



**FACULTAD METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MÁSTER EN ELECTROMECAÁNICA

Evaluación y modelación de equipos empleados para el
procesamiento de áridos en la provincia Holguín.

Ing. Raymundo Betancourt Laurencio

Moa, diciembre de 2017
“Año 59 de la Revolución”



FACULTAD METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MÁSTER EN ELECTROMECAÁNICA

Evaluación y modelación de equipos empleados para el
procesamiento de áridos en la provincia Holguín.

Autor: Ing. Raymundo Betancourt Laurencio

Tutor: Dr. C. Roberto Johan Sierra Pérez

Moa, diciembre de 2017

“Año 59 de la Revolución”

Resumen

En el siguiente trabajo se hace una caracterización de los equipos empleados en el procesamiento de áridos en Holguín, además se define el procedimiento necesario para la determinación de los parámetros tecnológicos de los equipos. Se hace una modelación para el caso de los trituradores de mandíbulas y los hidrociclones de acuerdo a las propiedades físico-mecánicas de la materia prima procesada. Se realiza un análisis energético asociado a estos equipos. Los resultados obtenidos se validan utilizando métodos estadísticos que permiten definir si los mismos son aceptables. La valoración económica se hace por separado, es decir para cada uno de los equipos siguiendo la misma estructura para todos, lo que permitió indicar las insuficiencias detectadas en cada uno de los casos.

Abstract

In the following work is made a characterization of the equipment used in the processing of aggregates in Holguín, in addition the necessary procedure for the determination of the technological parameters of the equipment is defined. Modeling is done in the case of jaw crushers and hydrocyclones according to the physical-mechanical properties of the raw material processed. An energy analysis is performed associated with these equipment. The results obtained are validated using statistical methods that allow to define if they are acceptable. The economic valuation is done separately, that is, for each of the teams following the same structure for all, which allowed to indicate the insufficiencies detected in each of the cases.

Índice

Introducción	1
CAPÍTULO I. Evolución teórica	7
1.1. Introducción.....	7
1.2. Antecedentes históricos del equipamiento de preparación mecánica	8
1.3. Requisitos de los proyectos de las plantas de preparación de áridos	9
1.4. Propiedades físico - mecánicas de los recursos en los yacimientos o canteras.....	14
1.5. Conclusiones del capítulo	18
CAPÍTULO II. Materiales y métodos.....	19
2.1. Introducción.....	19
2.2. Nuevo enfoque del método de cálculo para plantas procesadoras de áridos para la producción local.....	19
2.3. Determinación del régimen de trabajo de las plantas procesadoras de áridos.....	22
2.4. Principio de selección de los esquemas tecnológicos.....	24
2.5. Parámetros de los equipos que conforman los esquemas tecnológicos de las plantas procesadoras de áridos	26
2.6. Proceso empírico utilizado	64
2.7. Conclusiones del capítulo	64
CAPÍTULO III. Estudio de los resultados.....	66
3.1. Introducción.....	66
3.2. Resultados empíricos de los equipos que conforman las instalaciones de procesamiento de áridos	67
3.3. Resultados del cálculo teórico de los equipos que conforman las instalaciones de procesamiento de áridos.....	70
3.4. Validación de los de los parámetros tecnológicos.....	72
3.5. Simulación de los hidrociclones para áridos cubanos	77
3.6. Caso de estudio. Valoración económica	78
3.7. Conclusiones del capítulo	80
Conclusiones Generales.....	82
Recomendaciones	83
Referencias bibliográficas	
ANEXOS	

Introducción

La industria cubana de materiales de la construcción tiene la responsabilidad de la producción de materiales de construcción y del control de su calidad. Esta industria ha realizado una serie de inversiones encaminadas a la producción y adquisición de materiales con los parámetros técnicos y tecnológicos requeridos para la construcción de edificios, instalaciones diversas, viales y otros.

El incremento de la demanda de áridos, el nivel de agotamiento de los recursos en los yacimientos de áridos locales e incumplimiento de normas de explotación de dichos yacimientos, hace necesaria la aplicación de la ciencia, la tecnología y la innovación, para garantizar la producción y obtención de estos recursos con los parámetros requeridos y su explotación racional, tanto económica como energéticamente. Por otro lado las demandas para las producciones locales no satisfacen las necesidades exigidas por las nuevas inversiones, los mantenimientos y reparaciones previstas.

Por tanto es imperiosa la necesidad de implementación y desarrollo de tecnologías para el diseño y adquisición de equipos y herramientas encargados de la producción de materiales y áridos de construcción.

El diseño y fabricación de estos equipos en la industria nacional constituye una vía para el abaratamiento y eficiencia en la explotación de las instalaciones productoras de los materiales citados. El régimen de explotación y proyectos para la fabricación de equipos de procesamiento de áridos depende de procedimientos y modelos, que hasta la actualidad no están establecidos en la industria de materiales de construcción de Holguín. Lo que imposibilita la determinación de los parámetros tecnológicos de estos equipos con un mayor nivel de precisión.

En Holguín, durante el diseño y explotación de los equipos que conforman los esquemas tecnológicos para la preparación mecánica y el beneficio de los áridos, tienen considerables pérdidas económicas por concepto de inversión, por adquisición de equipos en el mercado exterior en monedas libremente convertibles, que incluso en la mayoría de los casos sus capacidades no se ajustan a las requeridas y de otro lado se encarecen los gastos de insumos, partes y piezas para las actividades de mantenimiento y reparación. Según datos del Centro de Investigación y Desarrollo de Materiales de Construcción (CIDMC), 2015, las pérdidas económicas por los conceptos señalados oscilan entre un 19 y 43 %.

Sierra (1987) asegura que, las pérdidas de energía en los equipos que componen las procesadoras de grava y arena, están en el orden del 30 al 37 %, principalmente por subutilización de las capacidades de carga instaladas y por la instalación de equipos con productividades y potencia de su accionamiento de forma inadecuada. Es notable que, hasta la fecha de acuerdo al CIDMC, el número de instalaciones se haya incrementado en todo el territorio nacional, lo cual aumenta la importancia del análisis de los consumos energéticos y de capacidad productiva de las instalaciones. En Cuba se han adquirido equipos importados, cuya producción nacional según el CIDMC 2013, constituye alrededor del 15 al 35 % de los costos de adquisición.

La dirección técnica del CIDMC y del Órgano Superior de Dirección Empresarial (OSDE) del Ministerio de la Construcción ha solicitado la ejecución del presente trabajo de investigación, con el propósito de ganar en eficiencia y eficacia durante la proyección, el diseño y la explotación técnica y tecnológica de las plantas procesadoras de grava y arena para áridos.

Situación Problemática

En la industria cubana de materiales de construcción en Holguín, durante el diseño y explotación de los equipos que conforman los esquemas tecnológicos, para la preparación mecánica y el beneficio de los áridos, existen cuantiosas pérdidas económicas por concepto de inversión y de energía, también por adquisición de equipos en el mercado exterior que en la mayoría de casos, exceden las capacidades requeridas y por otro lado, se encarecen los gastos de insumos, partes y piezas para las actividades de mantenimiento y reparación. Lo anterior ha provocado que existan averías en dichos equipos debido al nivel de subutilización y que el tiempo de reparación sea más extenso, debido a los costos de las piezas de repuesto, lo que afecta considerablemente a las personas que trabajan en estas instalaciones, a la propia empresa que deja de ingresar dinero, así como a la sociedad en general por la baja producción de materiales de construcción.

Problema

Durante el diseño y explotación de los equipos de preparación mecánica y beneficio de áridos en la industria de materiales de construcción de Holguín no existe una interrelación entre los parámetros de diseño y selección, con los parámetros tecnológicos caracterizados por las propiedades físico mecánicas de las rocas y

aluviones; en función de la capacidad requerida, que permitan diseñar los equipos componentes con niveles de utilización y eficiencia energética recomendables.

Objeto

Equipos de preparación mecánica y beneficio para la producción de áridos de construcción de Holguín.

Objetivo

Establecer la interrelación entre los parámetros tecnológicos para el diseño de los equipos que conforman los esquemas de preparación mecánica y beneficio de áridos, y las propiedades físico mecánicas de las rocas y aluviones procesadas en función de la capacidad requerida, que generen diseños con un nivel de utilización y eficiencia energética racionales, en la industria de materiales de construcción de Holguín.

Campo de acción

Diseño y selección de equipos de preparación mecánica para áridos en Holguín.

Hipótesis

Si se establece la interrelación entre los parámetros de diseño y selección de los equipos utilizados en la preparación mecánica y beneficio de los áridos en Holguín con los parámetros tecnológicos caracterizados por las propiedades físico mecánicas de las rocas y aluviones procesados (arcilla y lodos, granulometría, masa volumétrica, humedad, dureza, resistencia mecánica, abrasividad), en función de la capacidad requerida, entonces se podrán diseñar y seleccionar estos equipos con niveles de utilización y de eficiencia energética recomendables.

Objetivos específicos

1. Establecer, a partir de información empírica, los modelos que relacionan funcionalmente las propiedades físico-mecánicas de los áridos cubanos y los parámetros de diseño de los equipos que conforman los esquemas tecnológicos de las plantas procesadoras de grava y arena, a partir de áridos cubanos.
2. Perfeccionar los métodos matemáticos utilizados para el cálculo de los trituradores de mandíbulas e hidrociclones empleados en los esquemas tecnológicos de las plantas procesadoras de grava y arena a partir de áridos cubanos.
3. Evaluar los resultados del análisis técnico económico de la investigación.

Sistema de tareas

1. Sistematización y búsqueda de inconsistencias en el conocimiento actual sobre:
 - a. Diseño de los equipos que componen los esquemas de preparación mecánica de áridos.
 - b. Propiedades físico mecánicas de los áridos cubanos y su influencia en el diseño y funcionamiento de los equipos empleados para la preparación mecánica de estos.
 - c. Optimización energética de los equipos empleados en instalaciones de procesamiento de grava y arena.
2. Estudio de las vías para perfeccionar la metodología utilizada actualmente en las instalaciones de procesamiento de áridos cubanos empleados en la construcción, para incrementar su eficiencia desde el punto de vista energético.
3. Análisis de los modelos que relacionen funcionalmente las propiedades físico-mecánicas de los áridos cubanos, dadas por información empírica y los parámetros de diseño y operación de los equipos que componen los esquemas de su preparación mecánica.
4. Establecimiento de una metodología que permita la optimización, a partir de la información sobre los requerimientos técnicos de los equipos empleados en las instalaciones de procesamiento de grava y arena, que proporcionen las características que acrediten la propuesta del diseño como aquel que es energéticamente óptimo.

Aporte científico tecnológico del trabajo

La fundamentación, el algoritmo y la extensión de un nuevo enfoque del método de cálculo para para trituradores de mandíbulas e hidrociclones utilizados para la preparación mecánica y beneficio de los áridos.

Una modelación para calcular:

- La potencia del de accionamiento y el esquema cinemático de trituradores de mandíbulas para áridos de construcción, en función de la productividad demandada y las propiedades físico-mecánicas de la materia prima procesada, que permite la selección racional del triturador.
- Las dimensiones geométricas de los hidrociclones para áridos mullidos acarreados en un flujo de agua, en función de la productividad demandada por la instalación, la concentración volumétrica de sólidos en la suspensión o pulpa de

áridos estudiados y las propiedades físico mecánicas de la hidromezcla a beneficiar; según un valor de presión y de velocidad del flujo, que permite la correcta separación de la arena del lodo.

Aportes metodológicos del trabajo

- Se determinan los parámetros cinemáticos según esquemas de trituradores de mandíbulas para áridos de construcción, las propiedades físico-mecánicas de la materia prima procesada; tales como masa volumétrica, composición granulométrica, ángulo del talud según la evaluación previa de la materia prima procesada.
- Se prescriben la concentración volumétrica de sólidos en la suspensión o pulpa de áridos estudiados, las propiedades físico mecánicas de la hidromezcla a beneficiar, densidad, composición granulométrica, el punto de corte; para establecer los rangos de la caída de presión del flujo.
- A partir de la modelación establecida tanto para los trituradores de mandíbulas como los hidrociclones, se tienen algoritmos que permiten el diseño de un software respectivamente, que permita automatizar el proceso de diseño eficiente y con un enfoque energético racional de los equipos señalados para el procesamiento de áridos de construcción.

La investigación realizada se define como:

Exploratorias, cuyo fin es obtener mejores aproximaciones para la selección racional de los trituradores de mandíbulas e hidrociclones para el procesamiento de áridos. En este caso constituye una parte del trabajo para alcanzar la racionalidad de estos equipos durante el diseño (selección), sobre acciones empíricas (mediciones en situ de una instalación real procesadora de grava y arena).

Descriptivas. Se incrementa el nivel del conocimiento científico de los equipos empleados en las procesadoras de grava y arena, mediante el empleo de métodos de recopilación de datos y hechos se formulan descripciones, reseñas, inventarios, clasificaciones e incluso generalizaciones empíricas.

Los métodos empleados para la Investigación Científica y Tecnológica basados en un sistema de principios, reglas y acciones que facilita estudios teóricos y empíricos (generalmente sistemáticos, conscientes y críticos) de objetos y sus fenosistemas; permitió planear, organizar, dirigir, ejecutar y controlar en el plano gnoseológico, la creación del nuevo saber científico o de nuevas tecnologías, es decir, identificar,

interpretar, explicar y transformar los objetos de estudio, validar, desplegar y evaluar modelos y teorías.

La tesis cuenta con un total de 84 páginas, estructurada en introducción, tres capítulos, conclusiones parciales al final de cada capítulo, conclusiones generales, recomendaciones, bibliografía y un total de trece anexos.

CAPÍTULO I. Evolución teórica

1.1. Introducción

La revolución científico técnica exige un desarrollo técnico más acelerado de la producción, creación y fabricación de máquinas e instalaciones, que permitan mejorar las condiciones laborales y elevar el rendimiento del trabajo, economizar recursos materiales, así como crear e introducir nuevos medios técnicos y materiales, tecnologías progresivas, asegurar el crecimiento de la producción de máquinas e instalaciones de elevada potencia unitaria y productividad, equipos con altos índices económicos, tecnológicos y mínimos consumos energéticos.

En este capítulo se hace un estudio de los trabajos realizados, relacionados con el equipamiento empleado para la preparación mecánica de los materiales de construcción, áridos en específico; así como las tecnologías empleadas hasta el momento.

Se realiza la identificación de las propiedades físico mecánico y químico de las materias primas utilizadas para la obtención de los áridos destinados a la construcción de edificaciones, viales y agregados de construcción por la industria cubana de materiales de construcción (Desarrollo Local).

Se estudian los indicadores tecnológicos, económicos y energéticos que caracterizan el trabajo y explotación de las instalaciones encargadas de la producción de materiales, partes y agregados empleados para la construcción.

Este capítulo constituye la antesala para el establecimiento de un proyecto de una planta de preparación de áridos, que incluye el conjunto de documentos técnicos para efectuar la obra de construcción, el montaje y su explotación; con la elaboración de un procedimiento, que esté en correspondencia con las características físico mecánicas de los áridos cubanos y sus demandas, y que con la utilización de métodos teóricos y empíricos permita seleccionar y/o diseñar los equipos tecnológicos adecuados para el transporte, clasificación, beneficio y trituración de las materias primas procedentes de las canteras.

El **objetivo** del capítulo es realizar un análisis bibliográfico para exponer los fundamentos teóricos y las peculiaridades para la obtención de los parámetros tecnológicos y de diseño de los equipos e instalaciones encargados de la producción de materiales por la industria cubana de materiales de construcción (Desarrollo Local).

1.2. Antecedentes históricos del equipamiento de preparación mecánica

Hasta el momento, los equipos de extracción y carga, transporte, preparación mecánica y beneficio de los áridos empleados en la industria cubana de materiales de construcción se adquieren en el extranjero, sin embargo, existe la posibilidad de aprovechar los resultados de las investigaciones realizadas en diferentes instituciones tales como el Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMMM), el Centro de Proyectos para la Industria Cubana del Níquel (CEPRONI) y el Centro de Investigación y Desarrollo de los Materiales de la Construcción (CIDMC), así como el uso de herramientas, metodologías y la experiencia de la industria cubana de materiales de construcción, para realizar la proyección de instalaciones procesadoras de áridos, con el consiguiente diseño de muchos de sus equipos componentes, para su posterior construcción en talleres y empresas cubanas dedicadas a este tipo de actividad, como es el caso de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”.

Andréiev, et al. (1980), expresan las características y ecuaciones para determinar los diferentes parámetros tecnológicos, para los diferentes equipos empleados en la preparación mecánica de áridos. Sin embargo, las características y ecuaciones expuestas en este estudio corresponden a las normas rusas vigentes en ese momento.

Rázumov y Perov (1985), describen para una instalación de preparación mecánica, los equipos, las partes y piezas, con algunas de las características tecnológicas, así como la determinación de los parámetros de funcionamiento de estos, pero no se tienen en cuenta todos los parámetros de funcionamiento, de explotación y operación de estos equipamientos empleados en este tipo de instalaciones, además, solo se establecen para el caso del carbón mineral y teniendo en cuenta solo las normas rusas vigentes en esos momentos.

Sierra (1987), realizó el análisis de la explotación de un esquema tecnológico de una instalación de trituración en funcionamiento, donde se investigaron los flujos de cada fracción de material procesado, el balance energético y nivel de utilización de los equipos. En este trabajo se demostró que todos los equipos estaban sobredimensionados, con el consiguiente sobreconsumo energético, durante la explotación de áridos en el municipio de Moa. Sin embargo, en este análisis no se valoran otros esquemas tecnológicos factibles para la preparación mecánica de los

materiales áridos cubanos con características diferentes, que están presentes en otros municipios.

En empresas especializadas tales como, ECRIN, CEPRONI, CTDMC (2009) se han realizado estudios a instalaciones con igual finalidad como son: la planta procesadora de grava y arena de Sagua de Tánamo perteneciente a la industria de materiales de construcción de Moa y la de Miguel perteneciente a la Empresa Constructora y Reparadora del Grupo Empresarial CUBANIQUEL.

Velásquez (1990), realizó el diseño de una planta piloto a escala semi-industrial para el estudio del lavado y cribado del mineral laterítico, donde se tuvieron en cuenta los diferentes parámetros técnicos, las características constructivas y los cálculos de los equipos tecnológicos, que intervienen en el proceso tecnológico de cribado y lavado, los cuales tienen una gran importancia para la realización de estudios posteriores de este tipo. No obstante no se analizan diferentes variantes de diseño de equipos de cribado, ni se tienen en cuenta las propiedades físico - mecánicas del mineral laterítico.

Ramírez (2007), realizó el estudio del proyecto de una planta procesadora de grava y arena para el municipio Moa, donde expone los diferentes parámetros técnicos, las características constructivas y los cálculos de los equipos tecnológicos, que intervienen en el proceso tecnológico de trituración, lo cual constituye una referencia importante para estudios relacionados sobre este tema. No obstante, no se analizan la variedad de equipos e instalaciones y los procedimientos establecidos para su selección y diseño.

Regalado (2011), realizó el estudio del proyecto de una planta procesadora de grava y arena para el municipio Moa, en el cual expone los diferentes parámetros técnicos, las características constructivas y los cálculos de los equipos tecnológicos, que intervienen en el proceso tecnológico de trituración, lo cual constituye una referencia importante para estudios relacionados con este tema. Sin embargo, no se analizan la variedad de equipos e instalaciones y los procedimientos establecidos para su selección y diseño.

1.3. Requisitos de los proyectos de las plantas de preparación de áridos

Según Rázumov y Perov (1985), se deduce que en los proyectos de las plantas de preparación mecánica y beneficio de materiales de construcción se presentan los siguientes requisitos fundamentales:

- 1) Utilización racional y compleja de los recursos minerales; con el fin de elevar la rentabilidad de la empresa de preparación que se proyecta, y hallar las vías para el empleo de los desechos de la producción (tecnología sin desechos).
- 2) Aseguramiento de la alta productividad del trabajo, lo que debe alcanzarse con la ayuda de los procesos tecnológicos, la utilización de maquinarias de alto rendimiento, la mecanización compleja de los procesos de producción, la automatización de la verificación y el control de la producción.
- 3) Asimilación económica del terreno, medio y métodos eficaces de protección del medio ambiente contra la contaminación. Sistema racional de abastecimiento del agua de circulación, reducción de la cantidad de desagües e introducción de tecnología sin ellos, recultivación de las escombreras para los residuos y rocas y depuración de los gases expulsados a la atmósfera.
- 4) Utilizar maquinarias y estructuras de construcción tipificadas, proyectos tipo conjuntos compositivos individuales y de talleres. Además, en caso de modificar materia prima de una misma especie, deben emplearse proyectos típicos de las fábricas de preparación de minerales en su total.
- 5) Hacer uso de la posibilidad de cooperación de la planta que se proyecta con otras empresas de la región, al resolver los problemas relacionados con el abastecimiento de energía eléctrica, agua, la creación de poblados, la canalización, transporte, servicio de bomberos, mantenimiento de las maquinarias de la planta, su reparación, entre otros.
- 6) Elección de las soluciones más económica del plan general de la fábrica que se proyecta, mediante la disposición compacta de sus talleres en el solar industrial e incluso, si esto es posible, situar los talleres en naves comunes.
- 7) No tolerar excesos en los volúmenes y áreas de los locales de producción, administrativas y vestuarios, así como el acabado de exteriores e interiores.
- 8) Garantizar la seguridad del trabajo en la planta.

1.3.1. Equipos que componen el esquema tecnológico de obtención de áridos

El equipamiento que compone los esquemas tecnológicos de obtención de áridos es muy diverso, por lo general deben cumplir determinadas características en los procesos de preparación mecánica y selección de los materiales de construcción.

Las operaciones de fragmentación pueden dividirse en:

- 1) Trituración primaria, que proporciona trozos de rocas de gran tamaño (mayor de tanto) a partir de los bloques extraídos en las canteras. Esta operación también se conoce como pretrituración o premachaqueo.
- 2) Trituración media, que produce trozos de rocas para áridos de tamaño medio.
- 3) Trituradores para la obtención de gravas.
- 4) Trituradores para la obtención de áridos finos (arenas menores de 5 mm).
- 5) Pulverizadores y molinos, donde se producen los polvos de los áridos.

Las operaciones 1 y 2 se le denominan trituración primaria, a la operación 3 trituración secundaria y a las operaciones 4 y 5 trituración fina y polvorienta respectivamente.

El premachaqueo se logra usualmente mediante aparatos de mandíbulas y aparatos giratorios.

El machaqueo y la fabricación de gravas se logran con el uso de aparatos de mandíbulas, giratorios, de percusión (martillos) y de cilindro.

La trituración y la pulverización se logran con el empleo de aparatos giratorios, cilindros, martillos, barras y bolas.

Aparatos utilizados en la clasificación de los materiales

La clasificación de los materiales es necesaria para obtener, por clasificación y mezcla, las granulometrías exigidas. Se realiza a partir de las demandas de los clientes que consumirán dichos materiales para ciertas obras de hormigón.

La clasificación puede realizarse mecánicamente mediante cribas de discos, trómpes cilíndricos o cribas planas vibratorias, pero se reconoce generalmente que por debajo aproximadamente de 2.5 mm, prácticamente no se pueden clasificar las arenas con precisión. Es importante conseguir la granulometría deseada en la parte de los finos llegando, en ciertos casos, hasta 0.15 ó 0.06 mm. Esto se logra mediante el empleo de separadores hidráulicos o por selectores de aire.

Existen diversos tipos de clasificaciones:

Clasificación mecánica: por cinta transportadora y parrillas, por cribas de discos, por trómpes (tambores de chapas perforados) cilíndricos y por cribas planas vibratorias.

Clasificación por vías hidráulicas (lavado): por tornillo sin fin, cribas hidráulicas, de rastrillos, hidrociclones, centrífugas hidráulicas y tambores lavadores.

Selectores de aire (eliminación del polvo): filtros de mangas, electrofiltros, ciclones y otros menos utilizados.

Los esquemas de trituración (molienda) pueden contener las siguientes operaciones de clasificación:

- a. Clasificación previa.
- b. Clasificación de control en un ciclo cerrado por completo de trituración.
- c. Clasificación en un ciclo cerrado parcialmente de trituración.
- d. Clasificación de verificación del desagüe.
- e. Clasificación de verificación de arenas.

La clasificación previa se aplica para aumentar el rendimiento del triturador, reducir el enlodamiento, separar en un producto aislado las lamas iniciales y los componentes fácilmente triturables de la mena (si es preciso concentrarlo en un ciclo aparte).

En un ciclo cerrado, la clasificación de control se utiliza para verificar el grosor del producto triturado, elevar el rendimiento del triturador, reducir el enlodamiento del control de un producto durante la molienda.

Cribado

Las máquinas y dispositivos para clasificar por clases de tamaño a través de una superficie con orificios se llaman cribas, las cuales tienen una o varias superficies de trabajo (de cribado), correspondientes a una o varias cajas que realizan movimiento de vaivén o de sacudidas. En algunas cribas, la superficie de cribado está formada por discos rotativos (cilindros), situados paralelamente en varias filas. Para cribar un material grueso a veces se utilizan rejillas inmóviles, con inclinación suficiente para que el material se deslice libremente por ellos.

En el esquema tecnológico de enriquecimiento y en la preparación de minerales para su reelaboración se practican las siguientes formas de cribado: individual, preparatorio, y auxiliar.

Proceso de cribado: cuando el material ingresa en la criba se llama inicial, el que queda en ella, producto sobre la rejilla (superior), y el que cae por los orificios de la criba,

producto bajo la rejilla (inferior). Cribando un material consecutivamente en n cribas se obtiene n^{+1} productos. En este caso, uno de los productos del cribado anterior sirve como material inicial para el siguiente cribado.

Escala de cribado o de clasificación: se le llama a la serie de sucesivas magnitudes absolutas entre los orificios de las cribas anteriores y los orificios de las cribas siguientes. Ej. Para la escala de clasificación 100, 50, 25, 12.5, 6.25, la escala de cribado es igual a 2.

Granos: se consideran cualquier partícula de un material, desde los trozos gruesos hasta las partículas más diminutas.

El cribado individual es en el que se realiza la selección por clases de los productos acabados, que serán enviados a los consumidores.

El cribado auxiliar es el que se aplica en relación con las operaciones de trituración, para separar por grosores el producto acabado ante de triturarlo y para controlar el grosor del producto triturado. La primera forma de trituración se denomina con frecuencia trituración previa y la segunda trituración de control o comprobación. En la práctica de cribado de minerales y materiales se emplean cribas que se subdividen en los grupos siguientes: cribas fijas de barrotes, de discos, de tambores giratorios, planas de vaivén, semi-vibratoria (giratorias), vibratoria con cajas de oscilaciones rectilíneas, vibratorias con vibraciones circulares de la caja y curvilíneas y planas.

Unos de los clasificadores más utilizados en las plantas de procesar áridos para separar con un lavado final de la arena, son los hidromecánicos, donde se le añade a la acción del agua la de elementos mecánicos móviles.

El principio de funcionamiento es el siguiente: en una cuba inclinada, cerrada en la parte inferior, se sitúa un dispositivo mecánico como una espiral de Arquímedes, una espiral de caucho o raqueta de movimiento alternativo que asegure la agitación de la mezcla a tratar, así como la elevación de los productos decantados en el agua que circula en la cuba. El dispositivo tiene una zona de turbulencia en las proximidades de la alimentación; una zona de sedimentación; y una zona de corrientes de superficie que conduce al desbordamiento de los granos más finos.

Aparatos utilizados en la molienda de los minerales

En las plantas de preparación de materiales para la construcción (áridos), entre los molinos con cuerpos desmenuzadores de acero, se utilizan preferentemente: los de barras, de bolas con descargas por el emparrillado y de bolas con descargas central.

Los molinos de barra proporcionan un rendimiento más elevado que los de bolas, cuando la molienda se efectúa hasta (1 – 3 mm), pero no pueden funcionar con eficacia si se requiere obtener un producto más fino. Los primeros se utilizan con amplitud para la trituración gruesa (0.5 – 3 mm), de menas con diseminación fina, que se concentran mediante procesos de gravitación y magnetismo.

Entre los molinos de bolas, los más difundidos son los que se descargan por el emparrillado. Su rendimiento es mayor y despacha un producto triturado con menor contenido de lana que los de descargas central, el rendimiento específico de los trituradores con descargas por el emparrillado es de 10% a 15% mayor que el de los trituradores con descarga central. Las insuficiencias de los molinos con descargas por el emparrillado consiste en la relativa complejidad de su estructura y por esta causa, el costo es más elevado por unidad de masa y por unidad de volumen útil. Su explotación es más compleja y cara.

En cuanto a los molinos con descarga central, tienen como insuficiencia un menor rendimiento específico y mayor enlodado de los productos que se estructuran. Deben instalarse en aquellos casos en que la trituración excesiva del producto es conveniente para su maquinado posterior. Debido a que el rendimiento del triturador es directamente proporcional al contenido de la clase gruesa en este, la importancia tecnológica de la carga de circulación consiste en que permite elevar el contenido del tamaño grande en el triturador.

1.4. Propiedades físico - mecánicas de los recursos en los yacimientos o canteras

Gupta (2006) y Kelly (1982) plantean que un adecuado conocimiento de las propiedades de los materiales a utilizar es de fundamental importancia en la construcción, mantenimiento o reparación de una obra de arquitectura o ingeniería. Pero no menos importante es este aspecto, en su etapa de diseño y proyecto. El desconocimiento o conocimiento incompleto de las posibilidades y limitaciones de los materiales a utilizar, es decir de sus propiedades, puede traducirse en una imposibilidad de ejecutar correctamente el diseño previsto y, por lo tanto, en el abandono parcial o total del proyecto. Por otra parte el desconocimiento o el

conocimiento incompleto de las propiedades de los materiales traen como consecuencia la limitación del proyectista para el desarrollo de su idea, dada su inseguridad sobre las posibilidades de realización de su concepción y la performance en servicio de la obra.

1.4.1. Características de los materiales procesados

Los materiales susceptibles a su empleo en la industria de la construcción son muy diversos, desde la arcilla para la fabricación de cementos, de ladrillos y de otros productos moldeados en frío o productos cerámicos sometidos a cocción, hasta las arenas, gravas, piedra para sillería y escollera de gran tonelaje para presas y escolleras para obras marítimas.

En la extracción de algunos como la arcilla blanda, la arena y gravas se utilizan los procedimientos generales de movimiento de tierras.

Por el contrario, para el conjunto de los otros productos rocosos como los materiales para firmes de carreteras, áridos para hormigones, bloques naturales y gravas en bruto, el problema de la extracción puede abordarse de forma industrial.

En la industria de la construcción se utilizan las rocas de la siguiente forma:

- ✓ En bloques naturales de 100 kg a 15 o más toneladas, en los macizos de escollera que constituyen ciertas obras o como revestimiento de protección de orillas o taludes, especialmente en obras marítimas o fluviales.
- ✓ En piedras labradas de 100 kg a varias toneladas, o en mampuestos de 15 a 40 kg en las obras de albañilería.
- ✓ Como áridos, que son materiales a granel de pequeñas dimensiones que van desde polvo con partículas de diámetro inferior a 0.08 mm, a gravas y bolos de diámetro superior a los 100 mm, según la clasificación que corresponde a la norma P 18-304 de 14 de mayo de 1941.

1.4.2. Propiedades físico - mecánicas de los áridos procesados

El yacimiento de Grava – Arena del Rio Sagua, se caracteriza desde el punto de vista geológico por estar constituido por una mezcla de grava – arena – arcilla, típica de depósitos de terrazas de ríos de alta capacidad de arrastre, demostrado por el alto contenido de grava que lo compone según Rodríguez et al. (2008).

Estos depósitos son aluviales de poco transporte, es decir estos sedimentos han tenido poco curso de rodamiento, por lo que el contenido de grava es elevado.

La grava y arena están constituidas desde el punto de vista mineralógico por fragmentos de andesita, basalto, algunas dioritas y en mucha menor escala de calizas y tobas (10 – 15 %).

1.4.3. Características cualitativas de la materia prima

El yacimiento en cuestión se caracteriza por estar constituido en la zona 15, por una mezcla gravo – arenosa – arcillosa con un 20,2 % de polvo, limo y arcilla y un 79,8 % de grava – arena en la cual el 55,9 % es de grava y el 44,1 % de arena. Para el análisis de la calidad del yacimiento, bloque y pozo se procedió además al cálculo de los parámetros de calidad, con la determinación del porcentaje de grava, arena, desperdicios, polvo, limo-arcilla y el cálculo de la arena beneficiada, módulo de finura y calidad, según el cumplimiento de la granulometría (NC 054 00-78). La caracterización de la materia prima y el resumen de las calidades por bloques de la zona 15 se muestra en las tablas 1.1 y 1.2 del anexo 1.1 respectivamente.

La arena de esta zona cumple con los requisitos de calidad, solo que, referente a los tamices, los porcentos adecuados se pueden obtener reduciendo el retenido en una relación 2,36 del producto beneficiado. La grava por su parte tiene una masa volumétrica por encima de 2,5 g/cm³, absorción menor de 3 %, en general menor que 2,0 % y marca 800, que es una media que incluye análisis realizados a diferentes rocas, donde la grava es la roca principal, la más representativa, por lo que esta materia prima se puede utilizar conjuntamente en la producción de mezclas de hormigón de mediana y alta resistencia partiendo de que la grava debe sufrir un proceso de molienda. Las características geológicas de la Zona Limba son similares a las de la Zona 15, ya que en realidad es una prolongación de esta última, situada a poca distancia, con la diferencia que al encontrarse los áridos dentro del cauce ya se extraen con poco contenido de arcilla, es decir se produce un prelavado.

En el informe geológico no aparece la composición química, dada la gran variedad de rocas que componen la materia prima.

Según los ensayos realizados en el micro laboratorio del CIDMC a los productos de la Zona 15 y sobre todo de la Zona Limba, por ser la zona de donde se ha extraído la

mayor cantidad de áridos, todas las producciones han clasificado como conforme, lo cual ha sido reflejado en los diferentes Balances de Reservas.

En el anexo 1.2 se muestran diferentes tablas en las que se muestran las investigaciones tecnológicas y características cualitativas de los productos finales.

Todos los datos reflejados anteriormente se tomaron del informe realizado por la ENIA titulado “Control de calidad a materiales de construcción, centros de producción zona Mayarí y Sagua de Tánamo” en el año 2002.

Áridos

Los áridos se emplean especialmente en la fabricación de morteros y hormigones, en la construcción de carreteras y como balasto para las vías férreas.

Dentro de los áridos, es quizás el árido fino o arena el más importante, por ser el que mayor volumen ocupa tanto en los hormigones hidráulicos, las mezclas asfálticas, morteros y prefabricados de todo tipo, correspondiéndole además el rango granulométrico más amplio. Por este motivo las arenas requieren ser procesadas con cuidado, precisándose en ocasiones, especialmente cuando van a ser empleadas en la fabricación de hormigones de alta resistencia o responsabilidad, una clasificación interna en al menos dos fracciones para ajustar su granulometría a las necesidades de aplicación.

En la nueva normativa europea, se denominan finos a la fracción granulométrica inferior al tamaño 0.063 mm existentes en un árido. El contenido de finos en la arena se fija en 6% para áridos redondos y triturados no calizos y de 10% - 15% para áridos triturados dependiendo del ámbito de aplicación. Este valor se fijaba hace pocos años en un 5% de pasantes por el tamaño 0.074 mm (200 mallas), en la mayoría de los países.

Arena es el resultado de la desintegración o trituración natural o artificial de las rocas, en forma de granos o partículas redondas, angulosas o laminares, que corresponden a un tamaño máximo de 4.76 mm y como mínimo 0.149 mm.

Grava es la roca triturada comprendida en las siguientes fracciones:

Grava de 3/8: de 5/13 mm y 5/10 mm.

Grava de 3/4: de 13/19 mm y 5/19 mm.

Grava de 1½: de 19 mm y 38 mm.

1.5. Conclusiones del capítulo

- 1) Se pone de manifiesto que los equipos utilizados en los esquemas tecnológicos de las procesadoras de áridos cubanos tienen bajo nivel de utilización de su capacidad de carga (hasta 30 %) y grandes pérdidas de energía dado por el bajo nivel de aprovechamiento de su potencia instalada e inadecuada potencia de diseño.
- 2) Las empresas relacionadas con la selección y explotación de las plantas procesadoras de áridos de construcción, no tienen establecida una metodología y procedimiento que permita la selección y diseño de los equipos acorde a las capacidades demandadas y con la potencia requerida desde el punto de vista energético.
- 3) El diseño actual de los equipos empleados para el procesamiento de los áridos procedentes de las canteras se realiza con el empleo de metodologías que no relacionan los parámetros que definen las propiedades físico-mecánicas de las rocas y aluviones extraídos.
- 4) Se establece un sistema gnoseológico actualizado sobre la caracterización de las propiedades físico-mecánicas y las canteras de las rocas y aluviones que identifican los áridos cubanos.
- 5) Se evidenció la necesidad de modelar los parámetros tecnológicos que caracterizan los equipos utilizados en los esquemas tecnológicos de las procesadoras de áridos cubanos, para lograr racionalidad económica y utilización energética óptima de sus accionamientos.

CAPÍTULO II. Materiales y métodos

2.1. Introducción

En el presente capítulo se plantea un nuevo enfoque del método de cálculo para plantas procesadoras de áridos para la producción local de áridos de construcción, la fundamentación teórica del método y se lleva a cabo la descripción del algoritmo propuesto y la extensión del método.

Se establece la determinación del régimen de trabajo de las plantas procesadoras de áridos para la construcción, cuáles son los principios de selección de los esquemas tecnológicos, así como la caracterización de los parámetros de los equipos, que conforman los esquemas tecnológicos de las plantas procesadoras de áridos.

Se identifican los tipos de equipos y su clasificación que se emplean, de acuerdo a los requerimientos tecnológicos, en las plantas procesadoras de áridos cubanos, entre los que se inciden las máquinas de cribado, los trituradores de trituración primaria y secundaria; de mandíbulas, de cono de trituración gruesa, media y fina, de beneficio y clasificación como es el caso de los hidrociclones y tornillos sin fin y los equipos de transporte continuo interno como los transportadores de banda.

El **objetivo** del capítulo es perfeccionar la metodología utilizada para determinar con precisión los parámetros que caracterizan los equipos que conforman los esquemas tecnológicos de las plantas procesadoras de grava y arena a partir de áridos cubanos. En específico:

1. Establecer un nuevo enfoque del procedimiento empleado para determinar con precisión los parámetros que caracterizan los equipos que conforman los esquemas tecnológicos de las plantas procesadoras de grava y arena a partir de áridos cubanos,
2. Modelar los parámetros de diseño y explotación de los principales equipos que conforman los esquemas tecnológicos de las plantas procesadoras de grava y arena para áridos cubanos

2.2. Nuevo enfoque del método de cálculo para plantas procesadoras de áridos para la producción local

En este epígrafe, siguiendo las ideas de Legrá y Silva (2009), se desarrollará la fundamentación del método, su algoritmo y su extensión es decir el conjunto de casos donde es aplicable el método.

2.2.1. Fundamentación teórica del método

En la fundamentación del método de cálculo se asume que:

1. Una planta procesadora de árido para la producción local será considerada como una secuencia de procesos de extracción, carga, transporte, clasificación, reducción de tamaño y beneficio de los áridos de construcción. Cada proceso se identificará por una productividad, por las propiedades mineralógicas, físico-mecánicas y reológicas de los áridos procesados; a la entrada y a la salida.
2. Selección del método extracción, de carga y de transporte de los áridos de las canteras que suministran a las plantas procesadoras de áridos cubanos, a partir de los estudios geológicos locales.
3. El principio de selección de los esquemas tecnológicos de las plantas procesadoras de áridos locales cubanos sobre la base de las operaciones de trituración, clasificación, beneficio y su relación con los parámetros tecnológicos de los equipos e instalaciones que la conforman y la selección de los ciclos del proceso tecnológico -abierto, semi-abierto y cerrados- según se requiera, de las operaciones de preparación mecánica de los áridos.
4. El diseño –selección- de los equipos e instalación que conforman cada proceso se basa en los factores técnicos siguientes:
 - a) Propiedades relacionadas con el proceso y transportación de la carga.
 - b) Productividad de la máquina.
 - c) Dirección, recorrido y forma del movimiento de la carga en el proceso.
 - d) Métodos para depositar la carga en los diferentes puntos de las máquinas.
 - e) Características del proceso tecnológico y su relación con el producto que se elabora.
 - f) Condiciones específicas del medio.

Estos factores permiten evaluar la máquina desde un punto de vista cualitativo.

5. Elección del tipo de equipo según el esquema tecnológico identificado para la planta.

6. La selección del equipo óptimo entre los escogidos, debe hacerse sobre una base cuantitativa, desarrollando los cálculos de las siguientes variantes y comparándolos según un conjunto de índices, como son:
 - a) El esfuerzo que hay que aplicar al sistema impulsor para mover 1t de carga;
 - b) La energía que gasta el equipo para desplazar 1t de carga a una distancia de 1m;
 - c) La relación entre el peso lineal de las partes móviles del transportador y el peso lineal de las cargas;
 - d) El costo del desplazamiento de 1t de carga una distancia de 1 m.
7. El establecimiento de la interrelación entre las propiedades físico-mecánicas y reológicas de los áridos de construcción que determinan los parámetros tecnológicos -geométricos, dinámicos y de capacidad- de los equipos, que conforman el esquema tecnológico, de las plantas procesadoras de áridos locales cubanos.
8. Se determina el resto de los parámetros tecnológicos de los equipos que conforman el esquema tecnológico de las plantas procesadoras de áridos locales cubanos considerando los factores técnicos señalados en la pleca 3 de este epígrafe.
9. Identificar las restricciones del proceso tecnológico para la preparación mecánica de los áridos de construcción, consideradas durante la determinación de los parámetros tecnológicos de los equipos que conforman la instalación, que posibiliten obtener la productividad (Q) solicitada, garantizan un diseño energético óptimo.

2.2.2. Descripción del algoritmo propuesto

1. Establecer los requerimientos tecnológicos para la obra civil:
 - Topografía del terreno.
 - Cimientos.
 - Estructuras según requerimientos tecnológicos.
2. Establecer los requerimientos tecnológicos del equipamiento que conforman las plantas procesadoras de áridos para la construcción:

- a) Punto de inicio y punto final.
 - b) Productividad deseada por la planta.
 - c) Rango de tiempos de retención posibles.
 - d) Productividades nominales de los equipos e instalaciones.
3. Establecer las propiedades de los áridos a procesar, especialmente la masa volumétrica, composición granulométrica, abrasividad, humedad, composición química y mineralógica (componentes de arcillas y otros contaminantes), coeficiente de esponjamiento, ángulo de deslizamiento ψ y los ángulos de reposo tangencial ϕ_t y máxima ϕ_m (Valotkoscii (1990)) y otras. Estas propiedades se consideran desde las canteras hasta las exigidas por el proceso de construcción al que están destinados los áridos.
4. Características técnicas de los equipos seleccionados
- Tipo de equipo.
 - Características técnicas: potencia nominal, capacidad nominal, régimen de trabajo, explotación técnica, entre otras.

2.2.3. Extensión del método

Siempre que se conozca la secuencia de los procesos de extracción, carga, transporte, clasificación, reducción de tamaño y beneficio de los áridos de construcción y que cada proceso se identifique por una productividad, las propiedades mineralógicas, físico-mecánicas y reológicas de los áridos locales a procesar, tanto a la entrada como a la salida, entonces se podrá aplicar el método propuesto. Se recomienda realizar la automatización del método.

2.3. Determinación del régimen de trabajo de las plantas procesadoras de áridos

Productividad de los equipos

Se llama productividad a la carga procesada (transportada, clasificada, triturada, secada, reducida, calcinada, entre otros) por unidad de tiempo y se expresa en unidades de masa (t/h) o volumétrica (m³/h), esta última para el destape y en la industria de materiales de construcción.

Se distinguen tres tipos de productividad:

Productividad teórica: se da en el certificado de la máquina y se denomina así a la productividad que se alcanza en el trabajo continuo de la máquina con una carga total.

$$Q_{TEOR} = \frac{V}{t_C} ; \text{ m}^3/\text{h} \qquad Q_{TEOR} = \frac{q}{t_C} ; \text{ t/h} \qquad 2.1$$

Donde, V: volumen geométrico de la cama del camión; m^3 y t_C : tiempo del ciclo; h.

Para las máquinas de acción continua:

$$Q_{TEOR} = 3600 F_0 \cdot v ; \text{ m}^3/\text{h} \qquad \text{ó} \qquad Q_{TEOR} = 3600 F_0 \cdot v \cdot \gamma ; \text{ t/h} \qquad 2.2$$

Donde, F_0 : Área de la sección transversal en m^2 , v : velocidad de movimiento en m/s , y γ la masa volumétrica en t/m^3 .

Productividad técnica: se determina tomando en consideración los recesos inevitables por causas técnicas como por ejemplo: traslado de tolva, traslado de excavadora, recesos tecnológicos, coeficiente de llenado, coeficiente de esponjamiento, entre otros.

$$Q_{TEC} = Q_{TEOR} K_T, \text{ se deduce } Q_{TEC} < Q_{TEOR} \qquad 2.3$$

Donde, K_T : coeficiente que tiene en cuenta todas estas condiciones. $K_T < 1$

Productividad de explotación: se determina tomando en consideración los recesos organizativos y tecnológicos durante el turno: cambio de turno, revisión de la máquina, lubricación, rotura, llegada tarde de los operadores, merienda y otros.

$$Q_{EXP} = Q_{TEC} K_{UT}, \text{ por tanto, } Q_{TEOR} > Q_{TEC} > Q_{EXP} \qquad 2.4$$

Donde, K_{UT} : coeficiente de utilización del tiempo, este se tiene en cuenta para una jornada.

Según las estadísticas para los tractores y excavadora se toma 0,6 – 0,8. El cálculo de los principales parámetros de la producción se lleva a cabo a partir de la productividad teórica, por esta causa esta productividad también se llama de cálculo.

Para determinarla se utiliza la siguiente fórmula:

$$i_t = 365 - i_{clim} - i_{fest} - i_{rep} \qquad 2.5$$

Donde, i_t : número de días de trabajo al año, 365: número de días del año, i_{clim} : número de días perdidos por condiciones climatológicas, i_{fest} : número de días festivos, feriados entre otros, i_{rep} : número de días en reparaciones y mantenimiento.

El tiempo real de trabajo de la máquina en un turno (t_{TUR} en h) se determina por:

$$t_{TUR} = t' - t_{REG} - t_{IMP} - t_{CAM\ TUR}; \text{ en (h)} \quad 2.6$$

Donde, t' : número de horas que dura el turno, t_{REG} : horas reglamentadas, t_{IMP} : pérdidas de horas por imprevistos, $t_{CAM\ TUR}$: horas perdidas durante el cambio de turno.

El número de horas de trabajo al año: $i_A = t_{TUR} \cdot Z$

Donde, Z : número de turnos, i_T : número de días de trabajo al año,

$$\text{La productividad horaria de cálculo: } V_{CAL} = \frac{VaKi}{ia}; \text{ m}^3/\text{h} \quad 2.7$$

Donde, Va : es la productividad anual, Ki : coeficiente de irregularidad.

$$Q_{CAL,h} = \frac{Qa \cdot Ki}{ia}; \text{ t/h} \quad 2.8$$

$$Ki = \frac{Q_{\max ima}}{Q_{media}} \quad 2.9$$

El coeficiente Ki depende de la clasificación del personal, el estado de la máquina, el estado y la influencia de las condiciones climatológicas sobre los equipos y de la organización del trabajo.

Para canteras y plantas de beneficio: $Ki = 1,15 - 1,25$

Para labores subterráneas: $Ki = 1,25 - 1,50$

La determinación de la productividad del equipo de trabajo cíclico y continuo se lleva a cabo de manera diferente.

Para una productividad dada, cuando aumenta la velocidad disminuye la carga por unidad de longitud y varían las dimensiones transversales de las máquinas. Por esta causa tanto la velocidad como las dimensiones de la máquina se eligen en función del tipo de esta, el órgano de tracción, características de la carga, condiciones de carga, exigencia de durabilidad y fiabilidad de la máquina. Para cualquier cálculo este es el punto de partida.

2.4. Principio de selección de los esquemas tecnológicos

El esquema de preparación mecánica de áridos que necesitan las operaciones de trituración, cribado y molienda se crea a partir de las propiedades de la mena (en algunos territorios las piedras de potrero), sobre la base de los resultados de investigaciones de la concentrabilidad, las características tecnológicas de la

maquinaria, que es posible aplicar, y de la experiencia de transformación de materiales con propiedades y composición análogas. En el proyecto de la parte de minería se determina la composición granulométrica del material a procesar, mientras que la composición granulométrica del árido, que llega a la primera etapa de beneficio, así como el propio procedimiento de ésta, se establecen en función de los ensayos de beneficiabilidad.

Las propiedades físico-mecánicas de la mena determinan el procedimiento de fragmentación, cribado y molienda y los tipos de aparatos para realizar estas operaciones. Influyen también sobre la elección del esquema, las circunstancias generales para la realización del proyecto: condiciones climática de la región, procedimiento de explotación del yacimiento y de la alimentación de la mena a la planta y otros muchos, por ejemplo, cuando la mena es arcillosa y húmeda, pegajosa y no transportable, es posible que surja la necesidad del lavado de la mena. A veces, es preciso separar los menudos y el almacenaje independiente de la mena en trozos.

Para referirnos a los fundamentos de los esquemas tecnológicos para las canteras de áridos, en la trituración gruesa se pueden utilizar trituradoras de mandíbulas y de conos invertidos, mientras que para la trituración media, trituradoras de conos con vértices de igual dirección y de tambor, y para la trituración fina; trituradoras de impacto o martillos.

Las operaciones de trituración se emplean al preparar los áridos para su molido en molinos o bien con el fin de prepararlos directamente para las operaciones de concentración de componentes útiles. En los esquemas de trituración se incluyen, por regla, las operaciones de cribado previo y de control, que se relacionan con aquella operación de trituración en que se alimenta el rechazo de la criba.

Las etapas de quebrantadura tienen cuatro variedades:

- 1) operaciones de cribado previo, trituración y cribado de control;
- 2) Operaciones de cribado previo y trituración;
- 3) Operaciones de trituración y cribado de control;
- 4) Operaciones de trituración.

En los esquemas de fragmentación se incluyen una, dos, tres y más etapas de quebrantadura.

Durante la trituración sin cribado de control de menas de dureza media en trituradores de conos para finos, la salida del producto excesivo alcanza el 60%, mientras que el grosor máximo convencional del producto triturado supera 4,5 a 5 veces la anchura del orificio de salida. Al tratar menas duras, la salida del producto excesivo aumenta hasta el 85%, para el orificio de salida.

Los esquemas de trituración (molienda) pueden contener las siguientes operaciones de clasificación. Clasificación previa; clasificación de control en un ciclo cerrado por completo de trituración; clasificación en un ciclo cerrado parcialmente de trituración; clasificación de verificación del desagüe; clasificación de verificación de arenas.

Según Rázumov y Perov (1985) las operaciones de clasificación pueden ser:

- ✓ La clasificación previa;
- ✓ En un ciclo cerrado;
- ✓ La clasificación en un ciclo parcialmente cerrado en los esquemas con varias etapas de trituración, es sumamente importante en los esquemas de dos etapas, el procedimiento de distribución del trabajo de trituración entre el equipo de la primera y la segunda.
- ✓ La clasificación de verificación del desagüe se emplea en aquellos casos, cuando con la trituración en una etapa hay que obtener un producto final fino o efectuar la concentración por etapas de la mena, así como al instalar un hidrociclón para la clasificación, las arenas más gruesas se separan previamente en el clasificador mecánico.
- ✓ El objetivo de la clasificación de verificación de las arenas consiste en reducir en ellas el producto de grosor inferior (más fino).

2.5. Parámetros de los equipos que conforman los esquemas tecnológicos de las plantas procesadoras de áridos

En este epígrafe se analizarán los distintos tipos de máquinas de cribado, trituradores de mandíbulas, trituradores de cono de trituración media, los equipos de transporte continuo (por tornillo sin fin y transportadores de banda) utilizados en los esquemas tecnológicos para la preparación mecánica y el beneficio de los áridos en la provincia Holguín.

2.5.1. Máquinas de cribado

Según Bouso (1999) y (2003) existen varios métodos de cálculo para las cribas, los cuales se pueden resumir en:

- 1) Método de alimentación, basado en la masa sólida por unidad de tiempo, que puede alimentarse a una superficie específica de malla de una determinada luz de paso.
- 2) Método pasante, basado en la masa sólida por unidad de tiempo, que pasa por una superficie específica de malla de una determinada luz de paso.

En el cálculo se utilizan diferentes **factores de corrección que consideran:**

En general el parámetro principal a determinar es la superficie de cribado (S):

$$S = \frac{Q}{Q_{esp} \cdot f_t} \cdot f_s ; m^2 \quad 2.10$$

Donde, Q: productividad de alimentación a la superficie de cribado; t/h, Q_{esp} : productividad específica por unidad de superficie de cribado; $t/(m^2 \cdot h)$, f_t : factor de corrección total de la Q_{esp} , f_s : factor de servicio; que para el cribado fácil es $f_s=1,2$ y para el cribado difícil $f_s=1,4$. La productividad específica de las cribas se puede observar en la tabla 2.1 en el anexo 2.1

2.5.1.1. Método híbrido pasante

El factor de corrección de la densidad aparente f_d se determina por:

$$f_d = \frac{\rho_a}{1,6} \quad 2.11$$

Donde, ρ_a : densidad aparente; t/m^3 y 1,6 es la densidad específica; t/m^3 .

El factor de rechazo f_r se toma según la tabla 2.2 del anexo 2.1.

La capacidad básica considera un producto de alimentación con un 25 % de rechazo, por lo que cualquier otro porcentaje, significa que debe corregirse la capacidad básica con un factor f_r , lógicamente $f_r = 1$ para un valor del rechazo de $R = 25 \%$.

Ángulo de inclinación de la criba

Generalmente para cribados medios y gruesos se emplean cribas inclinadas, con una inclinación normal de 20° , aunque en algunas cribas puede ajustarse dicha inclinación, disminuyendo esta para cortes más finos y aumentando para cortes más gruesos. Existen cribas para clasificaciones finas con inclinaciones entre 5° y 15° . Los cálculos

de la capacidad básica han sido realizados en cribas inclinadas por lo cual el factor a aplicar en ese caso sería $f_i = 1$.

Anchura de la criba

Independientemente del cálculo de la superficie necesaria, la criba debe tener una anchura mínima para que la capa de material no tenga un espesor elevado, que impida que las diferentes partículas tengan acceso a la malla.

El ancho mínimo de una criba puede calcularse, en base al espesor máximo de capa sobre la malla, considerando el rechazo o fracción gruesa, que es el material que forma la capa sobre la malla en el extremo de salida, y la velocidad media de avance de las partículas en una criba vibrante convencional.

El espesor de capa está relacionado con la luz de la malla, que es normalmente de 2 a 4 veces la luz L_m , aunque conviene cotejar el valor calculado, con el tamaño máximo de partícula, pues el espesor de capa no puede nunca ser inferior al tamaño máximo. La velocidad de avance varía en dependencia del tipo de criba, pero suele estar entre 20 m/min y 40 m/min.

$$A_m = 116 \cdot \left(\frac{T \cdot R}{L_m \cdot f_d} \right) \quad 2.12$$

Donde, A_m : anchura mínima de la criba; mm, T: tonelaje de alimentación a la malla; t/h, R: porcentaje de rechazo; expresado en decimal, L_m : luz de la malla; mm, f_d : factor de densidad.

Relación de parámetros dinámicos

Andreiev y Perov (1980) recomiendan para las cribas vibratorias inclinadas con oscilaciones circulares o próximas a ellas, la fórmula empírica siguiente para la determinación de los parámetros óptimos de las oscilaciones de la caja:

$$n = 265 \sqrt{\frac{l}{r}} \quad 2.13$$

Donde, n: frecuencia de las oscilaciones; rev/min, l: dimensión del agujero del tamiz; m, r: radio de las oscilaciones; m.

Para las cribas vibratorias horizontales con oscilaciones lineales:

$$n = \frac{5(1+12,51)}{a} \quad 2.14$$

$$a = 0,004 + 0,14 l$$

Donde, a: semiapertura de mecedura, m.

Para las **cribas fijas de barrotes** el rendimiento varia proporcionalmente al ancho de la rendija. El área necesaria de la rendija de la criba de barrotes se puede determinar por la fórmula:

$$F = \frac{Q}{2,4 \cdot l}, \text{ m}^2 \quad 2.15$$

Donde, Q: rendimiento de la criba conforme al material inicial; t/h, l: ancho de la rendija entre las barras; mm.

Las **cribas de tambor**, en dependencia de la forma de éste, pueden ser cilíndricas, cónicas o de tambor prismático, las cuales se conocen además como lavaderos. La superficie de trabajo del lavadero se compone de 6 u 8 tamices planos, que forman la superficie lateral de un prisma o de una pirámide truncada.

El diámetro del tambor oscila desde 500 hasta 3000 mm; el largo, desde 2000 hasta 9000 mm; el largo de una sección separada del tambor va desde 800 hasta 1500 mm. Las dimensiones de los lavaderos son: 1000 a 1100 mm de diámetro; 3500 a 6000 mm de largo.

La frecuencia de rotación, con la cual la capa de material contigua a la superficie del tambor comienza a girar junto con él, se denomina crítica. La frecuencia de rotación crítica de la criba n_{crit} se determina como:

$$n_{crit} = \frac{30}{R}; \text{ rev/min} \quad 2.16$$

Donde, R: radio del tambor; m.

La frecuencia de rotación de las cribas de tambor se elige menor que la frecuencia crítica en los límites por la siguiente expresión:

$$n = \frac{8}{\sqrt{R}} \div \frac{14}{\sqrt{R}}; \text{ rev/min} \quad 2.17$$

El rendimiento de las cribas de tambor en 1 m² del área de la criba y en 1 mm de la dimensión de los agujeros, constituye en el cribado sin lavado de 0,25 a 0,3 t/h y en la húmeda, alrededor de 0,45 t/h.

Las cribas de tambor empleadas para el lavado, la desintegración y el cribado con lavado de los minerales extraídos de placeres, que contienen arcilla, se hacen de armadura pesada y pueden recibir pedazos de grosor de hasta 200 mm. Para la intensificación de la acción de lavado se bombea el agua al interior de la criba con una

presión de 2 a 5 kgf/cm² (196 kN/m² a 493 kN/m²). En el interior del tambor se instalan anaqueles y se cuelgan cadenas. La frecuencia de rotación del lavadero se aumenta hasta $n = \frac{20}{\sqrt{R}}$; rev/min. El consumo de agua en el lavado depende de las propiedades del mineral y oscila desde 2 hasta 5 m³/t. El consumo de agua en el cribado con lavado es de 1 a 1,5 m³/t de mineral.

Para las **cribas planas de vaivén** la frecuencia angular de la manivela:

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \quad 2.18$$

Donde, n: frecuencia de rotación del árbol motor en rev/min.

La velocidad circular de la manivela:

$$v = \omega r = \frac{\pi r n}{30} \quad 2.19$$

Donde, r es el radio de la manivela (la excentricidad).

El ángulo de giro de la biela φ , $\varphi = \omega t$. Aquí t es el tiempo de giro en el ángulo φ del árbol.

La proyección de la velocidad de la manivela en el eje:

$$v_x = v \sin \varphi = \omega r \sin \varphi \quad 2.20$$

La aceleración centrípeta es

$$J = \omega^2 r \quad 2.21$$

Y su proyección sobre el eje x, es

$$J_x = \omega^2 r \cos \varphi \quad 2.22$$

La ecuación para determinar la frecuencia mínima de rotación del árbol motor $n_{\min}$, con la cual comienza en el punto muerto 0 el movimiento hacia arriba del material por el tamiz:

$$n_{\min} = 30 \sqrt{\frac{\tan(\psi + \alpha)}{r}}, \text{ rev/min} \quad 2.23$$

Donde, α : ángulo de inclinación de la caja de la criba, ψ : tangente del ángulo de rozamiento y la frecuencia angular.

La frecuencia n_2 con la cual comienza el movimiento hacia abajo por el tamiz 12.

$$n_2 = 30 \sqrt{\frac{\tan(\psi - \alpha)}{r}}, \text{ rev/min} \quad 2.24$$

La frecuencia de rotación del árbol motor n_3 con la cual es posible el desprendimiento del material en el punto muerto 12, es:

$$n_3 = \frac{30}{\sqrt{r \tan \alpha}}, \text{ rev/min} \quad 2.25$$

De este modo, el carácter del movimiento del material por la criba de vaivén se determina por la frecuencia de rotación del árbol del excéntrico y por la excentricidad. Generalmente estas cribas trabajan con régimen de desprendimiento de material n_3 .

La productividad se determina por su capacidad de transporte según el material inicial:

$$Q = 3600 B h v k \delta \quad 2.26$$

Donde, B es el ancho de la criba en metros (m), h: la altura del material sobre el tamiz de la criba; m, v: la velocidad de transmisión del material por el tamiz en m/s, k: el coeficiente de mullido del material, δ : la densidad del material en t/m^3 .

En las cribas de vaivén rápidas la velocidad de desprendimiento del material por el tamiz es de 0,1 a 0,2 m/s.

Cribas semivibratorias (giratorias)

Cuando en el movimiento de la caja de la criba por una trayectoria circular surge la fuerza centrífuga:

$$\frac{Mv^2}{e} = \frac{M\pi^2 e \cdot n^2}{30^2} \quad 2.27$$

Donde, M es la masa de la caja en movimiento con el material a cribar, v: la velocidad circular de la manivela, e: la excentricidad del árbol motor y n: la frecuencia de rotación del árbol.

La fuerza centrífuga radial de la inercia variable en dirección, transmitida a través de los rodamientos al bastidor fijo de la criba, podría provocar oscilaciones de las construcciones de apoyo. Para equilibrar esta fuerza, se fijan al árbol dos volantes con pesos de desequilibrio adicionales. El radio de rotación r del centro de gravedad y la masa de los pesos se eligen de tal modo que se cumpla la igualdad

$$\frac{M\pi^2 e \cdot n^2}{30^2} = \frac{2m \cdot \pi^2 \cdot r \cdot n^2}{30^2} \quad \text{implica que } Me = 2mr$$

Donde, m es la masa de uno de los pesos de desequilibrio.

La excentricidad del árbol de la criba es de 1,5 a 6 mm y la frecuencia de rotación de éste de 750 a 1000 rev/min.

Las cribas giratorias se emplean para el cribado de materiales de pedazos grandes (hasta 400 mm) en rejillas con agujeros de hasta 150 y 200 mm, también para el cribado de materiales de tamaño medio y fino. El mérito de estas cribas consiste en que tienen amplitud constante de las oscilaciones de la caja independientemente de la carga de material en la criba y pueden ser empleadas en condiciones muy pesadas de trabajo. Se instalan principalmente en las plantas de trituración y selección de minerales como el cascajo.

Cribas vibratorias con cajas de oscilaciones rectilíneas

Las cribas con vibrador de autobalanceo tienen una caja con uno o más tamices instalados sobre apoyos elásticos o suspendidos por medio de amortiguadores a una estructura sustentadora. En la caja se monta el vibrador de autobalanceo, que genera las oscilaciones de ella. El vibrador se compone de dos contrapesos que giran en árboles paralelos en sentidos opuestos y con un número igual de revoluciones.

Con cualquier posición de los contrapesos del vibrador, las fuerzas actúan a lo largo del eje x. Las componentes de la fuerza centrífuga de la inercia, que actúan por el eje y, se anulan mutuamente como fuerzas dirigidas contrariamente e iguales por su magnitud. Si designamos por φ el ángulo de rotación del árbol de cada descompensador, entonces la resultante a lo largo del eje x será:

$$2P_x = 2P_0 \cos \varphi = 2m\omega^2 R \cos \varphi \quad 2.28$$

Donde, m: masa de un descompensador; kg, ω : frecuencia angular de rotación del descompensador; s^{-1} , R: distancia desde el centro de gravedad del contrapeso hasta el eje de rotación; m.

Cribas vibratorias con vibraciones circulares de la caja

A las cribas vibratorias con vibraciones circulares de la caja pertenecen las cribas con vibrador descompensado simple y las cribas de autocentrado.

Cribas con vibrador descompensado simple: las vibraciones de la caja son provocadas por la fuerza centrífuga de la inercia que surge con la rotación de la masa en desequilibrio del descompensador (contrapeso).

El descompensador durante la rotación desarrolla una fuerza de inercia centrífuga en sentido radial:

$$P = \frac{\pi^2 n^2 r}{30^2} 2m \quad 2.29$$

Donde, m: masa de uno de los descompensadores; kg, n: frecuencia de rotación del árbol; rev/min, r: la distancia entre el centro de gravedad del peso del descompensador hasta el eje de rotación; m.

La fuerza centrífuga se puede representar descompuesta en dos componentes. Uno de ellos está dirigido perpendicularmente al plano de la caja de la criba por el eje de los resortes y el otro a lo largo del plano de la caja. El primer componente comprime y estira los resortes de apoyo de la caja, y el segundo compensa su rigidez en dirección perpendicular al eje. Como resultado, la caja de la criba describe una trayectoria elíptica. Todo el mecanismo propulsor participa en las oscilaciones de la caja, y, por eso, el radio de las oscilaciones depende de la correlación de las masas de la caja de la criba y de los contrapesos. En la región lejana a la resonancia, es justa la correlación:

$$am_c = 2rm, \quad \frac{a}{r} = \frac{2m}{m_c},$$

Donde, a: amplitud de las oscilaciones de la caja (el radio de los vaivenes circulares), m_c : masa de la caja cargada.

En este tipo de cribas si disminuye la carga aumenta la amplitud de las oscilaciones. En este caso la eficacia del cribado también puede empeorar a causa del deslizamiento libre y rápido por el tamiz de granos individuales de material a cribar.

La frecuencia de las oscilaciones en el cribado del material fino es de 1000 rev/min (el diámetro de la trayectoria circular es de 5 a 7 mm) y para el material grueso, de 750 rev/min (el diámetro de la trayectoria circular es de 12 mm). El ángulo de inclinación más común es de 15°. El mecanismo propulsor del árbol del vibrador se construye teniendo en cuenta que el eje del árbol, junto con la caja, describa una trayectoria circular.

Cribas de autocentrado: Debido a que el árbol gira sobre los rodamientos sujetos a la caja, y ésta posee una sustentación elástica, la presión del excéntrico del árbol sobre la caja es una fuerza interna del sistema. En ausencia de fuerzas externas, el centro de

masas del sistema debe mantenerse inmóvil, por eso, con la rotación del árbol la caja recibe un movimiento circular de cierto radio, con relación al centro de masas del sistema, en el plano vertical. Los descompensadores se eligen tales, que la fuerza centrífuga de su inercia compense a la fuerza centrífuga desarrollada por la rotación de la caja en el radio igual a la excentricidad, es decir:

$$Me = mR \quad 2.30$$

Donde, M es la masa total de la caja cargada, e la excentricidad del árbol, m es la masa de los descompensadores y R : la distancia desde el centro de masas de los descompensadores hasta el eje de rotación.

En este caso, la caja describe movimientos circulares en torno al eje $O - O$ y el eje del árbol, más exactamente, el eje de la polea motriz, se mantiene inmóvil en el espacio. De ahí que, a las cribas con este mecanismo propulsor, se les ha dado la denominación de “autocentradas”. Si las masas de los descompensadores son insuficientes, es decir, $Me > mR$, entonces la caja de la criba describirá trayectorias circulares de radio pequeño, menor que la excentricidad e . Más, si los pesos son demasiado grandes, entonces la caja recibe oscilaciones, el radio de las cuales será mayor que la excentricidad del árbol. En ambos casos el eje del árbol describe cierta circunferencia en torno al centro de masas del sistema.

Inclinaciones insignificantes de las masas “equilibradas”, es decir de la condición $Me = mR$, de los pesos en desequilibrio, provocan trayectorias circulares de radio pequeño del centro del árbol, que no ejercen influencia en el trabajo de la transmisión por correa desde el motor eléctrico. Sobre esta base se considera que las cribas de autocentrado no necesitan de una selección minuciosa de los descompensadores y esta es su ventaja esencial ante las cribas giratorias, en las cuales el balanceado escrupuloso de los descompensadores es imprescindible.

2.5.2. Trituradores de mandíbulas

En las trituradoras de mandíbulas el material se aplasta entre dos mandíbulas, una de las cuales es inmóvil. La mandíbula móvil está colgada con articulación de los ejes móvil e inmóvil y alternativamente se aproxima y aleja de la mandíbula inmóvil. Durante la aproximación de las mandíbulas, los pedazos del material que se encuentran entre éstas se trituran. Los movimientos de oscilación de las mandíbulas se crean con ayuda de un árbol excéntrico giratorio a través del mecanismo de transmisión. En

dependencia de la potencia del eje de la mandíbula móvil se diferencian las trituradoras de mandíbulas con suspensión superior e inferior. A continuación se describen los parámetros tecnológicos fundamentales de las trituradoras de mandíbula.

Ángulo de agarre de las trituradoras de mandíbula

Según Andreiev y Perov (1980), se llama ángulo de agarre de las trituradoras de mandíbula el ángulo entre las mandíbulas móvil e inmóvil. Este ángulo durante el trabajo de la trituradora cambia a consecuencia de la oscilación de la mandíbula móvil. El ángulo de agarre no puede superar un valor límite, para evitar la expulsión de los pedazos desde la cámara de trituración hacia el exterior. El ángulo de agarre límite es igual al doble del ángulo de rozamiento. Debe garantizar al agarre sin resbalamientos de los granos de material a procesar. Esto se garantiza cuando se cumple que:

$$\alpha < 2\varphi \quad \alpha_{menor} \cdot 2(\varphi) \quad 2.31$$

Es decir, el ángulo de agarre (α) de las trituradoras de mandíbula debe ser siempre menor que el doble del ángulo de rozamiento (φ). El coeficiente de rozamiento de deslizamiento entre el trozo y la mandíbula (f) se puede expresar a través del ángulo de rozamiento (φ) como:

$$f = \tan(\varphi) \quad 2.32$$

Con el aumento del ángulo de agarre se debe aumentar el grado de trituración y disminuir la productividad de la trituradora. (véase las Figuras 2.1 y 2.2 en el anexo 2.3).

Para $f = 0.3$ de la piedra sobre el hierro, el ángulo de rozamiento es aproximadamente de 16° , entonces $\alpha \approx 32^\circ$. Prácticamente las trituradoras de mandíbula tienen un ángulo de agarre no mayor de 25° . Pero, a pesar de ello, durante el trabajo de trituradoras suceden casos de expulsión de pedazos de material hacia arriba. Ello se explica por la posibilidad de tal posición recíproca de pedazos en el espacio de trabajo de la trituradora cuando para ciertos trozos, el ángulo α será mayor que 2φ (Figura 2.3, anexo 2.3).

Frecuencia de rotación del cigüeñal del triturador de mandíbula

Según Andreiev y Perov (1980) considerando el tiempo de recorrido de la mandíbula móvil (de alejamiento o media vuelta del cigüeñal) igual al tiempo de caída libre del material triturado desde una altura h (Figura 2.4, anexo 2.3) y las dimensiones máximas

b_2 y mínima b_1 del orificio de descarga del material triturado, la frecuencia de rotación se puede calcular como sigue:

El tiempo de alejamiento de la mandíbula móvil es igual al tiempo de una media vuelta del árbol:

$$t = \frac{1}{2} \frac{60}{n} = \frac{30}{n}; s, \quad 2.33$$

Donde, n : frecuencia de rotación del cigüeñal; min^{-1} . Si se establece la condición, que este tiempo debe ser igual al tiempo t de caída libre de pedazos desde la altura h , se deduce que $h = \frac{1}{2}gt^2$, entonces,

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad 2.34$$

Donde, g : aceleración de la gravedad; m/s^2 .

Igualando los segundos miembros de las igualdades 2.33 y 2.34, se obtiene.

$$n = 30 \sqrt{\frac{g}{2h}} \quad 2.35$$

Encontramos la altura h del triángulo rectángulo BB_1C :

$$h = \frac{S}{\tan \alpha} = \frac{b_2 - b_1}{\tan \alpha} \quad 2.36$$

Sustituyendo la expresión para n , obtenemos

$$n = 30 \sqrt{\frac{g \cdot \tan \alpha}{2(b_2 - b_1)}} = 30 \sqrt{\frac{g \cdot \tan \alpha}{2S}}; \text{min}^{-1} \quad 2.37$$

Donde α : ángulo de agarre en grados, b_1 : ancho mínimo de la hendidura de salida; m , b_2 : ancho máximo de la hendidura de salida; m , S : longitud de la marcha (amplitud) de la mandíbula móvil cerca del orificio de descarga; m .

La frecuencia de rotación del árbol excéntrico, determinada por la fórmula 2.37, con algunos supuestos, corresponde al rendimiento máximo de la trituradora de mandíbula y por eso se llama la más ventajosa.

Ejemplo, si se toma el ángulo de agarre igual a 22° . Sustituyendo en la fórmula 2.37 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ y $\tan 22^\circ = 0.4$ se obtiene:

$$n = 30 \sqrt{\frac{9.81 \cdot 0.4}{2(b_2 - b_1)}} = \frac{42}{\sqrt{b_2 - b_1}}. \quad 2.38$$

Al expresar las dimensiones geométricas de la cámara de trituración en partes del ancho del orificio de carga (B) (Figura 2.5 anexo 2.3):

$$AA' = b_2 - b_1 \text{ y } CC' = 0.01 B \quad 2.39$$

$$\frac{AA'}{CC'} = \frac{2.7B}{0.5B} \text{ ó } \frac{b_2 - b_1}{0.01B} = \frac{2.7B}{0.5B}. \quad 2.40$$

Sustituyendo el valor hallado de $b_2 - b_1$ en la fórmula 2.38, obtendremos

$$n = \frac{42}{\sqrt{0.054B}} = \frac{182.6}{\sqrt{B}}; \text{ min}^{-1} \quad 2.41$$

Productividad del triturador de mandíbula

Según Andreiev y Perov (1980) se toma el volumen del producto triturado que cae por cada vuelta del árbol de la trituradora, que trabaja a la frecuencia de rotación más ventajosa, según la geometría de la cámara de trituración (Figura. 2.4 anexo 2.3).

La productividad volumétrica de la trituradora

$$V = 60nv = 60n \frac{(b_2 + b_1)(b_2 - b_1)}{2 \tan \alpha} \cdot L \quad 2.42$$

$$b_2 - b_1 = 0.054B, \quad b_1 = b_2 - 0.054B, \quad b_2 + b_1 = 2b_2 - 0.054B \quad 2.43$$

Donde, L longitud del orificio de carga de la trituradora en metros; b_1 y b_2 en metros, entonces, según la fórmula 2.42, la productividad resulta en metros cúbicos por hora.

A partir de la figura 2.5 del anexo 2.3, si se introduce en la fórmula 2.42 el ancho del orificio de carga B de acuerdo a la igualdad 2.39 y se sustituye 2.43 en 2.42, se obtiene

$$V = 60n \frac{(2b_2 - 0.054B)0.054B}{2 \tan \alpha} \cdot L = 30nL \frac{0.108Bb_2 - 0.003B^2}{\tan \alpha} \quad 2.44$$

En la última fórmula el número de vueltas de la trituradora se determina por la igualdad 2.41. Haciendo $\tan \alpha = 0.4$ y sustituyendo en la fórmula 2.44, obtendremos

$$V = (1479b_2\sqrt{B} - 40B\sqrt{B})L; \text{ m}^3/\text{h} \quad 2.44a$$

La productividad másica de la trituradora o rendimiento de la trituradora será:

$$Q = V(k\delta) = (1479b_2\sqrt{B} - 40B\sqrt{B})L(k\delta) \quad 2.45$$

Q: rendimiento de la trituradora en t/h, k: coeficiente de mullido del material al salir de la trituradora y δ la densidad del material en t/m³.

La fórmula 2.45 no toma en cuenta la influencia sobre el rendimiento de la trituradora, de las propiedades físicas del material que se tritura, ya que se obtiene solo a partir de representaciones geométricas. Pese a ello, la fórmula permite representar la influencia de los principales factores mecánicos que determinan el rendimiento de las trituradoras.

Para calcular el rendimiento de trituradoras de mandíbula se han propuesto varias fórmulas empíricas compuestas, en base a la suposición de que la productividad de las trituradoras es proporcional al área del orificio de descarga. La más conocida de ellas es la fórmula:

$$Q \sim 0.1 L b_2 \quad 2.46$$

Donde, L y b están expresadas en centímetros.

Se toma el rendimiento según los datos medios de las fábricas productoras introduciendo correcciones para la masa volumétrica del material triturado.

Las fábricas rusas suministran trituradoras de mandíbula para la trituración de rocas muy duras, con una resistencia a la compresión de 25 kN/cm². Por eso la trituradora se elige según el tamaño del pedazo máximo D_m en el material inicial y el ancho del orificio de carga debe ser no menor de $(1.15 \div 1.20) D_m$.

Las fábricas productoras extranjeras de trituradoras de mandíbula suministran el mismo tamaño típico de la trituradora con motores eléctricos de diferentes potencias. En este caso la potencia del motor eléctrico se elige tomando en cuenta la productividad, grosor del material inicial y del producto, y de la resistencia de la roca. La compañía "Allis Chalmers" recomienda calcular la potencia requerida del motor eléctrico según la ley de Bond. El índice de trabajo W_i se determina para la roca dada por una prueba especial de trituración de 30 - 40 pedazos elegidos de las rocas, con dimensiones de 50-75 mm. Los pedazos se rompen en dos martillos opuestos que caen como péndulos que asestan golpes por dos lados. Según Rowland (1973), el índice de trabajo calculado según datos de pruebas se mide en kilovatios hora por tonelada. La energía requerida para triturar una tonelada se calcula según la fórmula siguiente:

$$W = 0.75 \left(\frac{10W_i}{\sqrt{P}} - \frac{10W_i}{\sqrt{F}} \right); \text{ kW} \cdot \text{h/t} \quad 2.47$$

Siendo, W_i : índice de trabajo en kW.h/t, P : grosor del producto, que corresponde al tamiz a través del que pasa un 80 % del material (se toma conforme al tamaño de la hendidura de salida de la trituradora; μm), F : grosor del material inicial, que corresponde al tamiz a través del cual pasa un 80 % del material (en los cálculos se toma $F = (0.5 \div 0.67)B$; μm), B : ancho del orificio de carga de la trituradora. El índice de trabajo, se selecciona según el tipo de roca, Rowland (1973). Las rocas más blandas tienen un índice de trabajo inferior a 9 y las más duras superior a 26.

Accionamiento eléctrico

Si la potencia calculada supera el valor máximo del fabricante de trituradora, entonces se deben cambiar las condiciones de trituración, por ejemplo variar la hendidura de descarga, y cambiar el por ciento de grosor de producto de salida (P), o elegir una trituradora más grande.

$$P_{melect} = \omega \cdot Q ; \text{ kW} \quad 2.48$$

Donde, Q : productividad de la trituradora según la alimentación; t/h

La carga sobre el motor eléctrico durante la trituración en trituradoras de mandíbula depende de muchos factores, la mayoría de los cuales aún no se han tomado en cuenta, no existe ninguna fórmula teórica argumentada para determinar la potencia del motor eléctrico de accionamiento. Nedra (1975) recomienda la fórmula empírica:

$$P_{berenovmelect} = c \cdot L \cdot B \quad 2.49$$

Donde, L y B : longitud y ancho del orificio de carga de la trituradora; cm, c : coeficiente que se toma en dependencia del tamaño del orificio de carga:

$c=1/60$ para trituradoras de tamaño menor de 250x400 mm

$c= 1/100$ para trituradoras de tamaño desde 250 x 400 hasta 900x1200 mm

$c=1/120$ para trituradoras de 900x1200 mm y mayores.

2.5.2.1. Modelación de los trituradores de mandíbulas

La modelación de los trituradores de mandíbulas se realiza a partir de los datos de, V : productividad volumétrica de la trituradora; m^3/h , δ : densidad del material; t/m^3 , a_{max} : tamaño máximo de los pedazos del material; m, Q : productividad de la trituradora; t/h y de la longitud de las aberturas de entrada y salida (b_e y b_s).

Luego se establece el índice de trabajo de la trituradora (W_i) ó se establece a partir del tipo de roca.

Como (n) está en función de $\alpha_{(i)}$ y $S_{(j)}$

$$S_{(j)} = b_{2(j)} - b_{1(j)} \quad 2.50$$

$$n_{(i,j)} = 30 \sqrt{\frac{g \cdot \tan \alpha_{(i)}}{2 S_{(j)}}} \quad 2.51$$

$\alpha_{(i)}$ se selecciona en función de los rangos establecidos en la trituradora, que dependen de las propiedades físico – mecánicas del material a procesar y del revestimiento de las mandíbulas (cámara de trituración) (Andreiev et al. (1980))

Según Rasumov y Perov (1985), para las dimensiones intermedias de la trituradora de mandíbula la productividad (Q) se halla mediante la interpolación. Las trituradoras se eligen solo por el tamaño de los pedazos del material a triturar y por la productividad necesaria (Q).

Nótese que no existe una ecuación precisa para determinar la potencia del motor de las trituradoras de mandíbula utilizadas para la reducción de tamaño de los áridos cubanos. En la práctica en este trabajo se ha verificado la existencia de un nivel considerable de subutilización, que lleva a las consiguientes pérdidas de energía.

Otros autores utilizan para un mismo tipo de triturador motores de diferentes potencias de accionamiento por tanteo. Nótese que en este caso la potencia de accionamiento del motor se selecciona en función de la tenacidad del material a triturar (resistencia), (Q) y el volumen del material en la cámara.

$$\text{De la ecuación } V_{(i,j)} = 30 \cdot n_{(i,j)} L_{(i,j)} \cdot \frac{0,108 \cdot B_{(i,j)} \cdot b_{2(j)} - 0,003 \cdot (B_{(i,j)})^2}{\tan \alpha_{(i)}} \quad 2.52$$

Sustituyendo $L_{(i,j)} = B_{(i,j)} K_{LB}$ en la ecuación 2.52

$$\frac{V_{(i,j)} \tan \alpha_{(i)}}{30 \cdot n_{(i,j)} L_{(i,j)}} = 0,108 \cdot b_{2(j)} - (0,003) \cdot (B_{(i,j)})^2 \quad 2.53$$

$$\text{De } L_{(i,j)} = \left(\frac{K_{LB}}{K_{aB}} \right) a_{\max} \quad K_{LB} = 1,5 \text{ a } 1,2$$

De forma que el valor 1,2 corresponde al de mayor dimensión.

$$Cc_{(i,j)} = \frac{V_{(i,j)} \tan \alpha_{(i)} \cdot K_{aB}}{30 \cdot n_{(i,j)} \cdot a_{\max} \cdot K_{LB}} = (0,003) \cdot (B_{(i,j)})^2 + (0,108 \cdot b_{2(j)}) \cdot B \quad 2.54$$

$$B_{(i,j)}^2 - 36 \cdot b_{2(j)} \cdot B_{(i,j)} = Cc_{(i,j)} \quad 2.55$$

Aplicando la solución de la ecuación de segundo grado, se determinan las raíces de la ecuación.

$$B_{(i,j)} = 18 \cdot b_{2(j)} \pm \left\{ [81(b_{2(j)})]^2 - Cc_{(i,j)} \right\}^{0,5} \quad 2.56$$

El (B) se estandariza y se verifica según el ($a_{\max}$)

Si se establece $B = f(a_{\max})$ y se garantiza Q, entonces:

$$a_{\max} = (0,8 \text{ a } 0,9)B \quad K^B = 1,10 \text{ a } 1,15$$

Se recomienda según Razumov y Perov (1985)

$$B > K^B \cdot (a_{\max}) \quad 2.57$$

En la relación $\frac{L}{B} = 1,5 \text{ a } 1,2$, los valores menores corresponden a las trituradoras de mayor dimensión.

$$L_{(i,j)} = K_{LB} \cdot B_{(i,j)} \quad 2.58$$

$$L_{(i,j)} = K_{LB} \cdot B_{(i,j)} = K_{LB}^{a_{\max}} [0,8 \div 0,9] = \frac{K_{LB}}{K_{aB}} \cdot a_{\max} = L_{(i,j)} \quad 2.59$$

Determinación de la productividad másica según la ecuación

$$Q_{(i,j)} = V_{(i,j)} \cdot \gamma; \text{ t/h} \quad 2.60$$

Para determinar la potencia es importante determinar el índice de trabajo por la ecuación 2.61.

$$W = 7,5 \cdot W_i \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{D_{80}} \right); \text{ kW} \cdot \text{h/t} \quad 2.61$$

Donde, W_i : índice de trabajo de Bond.

Se puede asumir que

$$D_{80} = (0,5 \div 0,67) \cdot B \quad 2.62$$

La potencia N se determina de la siguiente manera.

$$N = W \cdot Q_{(i,j)}; \text{ kW} \quad 2.63$$

Los resultados de $B_{(i,j)}$ o $B -$ se escogen según los que más se ajusten a la relación práctica, en función del tamaño máximo de los pedazos de material a triturar.

2.5.3. Trituradores de conos

Las trituradoras de cono, por su destino, se dividen en trituradoras para trituración gruesa, media y fina. En las trituradoras de cono el material se tritura en el espacio anular, formado por el vaso exterior cónico inmóvil y por el cono de trituración móvil, situado dentro de este vaso y dispuesto sobre el árbol. En las trituradoras de cono para trituración gruesa, el árbol se encuentra en el travesaño superior, y en las de trituración media y fina en la quicionera esférica, en la que se apoya el cono de trituración, fijado rígidamente sobre el árbol.

2.5.3.1. Triturador de cono de trituración gruesa (giratorias)

El bastidor de estas trituradoras es desmontable. Las partes del bastidor se unen entre sí mediante tornillos. Las trituradoras con orificios de entrada de 1500 mm de ancho tienen un bastidor que consta de tres partes; las trituradoras de menor tamaño de dos partes. A continuación se describen los parámetros tecnológicos fundamentales de dichas trituradoras.

Angulo de agarre

Es el que se forma entre las generatrices de la superficie interior del vaso cónico inmóvil exterior y la superficie exterior del cono triturador móvil (Figura 2.6 anexo 2.3). El valor del ángulo de agarre varía entre (α) en el punto de aproximación de las superficies trituradoras y (α_1) en el punto diametralmente opuesto, donde el cono triturador se ha alejado del vaso exterior. La diferencia insignificante en el valor de los ángulos α y α_1 se desprecia puesto que no tiene importancia práctica, y el ángulo α se considera como el ángulo de agarre del triturador. Las condiciones de equilibrio de los pedazos de material a triturar tienen comportamiento similar al de las trituradoras de mandíbula. De tal modo, el ángulo α de las trituradoras cónicas de trituración gruesa no debe ser mayor que el ángulo doble de fricción. Prácticamente en estas trituradoras el valor de α es de 24 a 28°.

Frecuencia de rotación del vaso excéntrico del triturador de cono de trituración gruesa

La frecuencia de rotación del vaso excéntrico de la trituradora cónica se considera la óptima, con la cual se logra el máximo rendimiento. El ángulo OO_1 del cuerpo de la

tritadora y OK del cono triturador en las trituradoras con árbol suspendido (Figura 2.5 anexo 2.3) no supera de 30 a 40°.

Del análisis de la igualdad de los tiempos de girar media vuelta el cono triturador y de la caída libre de los trozos triturados desde la altura h según la Figura 2.7 del anexo 2.3;

$$n = 30 \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot h}} ; \text{min}^{-1} \quad 2.64$$

La altura h se halla de las relaciones geométricas

$$h = N_1 L = \frac{NL}{\tan \gamma_1} = \frac{KL}{\tan \lambda_2} \quad 2.65$$

Donde, γ_1 y γ_2 : son los ángulos entre las generatrices de las superficies del cono y del cono fijo con la vertical, entonces usando la propiedad de la proporción derivada:

$$h = \frac{NL + KL}{\tan \gamma_1 + \tan \lambda_2} = \frac{S}{\tan \gamma_1 + \tan \lambda_2} \quad 2.66$$

Entonces la frecuencia de rotación quedará:

$$n = 30 \cdot \sqrt{\frac{g(\tan \gamma_1 + \tan \lambda_2)}{2 \cdot S}} ; \text{min}^{-1} \quad 2.67$$

Donde, S es el recorrido del cono triturador en el horizonte del orificio de descarga, igual al doble de la excentricidad e en metros.

Las trituradoras de cono de trituración gruesa funcionan con una frecuencia n, que es aproximadamente dos veces menor que el calculado por la fórmula teórica (2.66). La desviación se explica por el hecho de que al deducir la fórmula, no fueron tomadas en consideración diversas resistencias que encuentra el material al salir de la tritadora. Por tanto para los cálculos prácticos se toma:

$$n = 15 \cdot \sqrt{\frac{g(\tan \gamma_1 + \tan \lambda_2)}{2 \cdot S}} ; \text{min}^{-1} \quad 2.68$$

Actualmente las trituradoras tienen una excentricidad al nivel de la descarga de 13 a 25 mm. Trituradoras de una misma dimensión pueden tener diferentes excentricidades. El recorrido medio del cono en el horizonte de la rendija de salida (excentricidad doble) en función del ancho de la abertura de carga es:

$$S = 0,02 \cdot B + 0,01 \quad 2.69$$

Donde B y S en metros.

Sustituyendo en (2.67) el valor de S y los valores numéricos de las tangentes γ_1 y γ_2 (10° y 19°) se tiene

$$n = \frac{240}{\sqrt{2 \cdot B + 1}}; \text{ min}^{-1} \quad 2.70$$

Productividad de las trituradoras de cono de trituración gruesa

Se determina el volumen V del producto evacuado de la trituradora en una revolución del vaso excéntrico, que funciona con óptima frecuencia de rotación (fig 2.6). Según el teorema de Hulden, el volumen de tal espacio, es igual al producto del área de la figura cuya rotación forma el anillo por la longitud de la circunferencia descrita por el centro de la gravedad de la figura, alrededor del eje de la rotación, o sea; $V = F \cdot 2 \cdot \pi \cdot R$, donde F es el área del trapecio AA_1N_1N ; m^2 , R la distancia desde el eje de rotación OO_1 , hasta el centro de gravedad del trapecio, situado en la línea que une los centros de las bases del trapecio a la distancia h_c (por la perpendicular) de su base mayor. Utilizando la Figura 2.6 según Andreiev y Perov, (1980) se obtiene:

$$V = \frac{b_2 + b_1}{2} \cdot \frac{S}{\tan \gamma_1 + \tan \gamma_2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \quad 2.71$$

Donde, b_2 y b_1 : anchos máximo y mínimo de la rendija de salida de la trituradora; m.

Aplicando las relaciones constructivas figura 2.6,

$$V = 0,029 B^3 + 0,0136 B^2 - 0,0005 B, \text{ donde } R = 0,83 B \quad 2.72$$

Multiplicando esta igualdad por el número óptimo de revoluciones del cono triturador se obtiene

$$V = \frac{420 \cdot B_3 + 195,8 \cdot B^2 - 7,2 \cdot B}{\sqrt{2 \cdot B + 1}}; \text{ m}^3/\text{h} \quad 2.73$$

La productividad másica de la trituradora

$$Q = \frac{420 \cdot B^3 + 195,8 \cdot B^2 - 7,2 \cdot B}{\sqrt{2 \cdot B + 1}} \cdot (k_e \cdot \rho); \text{ t/h} \quad 2.74$$

$$\text{O aproximadamente } Q = 420 \cdot B^2 \cdot \sqrt{2 \cdot B + 1} \cdot (k_e \cdot \rho); \text{ t/h} \quad 2.75$$

Donde, k_e : coeficiente de mullido, ρ : densidad del material en trituración; t/m^3 .

Las trituradoras de cono de trituración gruesa se eligen conforme al tamaño del trozo máximo que entra a la máquina ($B \approx 1,2 \cdot D$) y según la productividad para el ancho de la rendija de salida, en correspondencia con los datos del fabricante.

2.5.3.2. Trituradoras de cono de trituración media y fina

Las construcciones de estas trituradoras son semejantes, solo difieren en algunos detalles. La descripción de los parámetros de diseño y funcionamiento de las mismas se realiza a continuación.

Ángulo de agarre

Se llama ángulo de agarre de las trituradoras de cono de trituración media y fina (TCTMF) el que se forma entre las generatrices de las superficies del cono triturador y del vaso cónico exterior en la parte superior del espacio de trabajo en el momento de su máxima aproximación (Figura 2.8 anexo 2.3). Las condiciones de equilibrio del trozo de material triturado apretado en la cámara de trituración de las TCTMF, son análogas a las de trituración gruesa. El ángulo de apretado para las trituradoras citada debe ser menor que el doble del ángulo de rozamiento. En este caso por término medio este ángulo alcanza 18° .

Frecuencia de rotación del excéntrico

Las TCTMF tienen una zona paralela de longitud l y ancho b . El producto triturado los pedazos sus medidas máximas no superan el ancho de esta zona. El número de revoluciones del cono triturador depende de la longitud de la zona paralela y de la velocidad de paso del trozo por esta zona. El movimiento del material en la zona de trabajo puede considerarse como un proceso vibratorio de desplazamiento a lo largo del plano, tangente a la superficie del cono que realiza oscilaciones pendulares desde la excéntrica [19, 44, 48]. La velocidad de desplazamiento sobre la generatriz oscilante depende:

- De la frecuencia de oscilación (del número de revoluciones del excéntrico);
- De la amplitud de las oscilaciones (excentricidad dual);
- Del coeficiente de rozamiento;

- De la configuración del cono fijo que limita el movimiento del trozo en el proceso de apretado y trituración, entre otros.

Muchos fabricantes recomiendan las frecuencias de rotación del cono triturador según la experiencia práctica.

Recorrido del cono

En las TCTMF el recorrido del cono (de doble excentricidad) es mucho mayor en comparación con el recorrido en las TCTG. El aumento de la amplitud de oscilaciones es necesario para acelerar el paso del material a través de la zona de trituración y para facilitar la descarga: con esto se aumenta la productividad (Q) de la trituradora. El ángulo de desviación del eje de la trituradora alcanza hasta $2^{\circ}30'$ para trituradoras del tipo KSD rusa. Para trituradoras de diámetro de 2200 mm, se alcanza una excentricidad de 95 mm a la altura de la rendija de descarga. El recorrido del cono determina el tamaño del producto triturado. La relación del tamaño máximo del producto triturado y la medida de la rendija de salida, en la fase de aproximación de los conos de la trituradora; para el tipo KSD alcanza de 2,3 a 3,0 y para las trituradoras del tipo KMD hasta 3,0 a 4,0.

La influencia de la frecuencia de oscilación del cono de trituración de algunos tipos de trituradoras sobre la productividad y el tamaño del producto se expresa a través de tablas, según los fabricantes. La productividad aumenta para el caso de los materiales de elevada densidad.

Productividad de las TCTMF

La superficie de las zonas horizontales de la zona de trabajo de las TCTMF a distintos niveles en altura es diferente, también es distinta la velocidad de desplazamiento del material. La productividad de la trituradora se determina por la sección horizontal que tiene la menor capacidad volumétrica de paso. Tal sección crítica, corrientemente se encuentra al nivel de entrada del material en la zona paralela.

La productividad máxima se determina por la capacidad volumétrica de paso de la sección crítica y la densidad de carga del material triturado y se ha demostrado que para tal trituradora no depende del ancho de la hendidura de salida.

La productividad teórica de la trituradora se determina a partir de las siguientes apreciaciones. Se designa por x el desplazamiento del material en la zona de trabajo

para cada revolución del excéntrico, entonces de la trituradora cae un anillo de material con el volumen:

$$V = X \cdot b \cdot \pi \cdot D_c \quad 2.76$$

Donde, b: ancho de la ranura de salida y D_c : diámetro del círculo descrito por el centro de gravedad del rectángulo ABCD (Figura 2.9 anexo 2.3).

Se considera que $D_c = D$, donde D: diámetro de la base del cono. Si admitimos que el material pasa la longitud l de la zona paralela en una o dos revoluciones, es decir que $X = l$ ó $X = l/2$ y se puede tomar a l proporcional al diámetro del cono, es decir, $l = k \cdot D$; donde k es un parámetro constructivo de la trituradora, entonces:

$$V = 60 \cdot \pi \cdot n \cdot b \cdot l \cdot D = k_o \cdot n \cdot b \cdot D^2; \text{ m}^3/\text{h} \quad 2.77$$

Donde, n: frecuencia de oscilación del cono en un minuto, b, l y D; m, k y k_o : coeficientes de proporcionalidad

La productividad real oscila en límites amplios, en dependencia de la dureza y granulometría del material, de su humedad, arcillosidad y esquema de trituración. Estos valores se dan en tablas por los fabricantes en función de los valores medios.

Potencia del motor de accionamiento

Según la fórmula (2.63) la potencia para algunos tipos de trituradoras (KSD y KMD) es casi directamente proporcional a la productividad, es decir, al producto nD^2 :

$$N_{acc} = 0,2 \cdot l \cdot n \cdot D^2 \quad 2.78$$

La potencia media utilizada alcanza del 50 al 75 % de la potencia del motor eléctrico.

Las trituradoras se eligen según el ancho del orificio de carga y por la productividad para un ancho dado de la ranura de salida.

2.5.4. Equipos de transporte

En este epígrafe se analizan los equipos de transporte continuo (transportadores de banda y por tornillo sinfín) empleados en las instalaciones de preparación mecánica de áridos. A continuación se describe el procedimiento para determinar las características de diseño y funcionamiento de dichos equipos.

2.5.4.1. Transportadores de banda

Según Sierra (2010), se puede tener de datos la productividad y en ese caso determinaremos el ancho de la banda necesario. El ancho de la banda escogido a partir de la productividad debe ser menor que su ancho real. También puede ocurrir que conozcamos el ancho de la banda y en este caso calculamos la productividad del transportador. Seleccionamos de un catálogo el transportador adecuado. Se determina la resistencia a la marcha del transportador. Se determinan las tensiones en los puntos característicos del transportador. Se controla la resistencia de la banda. Se determina el esfuerzo del mecanismo de tensión. Se realizan los cálculos complementarios como: la determinación de la flecha máxima, el alargamiento de la banda, relación de los diámetros de los tambores motrices en el caso de que existan más de uno en la instalación motriz. Se determina la potencia del motor y se escoge el mismo según los catálogos. Se determinan los gastos de energía eléctrica durante la transportación.

Ancho de la banda

$$B = 1,1 \cdot \left(\sqrt{\frac{Q}{K_c \cdot v \cdot \varphi \cdot \gamma}} + 0,05 \right), \text{ m} \quad 2.79$$

Donde, K_c : coeficiente que tiene en cuenta la forma de la banda (tabla 1.1 anexo 7), v : velocidad de movimiento de la banda; m/s, φ : coeficiente de disminución de la productividad que tiene en cuenta el ángulo de inclinación del transportador (tabla 1.1 anexo 7), γ : masa volumétrica del material a transportar; t/m³, Q : productividad; t/h.

Luego se estandariza el valor del ancho de banda y se comprueba de acuerdo al tamaño de las partículas del material a transportar de acuerdo a lo siguiente:

- Para las cargas compuestas por pedazos grandes en un 15% de la masa total:

$$B \geq 2,3a_{2,5a_{\text{máx}}}, \text{ mm}$$

- Para cargas clasificadas con el contenido principal de pedazos, con un tamaño determinado (a) en una proporción de aproximadamente el 80% de la masa total:

$$B \geq (3,3a_{4,6})a; \text{ mm}$$

Determinación de la resistencia a la marcha del transportador.

La resistencia a la marcha del transportador se determina a partir de los valores de los parámetros siguientes (Alonzo, 2002; Garcell, 2003; y Vasiliev et al., 2006):

- Peso lineal de la banda [q_b]; N/m.
- Peso lineal de los rodillos de apoyos [q' y q'']; N/m.
- Peso lineal de la carga [q]; N/m.

Entonces se divide el contorno del transportador en partes rectas y curvas y éstas a su vez por sus puntos característicos. En los tramos rectos entre los puntos característicos la resistencia a la marcha se calculó según:

Para la rama cargada

$$W_c = \{[(q_b + q)\cos\beta + q_r']\omega' L \pm (q + q_b)L\cdot\text{sen}\beta\}; \text{ N} \quad 2.80$$

Donde β : ángulo de inclinación del tramo en cuestión (grados), L: longitud del tramo; m, ω' : coeficiente de resistencia al movimiento en la rama cargada

Para la rama vacía

$$W_c = \{[q_b \cos\beta + q_r'']\omega'' L \pm (q_b)L\cdot\text{sen}\beta\}; \text{ N} \quad 2.81$$

Se puede considerar:

$\omega' = 0,02 \pm 0,03$: para bandas estacionarias y $\omega' = 0,04 \pm 0,05$ para bandas no estacionarias. El signo (+) se utiliza cuando el movimiento es ascendente y el signo (-) cuando el movimiento es descendente.

En los tramos curvilíneos se pueden dar los siguientes casos (Oriol y Aguilar, 1995; Pereda y Polanco, 1999; Dunlop Conveyor Belt Design Manual, 2004; Gerontiev, 1962):

1. Que la banda bordee los tambores motores.
2. Que la banda bordee los tambores de desvío o de retorno.
3. Que la banda bordee una zona transitoria o de cambio de pendiente. Esta puede ser con la convexidad hacia arriba o con la convexidad hacia abajo
4. Que la banda varíe en trayectoria según su traza. Estos son casos que no se investigan en el presente trabajo.

Caso 1. Se observa en la siguiente figura.

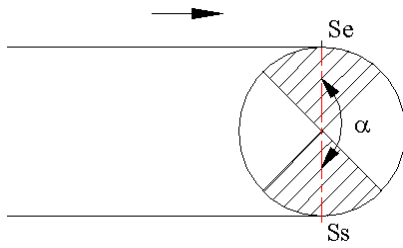


Figura 2.1 Esquema de la banda alrededor del tambor motor.

De ella se infiere que, la resistencia al movimiento en el tambor motor es igual al esfuerzo transmitido.

$$W_{tm} = S_e - S_s; \text{ N como } S_e = S_s \cdot e^{f \cdot \alpha \cdot des},$$

$$\text{Entonces, } W_{tm} = S_s \cdot (e^{f \cdot \alpha \cdot des}) = S_e \cdot \frac{e^{f \cdot \alpha \cdot des} - 1}{e^{f \cdot \alpha \cdot des}} \quad 2.82$$

Donde, f: coeficiente de fricción entre la banda y el tambor, Se: tensión de entrada; N, Ss: tensión de salida; N, α : ángulo de deslizamiento; rad, W_{tm}: resistencia al movimiento en el tambor motor.

En el caso que la banda borde los tambores de desvío o de retorno W_{tm} = S_s - S_e

Esto se debe a que la banda es la que mueve al tambor, por tanto a la salida es donde debe haber un mayor esfuerzo. $S_s = S_e \cdot e^{\omega_t \cdot \alpha}$, donde, ω_t : coeficiente de resistencia al movimiento de los rodamientos o cojinetes del tambor, A: ángulo de abrazado por la banda del tambor.

$$W_{td} = S_e \cdot (e^{\omega_t \cdot \alpha} - 1); \text{ N} \quad 2.83$$

$$\text{En los puntos de carga: } W_{dc} = C \cdot \frac{q \cdot (V - V_0) \cdot V}{g} \quad 2.84$$

Donde, C: coeficiente que tiene en cuenta la fricción de la carga con la banda y los bordes guías de la tolva. Varía de 1,3 a 1,4, V: velocidad de la banda; m/s, Vo: velocidad de la carga en la dirección del movimiento; m/s.

En el **punto de descarga** la resistencia al movimiento se determina por

$$W_{dd} = C' \cdot B \cdot q; \text{ N} \quad 2.85$$

C': coeficiente que toma valores entre 2,7 y 3,6

La resistencia en los **dispositivos de limpieza** se puede calcular por la fórmula.

$$W_{dl} = q_1 \cdot B, \text{ N}, \quad 2.86$$

Donde, q_1 : resistencia específica del dispositivo de limpieza. Para raspadores y arados de limpieza q_1 toma valores entre 30 y 50 N/m.

Para **cepillos giratorios** se toma igual de 2 a 6 veces mayor que la velocidad lineal del cepillo (V_c) y esta a su vez se toma mayor que la velocidad de la banda entre las magnitudes de 1,2 a 2; es decir; $q_1 = (2 \% 6)V_c$ y $V_c = (1,2 \% 2)V$

Determinación de la tensión de la banda

Según el perfil obtenido se determinan las tensiones en cada punto de contorno.

$$[S_{n+1} = S_n + \sum W]; \text{ N} \quad 2.87$$

Comprobación de la resistencia de la banda seleccionada

Para bandas de goma con fibras sintéticas se determina el **número de capas**.

$$i = \frac{S_{\max} \cdot m}{\sigma_r \cdot B}, \quad 2.88$$

Donde, i : número de capas que tiene la banda para evitar su rotura al estar sometida a una función igual a $S_{\max}$, $S_{\max}$: tensión máxima a la que está sometida la banda; N , m : coeficiente de seguridad, σ_r : límite de resistencia a la rotura de 1cm de ancho en una capa en N/cm, B : ancho de la banda; m . El coeficiente $m = 9-10$: horizontales $m = 11 - 12$: Inclinaados

Si el número de capas tomado para el cálculo de las resistencias es menor que el obtenido, entonces hay que cambiar el tipo de banda o hay que calcular nuevamente las resistencias y las tensiones, pero con el número hallado. En caso contrario no es necesario volver hacer el cálculo.

Para el caso de **bandas de goma- cable** su resistencia está en dependencia de la resistencia de los cables. Estas bandas se seleccionan de acuerdo a su resistencia a la destrucción (rotura):

$$\sigma_p = \frac{S_{\max} \cdot K_{real}}{B} \quad 2.89$$

Las características técnicas de la banda de caucho y de caucho y cable se escogen de los catálogos. El coeficiente real de reserva es de:

$$K_{real} = \frac{\sigma_p \cdot B}{S_{m\acute{a}x}}; \text{ donde } K_{real} \geq 6-9. \quad 2.90$$

El menor valor para los transportadores horizontales y el mayor para los inclinados.

Determinación de la **flecha entre rodillos**

La flexión máxima entre los rodillos de la rama cargada se determina por:

$$F_{m\acute{a}x} = \frac{(q + q_b) \cdot l^2}{8 \cdot S_{\min tr}}, \text{ m}, \quad 2.91$$

Donde $S_{\min tr}$: tensión mínima a la que está sometida la banda en la rama de trabajo:

$$S_{\min tr} = (10-5)(q + q_b) \cdot g \cdot l_r, \text{ N} \quad 2.92$$

Por las reglas de explotación se ha tenido que:

$$F_{m\acute{a}x} = (0,0125-0,025)l \quad \text{y } S_{\min tr} \leq Si$$

Si: tensión mínima en la rama de trabajo. Correspondiendo los menores valores para la banda de goma – cable.

Determinación de la potencia del motor.

$$N = \frac{W_o \cdot v}{1000 \cdot \eta} \cdot K_r; \text{ kW} \quad 2.93$$

Donde, W_o : esfuerzo de tracción en el tambor motor; N. Su valor en este caso se tomará igual:

$$W_o = (S_e - S_s) + (0,05-0,06)(S_e + S_s); \text{ N}, \quad 2.94$$

η : rendimiento de la transmisión $\eta = 0,85 - 0,90$ y K_r : coeficiente de reserva que considera los regímenes de arranque y otros. $K_r = 1,1 - 1,15$

2.5.4.2. Transportador lavador por tornillo sinfín

Según Rodríguez (2011) y Vasiliev (2003), las principales ventajas de estos transportadores están dadas por: son compactos, diseño modular de fácil instalación, soportes y apoyos simples, altas temperaturas, fácil hermeticidad, extremadamente versátiles; dosificador; mezcladores o agitadores, varias zonas de carga y descarga. Entre las principales desventajas de estos transportadores podemos encontrar que no son capaces de transportar materiales de grandes tamaños, materiales frágiles o

delicados y no abrasivos, mayores requerimientos de potencia, contaminación del material, volumen de material bajo y distancia de hasta 50 m.

Velocidad de giro del tornillo

La velocidad de giro (n) de los transportadores de tornillo depende, entre otros factores, de la naturaleza del material a transportar.

En este sentido y según el tipo de material a desplazar, la velocidad de giro del tornillo suele estar comprendida, con buena aproximación, entre los siguientes rangos:

- Para materiales pesados $\rightarrow n \approx 50$ r.p.m.
- Para materiales ligeros $\rightarrow n < 150$ r.p.m.

En general, se cumple que la velocidad de giro de un transportador de tornillo es inversamente proporcional al:

- peso a granel del material a transportar,
- grado de abrasividad del material a transportar,
- diámetro del tornillo.

Por otro lado, la máxima velocidad de giro a la que puede trabajar un tornillo sin fin depende además, de la naturaleza del material a transportar, del diámetro total del tornillo (eje+hélice).

En la tabla 2.3 anexo 2.4 se indica la velocidad de giro recomendada para un transportador de tornillo en función de la clase de material y del diámetro del tornillo.

Paso y diámetro del tornillo

En general, la dimensión para el paso de los transportadores de tornillo suele estar comprendida entre 0,5 y 1 veces la medida del diámetro del mismo, siendo mayor cuanto más ligera sea la carga que se vaya a transportar con el tornillo.

En cuanto al diámetro de la hélice del tornillo, su dimensión es inversamente proporcional a la velocidad de giro del eje, es decir, para velocidades de giro más elevadas supondrá un tornillo de hélices más estrechas.

En general, la magnitud del diámetro que hay que emplear en los transportadores de tornillo depende también del tipo de material a transportar, cumpliéndose la siguiente relación:

- Para materiales homogéneos, el diámetro del tornillo será, al menos, 12 veces mayor que el diámetro de los pedazos a transportar;
- Para materiales heterogéneos, el diámetro del tornillo será 4 veces mayor que el mayor diámetro de los pedazos a transportar.

Capacidad de transporte

Antes de conocer las expresiones matemáticas que permiten obtener el flujo de material que puede desplazar un transportador de tornillo, es necesario definir los siguientes conceptos:

- Área de relleno del canalón (S):

El área de relleno (S) del canalón que ocupa el material que mueve el transportador, se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$S = \lambda \cdot \frac{\pi D^2}{4} \quad 2.95$$

Donde D: diámetro del canalón del transportador; m, λ : coeficiente de relleno de la sección.

Este coeficiente de relleno (λ) deberá ser menor que la unidad con objeto de evitar que se produzca amontonamiento del material, que dificultaría su correcto flujo a lo largo del canalón.

- Velocidad de desplazamiento del transportador (v):

La velocidad de desplazamiento (v) del transportador es la velocidad con la que se desplaza el material en la dirección longitudinal del eje del tornillo. Depende tanto del paso del tornillo como de su velocidad de giro.

La expresión que permite conocer la velocidad de desplazamiento en un transportador de tornillo es la siguiente:

$$v = \frac{p \cdot n}{60} \quad 2.96$$

Donde, v: velocidad de desplazamiento del transportador; m/s, p: paso del tornillo o paso de hélice; m, n: velocidad de giro del eje del tornillo, r.p.m.

Determinación del flujo de material

La capacidad de transporte de un transportador de tornillo sin fin viene determinada por la siguiente expresión que calcula el flujo de material transportado:

$$Q = 3600 \cdot S \cdot v \cdot \rho \cdot i \quad 2.97$$

Donde Q: flujo de material transportado; t/h, ρ : densidad del material transportado; t/m³, i: coeficiente de disminución del flujo de material debido a la inclinación del transportador.

Si se sustituyen las expresiones para calcular el área de relleno del transportador (S) y la velocidad de desplazamiento (v), la capacidad de flujo de material transportado (Q) resultaría finalmente como:

$$Q = 3600 \cdot \lambda \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{p \cdot n}{60} \cdot \rho \cdot i \quad 2.98$$

Potencia de accionamiento

La potencia de accionamiento (P) de un transportador de tornillo sin fin se compone de la suma de tres componentes principales, según se refleja en la siguiente expresión:

$$P = P_H + P_N + P_i; \text{ kW} \quad 2.99$$

Donde, P_H : potencia necesaria para el desplazamiento horizontal del material, P_N : potencia necesaria para el accionamiento del tornillo en vacío, P_i : potencia necesaria para el caso de un tornillo sin fin inclinado.

Cálculo de la potencia total

Según lo expuesto anteriormente para el cálculo de la potencia total (P) de accionamiento de un transportador de tornillo se deberá calcular previamente las necesidades de potencia de cada tipo y posteriormente sumarmas para el cálculo de la potencia total.

- Potencia para el desplazamiento horizontal del material (P_H):

La potencia necesaria para realizar el desplazamiento horizontal del material se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P_H = c_0 \cdot \frac{Q \cdot L}{367}; \text{ kW} \quad 2.100$$

Donde, Q: flujo de material transportado; t/h, L: longitud del transportador; m, c_0 : coeficiente de resistencia del material transportado.

- Potencia de accionamiento del tornillo en vacío (P_N):

La potencia necesaria para el accionamiento del tornillo en vacío se puede calcular con bastante aproximación mediante la siguiente expresión:

$$P_N = \frac{D \cdot L}{20}; \text{ kW} \quad 2.101$$

Donde, D: diámetro de la sección del canalón de la carcasa del transportador; m,
L: longitud del transportador; m.

Normalmente, el valor nominal de esta potencia, es muy pequeño en comparación con la potencia necesaria para el desplazamiento del material.

➤ Potencia para el caso de un tornillo sin fin inclinado (P_i):

Esta componente se aplica para el caso que se use un transportador de tornillo inclinado, donde exista una diferencia de cota (H) entre la posición de la boca de entrada del material y la boca de salida o de descarga.

En este caso, la potencia necesaria para realizar el desplazamiento del material por un transportador de tornillo inclinado se emplea la siguiente expresión:

$$P_i = \frac{Q \cdot H}{367}; \text{ kW} \quad 2.102$$

Donde, Q: flujo de material transportado; t/h, H: altura de la instalación; m.

Finalmente, la potencia total (P) necesaria para el accionamiento de un transportador de tornillo resulta de la suma de las distintas necesidades de potencias calculadas anteriormente:

$$P = P_H + P_N + P_i = c_0 \cdot \frac{Q \cdot L}{367} + \frac{D \cdot L}{20} + \frac{Q \cdot H}{367} \quad 2.103$$

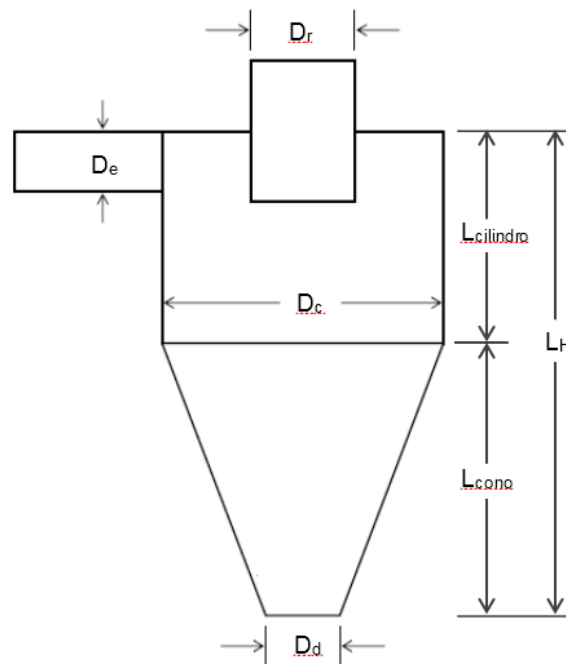
Que finalmente se puede expresar como:

$$P = \frac{Q \cdot (c_0 \cdot L + H)}{367} + \frac{D \cdot L}{20} \quad 2.104$$

2.5.5. Parámetros tecnológicos de los Hidrociclones

Según Trawinski (1973), la industria minera es el principal usuario de los hidrociclones, los cuales se aplican en clasificación de líquidos, espesamiento, ordenamiento de partículas por densidad o tamaño y lavado de sólidos. En este epígrafe se describen las características tecnológicas fundamentales de estos equipos.

Esquema de un hidrociclón



Características típicas

- Rango de diámetro: 10 mm a 2.5 m
- Rango de corte: 2 a 250 μm
- Rango de capacidad: 0.1 a 7200 m^3/h
- Caída de presión: 0.34 a 6 bar
- Máxima concentración de sólidos: 50%

Según Etayo y Barraza (2009), las variables que usualmente se consideran en el comportamiento de un hidrociclón pueden agruparse en cuatro categorías, desde los puntos de vistas:

- De la geometría del hidrociclón: se relacionan el diámetro del hidrociclón, el área de alimentación, el diámetro del reboso o líquido clarificado (vortex), el diámetro de descarga del concentrado (Apex), la longitud del reboso, el ángulo del cono y la altura de la cámara cilíndrica.
- Del sólido: se relacionan la distribución de tamaño de partículas (PSD por su sigla en inglés) que refleja como mínimo cualquiera de los siguientes rangos: $[d_{10}, d_{50} \text{ y } d_{90}]$; $[d_{20}, d_{50} \text{ y } d_{80}]$ o $[d_{25}, d_{50} \text{ y } d_{75}]$, la concentración de sólidos, la densidad del sólido y densidad a granel, el contenido de lodo y la curva de lavabilidad, la cual predice la densidad de separación y por ende el rendimiento a obtener.

- Del líquido de transporte: se relacionan, la densidad y la viscosidad, que junto con la concentración de sólidos permite calcular la reología de la pulpa.
- Operacional: se relacionan, la presión de trabajo, el caudal a procesar, el tamaño de corte deseado y el contenido de lodo deseado a la salida de descarga del hidrociclón (Apex).

Variables de operación

Se debe mantener una caída de presión que garantice un caudal estable y origine un campo centrífugo de magnitud considerable para que sea posible la sedimentación centrífuga, del componente de mayor densidad. Se establece que la capacidad y la eficiencia varían en forma inversamente proporcional: a mayor capacidad menor eficiencia y viceversa.

Variables de operación y diseño: efectos generales

- El diámetro del hidrociclón y el punto de corte varían en relación directa.
- El diámetro del hidrociclón y la capacidad varían en relación directa.
- El diámetro del hidrociclón y la caída de presión varían en relación inversa.
- La concentración y la eficiencia (punto de corte) varían en relación inversa.

Enfoque adimensional

Se utilizan a partir de una geometría estándar de hidrociclón, las proporciones geométricas que correlacionan las principales partes del mismo, a partir del caudal de alimentación de la pulpa o suspensión Q_e . Para el caso del lavado de las arenas de los áridos de construcción cubano es necesario determinar las dimensiones óptimas del hidrociclón según las características del material tratado.

Parámetros de diseño y funcionamiento

Estimar el tamaño, condiciones de operación y número de hidrociclones requeridos para obtener un producto deseado a una capacidad determinada, partiendo de un material con una distribución de tamaño conocida, se puede establecer el diseño del hidrociclón; independientemente del proceso de reducción de tamaño para los áridos.

Los dos parámetros a determinar en el diseño de un hidrociclón son el caudal de pulpa a tratar y el diámetro de corte d_{50c} . Las correlaciones reportadas en la literatura son de origen teórica, semiteórica y empíricas.

El próximo parámetro es el área de la abertura de alimentación (inlet). El área de entrada de la alimentación del hidrociclón corresponde aproximadamente al 7% del diámetro de la sección cilíndrica. El tamaño d_{50} se incrementa al aumentar el diámetro de entrada de la alimentación.

$$D_e = K_e \cdot D_c \quad 2.105$$

Donde D_e : diámetro de entrada (inlet), mm. K_e : coeficiente adimensional.

Otro parámetro relevante es el diámetro del tubo rebalse (vortex), su función primaria es la de controlar el tamaño de separación y el flujo de salida de la pulpa. Además, el tubo de rebalse se extiende hasta más abajo de la abertura de entrada para impedir el corto circuito del flujo de alimentación en el flujo de rebalse. El diámetro del orificio de vórtex corresponde a 35 % del diámetro del hidrociclón. El tamaño d_{50} se incrementa al aumentar el diámetro del vórtex.

$$D_r = K_r \cdot D_c \quad 2.106$$

Donde D_r : diámetro de rebalse (vortex), mm. K_r : coeficiente adimensional.

La sección cilíndrica del hidrociclón, está localizado entre la cámara de alimentación y la sección cónica y su función es alargar el hidrociclón para permitir el incremento de tiempo de retención. El largo de la sección cilíndrica es igual al diámetro interno de la misma. El diámetro del orificio de salida (apex) está determinado para cada aplicación y debe ser suficientemente grande para permitir que los sólidos que han sido clasificados puedan salir por la descarga sin atacamiento y podría estar entre el 10% y 35% del diámetro del hidrociclón.

$$D_d = K_d \cdot D_c \quad 2.107$$

Donde D_d : diámetro de descarga (Apex), mm. K_d : coeficiente adimensional.

La longitud del hidrociclón afecta la separación de las partículas. Cuanto más largo es el hidrociclón, la separación será más fina. Esta longitud puede ser incrementada mediante dos técnicas: la primera, aumentando la longitud de la sección cilíndrica; y la segunda disminuyendo el ángulo de la sección cónica. La desventaja de la primera técnica es que si el cilindro es demasiado largo, la velocidad angular de la pulpa se disminuye y el tamaño de separación de la partícula llega a ser más gruesa. Por consiguiente, se recomienda la utilización de no más de una sección cilíndrica adicional, lo cual es equivalente a una longitud de dos veces el diámetro interno de tal

sección, y solamente para hidrociclones menor o igual a 15 pulgadas de diámetro. El empleo de la segunda técnica incrementa el costo del hidrociclón y reduce la densidad del flujo de descarga, y una reducción de tal densidad resulta en un retorno de más finos al molino y algunos problemas con la viscosidad óptima de pulpa dentro molino.

$$L_H = L_{\text{cono}} + L_{\text{cilindro}} = k_{\text{cono}} \cdot D_c + k_{\text{cil}} \cdot D_c \quad 2.108$$

Donde, L_{cono} : longitud del cono; mm, L_{cilindro} : longitud del cilindro; mm.

El ángulo de la sección cónica del hidrociclón esta normalmente entre 12 y 20°. Para hidrociclones mayores a 10 in de diámetro, el ángulo de la sección cónica podría ser de 20° y para hidrociclones menores o iguales a 10 in de 12°. En un circuito de molienda común, la separación puede ser controlada por una simple adición de agua. Esta adición combinada con los 20° de ángulo cónico mejorará la eficiencia de clasificación y resultara en una cantidad mínima de finos retornados al molino.

Para determinar el tamaño y número de hidrociclones requeridos para una aplicación dada, se deben considerar dos objetivos principales: el primero, la clasificación o separación que se requiere y el segundo, el volumen o caudal de la pulpa que se desea procesar, el cual es determinado a través del cálculo del balance del material a partir de la siguiente información: (1) tonelaje horaria a procesar, (2) malla de separación o punto de corte, (3) densidad de la pulpa requerida en el flujo de descarga, (4) gravedad específica del mineral, (5) carga circulante estimada y (6) caída de presión en la alimentación.

El parámetro más importante es el diámetro del hidrociclón, puesto que el tamaño de separación de las partículas depende principalmente de su diámetro. Según Austin (1994) y Kasatkin (1985), la separación de partículas pequeñas requiere de hidrociclones pequeños y la separación de partículas mayores requiere de hidrociclones grandes. Partiendo de que se conoce el caudal de entrada Q_e se determina el diámetro del cilindro del hidrociclón D_c , según la ecuación propuesta por Plitt, (1976)

$$Q_e = \frac{D_c^{0.21} D_e^{0.53} L_H^{0.16} (D_d^2 + D_r^2)^{0.49}}{55.2 \times 10^3 \cdot P_e^{-0.56} e^{(0.0031 C_V)}} \quad 2.109$$

$$\text{Por lo que, } D_c = \sqrt[0.21]{\frac{Q_e 55.2 \times 10^3 \cdot P_e^{-0.56} e^{(0.0031 C_V)}}{D_e^{0.53} L_H^{0.16} (D_d^2 + D_r^2)^{0.49}}} \quad 2.110$$

Donde, D_c : diámetro de la sección cilíndrica del hidrociclón; mm, D_e : diámetro de entrada; mm, L_H : longitud del hidrociclón (altura); mm, D_d : diámetro de descarga (Apex); mm, D_r : diámetro del reboso (vortex); mm, P_e : presión de alimentación; kPa, Q_e : caudal de alimentación de pulpa; m³/h, C_v : concentración volumétrica de sólidos, %.

El tamaño de separación o punto de corte producido por el hidrociclón (Arterburn, 1982; Mular y Jull, 1978) está establecido como el tamaño de aquella partícula, en micrometros, que tiene la misma posibilidad de ir tanto al reboso como a la descarga.

Según Mular y Jull (1978) se determina el diámetro de corte

$$d_{50C} = 2.6539 \frac{D_c^{0.675} e^{(-0.301 + 0.945 C_v^2 + 0.0000684 C_v^3)}}{P_e^{0.3} (\rho_s - \rho_L)^{0.5}} \quad 2.111$$

Donde, ρ_s : densidad del sólido; g/cm³, ρ_L : densidad líquido; g/cm³.

Varios autores se refieren al tiempo de retención, que es importante en la separación que tiene lugar en hidrociclones. Una de las más conocidas es la teoría de (Svarovsky, 1981 y 1984). En este enfoque, primero propuesto por Rietema (1961), una partícula de un tamaño dado se recogerá si el tiempo que permanece en el interior del ciclón es igual o mayor que el tiempo necesario para que llegue a la pared. Según Vieira et al, (2005) la predicción del diámetro de corte del hidrociclón se puede considerar a través de la teoría del tiempo de retención

$$\frac{d_{50C}}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q_e (\rho_s - \rho_L)} \right]^{0.5} \quad 2.112$$

Donde, K: parámetro que se determina experimentalmente y es característico para cada diseño de hidrociclón, μ : viscosidad del líquido; kg/m·s,

Según Massarani (1997), la estimación del tamaño de corte reducido se obtiene con ayuda de la ecuación anterior utilizando factores adicionales que consideran el efecto de la disminución del rendimiento.

Según la ecuación:

$$\frac{d'_{50C}}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q_e (\rho_s - \rho_L)} \right]^{0.5} F(R_L) G(C_v) \quad 2.113$$

$$\text{Donde, } F(R_L) = \frac{1}{1 + 1.73 R_L} \quad 2.114$$

$$G(C_v) = e^{(4.5 C_v)} \quad 2.115$$

Donde, R_L : relación de flujo inferior al rendimiento,

Massarani (1997) propuso la ecuación (5) para la predicción de la relación de flujo inferior a rendimiento:

$$R_L = B \left(\frac{D_d}{D_c} \right)^C \quad 2.116$$

Donde, B y C: constantes para un diseño de ciclón dado.

Para Bradley (1965) y diseños óptimos de Rietema (1961), que son de interés en el presente trabajo, Massarani (1997) obtuvo los parámetros que se muestran en la Tabla 2.6 anexo 2.5.

Para un diseño específico de hidrociclón, se considera que la relación entre la caída de presión estática a través del ciclón ($-\Delta P$) y la presión dinámica, calculado a partir de la velocidad característica u_c ($\rho_L u_c^2/2$), es decir, el número de Euler, es constante, de acuerdo con la ecuación:

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\frac{\rho_L u_c^2}{2}} \quad 2.117$$

2.5.5.1. Modelación de los hidrociclones para áridos cubanos

Si se tienen los datos de la suspensión o pulpa:

- Caudal de arcilla y partículas finas de áridos (Q_e); m^3/h .
- Concentración volumétrica de sólidos en la suspensión o pulpa de áridos cubanos (C_v); %.
- Masa volumétrica de los áridos y la suspensión.
- La composición volumétrica.
- Densidad del sólido y el líquido ρ_s , ρ_L respectivamente.
- Presión de alimentación a la entrada del hidrociclón P_e ; kPa.

Se establecen las relaciones teóricas de los diferentes parámetros geométricos del hidrociclón en función del diámetro del cilindro del hidrociclón (D_c).

$$D_e = K_e \cdot D_c \quad K_e \approx 0,28$$

$$D_r = K_r \cdot D_c \quad K_r \approx 0,35$$

$$D_d = K_d \cdot D_c \quad K_d \approx 0,2$$

$$L_H = K_H \cdot D_c = K_{ci} \cdot D_c + K_{cono} \cdot D_c = H_{ci} + H_{cono} \quad K_H \approx 5$$

Uno de los parámetros geométricos más importantes del hidrociclón lo constituye el diámetro del cilindro (D_c).

Sustituyendo las relaciones anteriores de D_e , D_r , D_d y L_H en función de D_c en la ecuación de Plitt, 1976 y despejando se obtiene.

$$D_c = \sqrt[0.21]{\frac{Q_e (55.2 \times 10^3) \cdot P_e^{-0.56} e^{(0.0031 C_V)}}{(K_e \cdot D_c)^{0.53} (K_H \cdot D_c)^{0.16} [(K_d \cdot D_c)^2 + (K_r \cdot D_c)^2]^{0.49}}} \quad 2.118$$

$$\text{Haciendo; } A_H = Q_e (55.2 \times 10^3) \cdot P_e^{-0.56} e^{(0.0031 C_V)} \quad 2.119$$

Y utilizando algunas transformaciones

$$D_c = \sqrt[0.21]{\frac{A_H}{D_c^{1.67} [(K_e^{0.53} \cdot K_H^{0.16}) (K_d^{0.98} + K_r^{0.98})]}} \quad 2.120$$

$$\text{Haciendo; } B_H = [(K_e^{0.53} \cdot K_H^{0.16}) (K_d^{0.98} + K_r^{0.98})] \quad 2.121$$

$$D_c = \sqrt[0.21]{\frac{A_H}{D_c^{1.67} \cdot B_H}} = \left[\frac{A_H}{D_c^{1.67} \cdot B_H} \right]^{1/0.21} \quad 2.122$$

$$D_c = \left[\frac{A_H}{D_c^{1.67} \cdot B_H} \right]^{4.67}; \text{ despejando; } D_c = \left(\frac{A_H}{B_H} \right)^{0.532} \quad 2.123$$

Se determina el diámetro de corte del hidrociclón o diámetro crítico de las partículas, utilizando la ecuación propuesta por Mular y Jull, 1978.

$$d_{50C} = 2.6539 \frac{D_c^{0.675} e^{(-0.301 + 0.945 C_V^2 + 0.0000684 C_V^3)}}{P_e^{0.3} (\rho_S - \rho_L)^{0.5}} \quad 2.124$$

Entonces según Vieira et al. 2005 de la ecuación 2.112 se determina el parámetro (K) característico para cada diseño de hidrociclón.

$$K = \frac{d_{50C}}{D_c} \left[\frac{Q_e (\rho_S - \rho_L)}{\mu D_c} \right]^{0.5} \quad 2.125$$

Según Massarani, (1997) se determina la relación de flujo inferior al rendimiento (R_L).

$$R_L = B \left(\frac{D_d}{D_c} \right)^C \quad 2.126; \quad \text{entonces,} \quad F(R_L) = \frac{1}{1 + 1.73 R_L} \quad 2.127$$

$$G(C_V) = e^{(4.5 C_V)} \quad 2.128$$

Se determina el diámetro crítico reducido

$$d_{50red} = \frac{d'_{50c}}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q_e(\rho_s - \rho_L)} \right]^{0.5} F(R_L) G(C_V) \quad 2.129$$

Se determina la caída de presión a partir de la expresión de E_u

$$E_u = \frac{-\Delta P}{\frac{\rho_L u_c^2}{2}} \quad 2.130; \quad \text{es decir; } \Delta P = - \left(E_u \cdot \frac{\rho_L u_c^2}{2} \right) \quad 2.131$$

2.6. Proceso empírico utilizado

En el trabajo se realiza la modelación de varios equipos con el propósito de perfeccionar los procedimientos de cálculo empleados, dada la subutilización de la capacidad de carga a nivel energético y otros parámetros tecnológicos de los equipos que componen los esquemas de preparación mecánica de áridos. Para lograr la validación de la modelación teórica y expresiones obtenidas, se simulan según datos de instalación reales.

De forma empírica se obtienen los parámetros de explotación en una instalación real.

Procedimiento:

En las instalaciones reales en funcionamiento se miden simultáneamente la productividad y los consumos energéticos, considerando las propiedades físico – mecánicas de los áridos procesados.

Los parámetros eléctricos se miden con un analizador de redes marca Metrel (MI 2392 PowerQ Plus) según anexo 2.9.

Para la medición de la productividad se procedió de la siguiente manera:

La descarga de un transportador se realiza en un plano, durante un tiempo (t_d) que demora en formarse la pila de material con un volumen (V_t) determinado, luego se calcula la productividad con la utilización de la expresión:

$$Q = \frac{V_t}{t_d}; \text{ m}^3/\text{h} \quad 2.132$$

Donde, V_t : volumen total descargado; m^3 , durante el tiempo t_d ; h.

2.7. Conclusiones del capítulo

- 1) Se ha establecido un nuevo enfoque del método de cálculo para plantas procesadoras de áridos para la producción local de materiales; así como, una

orientación diferente para la modelación de algunos de los equipos que componen estas plantas.

- 2) Se identifica el procedimiento para la determinación del régimen de trabajo de las plantas procesadoras de grava y arena a partir de rocas extraídas de las canteras y de los aluviones de las cuencas hidrográficas; que tributan a la producción de materiales de construcción.
- 3) Se establece la modelación matemática de los trituradores de mandíbula de trituración primaria de áridos así como de los hidrociclones encargados del lavado de las arenas, para lograr precisión en la determinación de los parámetros tecnológicos de ambos equipos.
- 4) Se identifican los procedimientos del cálculo de los parámetros tecnológicos del resto de los equipos, que componen las plantas procesadoras de áridos cubanos: cribas vibratorias, trituradores de cono de trituración media y fina, transportadores de banda y por tornillo sin fin.
- 5) Se establecen los métodos para la medición de los parámetros tecnológicos de forma empírica, que permitan precisar la selección y explotación de los equipos que componen las plantas procesadoras de áridos.

CAPÍTULO III. Estudio de los resultados

3.1. Introducción

La implementación de parámetros tecnológicos precisos durante el diseño y explotación de los equipos que conforman los esquemas tecnológicos de las plantas procesadoras de grava y arena, a partir de áridos cubanos, constituye una de las principales prioridades para el OSDE de la industria de materiales del ministerio de la construcción, implica de manera explícita o implícita una tarea de encontrar los parámetros bajo los cuales se minimiza el costo de producción y se obtienen equipos de máximo rendimiento.

En el presente trabajo se obtienen los resultados empíricos y teóricos de los parámetros tecnológicos de los equipos que conforman los esquemas tecnológicos de las procesadoras de áridos cubanos; tales como: trituradores de mandíbula, trituradores de conos, cribas, transportadores de bandas, transportadores lavadores por tornillo sin fin para las arenas e hidrociclones y otros.

Se realiza la validación empírica de los modelos teóricos establecidos y conocidos en la literatura; utilizando análisis estadísticos de datos (Fisher y error relativo), que permiten determinar los parámetros tecnológicos precisos durante el diseño y explotación de los equipos que conforman los esquemas tecnológicas de las plantas procesadoras de grava y arena a partir de áridos cubanos.

Se realiza la valoración técnico económica de las propuestas tecnológicas obtenidas sobre la base de los resultados de la presente investigación a partir de un caso de estudio; según el esquema tecnológico de la planta procesadora de grava y arena producidas desde los áridos o rocas de las canteras y/o aluviones.

Por último se presentan propuestas de diferentes esquemas tecnológicos; que desde el punto de vista ingenieril son posibles para la producción de grava y arena producida desde los áridos o rocas de las canteras y/o aluviones. En este caso se consideran las características ingeniero geológicas de las canteras, sus propiedades físicas y mecánicas y las características físicas y mecánicas demandadas por la producción de materiales y materia primas para la construcción en diferentes obras industriales y sociales.

Los **objetivos** del presente capítulo son establecer, bajo criterios energéticos:

La simulación teórica de los parámetros tecnológicos que caracterizan los trituradores de mandíbula e hidrociclones utilizados en las plantas procesadoras de grava y arena a partir de áridos cubanos. La verificación de los niveles de utilización de las capacidades de procesamiento y de consumo energético de los accionamientos de cada equipo que conforman los esquemas tecnológicos de las plantas procesadoras de grava y arena a partir de áridos cubanos. La propuesta de diferentes esquemas tecnológicos factibles para la preparación mecánica y el beneficio de los procesos tecnológicos para los áridos cubanos. La valoración técnico económica de la investigación que se realiza.

3.2. Resultados empíricos de los equipos que conforman las instalaciones de procesamiento de áridos

En el presente epígrafe se describen los resultados de los parámetros tecnológicos empíricos de algunos de los equipos que componen las plantas procesadoras de áridos. Tomando como caso de estudio la planta procesadora de grava y arena “El Jobo” del municipio de Sagua de Tánamo, Holguín, Cuba.

3.2.1. Trituradores de mandíbulas

En la figura 3.1 se muestra un gráfico en el que se relaciona la productividad y la potencia del triturador de mandíbula instalado en la planta de preparación mecánica de grava y arena, caso de estudio. Como se puede observar, existe una tendencia creciente del consumo energético en la medida que aumenta la productividad, tomando valores de hasta 54,40 kW para los 93 m³/h de material procesado.

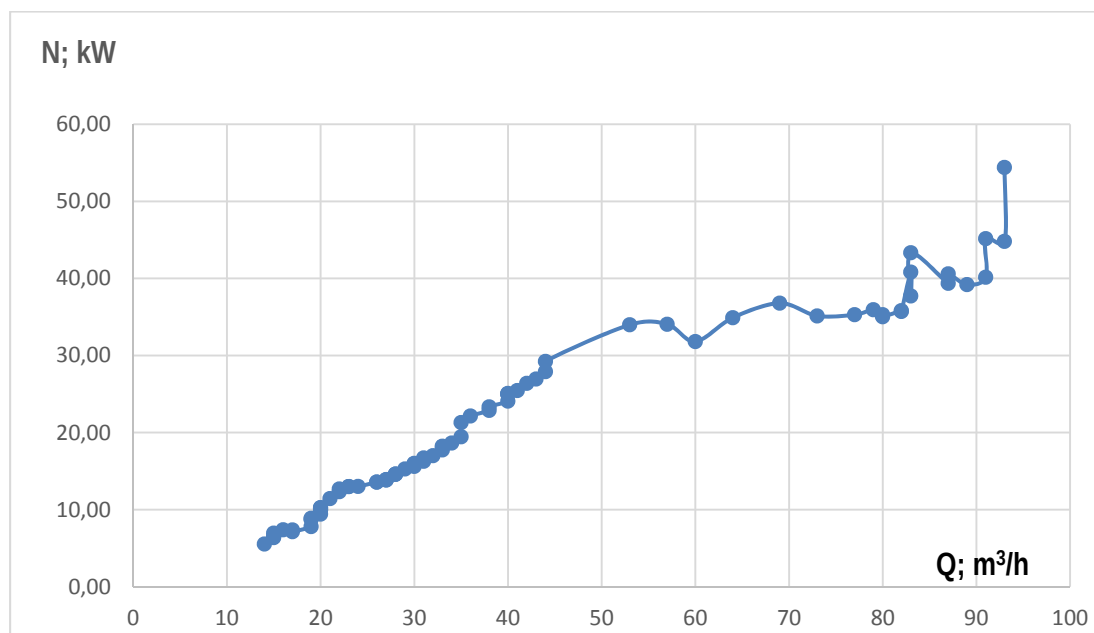


Figura 3.1 Productividad vs potencia del triturador de mandíbula.

3.2.2. Triturador de cono de trituración media y fina

En la figura 3.2 se muestra un gráfico en el que se relaciona la productividad y la potencia del triturador de cono instalado en la planta de preparación mecánica de grava y arena, caso de estudio. Como se puede observar en el mismo, existe una tendencia creciente del consumo energético en la medida que aumenta la productividad, con valores de hasta 76,83 kW para los 20 m³/h de material procesado.

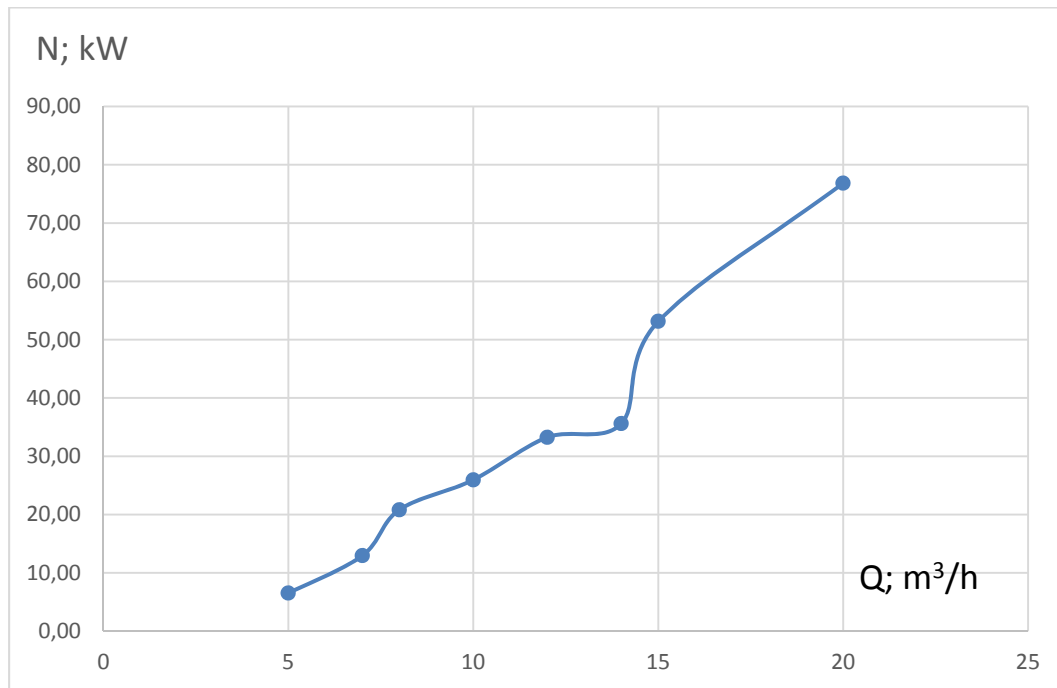


Figura 3.2. Productividad vs potencia del triturador de cono.

3.2.3. Máquina de cribado

En la figura 3.3 se muestra un gráfico en el que se relaciona la productividad y la potencia de la criba vibratoria instalada en la planta de preparación mecánica de grava y arena, caso de estudio. Como se puede observar en este, existe una tendencia creciente del consumo energético en la medida que aumenta la productividad, con valores de hasta 8,74 kW para los 53 m³/h de material procesado.

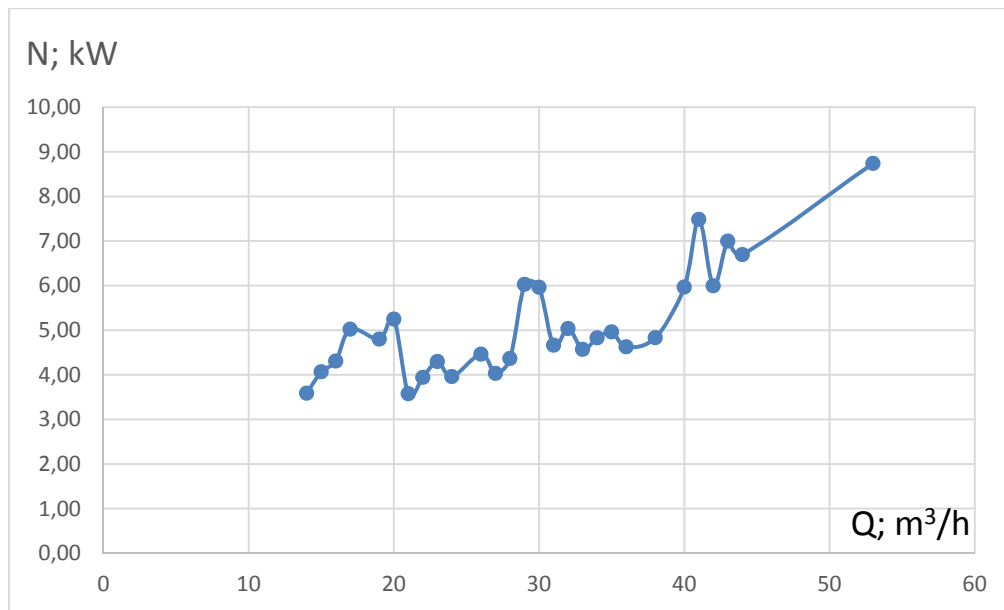


Figura 3.3 Productividad vs potencia de la criba vibratoria.

3.2.4. Transportador lavador por tornillo sinfín

En la figura 3.3 se muestra un gráfico en el que se relaciona la productividad y la potencia del transportador lavador por tornillo sinfín instalado en la planta de preparación mecánica de grava y arena, caso de estudio. Como se puede observar en este, existe una tendencia creciente del consumo energético en la medida que aumenta la productividad, con valores de hasta 13,32 kW para los 16 m³/h de material procesado.

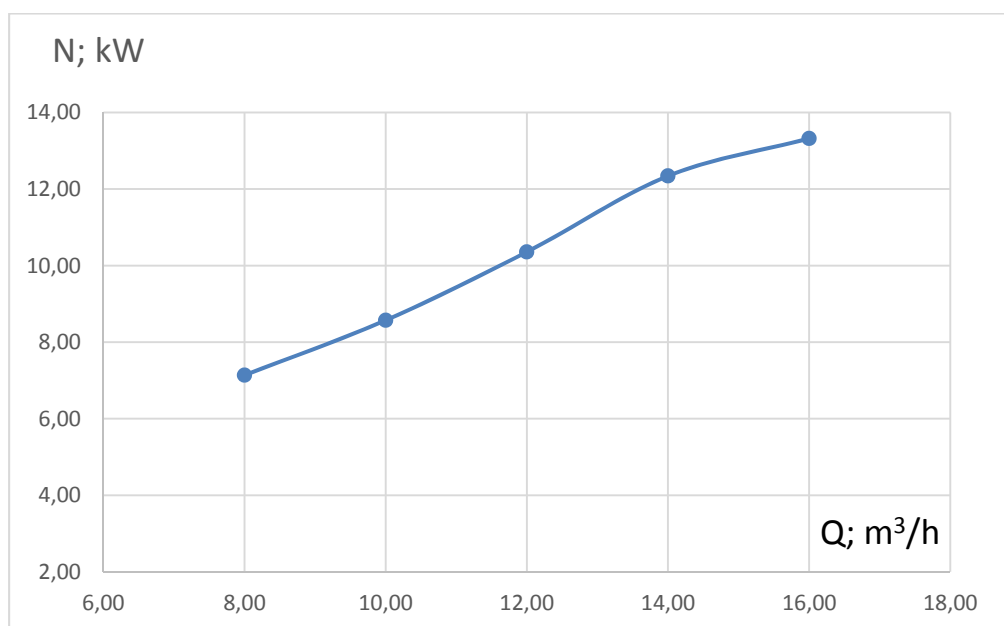


Figura 3.4 Productividad vs potencia del tornillo sinfín.

3.3. Resultados del cálculo teórico de los equipos que conforman las instalaciones de procesamiento de áridos

Los resultados del cálculo teórico de los parámetros tecnológicos obtenidos de los equipos que conforman los esquemas tecnológicos de las plantas procesadoras de áridos se muestran en el presente epígrafe, para el caso de estudio la planta procesadora de grava y arena “El Jobo” del municipio de Sagua de Tánamo, Holguín, Cuba.

A continuación en la figura 3.5, se muestran los resultados del cálculo teórico obtenidos según la modelación propuesta en el epígrafe 2.5.2.1 del capítulo anterior, para las características de los áridos cubanos. Como se puede observar en este, al igual que para el caso anterior en el que se analizaban los resultados empíricos para este mismo equipo, existe una tendencia creciente del consumo energético en la medida que aumenta la productividad, con valores de hasta 51,3 kW para los 93 m³/h de material procesado.

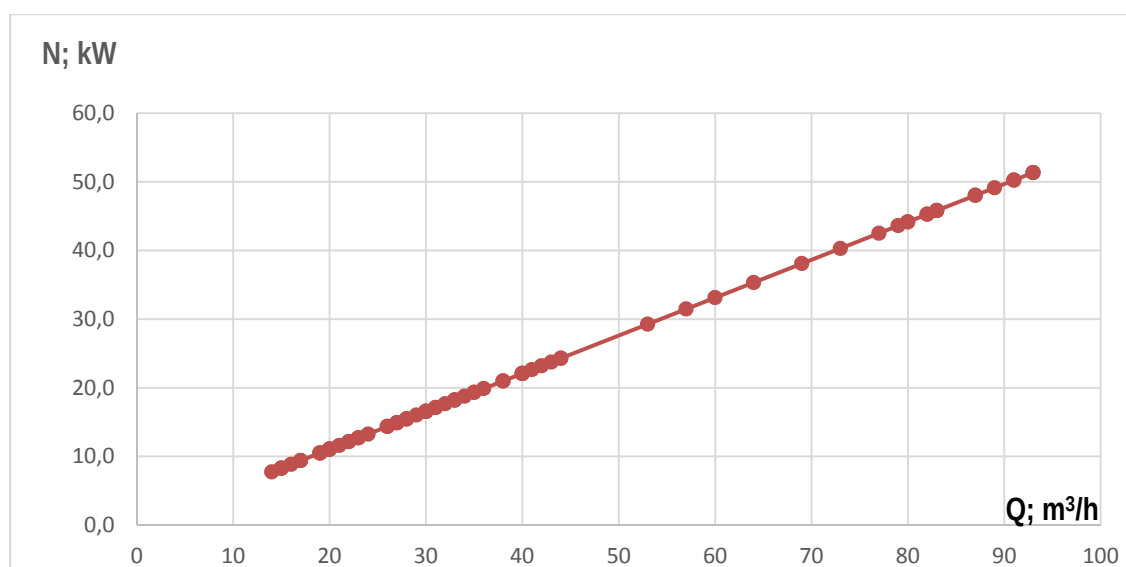


Figura 3.5 Productividad vs potencia del triturador de mandíbula.

En la figura 3.6 se muestran los resultados del cálculo teórico del triturador de cono de trituración media y fina obtenidos según la metodología propuesta en el epígrafe 2.5.3.2 del capítulo anterior para las características de los áridos cubanos. Como se puede observar en este, al igual que para el caso anterior en el que se analizaban los resultados empíricos para este mismo equipo, existe una tendencia creciente del consumo energético en la medida que aumenta la productividad, con valores de hasta 145,72 kW para los 25 m³/h de material procesado.

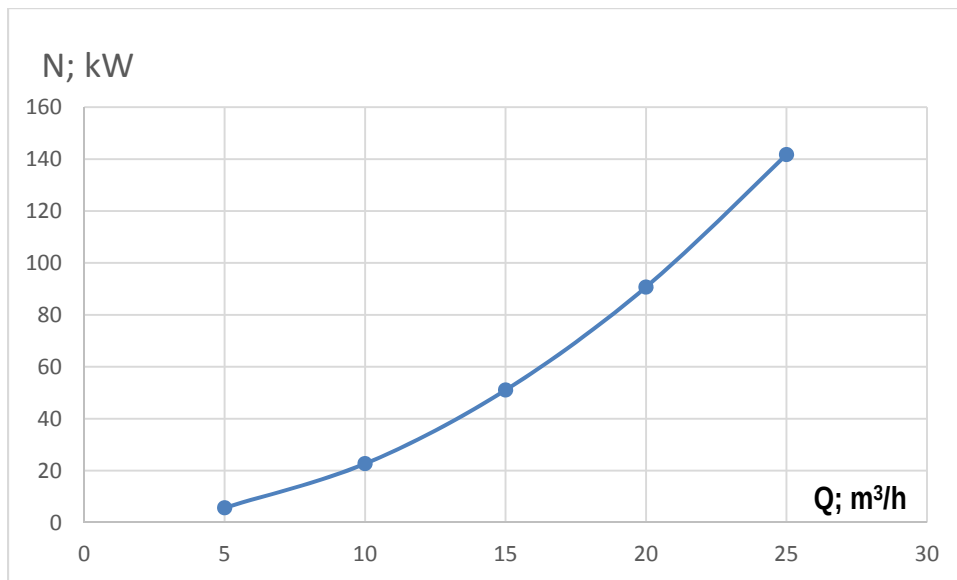


Figura 3.6 Productividad vs potencia del triturador de cono.

En la figura 3.7 se muestran los resultados del cálculo teórico del transportador por tornillo sinfín obtenidos según la metodología propuesta en el epígrafe 2.5.4.2 del capítulo anterior para las características de los áridos cubanos. Como se puede observar en este, al igual que para el caso anterior en el que se analizaba los resultados empíricos para este mismo equipo, existe una tendencia creciente del consumo energético en la medida que aumenta la productividad, con valores de hasta 22 kW para los 22,37 m³/h de material procesado.

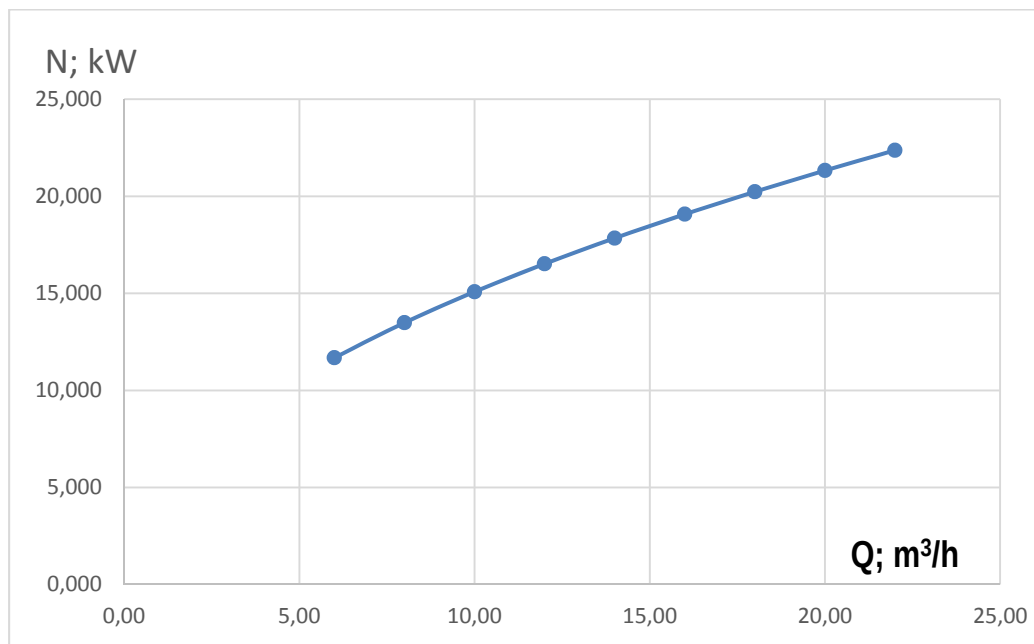


Figura 3.7 Productividad vs potencia del transportador por tornillo sinfín.

3.4. Validación de los de los parámetros tecnológicos

La validación de los parámetros tecnológicos, de los equipos que conforman los esquemas tecnológicos de las procesadoras de áridos en la presente investigación, se realizó a partir de los resultados teóricos y su correlación con los parámetros experimentales; para ello se utilizaron:

- Esquema tecnológico establecido para el caso de estudio de la planta procesadora de grava y arena “El Jobo” del municipio de Sagua de Tánamo, Holguín, Cuba.
- Los esquemas propuestos según el anexo 3.1.
- Herramientas estadísticas (Fisher y error relativo) cuyos resultados están en el anexo 3.2.

En el gráfico 3.8 se hace una comparación de los valores teóricos; según la modelación propuesta en el epígrafe 2.5.2.1 y los valores experimentales obtenidos de las mediciones realizadas del triturador de mandíbula para las características de los áridos cubanos. Luego en la tabla 3.1 se muestra el error absoluto entre los valores teóricos y empíricos de la potencia de accionamiento para iguales productividades y propiedades físicas mecánicas de los áridos procesados. En todos los casos como se puede apreciar el error es inferior al 15 %, lo que implica que los valores generados por el modelo teórico establecido para los diferentes equipos analizados son aceptados. Se seguirá el mismo procedimiento para todos los equipos analizados en el presente epígrafe.

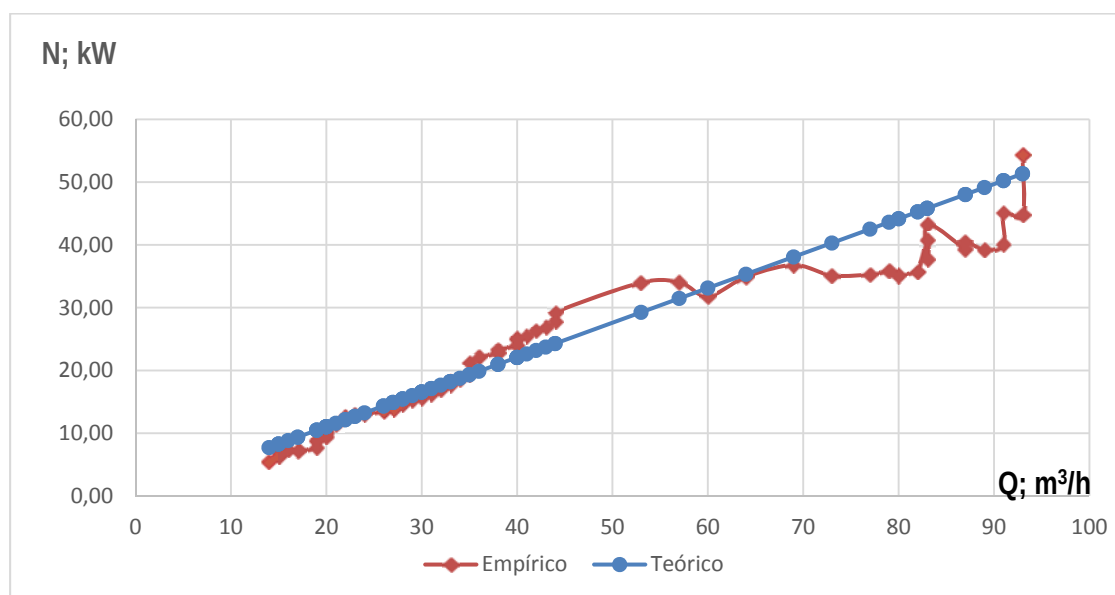


Figura 3.8 Valores teóricos y empíricos de productividad vs la potencia del triturador de mandíbula.

Tabla 3.1 Error absoluto del triturador de mandíbula.

Q; m³/h	Empí rico	teórico	Error; %	Q; m³/h	Empí rico	teórico	Error; %	Q; m³/h	Empí rico	teórico	Error; %
	N; kW	N; kW			N; kW	N; kW			N; kW	N; kW	
93	54,40	51,3	5,96	41	25,47	22,6	12,52	27	13,87	14,9	6,92
93	44,82	51,3	12,70	40	25,09	22,1	13,64	27	13,85	14,9	7,11
91	45,16	50,2	10,09	40	24,99	22,1	13,20	26	13,58	14,4	5,39
91	44,78	50,2	10,86	40	24,99	22,1	13,20	26	13,58	14,4	5,39
89	42,14	49,1	14,23	40	24,08	22,1	9,06	24	13,02	13,2	1,73
87	41,46	48,0	13,68	38	23,35	21,0	11,32	23	12,99	12,7	2,35
87	41,07	48,0	14,49	38	22,88	21,0	9,05	23	12,99	12,7	2,34
83	43,33	45,8	5,43	36	22,16	19,9	11,50	22	12,70	12,1	4,56
83	39,44	45,8	13,93	35	21,30	19,3	10,23	22	12,33	12,1	1,55
83	40,82	45,8	10,92	35	19,45	19,3	0,69	21	11,44	11,6	1,30
82	38,58	45,3	14,78	34	18,65	18,8	0,61	20	9,99	11,0	9,54
82	38,67	45,3	14,57	33	18,23	18,2	0,09	20	9,95	11,0	9,92
80	38,28	44,2	13,32	33	18,20	18,2	0,11	20	10,26	11,0	7,09
80	38,06	44,2	13,81	33	17,76	18,2	2,49	20	10,26	11,0	7,10
79	37,25	43,6	14,58	32	17,00	17,7	3,75	20	9,42	11,0	14,67
77	36,36	42,5	14,46	31	16,71	17,1	2,36	19	9,08	10,5	13,45
73	35,13	40,3	12,82	31	16,29	17,1	4,80	19	9,15	10,5	12,79
69	36,79	38,1	3,41	30	16,01	16,6	3,35	19	9,19	10,5	12,43
64	34,90	35,3	1,21	30	15,94	16,6	3,74	17	8,18	9,4	12,86
60	31,82	33,1	3,92	30	15,91	16,6	3,94	17	8,38	9,4	10,65
57	34,05	31,5	8,22	30	15,62	16,6	5,65	16	7,74	8,8	12,32
53	32,50	29,3	11,07	29	15,28	16,0	4,56	15	7,33	8,3	11,52
44	27,57	24,3	13,49	28	14,61	15,5	5,47	15	7,18	8,3	13,34
44	27,91	24,3	14,91	28	14,60	15,5	5,53	15	7,27	8,3	12,19
43	26,94	23,7	13,51	28	14,59	15,5	5,59	14	6,80	7,7	11,96
42	26,40	23,2	13,87	27	13,91	14,9	6,67				

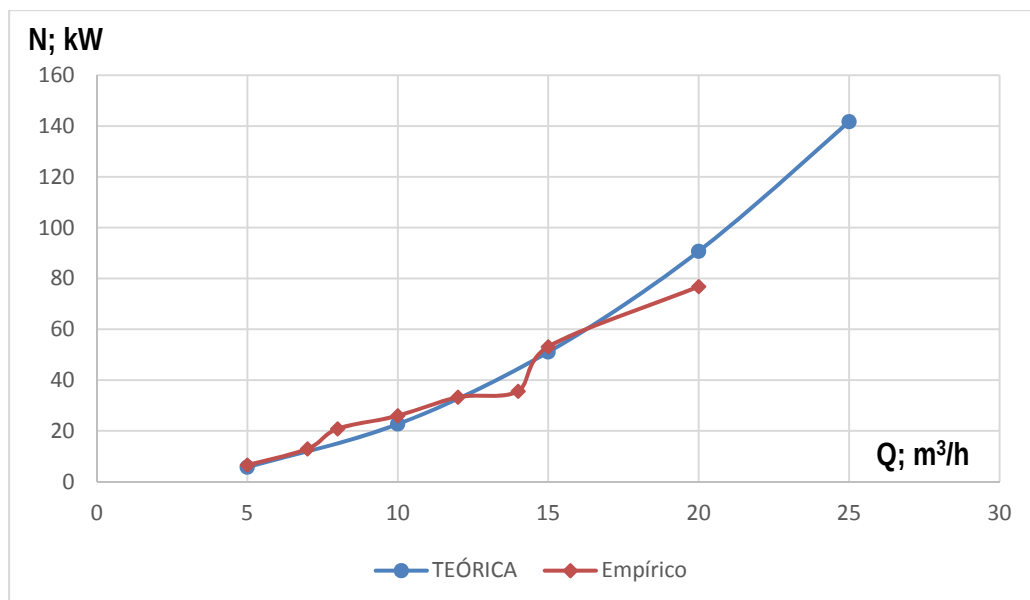


Figura 3.9 Valores teóricos y empíricos de productividad vs la potencia del triturador de cono de trituración media y fina.

Tabla 3.2 Error absoluto del triturador de cono de trituración media y fina.

Q; m³/h	Valores empíricos de potencia; kW	Valores teóricos de potencia; kW	Error; %
20,00	76,83	90,70	0,15
15,00	53,14	51,02	0,04
10,00	25,96	22,68	0,14
5,00	6,55	5,67	0,15

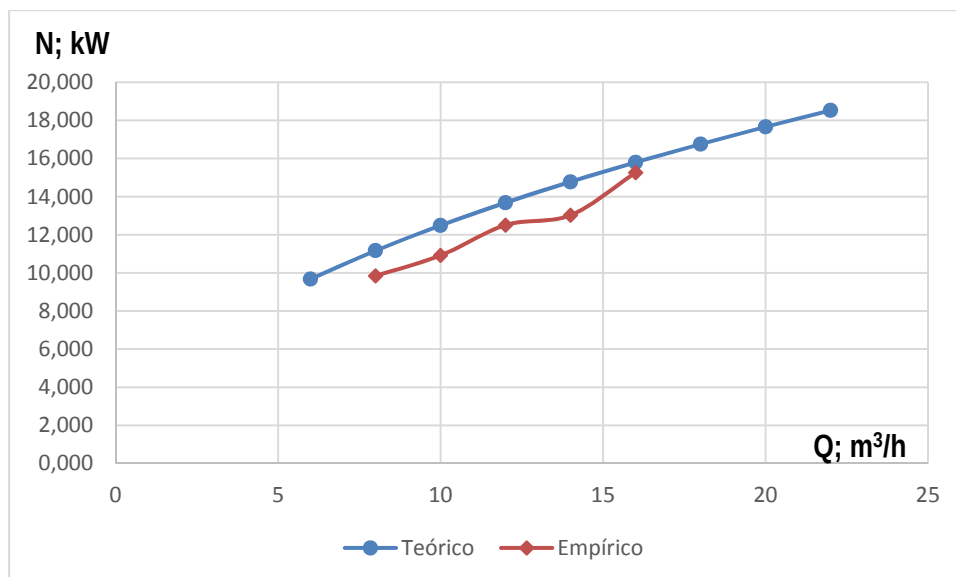


Figura 3.10 Valores teóricos y empíricos de productividad vs la potencia del transportador por tornillo sinfín.

Tabla 3.3 Error absoluto del transportador por tornillo sinfín.

Q; m³/h	Valores de potencia empírica; kW	Valores de Potencia teórica; kW	Error; %
16,00	15,26	15,80	0,04
14,00	13,03	14,78	0,13
12,00	12,51	13,68	0,09
10,00	10,92	12,49	0,14
8,00	9,84	11,17	0,13

3.4.1. Método estadístico para la validación de los resultados

Se realizó el tratamiento estadístico de los resultados simulados y experimentales para establecer la necesaria correspondencia entre las observaciones teóricas y las experimentales y comprobar la idoneidad de los modelos con la utilización del paquete estadístico Microsoft Excel 2016. (CASTRO M, & LIZASOAIN L, 2012)

Pruebas de significancia

La prueba de significación o correspondencia entre los resultados teóricos (frecuencia esperada) y los experimentales (frecuencia observada) se realizó mediante la prueba de análisis de varianza (ANVA) de la regresión o Fisher, que permite determinar si las

variaciones de la variable independiente son explicadas por las variaciones de la variable dependiente. Los pasos para la realización de la prueba de la misma fueron los siguientes:

1. Planteamiento de la hipótesis.
2. Búsqueda del valor crítico.
3. Cálculo del valor de prueba.
4. Toma de decisión.

Planteamiento de la hipótesis estadística

El análisis se verifica bajo las hipótesis siguientes:

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0$$

Búsqueda del valor crítico: el valor crítico para las muestras de tamaño N, se estableció para un nivel de significación $\alpha = 0,05$ y $v = N - 1$ grados de libertad.

Cálculo del valor de prueba: para la determinación del valor de prueba el software Microsoft Excel 2016 emplea las siguientes expresiones para el análisis de Varianza (ANVA) de la Regresión o Fisher

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>
Regresión	1	$\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	$CMR = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 / 1$		
Residuos	n-2	$\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$CMRes = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n - 2)$	$\frac{CMR}{CMRes}$	Menor que α
Total	n-1	$\sum (Y_i - \bar{Y})^2$			

Toma de decisión: Si la probabilidad es mayor que el nivel de significación (α) se acepta H_0 y las variaciones de la variable dependiente no son explicadas por la regresión (variaciones de la variable independiente) y por tanto el modelo no es significativo, en caso contrario (se rechaza H_0) el modelo es significativo y se pueden estimar los valores de la variable dependiente a través del modelo. Además se puede comparar el valor de Fisher (F) con el valor crítico: Si $F_{calc} > F_{\alpha;1;n-2}$ se rechaza H_0 .

3.5. Simulación de los hidrociclones para áridos cubanos

El parámetro más importante del hidrociclón es el diámetro, puesto que el tamaño de separación de las partículas depende principalmente de su diámetro. En la figura 3.11 se muestran los resultados obtenidos de la simulación realizada según el epígrafe 2.5.5.1. Como se puede apreciar a medida que se requiere mayor productividad aumenta el diámetro, alcanzando valores en este caso de hasta 1,82 m de diámetro para 150 m³/h de material procesado.

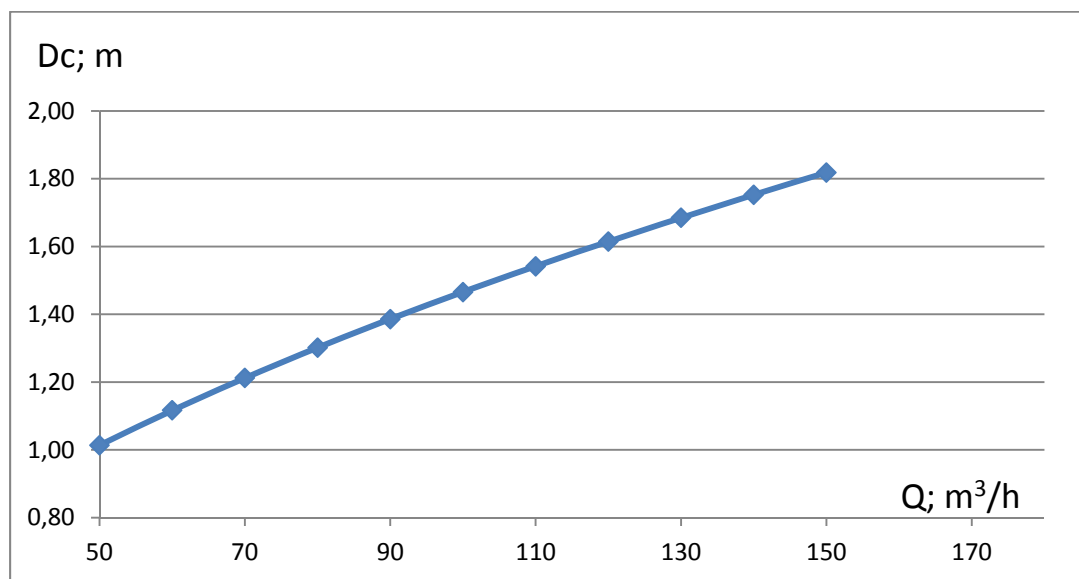


Figura 3.11 Relación entre el diámetro y la productividad del hidrociclón.

El diámetro del hidrociclón y la caída de presión varían en relación inversa como se puede observar en la figura 3.12, ya que para poder aumentar la productividad es necesario aumentar el diámetro del hidrociclón con el objetivo de mantener un buen tamaño de separación o punto de corte, para mantener una buena clasificación del material procesado (áridos). En este caso como se aprecia la caída de presión alcanza valores de hasta 14,66 kPa para los 150 m³/h de material procesado.

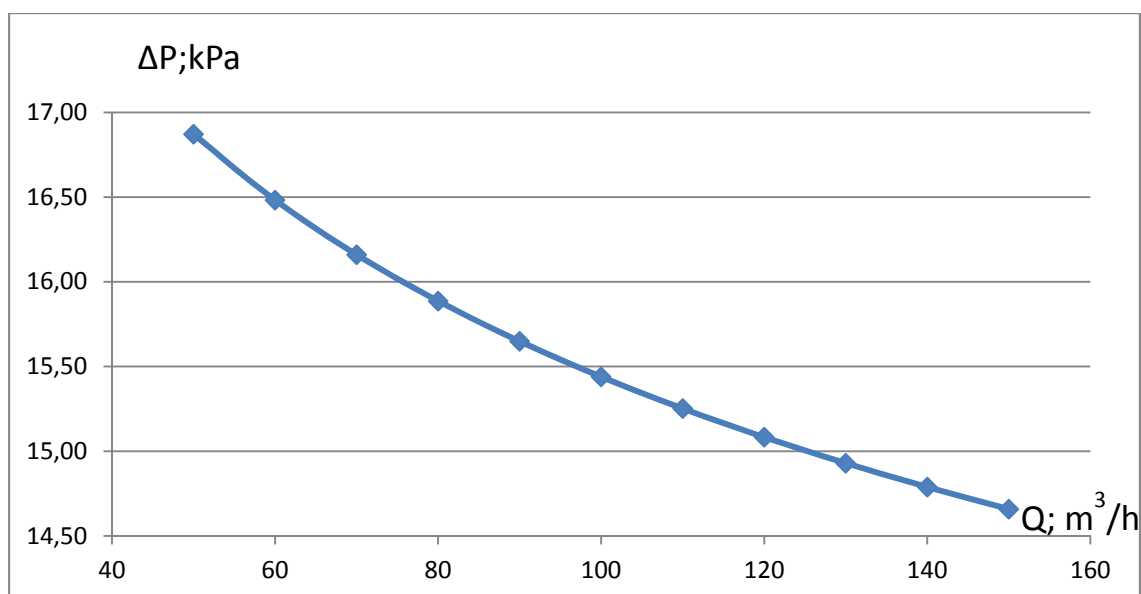


Figura 3.12 Relación entre la caída de presión y la productividad del hidrociclón.

3.6. Caso de estudio. Valoración económica

En el presente epígrafe se realiza una valoración técnico económica de los resultados obtenidos tomando como caso de estudio la planta procesadora de grava y arena “El Jobo” del municipio de Sagua de Tánamo.

Tabla 3.4 Resultados técnico económicos de la criba.

Equipo	Método de Cálculo	Potencia; kW	Ancho; m	Q ; m^3/h	Tamaño de la Inversión; CUC	Gasto anual energía kWh/año
CRIBA	Instalado	15	1,50	103,18	34828,41	29040,00
	Cálculo Real	10,23/11,2	1,50	75	25316,25	21683,20
	Necesario	8,91/9,00	1,50	54	18227,70	17424,00
Total	Instalado				34828,41	29040,00
	Cálculo Real con los datos tecnológicos (CR)				25316,25	21683,20
	Necesario según datos explotación actual (NE)				18227,70	17424,00
	Instalado - CR				9512,16	7356,80
	Instalado - NE				16600,71	11616,00

Tabla 3.5 Resultados técnico económicos del triturador de mandíbula.

Equipo	Método de Cálculo	Potencia; kW	Ancho; m	Q; m³/h	Tamaño de la Inversión; CUC	Gasto anual energía kWh/año
TRIT MAND	Instalado	110	0,60	110	17300,00	212960,00
	Cálculo Real	63,8/75	0,60	60	12600,00	145200,00
	Necesario	47,8/55,5	0,60	60	9400,00	107448,00
Total	Instalado				17300,00	212960,00
	Cálculo Real con los datos tecnológicos (CR)				12600,00	145200,00
	Necesario según datos explotación actual (NE)				9400,00	107448,00
	Instalado - CR				4700,00	67760,00
	Instalado - NE				7900,00	105512,00

Tabla 3.6 Resultados técnico económicos del triturador de cono de trituración media y fina.

Equipo	Método de Cálculo	Potencia; kW	Ancho; m	Q; m³/h	Tamaño de la Inversión; CUC	Gasto anual energía kWh/año
TRIT CONO	Instalado	184	0,09	75	25316,25	356224,00
	Cálculo Real	145/168	0,09	20	12489,35	325248,00
	Necesario	90,7/93	0,09	20	6751,00	180048,00
Total	Instalado				25316,25	356224,00
	Cálculo Real con los datos tecnológicos (CR)				12489,35	325248,00
	Necesario según datos explotación actual (NE)				6751,00	180048,00
	Instalado - CR				12826,90	30976,00
	Instalado - NE				18565,25	176176,00

Tabla 3.7 Resultados técnico- económicos de los transportadores de bandas.

Equipo	Método de Cálculo	Potencia; kW	Ancho B; m	Q; m³/h	Tamaño de la Inversión; CUC	Gasto anual energía kWh/año
Transportador 4	Instalado	18,00	0,800	80	35 152,50	34 848,00
	Cálculo Real	11,17/15,	0,800	80	34 662,00	29 040,00
	Necesario	10,22/11,	0,500	60	25 450,41	21 296,00
Transportador 6	Instalado	9,9	0,600	22	18 987,37	19 166,40
	Calc Real	4,71/5,50	0,600	22	18 545,80	10 648,00
	Necesario	4,44/5,50	0,400	15	13 229,64	10 648,00
Transportador	Instalado	11,00	0,600	16	19 774,41	21 296,00

tador 7	Calc Real	4,41/5,50	0,600	16	19 222,56	10 648,00
	Necesario	4,31/5,50	0,400	15	13 778,02	10 648,00
Transportador 9	Instalado	11,00	0,600	25	21 053,35	21 296,00
	Calc Real	5,20/5,50	0,600	25	20 465,81	10 648,00
	Necesario	4,68/5,50	0,400	12	14 669,14	10 648,00
Transportador 10	Instalado	11,00	0,600	14	88 54,21	21 296,00
	Calc Real	2,23/3,00	0,600	14	84 83,57	5 808,00
	Necesario	2,25/3,00	0,400	12	61 69,26	5 808,00
Transportador 12	Instalado	9,00	0,600	14	14 953,78	17 424,00
	CalcReal	3,97/4,00	0,600	14	14 536,46	7 744,00
	Necesario	3,82/4,00	0,400	10	10 419,20	7 744,00
Total	Instalado				11 8775,61	135 326,40
	Cálculo Real con los datos tecnológicos				11 5916,21	74 536,00
	Necesario según datos explotación actual				83 715,68	66 792,00
	Instalado - CR				2 859,40	60 790,40
	Instalado - NE				35 059,93	66 792,00

Tabla 3.8 Resultados técnico- económicos del transportador por tornillo sin fin.

Equipo	Método de Cálculo	Potencia; kW	D; m	Q; m³/h	Tamaño de la Inversión; CUC	Gasto anual energía kWh/año
TRANS SINFÍN	Instalado	22,4	1,25	25	8438,75	43366,40
	Cálculo Real	15,8/18,7	1,25	22	7426,10	36203,20
	Necesario	13,3/14,9	1,25	15	5063,25	28846,40
Total	Instalado				8438,75	43366,40
	Cálculo Real con los datos tecnológicos (CR)				7426,10	36203,20
	Necesario según datos explotación actual (NE)				5063,25	28846,40
	Instalado - CR				1012,65	7163,20
	Instalado - NE				3375,50	14520,00

3.7. Conclusiones del capítulo

- 1) Se obtienen las correlaciones entre los datos teóricos y experimentales de los equipos de trituración de mandíbula, de cono de trituración secundaria, de cribado y de transporte continuo según el esquema tecnológico estudiado, lo que permitió la validación de la metodología perfeccionada relacionada con estos equipos.

- 2) Se demuestra el nivel de subutilización de los equipos instalados según el esquema tecnológico de la Planta procesadora de grava y arena el Jobo de Sagua de Tánamo; caso de estudio.
- 3) Se muestran los resultados del análisis técnico económico según los resultados de los parámetros tecnológicos obtenidos por los procedimientos de cálculo perfeccionados para estos equipos procesadores de grava y arena, cuyo resultado final significa un ahorro de:
 - ✓ 374 616,00 kWh/año
 - ✓ 81 501,38 CUC por concepto de gastos de inversión
- 4) Los resultados obtenidos del análisis estadístico demuestran que la metodología °propuesta es válida con un nivel de significancia del 0,05.
- 5) Se proponen varios esquemas tecnológicos para el procesamiento de las gravas y arenas a partir de las rocas de canteras y aluviones.

Conclusiones Generales

1. Se estableció la modelación de los parámetros tecnológicos del triturador de mandíbula para áridos cubanos, donde se generó un diseño con un nivel de precisión menos del 15 % entre los valores teóricos y los empíricos medidos en condiciones reales; como es el consumo de la energía eléctrica por parte del accionamiento para las mismas condiciones de la productividad y de las propiedades físico mecánicas de los áridos cubanos procesados.
2. Se perfeccionaron los métodos de cálculo de los equipos que conforman las plantas procesadoras de áridos cubanos, al establecerse la fundamentación, los algoritmos y la extensión de un nuevo enfoque del método; a partir de las mejoras en la sistematización de los parámetros tecnológicos de los equipos que conforman los esquemas de estas plantas, lo que sirve de base para la selección racional de los mismos.
3. Se estableció una modelación teórica para el diseño de los hidrociclones utilizados para la extracción del lodo contenido en las arenas obtenidas de la preparación mecánica de los áridos o de los aluviones de los ríos y su beneficio por lavado con agua, a partir de la interrelación de los parámetros teóricos del fluido o suspensión, las propiedades físicas y mecánicas del líquido y sólidos que intervienen y los parámetros geométricos y tecnológicos del sistema de bombeo.
4. Se verificó que los equipos instalados en las plantas procesadoras de áridos de Holguín están subutilizados y existen sobreconsumos de energía que alcanzan valores considerables, como es el caso de la instalación objeto de estudio (374 616 kWh/año). Se observa además que se pueden disminuir los valores de inversión y mantenimiento (81,501.38 CUC).
5. Los procedimientos para la determinación de los parámetros tecnológicos de los trituradores, las cribas e hidrociclones generan el diseño racional de los equipos de preparación mecánica y beneficio que conforman los esquemas tecnológicos con un enfoque energético racional. Estos están integrados en una sucesión iterativa de etapas del flujo tecnológico de las plantas procesadoras, a través de un algoritmo, utilizando los esquemas establecidos en esta investigación (figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 del anexo 3.1).

Recomendaciones

1. Validar experimentalmente los equipos que componen las instalaciones de grava y arena a partir de áridos cubanos, que no se han analizado en el caso de estudio del presente trabajo de investigación como por ejemplo cribas de arco, de tambor, trituradores de cono primarios; de tambor y de impactos e hidrociclones.
2. Confeccionar un software que permita automatizar y optimizar el procedimiento obtenido en la presente investigación.

Referencias bibliográficas

1. ALFARO, J. 2003. Materiales utilizados como áridos, Disponible en: <http://www.slideshare.net>.
2. ALONZO, DANIEL. 2002. Transportadores Convencionales. WWW.GEOCITES.COM/INGENIERIADLPLATA.
3. ANDRÉIEV, S.E.; PEROV, V.A; ZVERIÉVICH, V.V. 1980. *Trituración desmenuzamiento y cribado de minerales*. Editorial Mir, Moscú, 547p.
4. ARTERBURN, R.; MULAR, A. & JERGENSEN, G. 1982. Design and Installation of Comminution Circuits. Eds Society of Mining Engineers, New York, 592-607p.
5. BOUSO, JUAN LUIS. 1999. Cálculo de la superficie de cribado. ERAL, Equipos y Procesos, S. A., Quito, Ecuador.
6. BOUSO, JUAN LUIS. 2003. Nuevas tendencias de clasificación en el procesamiento de minerales. ERAL, Equipos y Procesos, S. A., Quito, Ecuador.
7. BRADLEY, D. 1965. The Hydrocyclone. Pergamon Press, Oxford, London.
8. CASTRO, M; LIZASOAIN, L. 2012. Las técnicas de modelización estadística en la investigación educativa: Minería de datos, modelos de ecuaciones estructurales y modelos jerárquicos lineales. Revista Espanola de Pedagogia, 148pp.
9. CIDMC. 2013. Informe técnico. Cuba.
10. CIDMC. 2015. Informe técnico. Cuba.
11. DUBOURDIEU, B. 2006. Indicadores medioambientales: un primer paso hacia el desarrollo sostenible. En: I Congreso Nacional de Áridos. Zaragoza.
12. DUNLOP CONVEYOR BELT DESIGN MANUAL. 24/05/2004 http://www.ckit.co.za/Secure/Conveyor/Troughed/belt_tension/Dunlop/Belting.
13. ECRIN; CEPRONI; CTDMC. 2009. Informe técnico. Cuba.
14. ETAYO, JULIO; BARRAZA, JUAN. 2009. Correlaciones matemáticas para la obtención de rendimiento de producción, remoción de cenizas y partición de agua usando un hidrociclón “solo agua”. Revista DYNA. Medellín. ISSN 0012-7353.

15. FEIJOO CALLE, PATRICIO. 2017. Determinación de parámetros operacionales en un hidrociclón Krebs para una separación óptima de arenas aluviales. Trabajo de diploma. 67 pp.
16. G. AUSTIN, LEONARD; CONCHA A., FERNANDO. 1994. Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación. Chile, 394p.
17. GARCELL REGALADO, YOANNIA. 2003. Perfeccionamiento científico y metodológico de asignatura equipos de transporte industrial e izaje. Trabajo de Diploma. Tutores Ing. Roberto Sierra Pérez, Lic. Leila Reyes Oliveros. I.S.M.M.
18. GERONTIEV, B.; KARLIN, T. 1962. Transporte minero. Ed. Niedra, Moscú, 347 pp.
19. GONZÁLEZ ALIAGA, PEDRO. 2013. Diseño de un sistema de información y plan de mantenimiento preventivo para planta de áridos Petromax. Trabajo de diploma. 129 pp.
20. GONZÁLEZ, C. 2006. Un proyecto de minería de áridos para el futuro. En: I Congreso Nacional de Áridos, Zaragoza.
21. GUPTA, A. 2006. Mineral processing design and operation: an introduction. Elsevier: London, 718 pp.
22. HERNÁNDEZ JATIB, NAISMA. 2015. Procedimiento para la elección del método de arranque de las rocas en canteras para áridos. OTAÑO NOGUEL, J. (tutor) Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 120 pp.
23. KASATKIN, A. 1985. Operaciones básicas y aparatos en la tecnología Química. Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, 323 pp.
24. E. G., KELLY; SPOTTISWOOD D., J. 1982. Introduction to mineral processing. Ed John Wiley & Sons, New York, 491pp.
25. LAMBER, J. 1990. Alternative weighing. Technology for belt. *Conveying systems*. B.S.H. 1 (3), Germany, 248 pp.
26. LEGRÁ LOBAINA, A. A; SILVA DIÉGUEZ, O. 2009. La investigación científica: conceptos y reflexiones. ISMMM. Moa. Cuba. Inscrito en el CENDA: 2384-2007.

27. LUACES, C.; CARRETÓN, M. R. & MACEDA, M. 2015. Perspectiva económica del sector europeo de los áridos. Lecciones de la crisis. En IV Congreso Nacional de Áridos, Madrid.
28. M., NEDRA. 1975. Manual del enriquecimiento de minerales. V.1, Procesos preparatorios. 447p.
29. MARTÍNEZ, M. A. 2009. Diagnóstico tecnológico del sector de los áridos y su aplicación a la región de Murcia. TRIGUEROS TORNERO, E. (tutor). Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena. 325 pp.
30. MASSARANI, G. 1997. Fluidodinâmica em Sistemas Particulados. Editora UFRJ, Rio de Janeiro.
31. MOTA, E. Consejos Prácticos. 2007. En: II Jornadas sobre Gestión Integral de Explotaciones de Áridos, Jornada Técnica, Madrid.
32. MULAR, A. L.; JULL, N.A. 1978. The Selection of Cyclone Classifiers, Pumps and Pump Boxes for Grinding Circuits. AIME, New York.
33. ORIOL G. J.M.; AGUILAR P.F.1995. Máquinas de transporte continuo. T I. 3Ed. Pueblo y Educación, 235 pp. ISBN 959-13-0393-9.
34. PEREDA, H.; POLANCO A., R. 1999. Transporte minero. Edit. Félix Varela, La Habana, 363 pp.
35. PLITT, L. R. 1976. A Mathematical Model of the Hydrocyclone Classifier. CIM Bulletin.
36. RAMÍREZ CARDERO, ALEXEYS. 2007. Estudio del Proyecto de una planta procesadora de grava y arena para el municipio Moa. Trabajo de Diploma. Tutor: M. Sc. Roberto J. Sierra Pérez, ISMMM.
37. RÁZUMOV, K.A.; PEROV, V.A. 1985. Proyectos de fábricas de preparación de minerales. Editorial Mir, Moscú, 544pp.
38. REGALADO ROMERO, ROLANDO. 2011. Diseño y parámetros tecnológicos de un hidrociclón para el beneficio de la planta procesadora de áridos del municipio de Sagua de Tánamo. Trabajo de Diploma. Tutores: Dr. C. Roberto Johan Sierra Pérez; Ing. Yoni Sierra González. ISMMM.

39. RIETEMA, K. 1961. Performance and design of Hydrocyclone. Chemical Engineering Science. 267 pp.
40. RODRÍGUEZ GALBARRO, HERMENEGILDO. 2011. Cálculo de Transportadores de Tornillo Sin Fin. 237 pp.
41. RODRÍGUEZ T., CALIXTO; FALCÓ O., OLBEN. 2008. Proyecto de explotación actualizado periodo 2007 – 2011, concesión del yacimiento de grava – arena Rio Sagua zona 15 y zona Limba.
42. ROWLAND C., A. 1973. Comparison of Work Indices Calculated From Operation Data with Those from Laboratory Test Data. ed. M.J. Jones. IMM (London), 47-61p.
43. SHASMEITER L, G. DIITRIEV V, G. 1996. Teoría y cálculo de los transportadores de banda. Mashinostoinie. Ed. Niedra, Moscú, 417 pp.
44. SIERRA PÉREZ, ROBERTO JOHAN. 1987. Análisis de la explotación de los equipos de transportación de grava y arena en la industria de materiales de construcción de Moa. Revista Minería y Geología. Moa, Holguín, Cuba, 71-82pp.
45. SIERRA PÉREZ, ROBERTO JOHAN. 2010. Optimización energética en el diseño de transportadores de banda para el mineral laterítico cubano. Tesis Doctorado en Ciencias Técnicas. ISMMM.
46. SVAROVSKY, L. 1984. Hydrocyclones. Technomic Publishing Co, New York, 283 pp.
47. SVAROVSKY, L. 1981. Solid-liquid Separation. London-UK: Butterworths. 239 pp.
48. TARG, S. 1980. Curso breve de mecánica teórica. Editorial Mir, Moscú.
49. TÍJONOV N., V. 1987. Máquinas de transporte en las empresas mineras. Ed. Niedra, Moscú, 367 pp.
50. TRAWINSKI, HELMUT. 1973. Aplicaciones y funcionamiento práctico de los hidrociclones. Adaptación de ERAL, Equipos y Procesos, S. A.
51. TRIGUEROS, E. 2008. Líneas estratégicas del sector de fabricación de los áridos. Fabricación de Áridos en la Región de Murcia. Estrategias y Desarrollo. En: Jornada Técnica, Murcia.

52. TRIGUEROS, E. 2006. Nuevas propuestas en la aplicación para la restauración de canteras. Nuevas tendencias medioambientales y restauración de canteras de áridos. En: Jornada Técnica, Murcia.
53. TRIGUEROS, E.; ALCARAZ, M. & MARTÍNEZ, M. A. 2007. Análisis del Proyecto de la cantera Ideal. Cartagena: Colegio de Ingenieros Técnicos de Minas. Universidad Politécnica de Cartagena.
54. VALOTKOSKII V., S.; KARMAYEV G., D. & DRAYA M., I. 1990. Selección del equipamiento de los transportadores de banda en las canteras. Ed Niedra, Moscú, 387 pp.
55. VASILIEV K., A.; NIKOLAIEV A., K. & CAZONOV K., G. 2006. Máquinas de cargas y transporte de las plantas de beneficio de minerales. Sant Petersburgo, HAYKA, 358 pp. ISBN 5-02-025092-9. 359.
56. VASILIEV K., A.; NIKOLAIEV A., K. 2003. Máquinas de transporte. Sant Petersburgo, 124 pp. ISBN 5-94211-216-9.
57. VELÁSQUEZ MATOS, ALEXANDER. 1990. Diseño de una planta piloto a escala semi-industrial para el estudio del lavado y cribado del mineral laterítico. Trabajo de diploma. Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya". Tutor Dr. C. Hernández Ochoa.
58. VIEIRA L., G.M.; BARBOSA E., A. & BARROZO, M. 2005. Performance analysis and design of filtering hydrocyclones. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. January - March, ISSN 0104-6632.
59. ZELIENKII O., B.; PETROV A., C. 1986. Manual para proyectos de transportadores de banda. Niedra, Moscú, 222 pp.

ANEXOS

Anexo 1.1 Caracterización de la materia prima y el resumen de las calidades por bloques de la zona 15

Tabla 1.1 Caracterización de la materia prima.

Caracterización de la materia prima Zona 15						
Depósitos de terraza de rio, mezcla de arena, grava y arcilla. Depósitos aluviales de poco arrastre	100 % (Alto contenido de grava)	Composición Fragmentos de andesitas, basalto, algunas dioritas y en menor grado calizas y tobas (10 - 15 %)	Polvo, limo y arcilla	20,2 %		20,2 %
			Grava y Arena	79,8 %	100 %	Arena 44,1 %
						Grava 55,9 % MV-2,5 g/cm³ Abs. 3 % Marca: 800
Caracterización de la materia prima Zona Limba						
Depósitos de terraza de rio, mezcla de arena, grava y arcilla. Depósitos aluviales de poco arrastre	100 % (Alto contenido de grava)	Composición Fragmentos de andesitas, basalto, algunas dioritas y en menor grado calizas y tobas (10 - 15 %)	Polvo, limo y arcilla	2 %		Arena 51 %
			Grava y Arena	80 %	100 %	Grava 49 % MV-2,5 g/cm³ Abs. 3 % Marca: 800

Tabla 1.2 Resumen de calidades por bloques (Zona 15).

Bloques	Eficiencia Tecnológica	Grava	Arena	Perdidas Tecnológica	Módulo. Finura	Calidad
1BB	78,1	48	29,9	21,7	3,47	C - D
2C ₁ B	78	48	29,9	21,7	3,47	C - D
3C ₁ B	75,9	57,2	18,6	23,6	3,35	D
4C ₂ B	84,35	64,39	19,96	15,45	3,37	B
5C ₁ N	73,7	51,5	22,23	26,05	3,13	C
6C ₁ N	73,5	42,77	30	26,2	3,31	C

Anexo 1.2 Investigaciones tecnológicas y características cualitativas de los productos finales

Tabla 1.3 Composición granulométrica de la fracción 19 – 10 mm. p

Tamiz (mm)	% Pasado	% Retenido
25,4	99	1
19,1	84	16
12,7	11	89
9,52	1	99
4,76	1	99

Tabla 1.4 Otras características físicas de la fracción 19 – 10 mm.

Masa unitaria suelta; kg/l	1,488
Masa unitaria compactada; kg/l	1,635
Vacío; %	35,7
índice de triturabilidad; %	6,34
Abrasión; %	20,4

Material más fino que el tamiz 200; %	0,72
Partículas planas y alargadas; %	7,26
Partículas de arcilla; %	0
Peso específico corriente; g/cm ³	2,226
Peso específico saturado; g/cm ³	2,543
Peso específico aparente; g/cm ³	2,617
Absorción; %	2,87

Tabla 1.5 Composición granulométrica de la fracción 10 – 5 mm.

Tamiz (mm)	% Pasado	% Retenido
12,7	100	0
9,52	77	23
4,76	14	86
2,38	3	97
1,19	2	98

Tabla 1.6 Otras características físicas de la fracción 10 – 5 mm.

Masa unitaria suelta; kg/l	1,423
Masa unitaria compactada; kg/l	1,569
Vacío; %	37,2
Índice de triturabilidad; %	6,58
Abrasión; %	24,0
Material más fino que el tamiz 200; %	0,85
Partículas planas y alargadas; %	6,0
Partículas de arcilla; %	0

Peso específico corriente; g/cm ³	2,502
Peso específico saturado; g/cm ³	2,588
Peso específico aparente; g/cm ³	2,736
Absorción; %	3,4

Tabla 1.7 Composición granulométrica de la fracción 5 – 0,15 mm.

Tamiz (mm)	% Pasado	% Retenido
9,52	100	0
4,76	98	2
2,38	84	16
1,19	69	31
0,59	46	54
0,297	15	85
0,149	2	98

Tabla 1.8 Otras características físicas de la fracción 5 – 0,15 mm.

Masa unitaria suelta; kg/l	1,500
Masa unitaria compactada; kg/l	1,614
Vacío; %	33,7
Material más fino que el tamiz 200; %	1,4
Partículas de arcilla; %	0
Peso específico corriente; g/cm ³	2,435
Peso específico saturado; g/cm ³	2,530
Peso específico aparente; g/cm ³	2,693
Absorción; %	3,94

Anexo 2.1 Datos de las cribas

Tabla 2.1 Productividad específica de las cribas.

Productividad específica Q_{esp} (t/m ² ·h)			
Tamaño del orificio de la malla (mm)	Material		
	Carbón	Triturado	Natural
0,50	2,0	2,7	3,5
0,80	2,6	3,4	4,4
1,00	2,8	3,7	4,9
1,25	3,1	4,1	5,5
2,0	4,0	5,3	7,1
4,0	6,0	8,0	10,5
5,6	7,5	10,0	13,0
6,3	8,1	10,8	14,0
8,0	9,4	12,5	16,0
10,0	10,8	14,4	18,6
12,5	12,5	16,6	21,5
16,0	14,3	19,0	25,1
20,0	16,5	22,0	29,0
25,0	19,5	26,0	33,4
31,5	22,5	30,0	37,9
40,0	26,0	34,7	42,5
50,0	29,3	39,0	47,4
63,0	33,0	44,0	52,0
80,0	36,8	49,0	57,0
100,0	42,0	56,0	63,0
120,0	47,3	63,0	68,0

Tabla 2.2 Factor de rechazo.

Factor de rechazo										
R	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Factor f_r	1,10	1,08	1,06	1,04	1,02	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92
R	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95

Anexo 2.3 Esquemas de las trituradoras

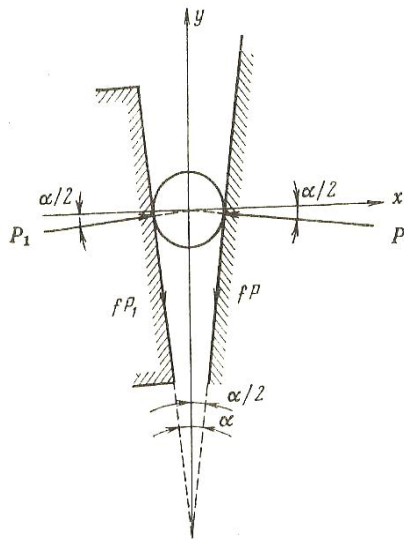


Figura. 2.1. Ángulo de agarre de la trituradora de mandíbula.

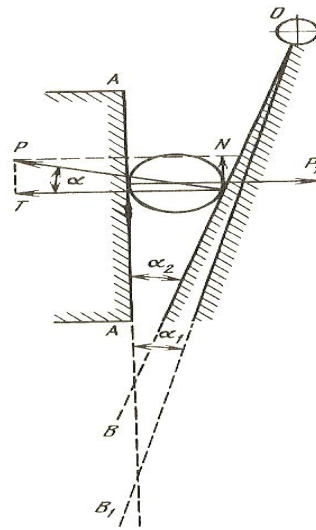


Figura. 2.2. Equilibrio de un trozo fijado entre las mandíbulas de la trituradora.

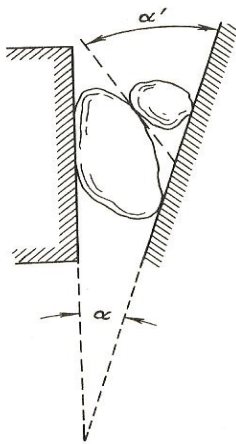


Figura. 2.3. Posición de los trozos durante la salida de la cámara de trituración de la trituradora de mandíbula.

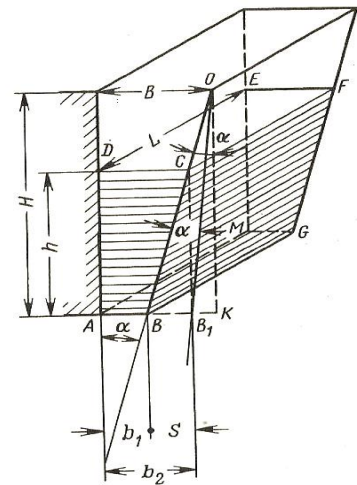


Figura. 2.4. Descarga del producto triturado de la trituradora de mandíbula a la frecuencia de rotación más ventajosa del cigüeñal.



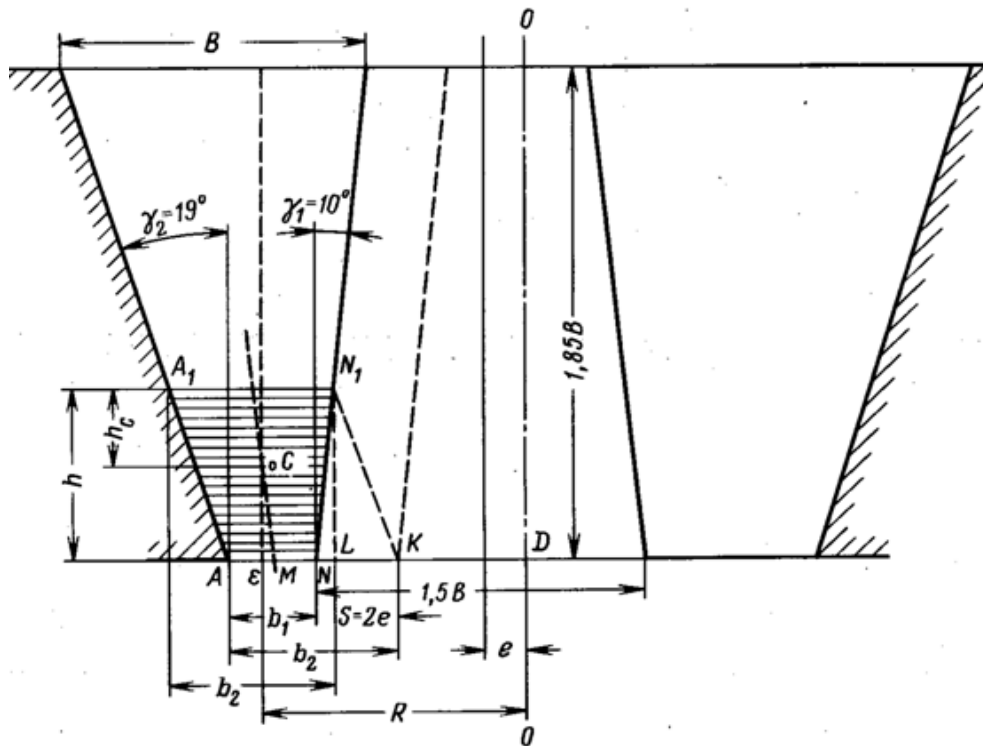


Figura 2.7. Descarga del producto triturado de la trituradora cónica de trituración gruesa con la frecuencia óptima del vaso excéntrico.

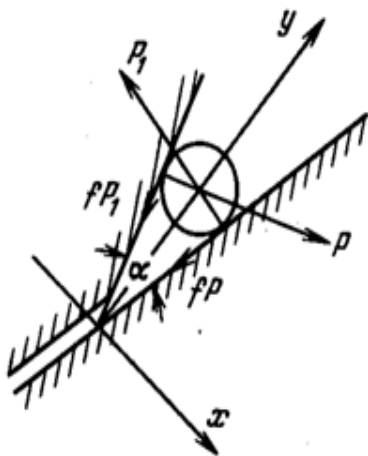


Figura 2.8 Esquema del ángulo de agarre de una trituradora de cono de trituración media.

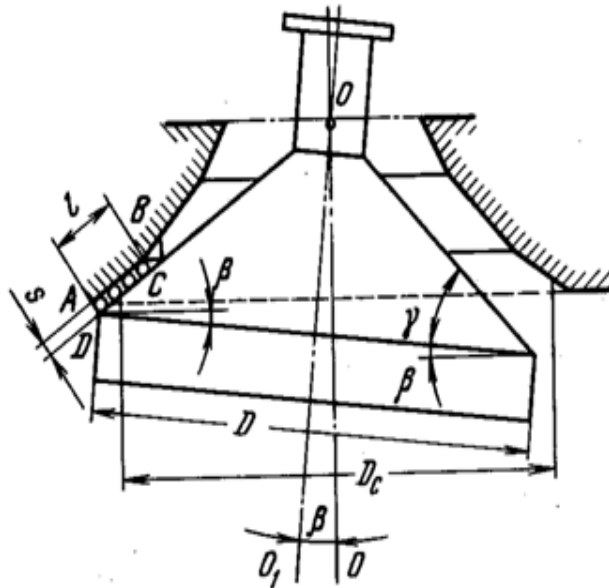


Figura 2.9 Esquema de descarga del producto triturado en la trituradora de cono de trituración media fina.

Anexo 2.4 Datos transportador sinfín

Tabla 2.3 Velocidad máxima según la clase de material.

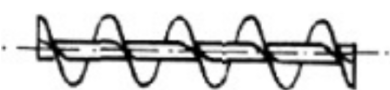
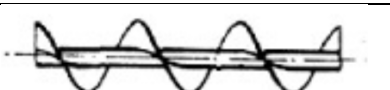
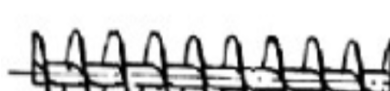
Diámetro del tornillo (mm.)	Velocidad máxima (r.p.m.) según la clase de material (*)				
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	Clase V
100	180	120	90	70	30
200	160	110	80	65	30
300	140	100	70	60	25
400	120	90	60	55	25
500	100	80	50	50	25
600	90	75	45	45	25

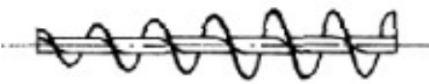
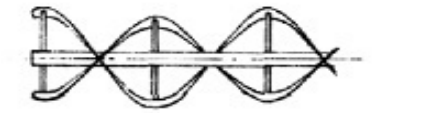
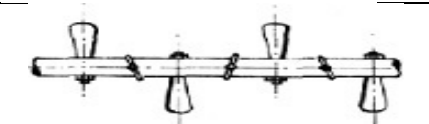
(*) Ver las distintas clases de material definidas en el Anexo 2.5.

Tabla 2.4 Capacidad de transporte de un tornillo sinfín.

Diámetro del tornillo (mm)	160	200	250	315	400	500	630	800
Paso de hélice (mm)	160	200	250	300	355	400	450	500
Velocidad normal (r.p.m.)	70	65	60	55	50	45	40	35
Capacidad en horizontal al 100 % (m ³ /h)	14	26	45	78	130	217	342	525

Tabla 2.5 Distintos tipos de hélices para un tornillo sin fin, según el tipo de material a transportar y de la función a realizar:

Tipo de Hélice	Tipo de Material para Transportar / Aplicación	Figura
Hélice continua, de paso igual al diámetro	Tipo de hélice normal para transporte de sólidos	
Hélice de gran paso, de 1,5 a 2 veces el diámetro	Se utiliza para productos que fluyen muy bien	
Hélice de pequeño paso, normalmente la mitad del diámetro	Se utiliza en tornillos sin fin inclinados hasta unos 20-25°, o cuando se quiere un prolongado tiempo de permanencia del producto en el transportador con el objeto de enfriarlo, secarlo, entre otros.	
Hélice de paso variable	Utilizado para compresión de productos, como es el caso de las prensas de tornillo.	

Hélice de diámetro variable	Se utiliza como extractor dosificador de sólidos de tolvas.	
Hélice de cinta	Tipo de hélice adecuada para productos que producen atascamiento.	
Hélice mezcladora, con dos hélices tipo cinta, uno a derecha y otro a izquierda	Se utiliza como equipo mezclador	
Hélice mezcladora, con eje provisto de paletas	Se utiliza como equipo mezclador	

Para el manejo de materiales y productos normales, la hélice de un transportador de tornillo está normalmente fabricada en chapa de acero al carbono de 3 a 4 mm de espesor. Su diámetro suele ser inferior en unos 2 cm al de la carcasa, ya que no deberá rozar las paredes de la misma cuando el eje del tornillo gire.

Anexo 2.5 Diferentes tipos de clases de materiales transportados en un sinfín

Materiales de Clase I

Los materiales de Clase I son principalmente materiales pulverulentos, no abrasivos, que tienen un peso específico que se sitúa entre 0,4 - 0,7 t/m³ aproximadamente, y que fluyen fácilmente. Entre los materiales pertenecientes a esta clase están:

Cebada, trigo, malta, arroz y similares; Harina de trigo y similares; Carbón en polvo; Cal hidratada y pulverizada.

Materiales de Clase II

Los materiales de Clase II son materiales que se presentan en granos o pequeños tamaños, mezclados en polvo, son de naturaleza no abrasiva, que fluyen fácilmente. Su peso específico se sitúa entre 0,6 - 0,8 t/m³. Entre los materiales pertenecientes a esta clase están:

Alumbre en polvo; Haba de soja; Granos de café, cacao y maíz; Carbón de hulla en finos y menudos; Cal hidratada.

Materiales de Clase III

Los materiales de Clase III son materiales semi-abrasivos de pequeño tamaño, mezclados con polvos, con peso específico que se sitúa entre 0,6 - 1,2 t/m³. Entre los materiales pertenecientes a esta clase están:

Alumbre en terrones; Bórax; Carbón vegetal; Corcho troceado; Pulpa de papel; Leche en polvo; Sal; Almidón; Azúcar refinada; Jabón pulverizado.

Materiales de Clase IV

Los materiales de Clase IV son materiales semi-abrasivos o abrasivos, granulares o pequeños tamaños en mezcla con polvos. Son materiales con un peso específico que se sitúa entre 0,8 - 1,6 t/m³. Entre los materiales pertenecientes a esta clase están:

Bauxita en polvo; Negro de humo; Harina de huesos; Cemento; Arcilla; Azufre; Arena; Polvo de piedra caliza; Azúcar sin refinar; Resinas sintéticas; Óxido de cinc.

Materiales de Clase V

Los materiales de Clase V son materiales abrasivos, troceados o en polvo, como pueden ser cenizas, hollines de conductos de humos, cuarzo pulverizado, arena silícea. Esta clase de materiales, al ser de naturaleza abrasiva, se debe evitar que entre en contacto con soportes y cojinetes. Como norma general, no es aconsejable utilizar transportadores de tornillo sin fin para transportar esta clase de material.

Anexo 2.6 Esquema de la instalación caso de estudio

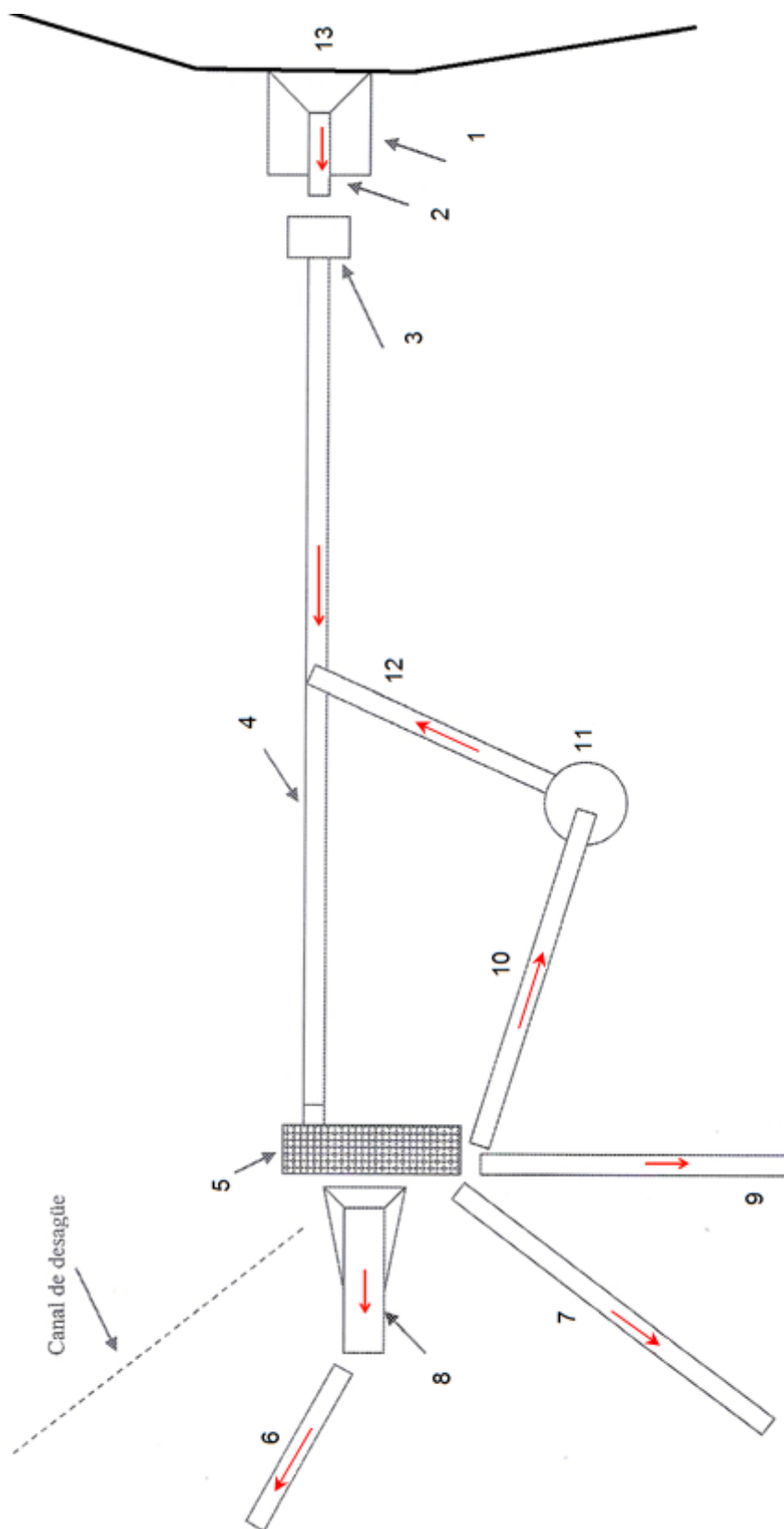


Figura 2.10 Esquema tecnológico de la procesadora de grava y arena el Jobo, municipio Sagua de Tánamo, Holguín.

Anexo 2.7 Características tecnológicas de los equipos que conforman el esquema tecnológico de la procesadora de grava y arena el Jobo, municipio Sagua de Tánamo, Holguín

Transportadores de banda								
Transportador	Q (m ³ /h)	B (m)	V (m/s)	γ (t/m ³)	N (kW)	a mm	L (m)	Δh m
4	80	0,8	1,94	1,57	18	0 a 90	30,0	7,6
6	22	0,6	1,6	1,4	9,9	0,15 a 5	19,3	4,6
7	16	0,6	1,37	1,4	11	5 a 12	20,1	4,5
9	25	0,6	1,37	1,4	11	13 a 19	21,4	4,6
10	14	0,6	1,87	1,4	11	35	9,0	2,2
12	14	0,6	1,87	1,4	9	19	15,2	3,6

Transportador por tornillo sinfin								
Transportador	Q (m ³ /h)	D (m)	n (20) (min ⁻¹)	γ (t/m ³)	N (kW)	a mm	L (m)	Δh m
8	22	1,25	1,94	1,57	18	0,15 a 5	7,5	1,7

11. Triturador de cono Sandvik H3800

Potencia motor 184 kW 440v 275A 0.87 1782 min⁻¹
Q = 45 75 m³/h
Velocidad de rotación del cono móvil 260 min⁻¹
Ancho de abertura de carga 90 mm
Ancho de abertura de descarga mínima 16 mm
Masa de la trituradora 11 27 t

2. Alimentador

Potencia motor 18,5 kW 440v 88A 0.85 1170 min⁻¹

3. Triturador de mandíbula

Potencia motor 75 kW 440v 122A 0.86 1184 min⁻¹
Q = 80 a 110 t/h
Grosor de los pedazos de material
Velocidad de rotación del árbol del excéntrico 260 a 350 min⁻¹
Ancho de abertura de carga 600 x 900 mm
Ancho de abertura de descarga 75 a 200 mm
Masa de la trituradora 7,67 t

Tipo correa D275 – 285

5. zaranda vibratoria (Criba) serie yk (modelo chino 3YK1548)

Potencia motor	15 kW 440v 25,4A 1752 min ⁻¹
Q=	22,5 a 162 t/h
Dimensión	5906×2100×1600 mm
Dimensión de separación	4800 x 1500 mm
Niveles	(3); Nivel Superior (25 mm); Nivel Medio (13 mm); Nivel Inferior (6 mm)
Ángulo de inclinación	20°
Tamaño de alimentación máximo	100 mm
Frecuencia de vibración	870 Hz
Velocidad de rotación	870 min ⁻¹
Dos amplitudes	8 mm
Masa de la criba	6,9 t

Anexo 2.5 Datos hidrociclón

Tabla 2.6 Parámetros K, B y C y número de Euler para diseños convencionales de Bradley (1965) y Rietema.

Diseño	K	B	C	Eu
Bradley	0.016	54.6	2.61	7000
Rietema	0.039	145	4.75	1200

Anexo 2.8 Datos de consumo de agua criba para diferentes materiales

Material	Operación	Consumo de agua en 1 t de material, en m ³
Cascajo	Lavado	0.5 a 1
Cascajo	Cribado húmedo	0.7 a 1.1
Cascajo	Enjuague	0.3 a 0.5
Cascajo y arcilla	Lavado	1.1 a 2.1
Arena y grava	Lavado	0.7 a 1.1
Arena y grava	Cribado húmedo	0.7 a 1.1
Mineral de hierro	Cribado húmedo	1.1 a 2.3
Mineral de hierro	Lavado de suspensión	0.55 a 0.8
Carbón	Humectación previa	0.2 a 0.7
Carbón	Cribado húmedo	0.7 a 1.4
Carbón	Lavado de suspensión	0.35 a 0.7

Anexo 2.9 Analizador de redes

 **METREL®** Power Quality Analysis
MI 2392 PowerQ Plus



Anexo 3.1 Propuestas de los esquemas tecnológicos.

La variante #1 corresponde a un cribado previo ante de la trituración con la trituradora de mandíbula, continúa el cribado con lavado donde se clasifican en una malla de 5 mm la clasificación

Variante # 1.

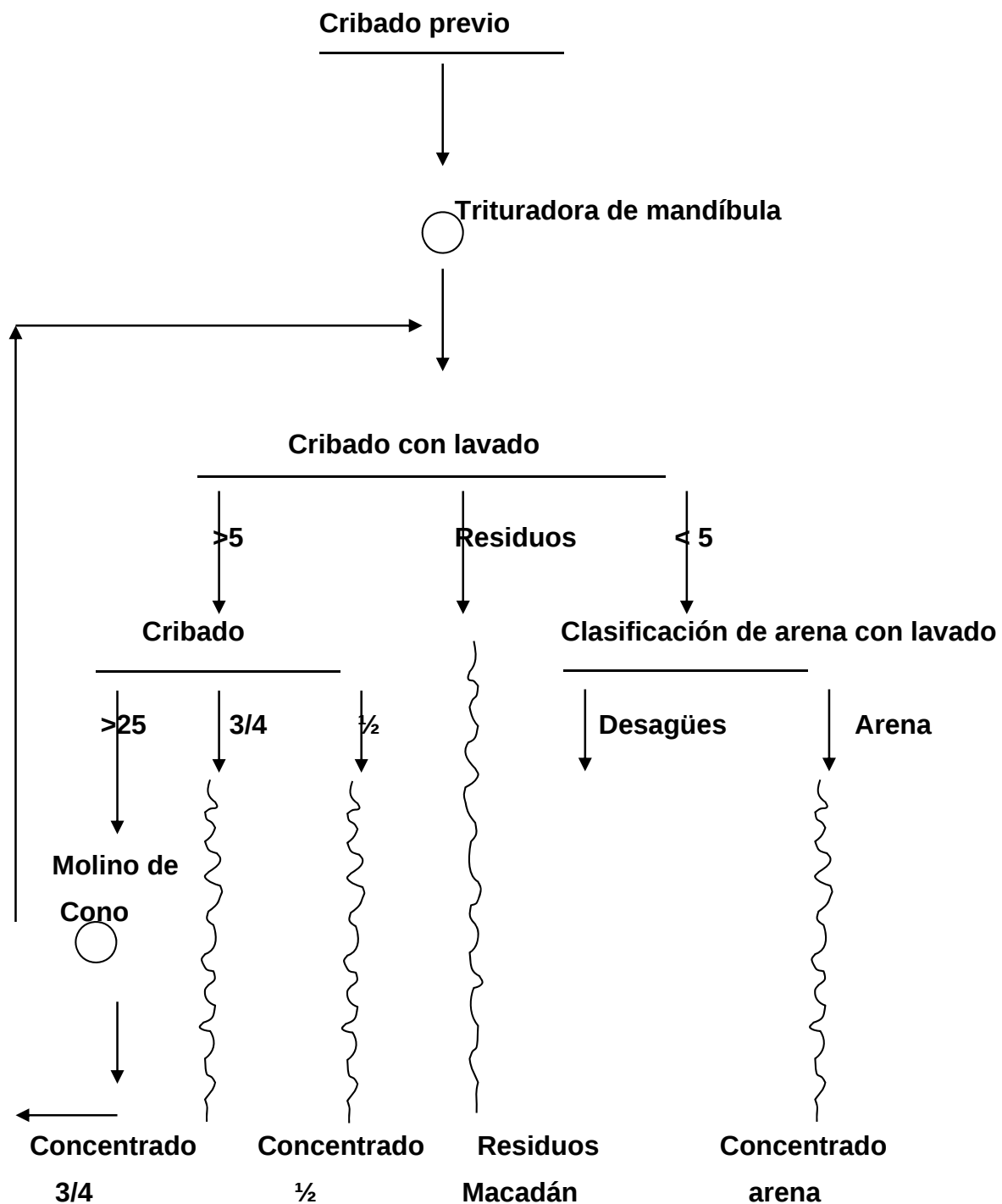


Figura 3.1 propuesta de esquema con cribado previo y triturador secundario de cono

Variante # 2.

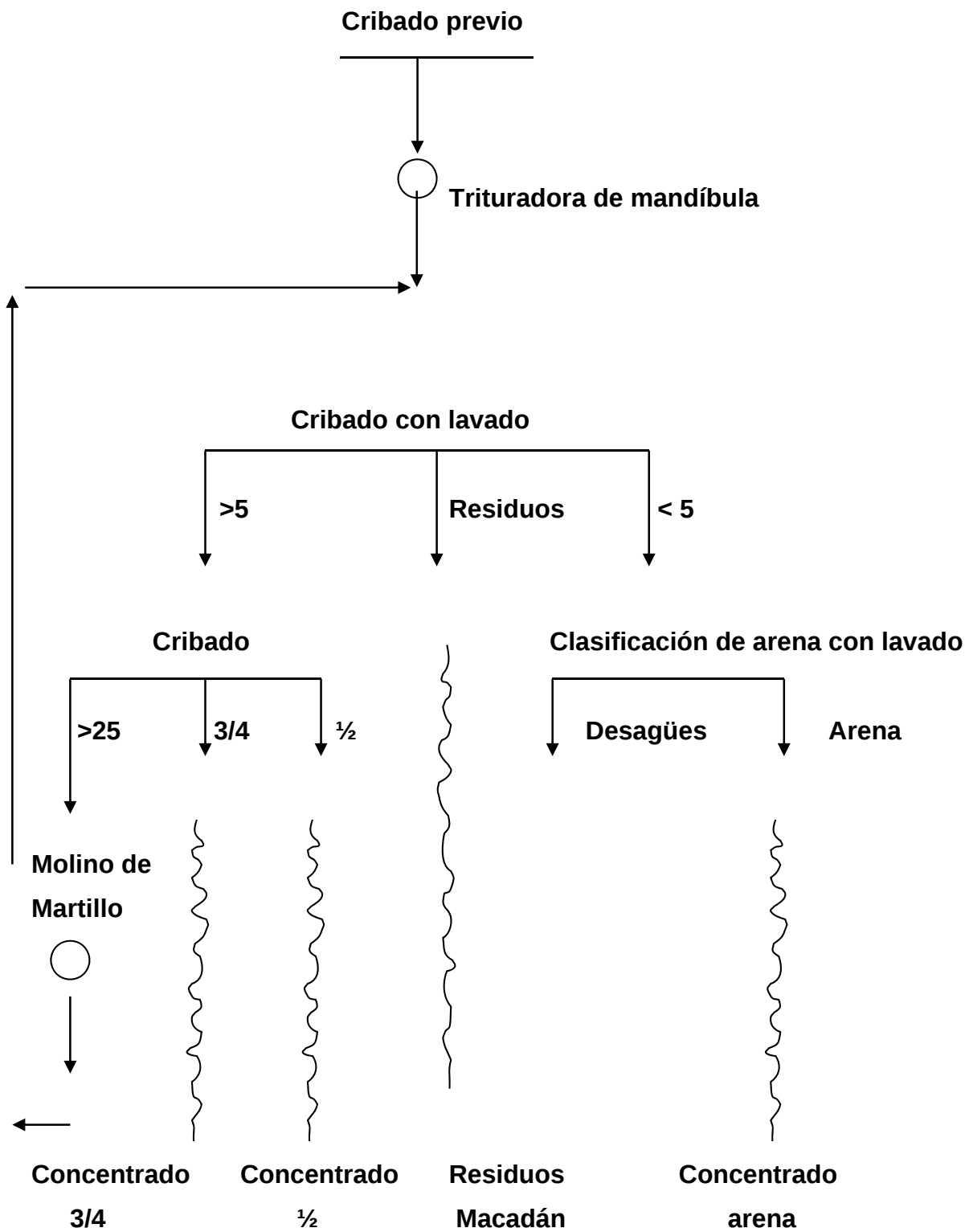


Figura 3.2 propuesta de esquema con cribado previo y triturador secundario de martillo

Variante # 3.

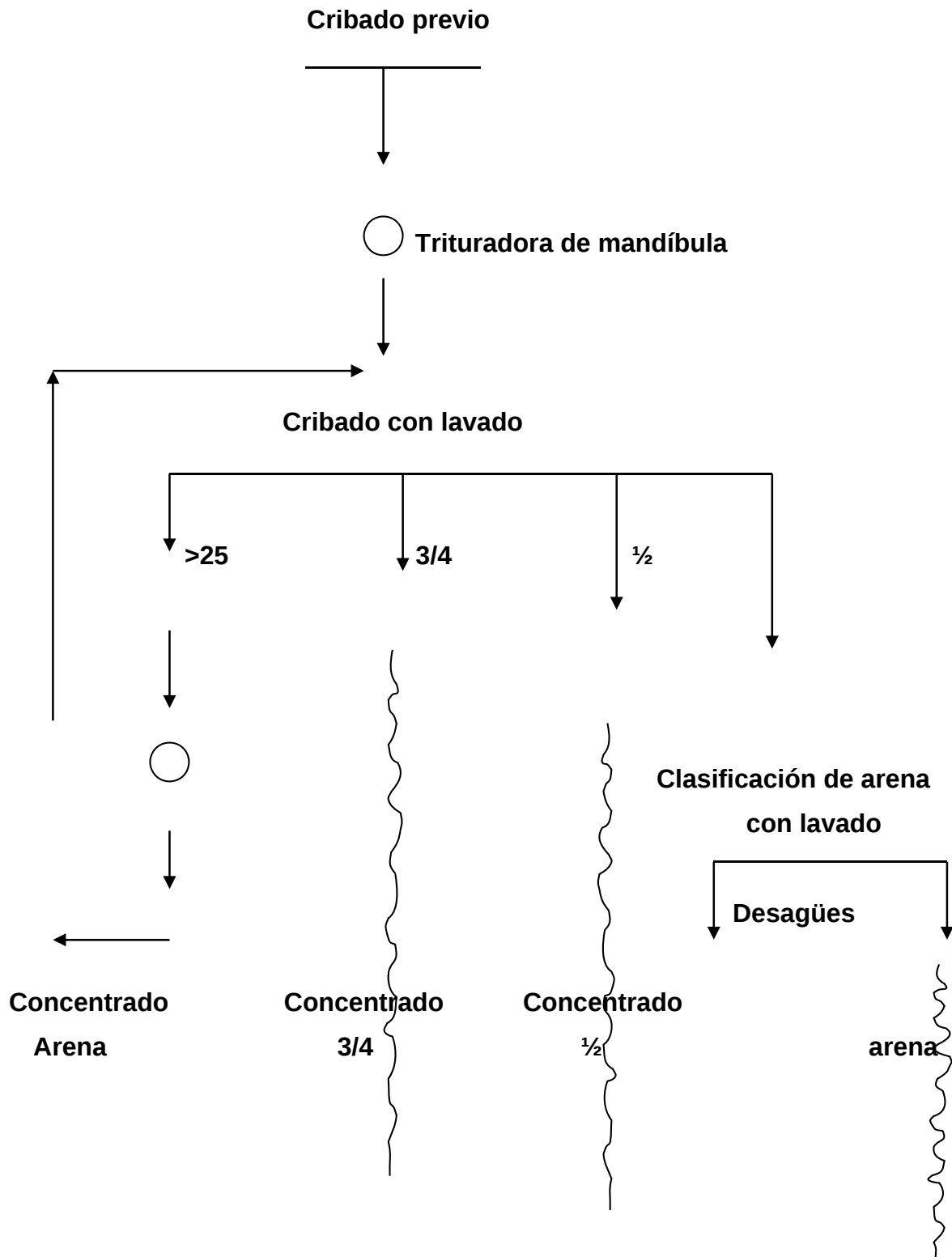


Figura 3.3 propuesta de esquema sin cribado previo en el remolador

Variante # 4.

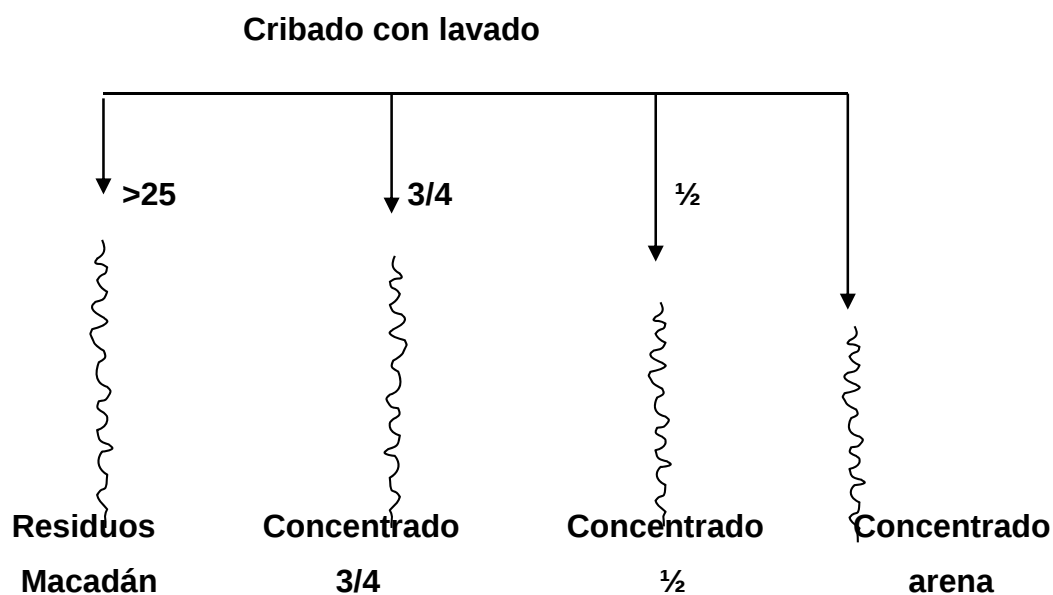


Figura 3.4 propuesta de esquema sin trituración

Anexo 3.2 Resultados del análisis estadístico

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,9931135
Coefficiente de determinación R ²	0,9862744
R ² ajustado	0,9860203
Error típico	0,8400373
Observaciones	56

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	2738,15802	2738,15802	3880,26489	5,6226E-52
Residuos	54	38,1057834	0,70566265		
Total	55	2776,26381			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-6,147878	0,36850675	-16,6832166	5,7944E-23	-6,88668951	-5,40906641
Q; m ³ /h	0,7630579	0,01224974	62,2917722	5,6226E-52	0,73849869	0,78761719