliada, de aspecto masivo, color verde claro, de grano medio. Con respecto a las texturas de rocas metamórficas, esta posee textura granoblástica. El contenido mineral observado a través del microscopio es el siguiente: hornblenda (grupo de los anfíboles), de color verde en nicols paralelos, fracturadas y alteradas producto del metamorfismo, con clivaje en dos direcciones, figura de interferencia biaxial y relieve $> 1,54$; plagioclasas, posiblemente oligoclasa, andesina o albita según su contenido de calcio y sodio, incolora en nicols paralelos, no tiene clivaje y su relieve es bajo; micas, algunas cloritizadas debido a cambios químicos, incoloras, clivaje en una dirección, relieve $> 1,54$ y con figura de interferencia biaxial y cuarzo con figura de interferencia uniaxial,

incolores en nicols paralelos, relieve $> 1,54$ sin presencia de maclado; también se pudo observar en menor proporción minerales accesorios, feldespato, biotita y apatito. Los porcentajes de los minerales descritos anteriormente son aproximadamente los siguientes: hornblenda (40%), micas (25%) plagioclasas (20%), cuarzo (5%) y minerales accesorios (5%). Por sus propiedades físicas y debido al contenido mineral la roca se puede clasificar como Anfibolita.

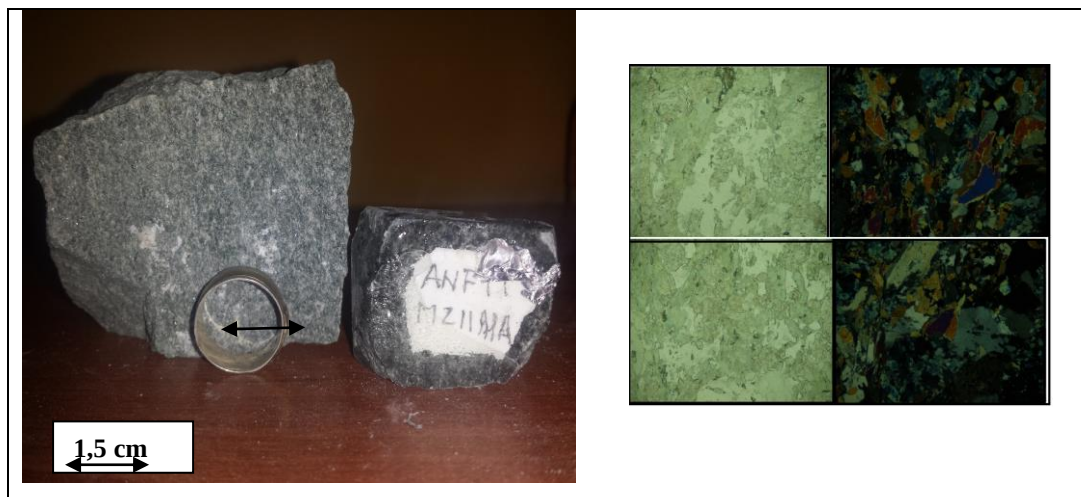


Figura 19. Roca Anfibolita, muestra M1-17.

– Muestra M2-17

Roca no foliada, de aspecto masivo granular, color blanco alternado con gris muy claro posiblemente debido a la alteración de la caliza, reacciona en presencia de ácido clorhídrico esta roca posee textura de roca metamórfica granoblástica. Su contenido mineralógico observado a través del microscopio es el siguiente: calcita con colores variantes entre carne y rosado, maclado tipo albita, clivaje en tres direcciones, relieve moderado y figura de interferencia uniaxial; cuarzo incoloro, relieve menor al del bálsamo sin presencia de maclado; plagioclasas incoloras en nicols paralelos, sin presencia de clivaje y con relieve bajo. La composición porcentual de estos minerales en la roca es de 50% calcita, cuarzo (35%), plagioclasas (10%) y 5% de minerales accesorios, entre ellos feldespatos. Descritas las propiedades físicas de la roca y su contenido mineral Baamonde (2006) la clasifica por su ensamblaje mineral como un Mármol y coincide con Ostos (1981), quien describe en su unidad la presencia de Mármol cuarcífero.

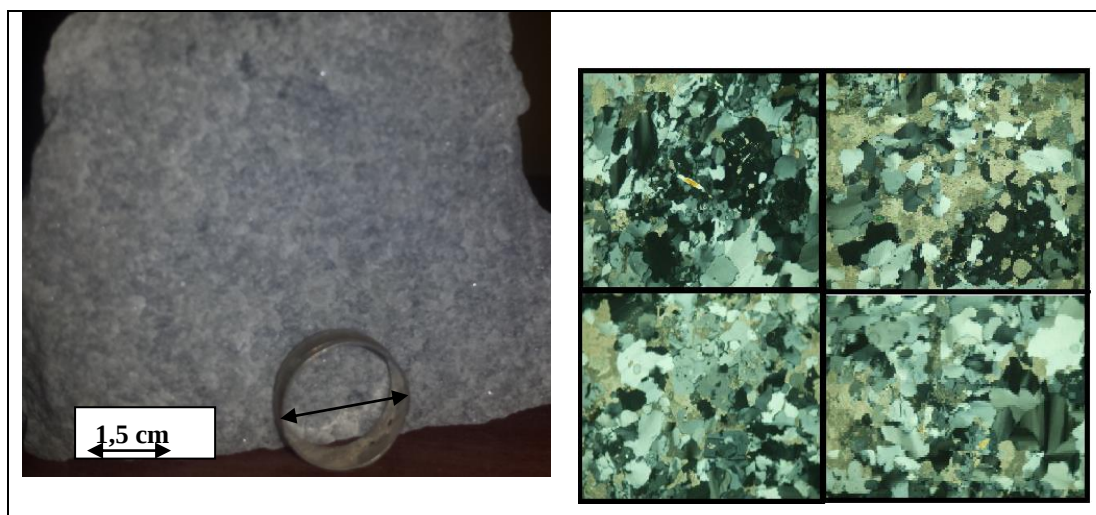


Figura 20. Roca Mármol cuarcífero, muestra M2-17.

– **Muestra M3-17**

Roca foliada, gris oscuro, de aspecto masivo de grano medio, foliación de tipo esquisto y con textura de roca metamórfica lepidoblástica, reacciona en presencia de ácido clorhídrico. Los minerales presentes en esta muestra según sus características microscópicas son los siguientes: micas (muscovita) en abundancia, incoloras, con clivaje en una sola dirección, relieve $< 1,54$ y figura de interferencia biaxial; calcita de color carne a rosado, clivaje en 3 direcciones, maclado de tipo albita y relieve moderado; cuarzo con figura de interferencia uniaxial, incoloro en nicoles paralelos, relieve $> 1,54$ sin presencia de maclado; grafito de color negro, mineral característico de rocas metamórficas, en muestra de mano marca el papel; esta roca en muestra de mano se observan cristales de pirita. El contenido porcentual de los minerales descritos anteriormente son los siguientes: micas (50%), calcita (10%), cuarzo (15%), grafito (20%) y otro 5% de minerales accesorios. Debido a la composición mineralógica, el tipo de roca es Esquisto muscovítico grafitoso.

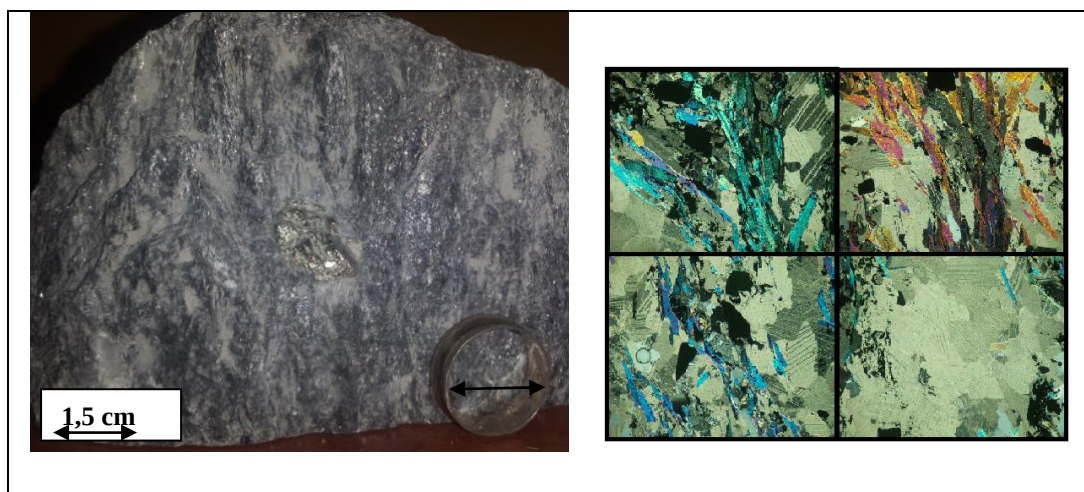


Figura 21. Esquisto muscovítico grafitoso, muestra M3-17.

– **Muestra M4-17**

Roca ligeramente foliada, de color gris oscuro, aspecto masivo de grano medio y foliación de tipo esquisto y con textura de roca metamórfica lepidoblástica, en muestra de mano la roca reacciona al ácido clorhídrico. Los minerales identificados en el microscopio son los siguientes: micas (muscovita) en abundancia, incoloras, con clivaje en una sola dirección, relieve < 1,54 y figura de interferencia biaxial; calcita de color carne a rosado, clivaje en 3 direcciones, maclado de tipo albita y relieve moderado; cuarzo con figura de interferencia uniaxial, incoloro en nicoles paralelos, relieve > 1,54 sin presencia de maclado; en esta muestra también se pudo observar la presencia de plagioclasas incoloras en nicoles paralelos, sin presencia de clivaje y con relieve bajo. El contenido porcentual de los minerales descritos anteriormente es el siguiente: calcita (40%), cuarzo (20%), micas (20%), plagioclasas (15%) y minerales accesorios que en muestra de mano también se pueden observar como pequeños cristales de pirita (5%), siendo este los porcentajes de cada mineral el tipo de roca se trata de un Esquisto calcáreo muscovítico, coincidiendo con lo descrito por Urbani y Ostos (1989) en lo que ellos denominan fase Antimano.

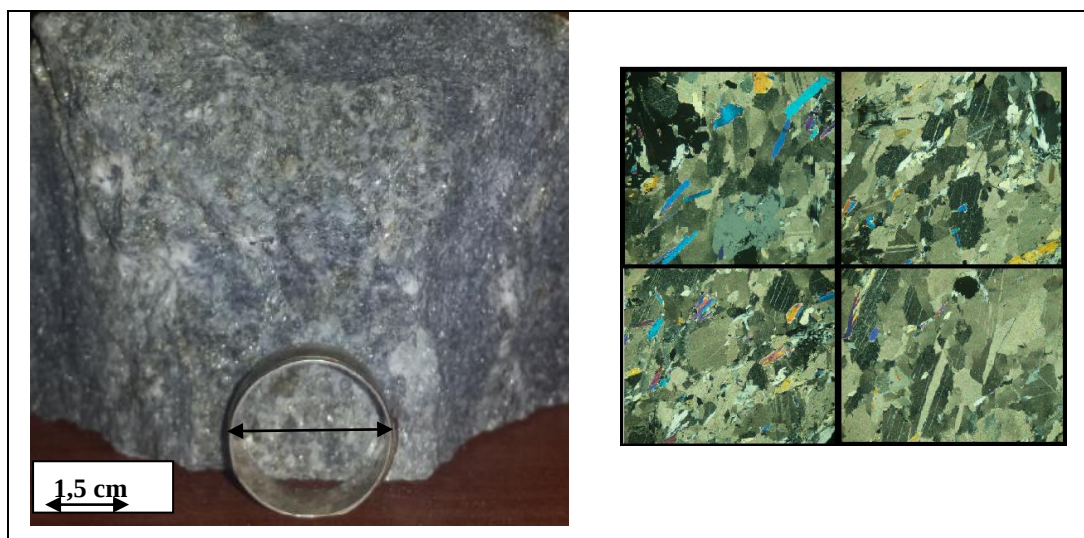


Figura 22. Esquisto calcáreo muscovítico, muestra M4-17.

Una vez descritas las muestras extraídas de los frentes de explotación, se puede certificar la presencia de minerales como horblenda, micas (muscovita), calcita, cuarzo, plagioclasas y grafito, los cuales se repiten en porcentajes variantes en cada una de las rocas, en su mayoría estos minerales pertenecen a los diferentes grupos de los silicatos, cuya composición básicamente es de Silicio y Oxígeno. Por su parte, la horblenda pertenece al grupo de los anfíboles, estos su vez forman parte del grupo de los inosilicatos, cuya dureza en la escala de Mohs esta entre 5 y 6; el cuarzo es químicamente muy inerte y resistente a la meteorización, su dureza es la más alta en la escala de Mohs (7) y pertenece al grupo de los tectosilicatos; la calcita es uno de los minerales presente en las rocas descritas anteriormente que no pertenece a los silicatos, este forma parte del grupo de los carbonatos, con dureza en la escala de Mohs de 3 y cuya densidad esta entre 2,6 y 2,8 g/cm³. Siendo la finalidad de esta caracterización mineralógica el establecimiento de los parámetros correctos para el circuito de trituración de arena lavada, deben analizarse cuidadosamente la cantidad de estos silicatos en el yacimiento, ya que el contenido de sílice libre, la presencia de minerales abrasivos, el tamaño y la textura de estos minerales, son los factores más determinantes en el desgaste de los forros de los equipos. Haciendo referencia a la tabla 01 donde se establece la resistencia a la fragmentación de algunos minerales con respecto a su dureza en la escala de Mohs, la horblenda tiene una resistencia a la fragmentación de 0,311 kg/cm² mientras que el cuarzo tiene resistencia de 1000 kg/cm² siendo estos

factores importantes de considerar, debido a que propiedad define la acción mecánica que debe ejercer el equipo de trituración para lograr disminuir de tamaño la roca; además en la tabla 13 cuyo autor clasifica cualitativamente a la Anfibolita como una roca altamente abrasiva, el esquisto como abrasiva, mientras que las rocas con alto contenido de calcita (carbonaticos), la clasifican como una roca muy poco abrasiva.

Tabla 13. Clasificación cualitativa de rocas según su abrasividad. Fuente: Ensayos geotécnicos de suelos y rocas Universidades de Alicante y de La Laguna. Tomás, R., Santa marta, J.C., Cano, M. Hernández-Gutiérrez, L.E., García-Barba, J. (2013).

<i>Tipo de roca</i>	<i>Clasificación</i>
Gneis, pegmatita, granito	Extremadamente abrasiva
Anfibolita, granito	Altamente abrasiva
Granito, gneis, esquistos, piroxenos, arenisca	Abrasiva
Granito, gneis, dolerita	Moderadamente abrasiva
Arenisca	Poco abrasiva
Caliza	Muy poco abrasiva

6.3 Relación de las características geomecánicas y petrográficas del yacimiento con los equipos de clasificación y trituración de la planta III

Un estudio realizado por Erinova (2012), demostró que para el diseño de una planta de trituración es necesario tomar en consideración todos los factores intrínsecos y extrínsecos relacionados con la formación del yacimiento, ya que de ello dependerá las etapas de trituración a la cual deberá ser sometida la roca para poder obtener la granulometría y formas deseadas en el agregado. Por esta razón se llevó a cabo un estudio somero de las características del yacimiento, a través de ensayos mecánicos y análisis petrográficos de las diferentes litologías presentes en la cantera.

De los ensayos mecánicos realizados se obtuvieron valores de RCS que caracterizan a este tipo de roca como **“Roca dura”**, existiendo también una diferencia en otras muestras, que al igual que en los ensayos de tracción, clasifican

a otras como rocas con “**dureza baja**”. Estudios realizados por Gutiérrez (2015), demuestran que mientras mayor es el valor de RCS menor es el porcentaje de desgaste del material; relacionándolo con los resultados obtenidos, las muestras con RCS de 55,2 y 4,00 Mpa son las que poseen mayor porcentaje de desgaste, estableciendo así una hipótesis en conjunto con los resultados obtenidos del ensayo de desgaste Los Ángeles a los 4 tipos de rocas presentes en la cantera, de cómo podrá ser el comportamiento del material ante cualquier acción mecánica de desgaste, bien sea la que ejercen los elementos de desgaste de los equipos de trituración o las mallas de clasificación de las cribas.

Según el estudio petrográfico realizado existe una variedad litológica en el yacimiento de rocas metamórficas, siendo las más comunes la anfibolita, mármol y esquistos con variaciones en su composición mineralógica; Erinova (2012) afirma que una sustancia es abrasiva cuando su contenido de sílice libre o de pirita es $\geq 6 - 8\%$, según el estudio realizado la presencia de sílice en las diferentes rocas es considerable, por tanto se considera que el material presente en el yacimiento es abrasivo. Por otra parte varios autores (Kranz, 1979, Gramberg, 1989; Vasarhelyi y Bobet, 2000; Germanovich et al., 1996) sugieren, en el desarrollo de su investigación que el cuarzo, con una dureza Mohs de 7 aumenta la degradación de la roca, probablemente por trituración de minerales más débiles durante el ensayo de abrasión Los Ángeles. Mientras que, la presencia de plagioclasas disminuye la cantidad de desgaste en la prueba de abrasión LA, probablemente creando un efecto amortiguador que reduce los esfuerzos de impacto y el desgaste. De esta forma, la presencia de estos minerales en el macizo rocoso de Canteras Del Distrito Capital favorecen a la conservación de consumibles y mantos de los equipos de trituración, sabiendo entonces que las maquinarias que mejor comportamiento tienen frente a las propiedades descritas anteriormente, según Erinova (2012) son las trituradoras de mandíbula y giratorias.

El uso extensivo de agregados para la fabricación de mezclas asfálticas, concreto premezclado y la construcción de obras civiles, se requiere adecuar el diseño y

configuración de las plantas de procesamiento, en el caso de la planta III de Canteras del Distrito Capital el producto final es arena lavada, para obtener esta gradación los equipos deben estar configurados para la obtención de partículas con diámetro menor a 3/8” (finos), en la Figura 23 se bosquejan las trituradoras utilizadas para la obtención de finos partiendo de la alimentación de rocas duras, en la misma también se indica las relaciones de reducción típicas (la relación entre el 50% de la alimentación y para el 50% de la producto) y el porcentaje promedio de finos generados.

Tipo de Trituradoras	Trituradoras Primarias		Trituradoras Secundarias y Terciarias
	Mandíbula	Giratorias	Cono
Principal objetivo	Reducción de tamaño		Reducción de tamaño, cubicidad y ruptura de partículas
Línea de producción	Circuito abierto		Secundaria: circuito abierto. Terciaria: circuito cerrado
Razón de Reducción	2:1 a 10:1 3:1 a 7:1	3:1 a 10:1	2:1 a 8:1 2:1 a 6:1
Finos <0,075mm (porcentaje de alimentación)	3,5%	4,7%	Secundaria: 1,1% Terciaria: 1,6-1,9%

Figura 23. Trituradoras y características de producción. Fuente: M.S. Guimaraes et al. / Int. J. Miner. Process. 81 (2007) 237–247

Haciendo referencia a los datos observados en la figura 23, podemos considerar que al igual que lo afirmado por Erinova, los equipos que mejor se adaptan a la trituración de rocas duras para la obtención de productos finos, son las trituradoras de mandíbulas y las giratorias cuya relación de reducción van de 3:1 hasta 10:1. Es importante considerar que el flujo de material de los equipos de trituración frente a este tipo de características, dependerá de la conservación de los forros de los mismos, por lo general las capacidades de estos equipos descrito por los fabricantes en los manuales, se refieren a trituradoras con revestimientos nuevos.

6.4 Condiciones actuales de los equipos de trituración

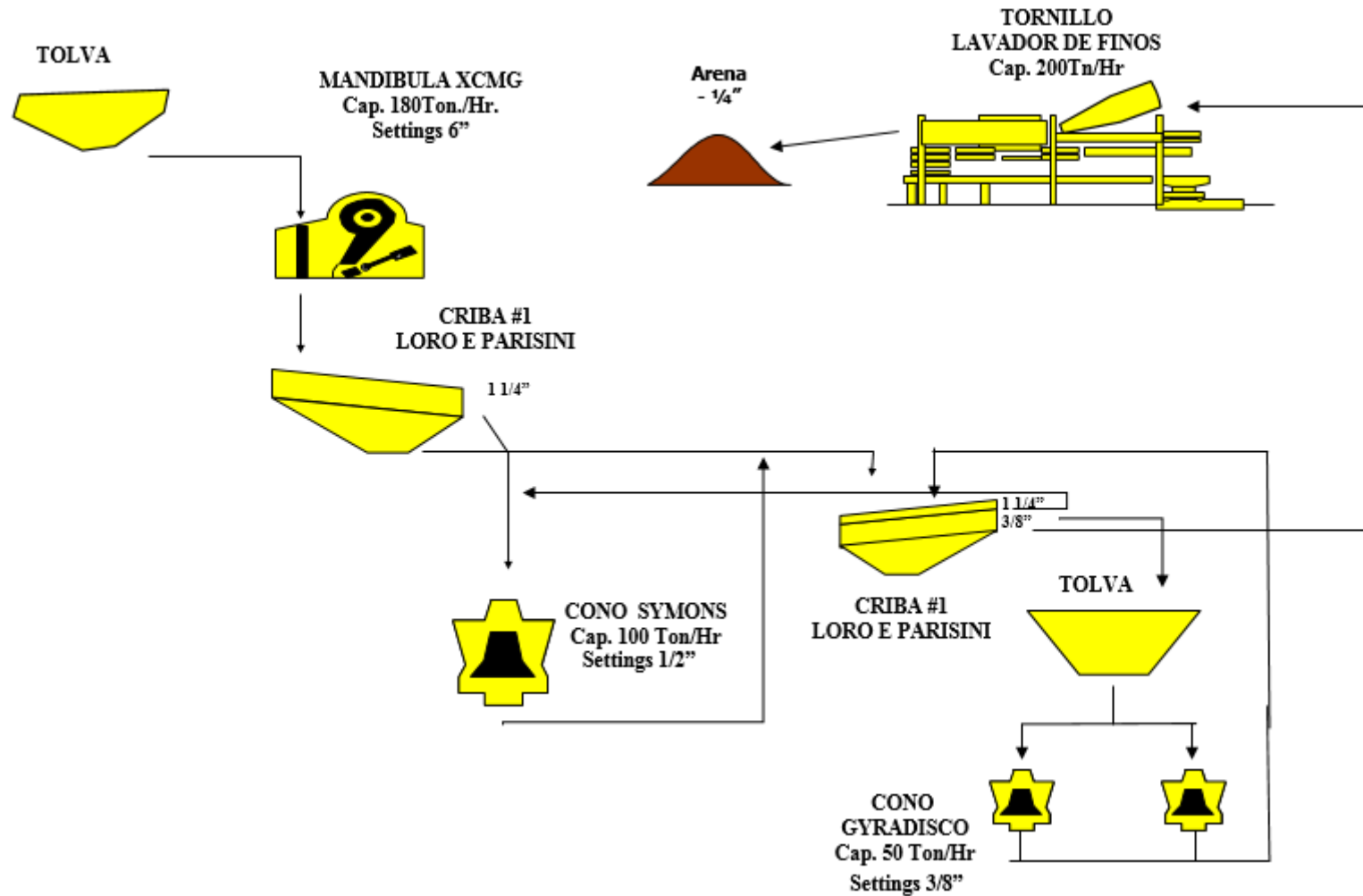


Figura 24. Configuración del circuito para la obtención de arena lavada

Tabla 14. Especificaciones técnicas de los equipos de trituración.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS			
	Trituradora Mandíbula	Trituradora de cono	Triturador de impacto de la serie Giradiscos
Marca	XCMG	<i>Symons</i>	<i>Gyradisc</i>
Modelo	PE 800X1060	3Ft serial 41742	GD75
Razón de reducción	1:4	1:3	1:3
Tipo de forro	Ondulado		
Capacidad Instalada	136 – 230 (t/h)	100- 120 (t/h)	40 - 50 (t/h)
Capacidad Utilizada	180 (t/h)	100 (t/h)	50 (t/h)
Diámetro de alimentación (m)	0,65*100	0,03	0,03
Diámetro de salida (m)	0,16*100	0,01	0,009

Tabla 15. Especificaciones técnicas de la criba #01.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		
	CRIBA #01	CRIBA #02
Marca	<i>Loro e Parisini</i>	<i>Loro e Parisini</i>
Modelo	516	516
Capacidad Instalada	144 - 720 (t/h)	144 - 720 (t/h)
Apertura de la malla	1 ¼"	1 ¼"
		3/8"

Tabla 16. Especificaciones técnicas del tornillo lavador de finos.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Marca	Kolberg
Modelo	5036-25T
Capacidad de Arrastre	200 (t/h)
Diámetro del Espiral	914 mm
Capacidad de derrame	4540 (lts/min)

En las tablas mostradas anteriormente, se describen los componentes y características de los equipos que intervienen en el proceso de trituración y clasificación para la obtención de arena lavada, siguiendo el sentido de flujo del circuito cerrado que se muestra en la figura 23.

6.4.2 Diagrama de procesamiento indicando los puntos de toma de muestras

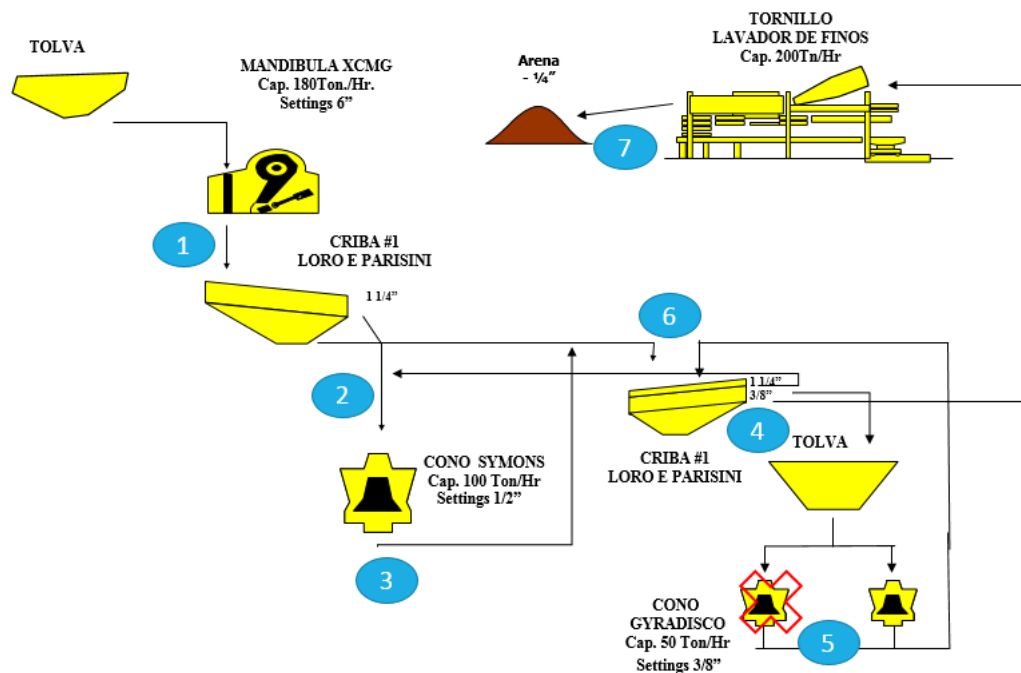


Figura 25. Diagrama de trituración, mostrando los puntos de toma de muestra.

Para la caracterización se hizo un muestreo de forma manual en los puntos de alimentación y descarga de los equipos mostrados en la figura 24, esta toma de muestra se realizó en un periodo de 20 días, tomando dos cortes en periodos de 1

hora en las cascadas de las bandas. Se homogenizó la muestra en cada punto y se dividió por el método de cono cuarteo, hasta obtener muestras representativas por punto. Para cada una de las muestras se llevó a cabo un análisis granulométrico, con la finalidad de obtener la fracción de cada tamaño, y si la granulometría corresponde a lo establecido en cada uno de los equipos, además de estudiar el comportamiento de estos a través de la comparación de sus curvas granulométricas.

El circuito de trituración comienza con una trituradora de mandíbulas (ver figura 26) con características de entrada de hasta 27" reduciendo el material a 6" aproximadamente como se especifica en la tabla 14. La alimentación de este equipo, es el material proveniente de las operaciones de voladura, el cual es almacenado en una tolva de alimentación con una capacidad de 104 tn, y llevado a la trituradora a través de un alimentador vibratorio tipo Simplicity de dimensión 4 x 1,4 m.



Figura 26. Trituradora de Mandíbulas

El producto de esta trituradora es clasificado por una criba vibratoria de un solo paño, cuyo retenido es el que alimenta al triturador secundario; la trituración secundaria consta de un triturador de cono que se muestra en la figura 28, cuyo diámetro de salida es de 1/2", este en conjunto con una criba vibratoria de dos mallas forman el primer circuito cerrado dentro del diagrama, ya que el material retenido en la primera malla es retornado nuevamente al cono, a través de una cinta transportadora, hasta obtener la granulometría correspondiente.



Figura 27. Criba Vibratoria de 2 mallas (1 1/4" y 3/8")



Figura 28. Triturador de cono

Así mismo, el producto retenido en la segunda malla ($> 3/8''$) es llevado por cinta transportadora a una tolva de distribución con una capacidad de 180 tn, y posteriormente a dos trituradores terciarios, en este caso trituradores de impacto; el material menor a este diámetro ($3/8''$) es el que alimenta al clasificador de finos o tornillo sin fin, el cual elimina a través de un sistema de lavado, la mayor cantidad de partículas menores a la malla #200, para así poder obtener un producto final de mejor calidad.



Figura 29. Triturador terciario



Figura 30. Tornillo lavador de finos.

6.4.3 Dimensión del material de alimentación

Las dimensiones de las rocas que alimentan esta planta de procesamiento, es una de las variables más importantes en las labores de los equipos de reducción de tamaño, ya que estas, deben tener un tamaño adaptado a las dimensiones de alimentación del triturador primario, establecido para esta planta como menor o igual a 27" (0,65m); los fragmentos de rocas producto de la voladura (ver figura 27), son acarreados por un camión CAT 769C con capacidad de 23,5 m³ hasta la tolva de alimentación de la planta de procesamiento.

Para lograr dicha granulometría la empresa utiliza para las labores de voladuras las variables presentadas en la tabla 17.

Tabla 17. Variables utilizadas para las labores de perforación y voladura. Fuente: Canteras del Distrito Capital (2016)

Altura de Banco	12 m
Sobre perforación	0,5 m
Longitud de Perforación	12,5 m
Diámetro de Barreno	4"
Retiro	3,5 m
Espaciamiento	4 m
Taco	3 m
Factor de Carga	0,39 Kg/m ³



Figura 31. Distribución de tamaños de rocas provenientes de las voladuras.

Al ser analizados los tamaños de bloque que se disponen para la alimentación de la planta a través de un software libre de definiciones de dimensiones digitales, se obtiene la siguiente distribución granulométrica:

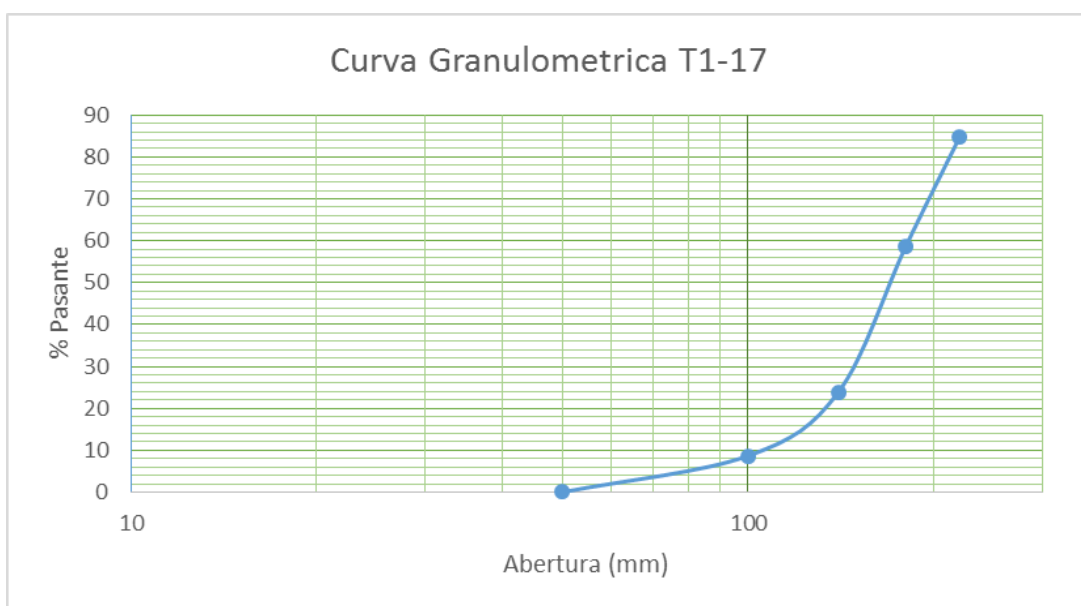


Figura 32. Distribución granulométrica del material producto de las voladuras

6.4.4 Distribución granulométrica del producto de los equipos de trituración

– Trituración Primaria

Debido a las dimensiones tan grandes de salida de este triturador primario (diámetro $< 6''$), se realizó la distribución granulométrica utilizando nuevamente el software libre de definiciones de dimensiones digitales.



Figura 33. Productos de la trituración Primaria

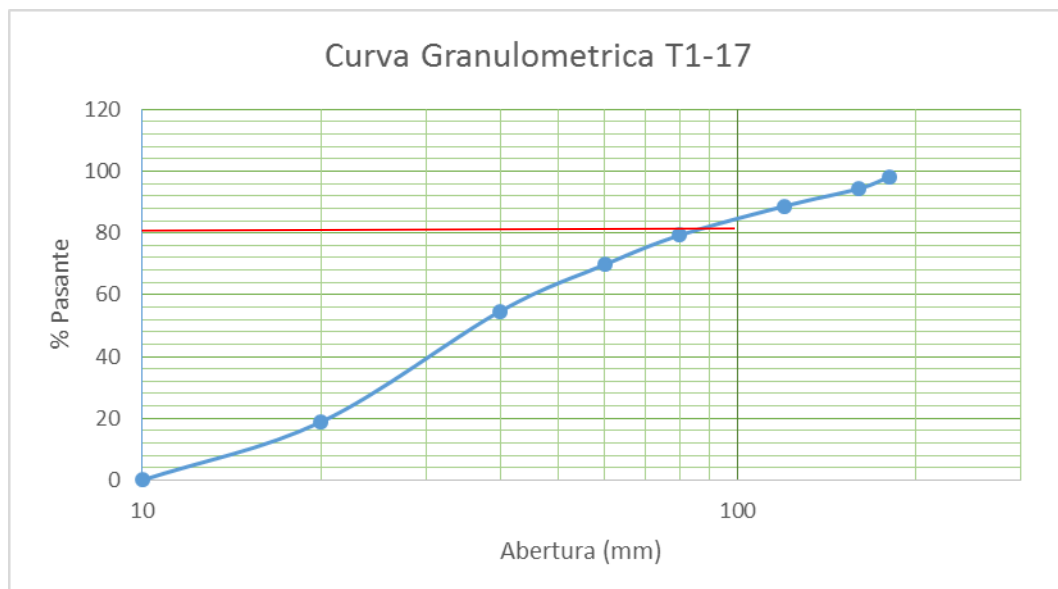


Figura 34. Distribución granulométrica de la trituración primaria

En la figura 34 se puede observar que el D₈₀ en el porcentaje pasante corresponde a las partículas de aproximadamente 82,5 mm; existe una cantidad importante de material correspondiente al menos un 63% que alimentara al triturador secundario, mientras que el resto pasara directamente a la criba #02.

– Trituración secundaria

Consta de un triturador de cono Symons y su alimentación es el material proveniente de las dos cribas vibratorias cuyos paños retienen los bloques con tamaño mayores a 1 ¼”.

Tabla 18. Datos de distribución granulométrica de la trituración secundaria.

MUESTRA: T2-17					
Malla		peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
N°	(mm)				
1"	25,40	309,8	15,49	15,49	84,51
3/4"	19,05	298,7	14,94	30,43	69,58
1/2"	12,70	494,2	24,71	55,14	44,87
3/8"	9,53	203,1	10,16	65,29	34,71
1/4"	6,35	179,3	8,97	74,26	25,75
# 4	4,75	131,7	6,59	80,84	19,16
# 8	2,36	140,8	7,04	87,88	12,12
# 16	1,18	85,8	4,29	92,17	7,83
# 30	0,60	47,1	2,36	94,53	5,48
# 50	0,30	58,7	2,94	97,46	2,54
# 100	0,15	15,2	0,76	98,22	1,78
# 200	0,075	10,4	0,52	98,74	1,26
Fondo		25,2	1,26	100,00	0,00

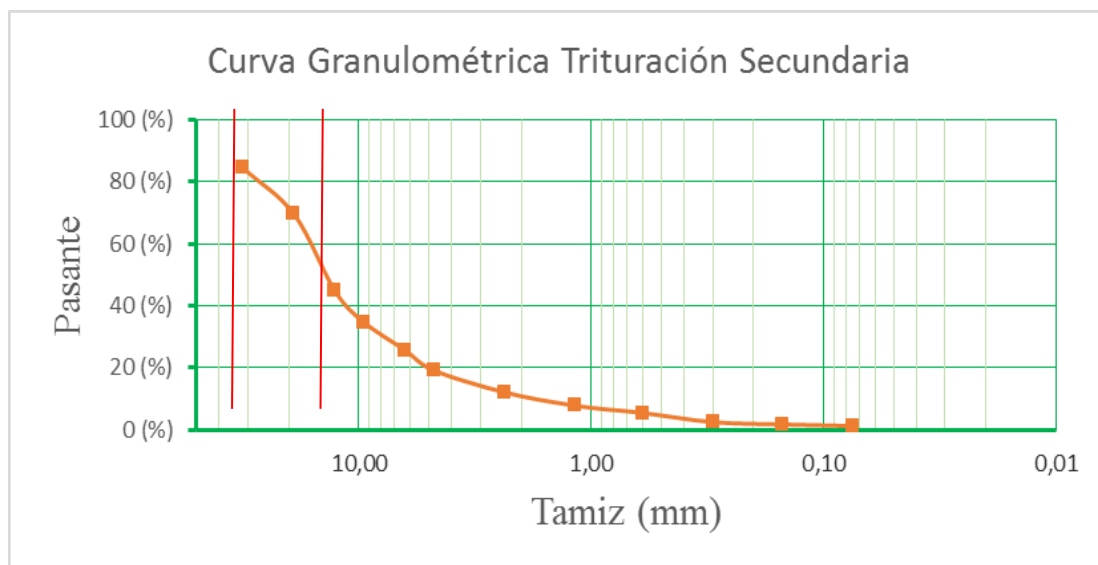


Figura 35. Distribución granulométrica de la trituración secundaria.

Si observamos los valores de la tabla 18, la generación de partículas $> \frac{1}{2}$ " (diámetro de salida a la cual se encuentra graduado este equipo) representa un 55,14%, es decir, más de la mitad del producto del triturador secundario no alcanza el diámetro establecido dentro de los parámetros del mismo; de este porcentaje al menos un 49,81%, es enviado al triturador terciario, mientras que el otro 15,49% es retornado a través del circuito cerrado nuevamente al triturador secundario. Dicho esto, solo un 34,71% del producto de la trituración secundaria es pasante de la malla de $\frac{3}{8}$ " y enviado directamente al tornillo lavador de finos.

– Trituración Terciaria

Tabla 19. Datos de distribución granulométrica de la trituración terciaria.

MUESTRA: T3-17					
Malla		peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
N°	(mm)				
1"	25,40	33,2	1,66	1,66	98,34
3/4"	19,05	221	11,05	12,71	87,29
1/2"	12,70	611,6	30,58	43,29	56,71
3/8"	9,53	377,9	18,90	62,19	37,82
1/4"	6,35	267,9	13,40	75,58	24,42
# 4	4,75	137,2	6,86	82,44	17,56
# 8	2,36	150,2	7,51	89,95	10,05
# 16	1,18	75,8	3,79	93,74	6,26
# 30	0,60	33,9	1,70	95,44	4,57
# 50	0,30	32,7	1,64	97,07	2,93
# 100	0,15	21,2	1,06	98,13	1,87
# 200	0,075	28,3	1,42	99,55	0,46
Fondo		9,1	0,46	100,00	0,00

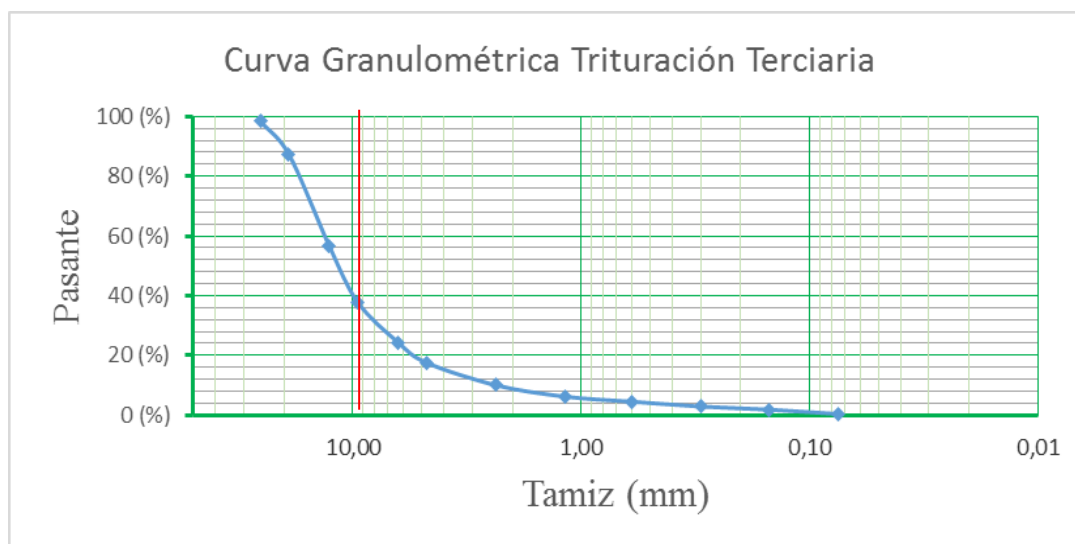


Figura 36. Distribución granulométrica de la trituración terciaria.

Al observar los datos mostrados en la tabla 19 se puede comprobar que los productos con diámetro $> 3/8''$ representa un 62,19%, lo cual se considera un porcentaje importante en cuanto al diámetro de salida ($< 3/8''$) que deben tener las partículas una vez fragmentadas por este equipo, es decir, que una cantidad de material considerable debe recircular a través del circuito cerrado, para lograr el diámetro correspondiente que deben tener las partículas para ser clasificadas en el tornillo sin fin y llegar así al producto final, disminuyendo de esta forma la producción de la planta.

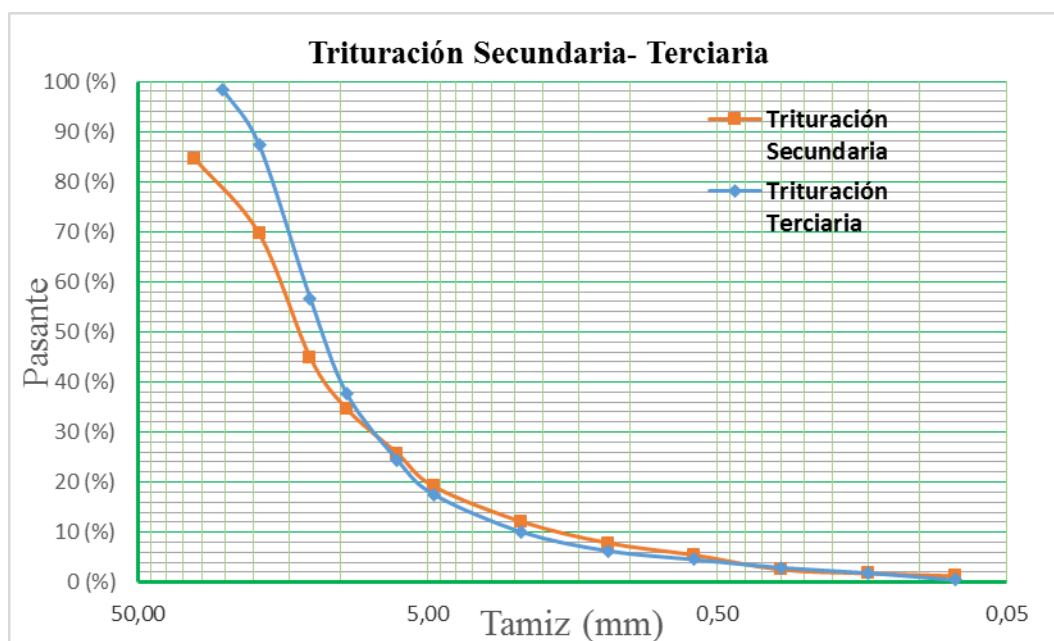


Figura 37. Distribución granulométrica de la trituración secundaria y terciaria

Según Krumbein (1963), el tamaño y la forma de las partículas determinan el comportamiento del flujo de estas dentro de los procesos industriales, no obstante, su comportamiento es diferente dentro de las características estructurales y de resistencia de los materiales de los que forman parte. En la figura 37 se muestra una comparación de los tamaños de las partículas resultantes de los procesos de trituración secundaria y terciaria dentro del circuito, en la misma se puede observar que el comportamiento de ambas se asemeja durante el recorrido de ambas curvas, la producción de partículas de menor diámetro debería corresponder notablemente a la curva de trituración terciaria.

– Producto Final

Tabla 20. Datos de distribución granulométrica del producto final.

MUESTRA: PF-17					
Malla		peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
N°	(mm)				
1"	25,40	0	0	0	100,00
3/4"	19,05	13,8	0,69	0,69	99,31
1/2"	12,70	6,9	0,35	1,04	98,97
3/8"	9,53	41,7	2,09	3,12	96,88
1/4"	6,35	487,9	24,40	27,52	72,49
# 4	4,75	289	14,45	41,97	58,04
# 8	2,36	397,5	19,88	61,84	38,16
# 16	1,18	251,2	12,56	74,40	25,60
# 30	0,60	144,4	7,22	81,62	18,38
# 50	0,30	141,7	7,09	88,71	11,30
# 100	0,15	80,5	4,03	92,73	7,27
# 200	0,075	99,5	4,98	97,71	2,30
Fondo		46	2,30	100,01	0,00

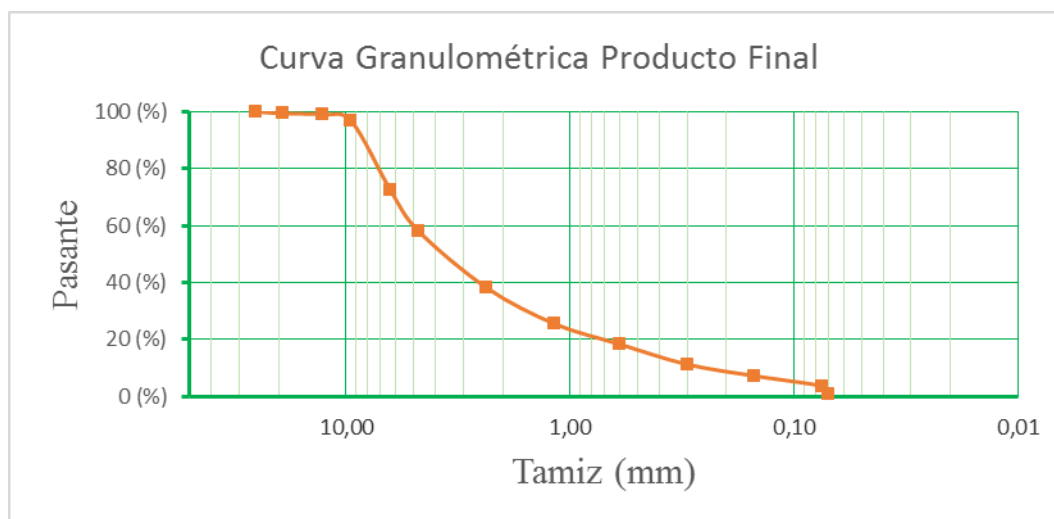


Figura 38. Distribución granulométrica del producto final.

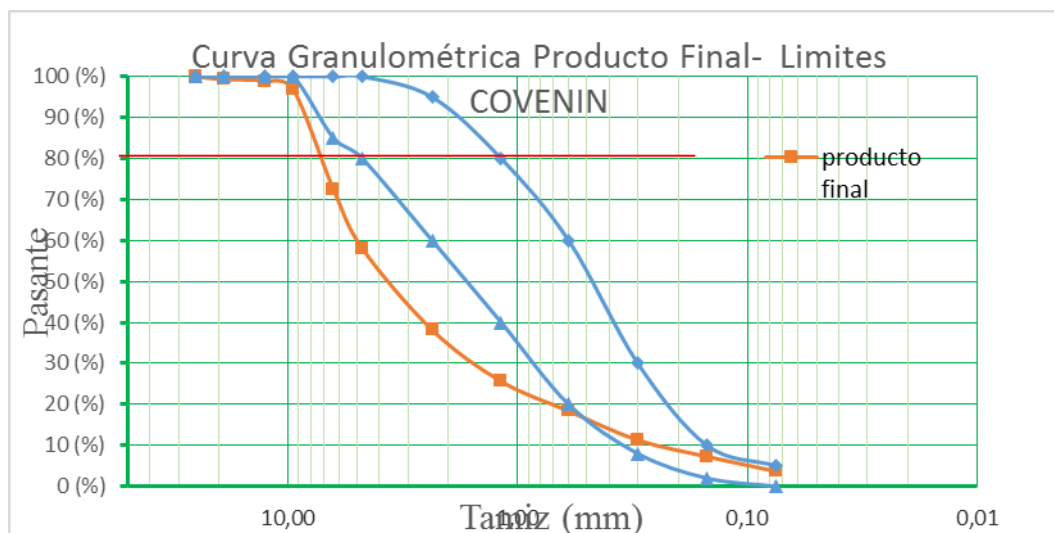


Figura 39. Comparación de la distribución granulométrica del producto final con los límites COVENIN para agregados finos.

Según los parámetros establecidos por las normas covenin 277-2000 para el porcentaje pasante de partículas, el d_{80} para agregados finos, provenientes de la trituración de rocas, debe estar entre 4,74 mm y 1,19 mm, como se observa en la figura 39, donde se puede apreciar claramente que el producto final del circuito para la obtención de arena lavada, esta fuera del rango de la granulometría establecida, teniendo este un d_{80} de 7mm aproximadamente, es decir, que la arena procesada en dicha planta, tiene un tamaño de grano mucho mayor a lo establecido por la norma, de lo que se puede inferir que los equipos de trituración no están funcionando adecuadamente para obtener el fragmentación requerida y además la configuración del circuito, no está adecuada para la obtención de un producto que esté en el rango granulométrico permitido.

A modo de tener un patrón con el cual comparar la calidad de trituración de los equipos utilizados en el circuito, debido a que no se cuenta con la curva que describen los manuales de los mismos, se utilizó como patrón los límites máximos y mínimos de porcentaje pasante establecidos por la norma Covenin 277-2000 de agregados para la construcción, para los equipos de trituración secundaria (cono) y terciaria (triturador de impacto), utilizando en este sentido los límites

establecidos para los agregados finos, obteniendo los resultados presentados en la figura 40.

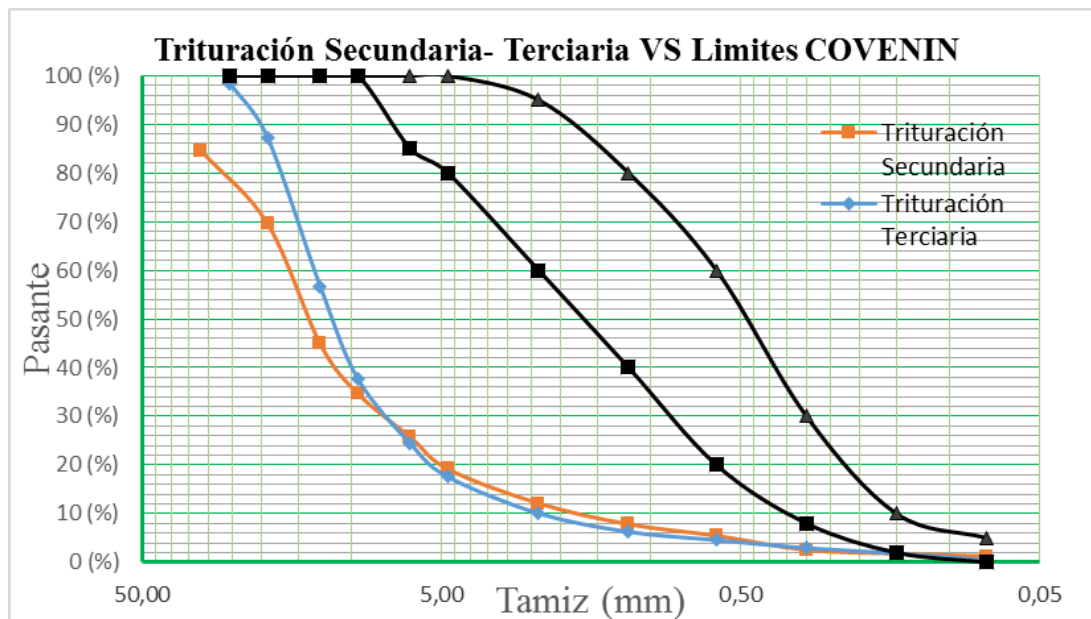


Figura 40. Comparación de la distribución granulométrica de la trituración secundaria y terciaria con los límites COVENIN para agregados n°0.

Para ambos casos, se puede observar que diámetros de partículas producto de estos, están muy por encima de los valores establecidos por la norma, pudiendo constatar que los equipos no están triturando el material adecuadamente, ya que el máximo porcentaje de partículas está por encima del diámetro de descarga al cual están configurados los equipos, como se demostró en los análisis granulométricos mostrados anteriormente.

Esta deficiente razón de reducción de los equipos de trituración, se puede atribuir al deterioro de los mismos y al desgaste tan marcado que presentan los mantos, lo que impide que estos puedan disminuir la roca al tamaño adecuado, generando entonces, mayor recirculación de material, menor productividad y una baja eficiencia en las operaciones.

6.5 Balance de masa en la planta III

6.5.1 Alimentación del Balance de Masas

Durante la elaboración del estudio los camiones CAT 796C cuya finalidad era alimentar la planta de procesamiento no se encontraban operativos, por esta razón la empresa contrato los servicios de camiones volteos con una capacidad de 16 m³, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Flujo de material que alimenta la planta

Día	Alimentación (m³)	Día	Alimentación (m³)
1	254,5	11	0
2	205	12	205
3	246	13	238
4	0	14	246
5	254,7	15	0
6	270,6	16	256,7
7	273,56	17	285
8	275,08	18	311,6
9	311	19	254,6
10	205	20	307,5
Promedio			258,81

En la tabla 21 se puede observar que durante los días de muestreo la planta tuvo un promedio de alimentación de 258,81 m³, es importante destacar que para el cálculo de este promedio no fueron considerados los días de parada de la planta, ya que para fines del estudio, solo es necesario tomar en cuenta los días en que la planta se encuentra operativa, de igual forma se puede apreciar en dicha tabla que los valores máximos y mínimos de alimentación son 205 m³ y 311 m³ respectivamente; los valores mínimos tuvieron como causa principal durante el estudio, la deficiente disponibilidad de los equipos de acarreo o en su defecto paradas operativas que haya presentado la planta durante el día.

6.5.2 Desarrollo del Balance de Masas

Este balance de masas se llevó a cabo con la finalidad de definir los flujos en los puntos de entrada y salida en cada una de las etapas del proceso, en los cuales también se pueda establecer la carga circulante (cc) del circuito de trituración; para el desarrollo del mismo se tomó como punto de partida, una alimentación promedio de 258,81 m³/día, con su equivalente en toneladas (por facilidad de cálculo según la capacidad de los equipos) de 639 Tn, tomando en consideración que la empresa labora un solo turno de trabajo de 8 horas diarias, equivalente a 79,87 Tn/h.

Para el desarrollo del balance de masa se definieron diversas etapas del circuito que se describen a continuación, con la finalidad de ver de una mejor forma el flujo de masa que sale de cada uno de los equipos y que a su vez alimenta a otro elemento durante el circuito. Con la ayuda de una hoja de cálculo que se muestra en los anexos, ya que los cálculos varían en función del tiempo, se definio un tiempo cero, donde solo se toma en cuenta la alimentación parcial de la planta a los equipos de trituración, un tiempo 1 donde se toma en cuenta la carga circulante que existe según los análisis granulométricos en cada una de las etapas del circuito y como esta recircula a cada uno de los equipos y finalmente una etapa donde ya el circuito se encuentra en régimen.

A continuación se definen las etapas para el cálculo del balance de masa

Tabla 22. Etapas del circuito para el cálculo del balance de masas.

Etapas	Elementos de circuito
I	Alimentación y Trituración primaria, tiempo cero
II	Productos de criba #01 y alimentación de triturador secundario
III	Alimentación de criba #02, clasificación y retorno del material
IV	Alimentación trituradores secundario, terciario y tornillo lavador de finos

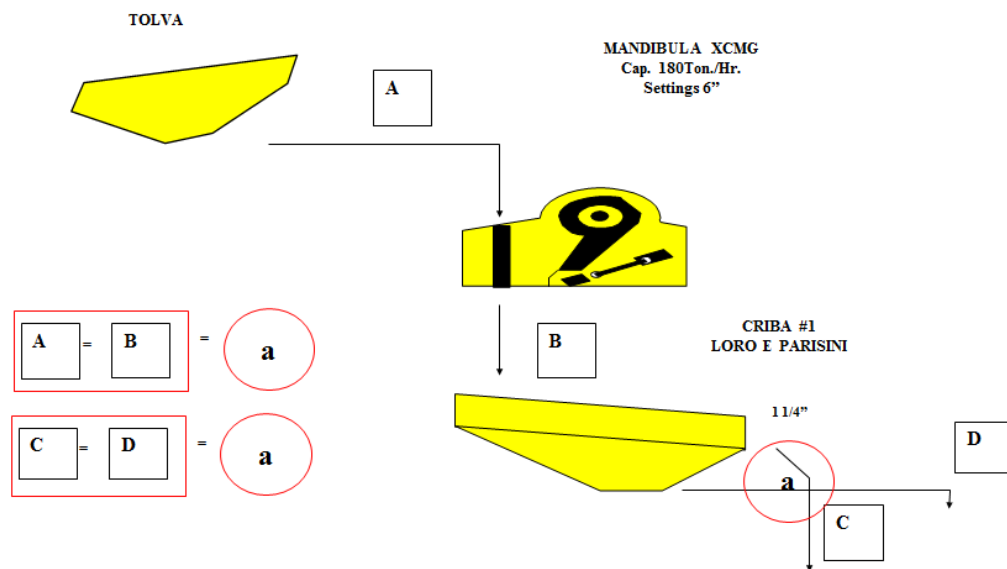


Figura 41. Etapa I del balance de masas

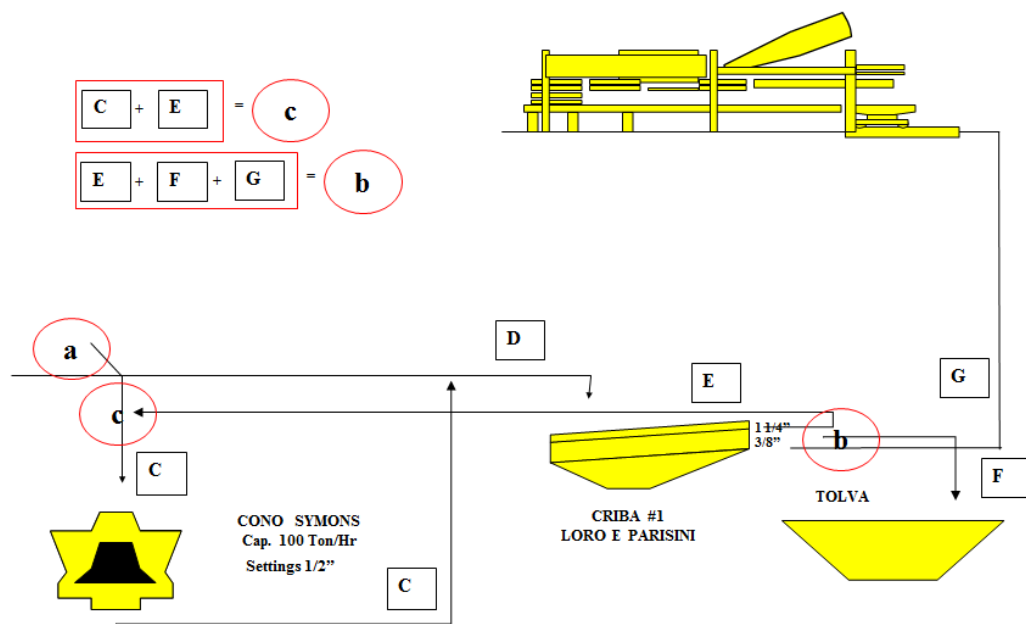


Figura 42. Etapa II del balance de masas

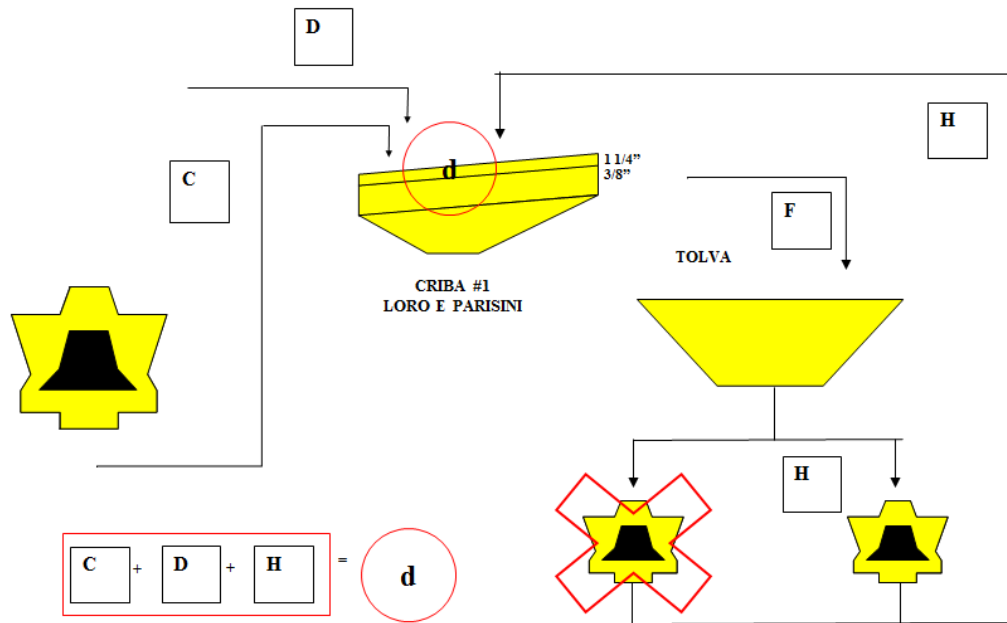


Figura 43. Etapa III del balance de masas

En las figuras vistas anteriormente, se describen cada una de las etapas del circuito especificando su separación, en donde la etapa I se toma la alimentación principal de la planta y la su primera fase de trituración, es el inicio del procesamiento mineral y su producto (a) es lo que alimenta a la siguiente fase, la etapa II describe el producto de la criba #01 donde D es el material que alimenta la trituradora secundaria y E es el producto menor a $\frac{1}{4}$ " que va directo a la criba #02 para dar continuidad al circuito, en la etapa III se describen todos los productos que alimentan a la criba #02 (d) y finalmente en la etapa IV se muestra la alimentación total del circuito cerrado. Obteniendo los resultados que se muestran a continuación en la figura 44.

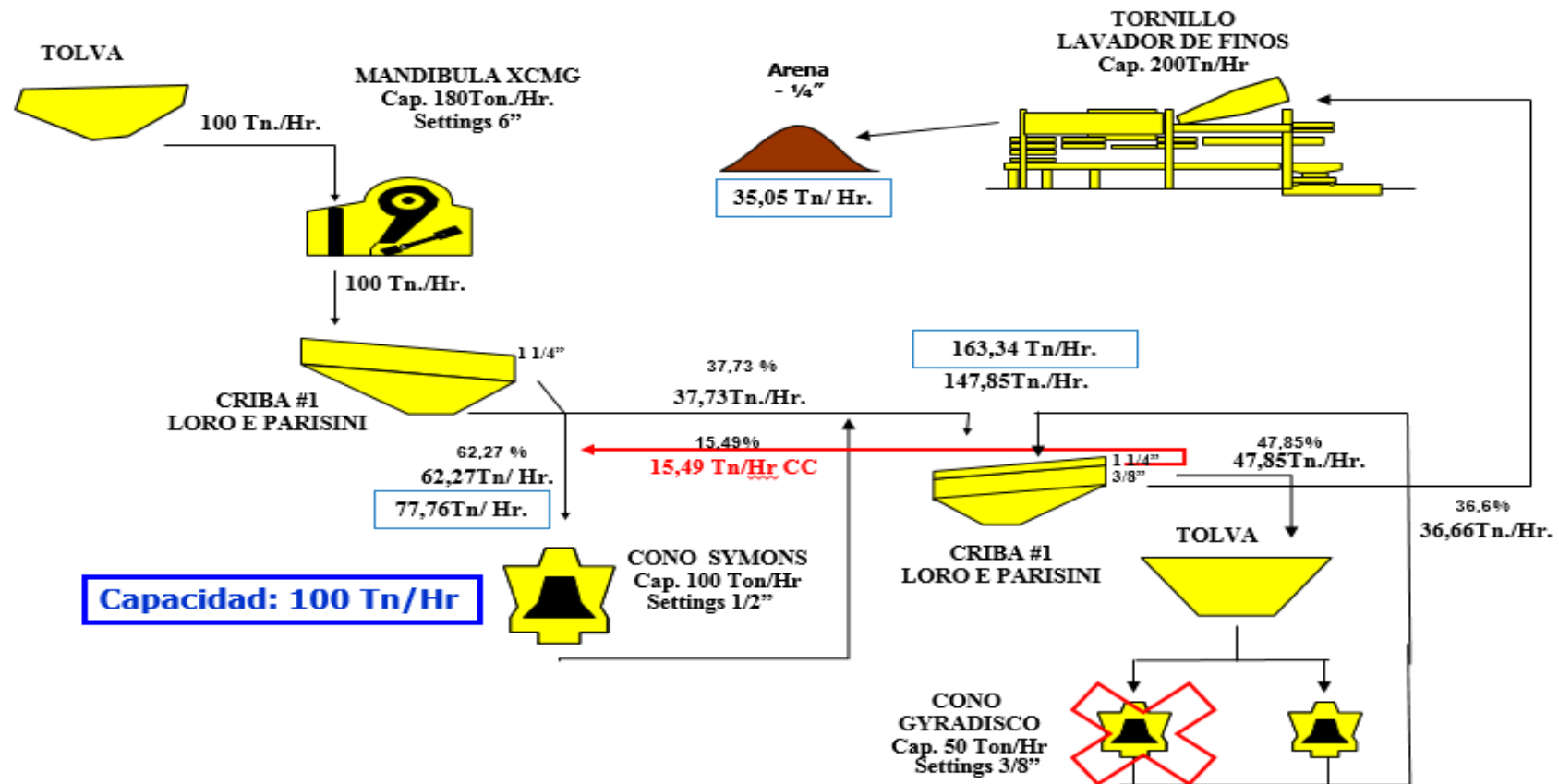


Figura 44. Diagrama con Balance de Masas con respecto a la capacidad teórica de los equipos.

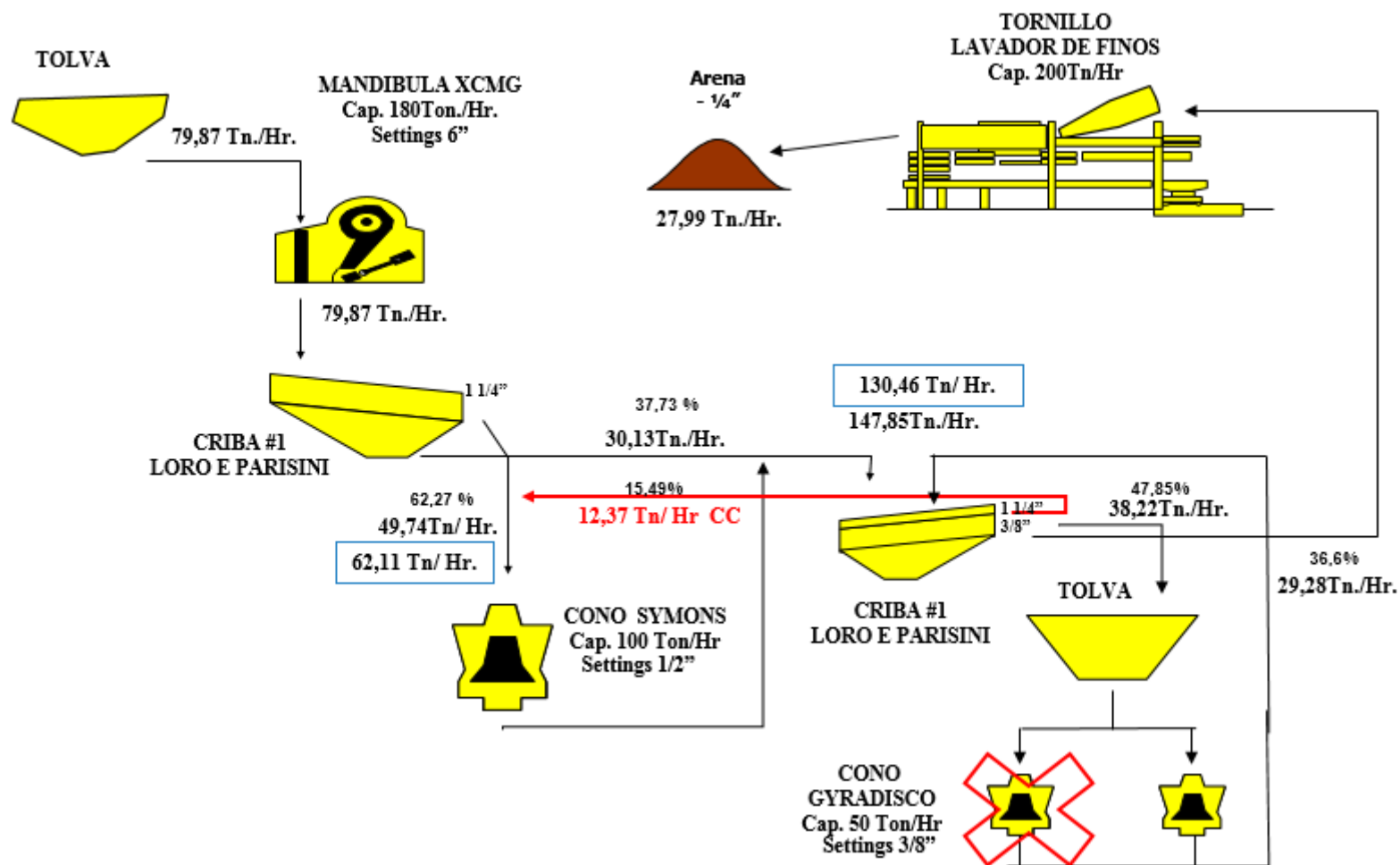


Figura 45. Diagrama con Balance de Masas con respecto a la alimentación de la planta por hora.

Según los valores obtenidos, en la figura 41 se muestran los resultados del balance de masas según la capacidad real de los equipos, tomando como referencia el equipo con menor capacidad del circuito (tritador de cono), se puede observar que el flujo de material debe disminuir en la alimentación del triturador terciario, ya que solo uno de ellos se encuentra operativo desequilibrando así el balance; los resultados mostrados en la figura 42 muestran el balance de masa con respecto a la alimentación promedio que se obtuvo en los días de estudio.

6.5.3 Evaluación de los puntos críticos del sistema

Una vez determinado el balance de masas de la planta de producción de arena lavada, se obtuvieron los puntos críticos que afectan la obtención de la misma, los cuales se originan por diferentes motivos, como por ejemplo tipo y cantidad del material de la alimentación, condiciones de los equipos de fragmentación y clasificación, la colmatación de algunos equipos debido a la gran cantidad de material que se encuentra recirculando en el circuito y la limitación de la alimentación del circuito para evitar averías mecánicas, entre otras.

Seguidamente se procede a identificar y evaluar los puntos críticos que se señalan en la figura 43.

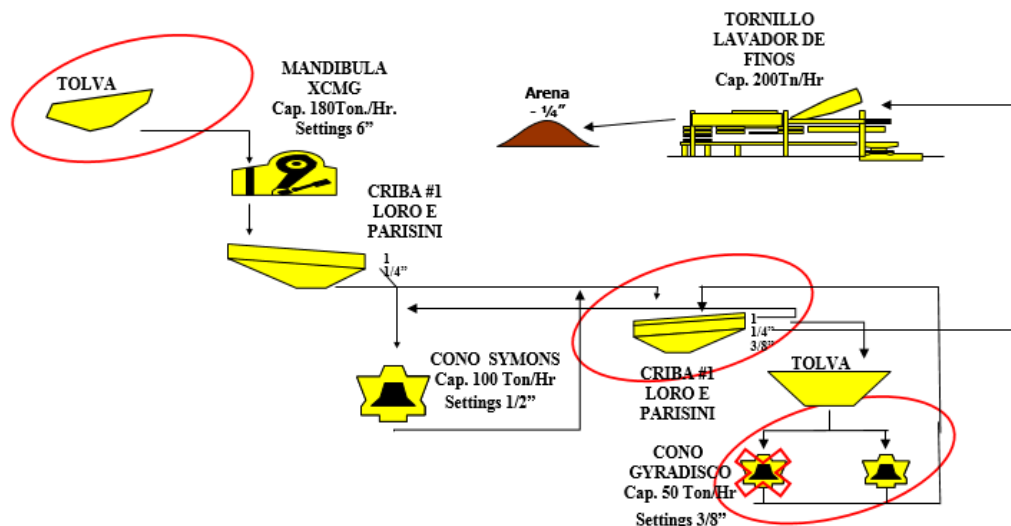


Figura 46. Puntos Críticos del circuito para la obtención de arena lavada.

En la figura 43 se muestran los aspectos fundamentales que marcan la disminución en la producción de arena lavada en dicha planta y que se describen a continuación:

- Carga circulante del circuito

Todo el material que se alimenta en la planta debe reducirse a través de los diferentes equipos de fragmentación a una granulometría menor a $3/8''$, según la configuración de la segunda malla de la criba #02, cuyo pasante es enviado al tornillo lavador de finos con la finalidad de eliminar todo el material pasante de la malla #200 y así obtener un producto final de calidad. Todo el material que no alcanza esta granulometría, una vez pasado por el triturador terciario, se denomina retorno y en conjunto con la alimentación fresca más el retorno producido por otros equipos conforma lo que conocemos como carga circulante.

Mediante el cálculo del balance de masas del circuito se pudo determinar que existe al menos una cantidad de 40,12 Tn/h de material recirculando, lo que significa para una jornada de trabajo (8 horas) un total de 320,96 Tn, de esta cantidad un 24,46% pertenece a aquellas partículas que una vez pasadas por el triturador secundario no alcanzaron un diámetro menor a la apertura de la primera malla de la criba #02, mientras que el otro 75,54% corresponden al material que debe recircular nuevamente al triturador terciario.

- Capacidad Especifica de la criba #02

Este equipo es el que recibe el material proveniente tanto del triturador secundario como el terciario para su posterior clasificación en los dos cortes ($1/4''$ y $3/8''$), los productos generados por este son los que dan paso al circuito cerrado en esta planta de procesamiento. Debido a la gran cantidad de material que recircula por el circuito, el flujo hasta este clasificador aumenta, provocando la acumulación de material en el mismo. Durante la investigación se calculó la superficie de cribado para ambas mallas de esta criba, obteniendo como resultado una superficie de 10,3 m² para la primera y 7,71m² para la segunda, según los datos mostrados en la tabla 23 se puede determinar que la capacidad especifica utilizando la ecuación más simplificada propuesta por Fueyo (1990) de estas mallas según la luz del

tamiz debería ser de 30m² y 16m² respectivamente, es decir que la superficie de cribado actual según la alimentación por hora y el % de rechazo de esta no es eficiente para las exigencias de la planta.

Tabla 23: a) tabla de capacidades específicas en función de la luz de malla para cálculos por alimentación. b) Factores de corrección del sobre tamaño o rechazo y del tamaño mitad para cálculos por alimentación. Tomado del Fueyo (1990).

Luz (mm)	CAPACIDAD ESPECÍFICA (m ³ /m ² -h)		%	B Sobretam.	C T. Mitad
	Triturado	Natural			
0,4	1,20	3,00	0	0,92	0,40
0,7	1,50	3,00	5	0,93	0,45
0,8	2,10	3,40	10	0,94	0,50
1,2	2,70	4,30	15	0,96	0,55
1,6	3,60	5,50	20	0,97	0,60
2,4	5,20	6,70	25	1,00	0,70
3,3	6,70	8,60	30	1,03	0,80
4,7	8,80	11,3	35	1,06	0,90
6,5	12,0	16,3	40	1,09	1,00
12	16,0	23,0	45	1,13	1,10
19	22,0	29,0	50	1,18	1,20
25	26,0	33,0	55	1,24	1,30
31	30,0	37,0	60	1,30	1,40
38	33,0	40,0	65	1,42	1,50
45	35,0	43,0	70	1,54	1,60
50	37,0	45,0	75	1,75	1,70
57	39,0	48,0	80	2,00	1,80
63	41,0	50,0	85	2,70	1,90
70	43,0	53,0	90	3,60	2,00

– Flujo de la alimentación del material

Esta planta está en la capacidad de ser alimentada con al menos 100 Tn/h que es la capacidad del triturador de cono, sin embargo, se presentan en los días de muestreo, una alimentación mínima de 79,83 Tn/h que representa solo el 79% del límite inferior de la capacidad instalada. Dado lo anterior, es importante considerar que la disminución del flujo de alimentación como consecuencia del colapso de la criba #02 para evitar fallas mecánicas en la misma (rompimiento de las correas, fallas del motor), generan entonces, pérdidas de al menos un 20 % de la producción de arena en dicha planta

Con los resultados obtenidos en todos los ensayos durante el desarrollo de este trabajo de investigación se pueden definir los parámetros mostrados en la tabla 24 para los equipos de clasificación y trituración.

Tabla 24. Parámetros de los equipos de clasificación y trituración

Resultados Obtenidos			Parámetros a considerar
Ensayos de Resistencia a la compresión simple	Esfuerzo Axial	Módulo de elasticidad Tangencial	
	142,1	108,78	Fuerzas actuantes y energía requerida durante el proceso de trituración
	63,9	93,61	
	55,2	66,7	
	4	19,8	
Ensayos de Tracción Directa	Carga Axial (KN)	Resistencia a la Compresión (Mpa)	Calidad y abrasividad del agregado
	17,77	19,8	
	9,84	9,9	
	19,42	22,25	
	20,01	21,15	
Ensayos Petrográficos	40% de contenido de sílice libre, tomando como referencia el contenido de cuarzo en cada una de las muestras, además la estructura interna de los minerales, juegan un papel fundamental en la morfología de los granos, es decir, la esfericidad y la redondez		
Análisis Granulométrico	La producción de partículas de menor diámetro Juega un papel fundamental a lo largo del circuito, por eso sus equipos deben estar configurados para la obtención de finos		Cumplimiento de la normativa de calidad de agregados para la construcción

6.6 Propuestas en función de la relación obtenida los parámetros más convenientes en los equipos de trituración y clasificación, para mejorar la eficiencia del circuito

Una vez descrito y desarrollados los puntos críticos de la planta se tienen propuestas de infraestructuras y otras de decisiones gerenciales, las mismas deberán tomarse dependiendo de las necesidades que se requieran atender como prioridades en la empresa para el momento en que decidan realizar una modificación.

– Propuestas en relación a la Infraestructura de la planta

1. Cambiar el calibre en la salida de las trituradoras

Trituradora de mandíbula

Siendo la finalidad de esta planta la generación de productos con granulometría fina (menor a 3/8”) y debido a que la eficiencia de este equipo es una de las más alta (80%) entre los equipos que conforman el circuito, se debe considerar el generar en esta primera etapa de trituración la mayor cantidad de partículas con menor diámetro posible, disminuyendo así la alimentación del triturador secundario. Esto será viable disminuyendo el set de salida del equipo al máximo posible que de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

Triturador secundario

Según los datos suministrados por la empresa, aseguran que el diámetro de salida del triturador secundario es de 1/2”, mientras que en los resultados mostrados en la figura 30 podemos observar que el porcentaje de partículas mayor a este diámetro es de al menos un 60%, por lo que se recomienda en primer lugar hacer las mediciones correspondientes en campo y corroborar que el equipo se encuentre graduado a estas dimensiones, de lo contrario se deberá disminuir su diámetro de salida de forma tal que no exista gran cantidad de material recirculando, ya que aumenta la alimentación de este equipo y disminuya el flujo de material por el resto del circuito.

Triturador terciario

Este equipo es alimentado por todo el material con diámetro $\geq 3/8''$ retenido en la criba #02, según los estudios realizados el diámetro de alimentación de este equipo es de $1\frac{1}{4}''$, mientras el de salida es de $3/8''$. Esta configuración no le asegura al circuito obtener la mayor cantidad de partículas menores a este diámetro, debido a los resultados obtenidos en las curvas granulométricas del material saliente de este equipo, se pudo demostrar que la generación de partículas menores a $3/8''$ es de solo 37,81%. Es por esto que se propone que el diámetro de salida sea de $1/4''$, de esta forma se podrá generar la mayor cantidad de partículas de menor diámetro.

Es importante destacar que la empresa debe considerar para los dos ítems anteriores, que, según diversos manuales de equipos, los calibres o *set* de salida de los trituradores siempre deben estar por debajo del diámetro que se desea obtener, de lo contrario, no se obtendrá el producto deseado.

Si se llegase a disminuir la carga circulante al menos un 50% bien sea con la graduación de los equipos a un diámetro menor o con la adquisición de un nuevo triturador de cono, que se adapte a las dimensiones e infraestructura de la planta y configurado para la obtención de finos, teniendo una alimentación de 800 tn/día se tiene el balance de masas mostrado en la figura 44. Es importante considerar que la inversión para instalar un nuevo triturador de cono, debe ir de la mano de un estudio financiero y estas decisiones deben ser de tipo gerenciales, ya que los precios actuales de un triturador de cono, varían según su diseño entre unos 291.188.000 BsF y 655.173.000BsF aproximadamente, este precio también varía según la marca de fabricación.

2. Programa de mantenimiento

Realizar un plan de mantenimiento completo: predictivo y preventivo a la planta, este plan debe incluir un control en las horas trabajadas por el equipo, las horas de paradas de los equipos, tiempo de reparación, motivo de las paradas y frecuencia de las fallas, todo esto con la finalidad de disminuir la cantidad de paradas no planificadas. En esta programación también debe estar incluido la ejecución de trabajos de reparación y sustitución de tipo mecánico y eléctrico; es importante que el departamento de almacén facilite el inventario de repuestos, equipos y materiales disponibles generando así una planta con mayor eficiencia y eficacia.

Dentro de las actividades más comunes para ser ejecutadas en el mantenimiento de la planta tenemos: cambio de correas de motores y reductores, revisión de las mallas de las cribas para asegurar que no haya contaminación del material y variación en la granulometría del mismo, limpieza en todas las áreas de la planta y pasillos de las misma, de esta manera también se evitarían accidentes laborales, así mismo se debe hacer uso de técnicas analíticas y estadísticas que permitan medir y predecir el desgaste de los elementos consumibles de los equipos de trituración, clasificación y bandas.

2. Mejorar la calidad de alimentación de la planta

Como se pudo corroborar en los estudios petrográficos y ensayos mecánicos realizados, el yacimiento cuenta con materiales cuyas características son muy variables de uno a otro, por su parte la anfibolita es una roca metamórfica con características mecánicas más resistentes que el esquisto, por su parte este al igual que el mármol son materiales más abrasivos por su alto contenido de cuarzo, pero que a su vez pueden ser fragmentadas con mayor facilidad y generar la mayor cantidad de material fino posible, por esta razón se considera que la alimentación de la planta debería realizarse en proporciones 40% anfibolita y 60% esquistos, de forma tal que los equipos de trituración no se vean afectados por la cantidad de

energía y fuerzas actuantes que deben proporcionar para disminuir el tamaño de las partículas.

Es importante también destacar que si el producto final tiene como destino la fabricación de concreto debe evitarse el uso excesivo de esquistos con alto contenido de micas, debido a lo establecido por las normas COVENIN 211:2000 en su nota #01 “Las arenas micáceas debido a su constitución, son poco apropiadas para utilizarse en la fabricación de concreto y por lo tanto deben evitarse”.

– **Propuestas Gerenciales**

Existen otras propuestas, en las cuales se requiere realizar una evaluación de los costos y estudiar si será o no económicamente rentable asumirlos según los años de vida que tenga el yacimiento con respecto al estatus en el que se encuentra la planta actualmente, entre estas se tiene:

1. Adquirir nuevos forros para los equipos de trituración secundaria y terciaria que cumplan con los parámetros adecuados según las características del yacimiento.
2. Activar el otro triturador terciario para que este trabaje en paralelo con el que se encuentra actualmente operativo, de esta forma la generación de material con diámetro menor a 3/8” aumentara, disminuyendo la carga circulante dentro del circuito y aumentando la producción de la planta.
3. Desarrollar una nueva planta de trituración, que cumpla con los parámetros establecidos en los resultados y que se adapte a las nuevas tecnologías del mercado.

En la figura 45 se resume en un diagrama causa efectos o diagrama de **Espina de Pescado** algunos aspectos generales, que pueden provocar cambios discretos o en el proceso de la planta de trituración, es una lista donde, los aspectos no están establecidos en un orden específico de cómo cada uno de estos afectan a las unidades de producción y / o el propio proceso dependiendo de su aplicación.

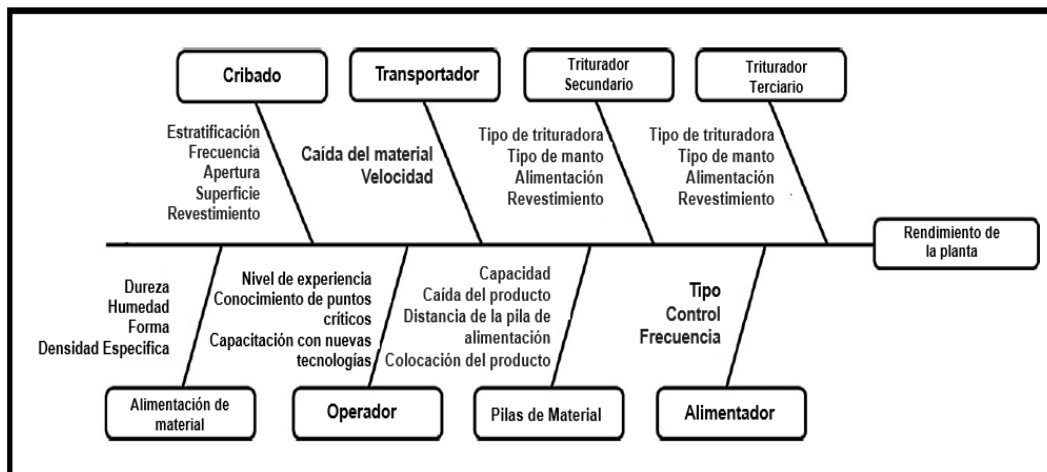


Figura 48. Factores ilustrativos que pueden causar cambios en el rendimiento de la planta. Fuente: G. Asbjörnsson et al. / Minerals Engineering (2012)

Gauti Asbjörnsson, Erik Hulthén y Magnus Evertsson (2012), aseguran que identificar problemas y eliminar el estrangulamiento de un proceso existente es desafiante y requiere información detallada del proceso. En un circuito cerrado como es el caso de la planta a la que se está haciendo estudio, la configuración de los equipos puede causar problemas, ya que como se puede observar a lo largo de la investigación, una falla mínima en al menos uno de los equipos que lo conforman pueden causar grandes inconvenientes, en este caso, la configuración de los equipos no está adaptada a la producción de fino, por tanto genera inconvenientes en el proceso de clasificación, ya que la superficie de cribado no se adapta a la cantidad de material que está circulando por esta. Esta la identificación de estos problemas se puede hacer mediante el estudio manual de los datos del sistema de la planta, pero este proceso, aunque requiere mucho tiempo no siempre garantiza resultados.

CONCLUSIONES

Los parámetros mecánicos de los diferentes tipos de litologías presentes en el macizo rocoso de Canteras del Distrito Capital S.A corresponden a rocas moderadamente dura y de buena calidad, sin embargo, haciendo un análisis individual, se puede definir a la roca anfibolita resulto más competentes, y debido a su bajo contenido de sílice, presento menor índice de abrasividad.

Mediante la caracterización geológica y petrográfica de las diferentes muestras se pudieron corroborar la presencia de rocas metamórficas pertenecientes a la formación las mercedes, entre ellas Anfibolita definida por su alta presencia de minerales como la Horblenda (40%) perteneciente al grupo de los anfíboles, Mármol una roca metamórfica cuyo contenido de minerales en abundancia fue de 50% calcita y 35% cuarzo, el alto contenido de carbonato de calcio, se debe a que este tipo de roca se forma a partir de rocas calizas que sometidas a altos valores de presiones y temperatura alcanzan un alto grado de cristalización, el alto contenido de cuarzo en esta roca la hace abrasiva; por otra parte, se pudo comprobar que el macizo rocoso de Canteras de Distrito Capital cuenta con gran variedad de esquisto cuyos nombre varían de acuerdo a la composición mineralógica del mismo, entre los minerales más comunes presentes en estos se pueden describir: micas, calcita, grafito plagioclasas y cuarzo en pocas proporciones, además de minerales accesorios como pirita.

Canteras del Distrito Capital para adaptarse a la demanda de agregados finos, debe utilizar equipos para la obtención de partículas con diámetro menor a 3/8" (finos), las maquinarias que mejor comportamiento tienen frente a las propiedades mecánicas y petrográficas de este yacimiento, para la obtención de este tipo de granulometría, son las trituradoras de mandíbula cuya relación de reducción van de 3:1 hasta 10:1.

Los equipos de trituración secundaria y terciaria con los que cuenta la planta actualmente, dado el estudio granulométrico del material a la salida de los mismos, no se encuentran configurados para la obtención de agregados finos,

ambos poseen un d_{80} entre 12,7mm y 10,8mm respectivamente, mientras que el diámetro del producto final deben ser partículas menores a 6,35mm. Lo que trae como consecuencia la recirculación del material y disminución de la producción. Los equipos de trituración deben adaptarse a los parámetros establecidos para este yacimiento, es decir RCS entre 55,2 Mpa y 142,1 Mpa, cuyos valores la clasifican como una roca dura, su resistencia a la fragmentación según su contenido mineral esta entre 0,3 y 100 Kg/cm² que a su vez algunos autores lo definen como rocas abrasivas.

El balance de masa se convirtió en el aspecto clave para determinar los puntos críticos dentro del circuito de procesamiento mineral, para este estudio en particular, se observó que la cantidad de carga circulante es de al menos el 59,88% de la alimentación diaria del circuito, lo que trae como consecuencia la perdidas en la producción de arena lavada; la generación de esta cantidad de material que deben recircular a través del circuito también trae como consecuencia las fallas en otros puntos del circuito, ya que la alimentación no se realiza de forma constante para evitar el colapso y averías mecánicas de algunos elementos del circuito.

La evaluación de los puntos críticos arrojados por el balance de masa permitió establecer una serie de propuestas técnicas de tipo estructural de la planta y de decisiones gerenciales, que se pueden aplicar previo a la evaluación de estudios económicos y financieros. Las propuestas planteadas en esta investigación no son excluyentes, es decir, dependiendo de los alcances de la empresa estas propuestas podrán desarrollarse a través del tiempo.

RECOMENDACIONES

Una vez desarrollado el estudio en esta planta de procesamiento se tienen recomendaciones de infraestructuras, de decisiones gerenciales y otras de Investigaciones, las mismas deberán tomarse dependiendo de las necesidades que se requieran atender como prioridades en la empresa

Toma de decisiones gerenciales

- El valor promedio de resistencia a la compresión simple del macizo fue obtenido tras un número mínimo de muestras (4 muestras) ensayadas anteriormente en el desarrollo de otra investigación, a causa del tiempo requerido para el uso de los laboratorios y los costos asociados a la preparación de las muestras, por lo que se recomienda aumentar el número de ensayos para mejorar la precisión de dicho valor.
- Llevar un histórico del consumo por desgaste en los revestimientos de mandíbulas, forros y en el cóncavo. Para poder evaluar y proponer soluciones efectivas.
- Realizar análisis técnico-económico de las propuestas planteadas, evaluando las características de cada uno de los puntos críticos señalados en este trabajo y las necesidades actuales en la que se encuentre la empresa.

Infraestructura

- Revisión de las mallas o paños de las cribas para asegurar que no haya contaminación del material y un aumento de la carga circulante dentro del circuito. Adicionalmente se recomienda acondicionar la planta garantizando la limpieza en todas las áreas de y pasillos de la misma, de esta manera también se evitarían accidentes laborales.

Líneas de Investigación

- Realizar un estudio geológico local extenso, de esta forma comprobar los diferentes tipos de rocas presentes en el macizo rocoso y generar un mapa

geológico que le facilite a la empresa saber la cantidad y calidad de recursos con los que cuenta y de igual forma la gerencia de minería podrá realizar sus operaciones de extracción de material, de forma tal que se generen pilas con diferentes tipos de materiales, que garanticen la calidad del producto final.

- Evaluar un mejor diseño de la superficie del revestimiento, y usar el acero adecuado para el nivel de abrasividad y dureza del material, con el fin de alargar la vida útil de los mismos y disminuir los costos de producción. Con alianzas estratégicas con las Escuelas de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Metalurgia-UCV.
- Realizar pruebas piloto para encontrar los parámetros de clasificación isodrómica: Área de sedimentación, Cantidad de agua utilizada, Grado de turbulencia en el área de sedimentación, Capacidad de flujo. Con alianzas estratégicas con la Escuela de Ingeniería Metalurgia-UCV.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acosta Magda (2015). Minería de Campo. “Determinación de los parámetros del ciclo de carga y acarreo y balance de masa en la planta III de beneficio mineral, en Canteras del Distrito Capital”. Departamento de Minas, Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela.
- [2] ASTM D75 / D75M-14, Práctica estándar para la toma de muestras de Agregados, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014
- [3] Baamonde José M. (2006). “Petrología – Ambientes Sedimentarios”. Facultad de Ciencias UCV. Caracas, Venezuela.
- [4] Blanco Emilio (2014). Bloque II- Capitulo 7. “Trituración”. Universidad de Cantabria. España.
- [5] Blanco Emilio (2014). Bloque II- Capitulo 9. “Clasificación y Cribado”. Universidad de Cantabria. España.
- [6] Canteras del Distrito Capital. (2015-2016). “**Plan de Aprovechamiento de Minerales**”. Antímano, Caracas.
- [7] D.D. Cortes a, H.-K. Kim b,, A.M. Palomino c, J.C. Santamarina a (2008). “*Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands*”.
- [8] Díaz Eduardo (2013). “Evaluación de electrodos para la fabricación de blindajes laterales de molinos de Trituración de áridos” Medellín.
- [9] Erinova, M. Z. (2012). Proyecto de una planta de Trituración para cantera de caliza. Provincia de lugo España.
- [10] Errol Kelly (1990). Introducción al procesamiento mineral
- [11] Fuenmayor Oswaldo (2001). Trabajo Especial de Grado. “Caracterización Geomecánica de las Rocas de la Cantera Perteneciente a la Corporación De Cemento Andino C.A. Ubicada En El Municipio Candelaria, Estado Trujillo”. Departamento de Minas, Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela.
- [12] Fueyo Luís C. (1999). “Equipos de trituración, molienda y clasificación. Tecnología, diseño y aplicación”. España.

- [13] Gauti Asbjörnsson, Erik Hulthén y Magnus Evertsson (2012). *“Modelling and simulation of dynamic crushing plant behavior with MATLAB/Simulink”*.
- [14] González de Vallejo Luís (2002). “Ingeniería Geológica”. España.
- [15] Guerra Francisco (1999). Trabajo Especial de Grado “Optimización de una planta de fabricación de agregados minerales”. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- [16] Hernández Teobaldo (2000). Trabajo de Entrenamiento Profesional. “Análisis Granulométrico y Balance de masas en el proceso de la planta de trituración los barrancos de la empresa C.V.G Ferrominera Orinoco”. Departamento de Minas, Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela.
- [17] Labrador, María (2017). Trabajo Especial de Grado “Evaluación de la planta de trituración y clasificación de tamaño de la roca caliza en la cantera agua viva II, San Sebastián de los Reyes, estado Aragua”. Departamento de Minas, Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela.
- [18] M.S. Guimaraes a, J.R. Valdes b, A.M. Palomino c, J.C. Santa marina d (2007). *“Aggregate production: Fines generation during rock crushing”*
- [19] Márquez José y Murgas Ana (2005). Trabajo Especial de Grado. “Evaluación del comportamiento de los agregados de la cantera san salvador en mezclas asfálticas en caliente tipo III, mediante la adición de cal” Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo.
- [20] Melo Yondert (2016). Trabajo Especial de Grado. “Propuesta metodológica para la planificación de soporte de mina, en Canteras del Distrito Capital”. Departamento de Minas, Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela.
- [21] Metso (2012). Materiales y desgaste “Guía de aplicación de piezas de desgaste”.
- [22] Nobregas, Ricardo (2016). Trabajo Especial de Grado. “Propuesta para reducción de tamaño de minerales no metálicos: Caso charnockita, cerro la danta Sector cambalache, estado Bolívar”. Departamento de Minas, Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela.

- [23] Norma Venezolana COVENIN 277:2000. (2000). “Concreto. Agregados. Requisitos” (3era Revisión).
- [24] Norma Venezolana COVENIN 254 (1998) “Cedazos de Ensayos”. (2da Revisión).
- [25] Norma Venezolana COVENIN 255 (1998) “Agregados. Determinación de la composición granulométrica” (1era revisión).
- [26] Peláez Eduardo (1981). “Preparación y concentración de Minerales”. Departamento de Minas, Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela.
- [27] Perdomo Luís (2013). Trabajo Especial de Grado “Estudio para el aumento de la vida útil de los exhaustores de la fábrica de cemento Siguaney, mediante la aplicación de relleno superficial por soldadura”. Universidad Central “Marta Abreu” de las villas. Santa Clara- Cuba.
- [28] Gutiérrez, H. (2015). Resistencia a la fragmentación de rocas volcánicas como áridos para hormigones y asfaltos. Santa Cruz de Tenerife, España: Universidad de La Laguna.
- [29] Pimentel Reinaldo (2016). Trabajo Especial De Grado. “Desarrollo de una propuesta de adecuación de las plantas de agregados de la cantera Carayaca, Distrito Capital, para disminuir la producción de finos”. Departamento de Minas, Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela.
- [30] Rosero Cecilia (2013). Trabajo Especial de Grado. “Alternativas para controlar las pérdidas de los elementos de desgaste de los equipos de carguío, en la mina a cielo abierto Sur-Sur de la división andina de CODELCO-CHILE”. Universidad Central del Ecuador.
- [31] Sánchez Roberto (2012). Trabajo de Pasantías. “Elaboración de planes de Mantenimiento preventivo para los equipos de las plantas de agregados” Coordinación de Mecánica Universidad Simón Bolívar.
- [32] Tamayo y Tamayo (2003). “El proceso de la Investigación Científica”. México.

- [33] Torres Pablo (2006). “Avances en el estudio sobre recuperación de partes de equipos de carga usados en la minería”. Universidad de La Serena, Chile.
- [34] Universidad Pedagógica Experimental Libertador (2003). “Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales”. Caracas, Venezuela.
- [35] Valencia Evaristo (2013). Trabajo Especial de Grado. “Proyecto para el incremento de capacidad de operación de la planta de beneficio, compañía minera La Negra, Maconí Querétaro”. Universidad Nacional Autónoma de México.

ANEXOS

