

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Estudio de prefactibilidad para una planta de conminución de
yacimientos no metálicos en un proyecto vial interregional**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Cristian Jean Soriano Contreras

 [0009-0003-0555-1928](https://orcid.org/0009-0003-0555-1928)

Asesor

MSc. Adolfo Jesús Chávez Valdivia

 [0000-0003-0625-1495](https://orcid.org/0000-0003-0625-1495)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Soriano Contreras [1]
Referencia/Reference	[1] C. Soriano Contreras, <i>“Estudio de prefactibilidad para una planta de conminución de yacimientos no metálicos en un proyecto vial interregional”</i> [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Soriano, 2025)
Referencia/Reference	Soriano, C. (2025). <i>Estudio de prefactibilidad para una planta de conminución de yacimientos no metálicos en un proyecto vial interregional</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A mis padres Pablo y Olga por su apoyo incondicional. Un
paso más.*

A mi esposa Karla, pilar en mi vida. Te amo.

*A mi hija, María Catalina, aunque aún no te tenga en mis
brazos te espero con ansias y amor infinito. Eres mi
inspiración.*

Agradecimientos

El presente trabajo es la culminación de una etapa ardua del camino que como profesional se busca concretar, la titulación profesional. Una suma de esfuerzo y dedicación que no sería posible sin el apoyo y soporte de un grupo de personas a las cuales estaré eternamente agradecido.

A mi esposa e hija, por su inspiración, por el aliento y el amor que cada día me entregan y al cual trato de retribuir incondicionalmente.

A mis padres, por la vida, por motivarme a seguir superándome y por los valores inculcados que hacen de mí, hoy, seguir adelante con convicción y firmeza.

A mi familia en general, por las vivencias, las experiencias, las alegrías y tristezas que forjaron mi carácter y mi semblante.

A mi tierra, Jauja, pedacito de cielo, alegría del corazón, ojalá pueda regresar algún día a unirme nuevamente a tus raíces.

A mis maestros, colegas, compañeros de estudio y amigos con quienes comparto el sueño de vivir en un país y una sociedad mejor para todos, la ingeniería contribuirá a eso.

Agradecer también al Ing. Adolfo Chávez Valdivia y al Ing. Víctor Hernández Díaz, asesor y especialista de mi trabajo de Tesis, por sus alcances, sugerencias y recomendaciones en la elaboración del presente trabajo.

Y finalmente, a la UNI, por permitir que en sus aulas pueda forjarme en la ingeniería y adquirir los conocimientos que puse en práctica en la elaboración de este trabajo.

Resumen

La presente tesis desarrolla un estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta de conminución de yacimientos no metálicos, orientada al abastecimiento de materiales agregados requeridos para la construcción de la carretera interregional PE-3N, en el sector Bambamarca – Cajamarca. Este proyecto surge ante la limitada disponibilidad de materiales procesados en la zona y los elevados costos logísticos derivados del transporte desde ubicaciones distantes.

El estudio se centró en el Yacimiento No metálico (cantera) Cuñacales Alto, ubicado en la provincia de Hualgayoc, Cajamarca, y comprendió la caracterización mineralógica y geomecánica del yacimiento, así como la evaluación de parámetros críticos de muestras extraídas, tales como: granulometría, resistencia a la abrasión, absorción y peso específico. Estos estudios confirman que el material extraído del yacimiento cumple con los estándares técnicos establecidos para la construcción de carreteras (Manual de Carreteras EG-2013), mostrando una baja pérdida por abrasión, adecuada clasificación granulométrica y buena estabilidad física.

Finalmente, se realizó la simulación operativa de una planta de conminución para el procesamiento del material extraído, empleando el software especializado Bruno-Metso. La simulación evidenció una capacidad de procesamiento de 84 t/h, con alta eficiencia operativa y un bajo índice de generación de finos.

Se concluye que la implementación de esta planta es técnica y económicamente viable, representando una solución estratégica para garantizar un suministro continuo, eficiente y conforme con la normativa vigente de materiales agregados. Además, su aplicación podría replicarse en otros proyectos de infraestructura vial a nivel nacional.

Palabras clave — Yacimiento no metálico, cantera, material agregado, granulometría.

Abstract

This thesis presents a prefeasibility study for the installation of a comminution plant for non-metallic deposits, aimed at supplying aggregate materials required for the construction of the PE-3N interregional highway, specifically in the Bambamarca – Cajamarca sector.

This project arises due to the limited availability of processed materials in the area and the high logistical costs associated with transporting aggregates from distant locations.

The study focused on the Cuñacales Alto non-metallic deposit (quarry), located in the province of Hualgayoc, Cajamarca, and included the mineralogical and geomechanical characterization of the deposit, as well as the evaluation of critical parameters from extracted samples, such as: particle size distribution, abrasion resistance, absorption, and specific gravity. These analyses confirmed that the material extracted from the deposit meets the technical standards established for road construction (Road Manual EG-2013), exhibiting low abrasion loss, proper granulometric classification, and good physical stability. Finally, an operational simulation of a comminution plant for processing the extracted material was performed using Bruno-Metso specialized software. The simulation revealed a processing capacity of 84 t/h, with high operational efficiency and a low fines generation index.

It is concluded that the implementation of this plant is technically and economically feasible, representing a strategic solution to ensure a continuous, efficient, and regulation-compliant supply of aggregate materials. Furthermore, its application could be replicated in other national road infrastructure projects.

Keywords — Non-metallic deposit, quarry, aggregate material, particle size distribution.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.1.1 Ubicación geográfica.....	1
1.1.2 Accesibilidad	2
1.1.3 Clima.....	2
1.1.4 Hidrología.....	3
1.1.5 Hidrogeología.....	4
1.1.6 Hidroquímica.....	5
1.1.7 Geología regional de Bambamarca	6
1.1.8 Topografía del sector Cuñacales Alto.....	7
1.2 Descripción del problema de investigación.....	8
1.3 Objetivos del estudio	10
1.3.1 Objetivo general	10
1.3.2 Objetivos específicos	10
1.4 Antecedentes investigativos	10
1.4.1 Antecedentes internacionales	10
1.4.2 Antecedentes nacionales	15
1.5 Justificación e importancia de la investigación	21
1.5.1 Justificación técnica	21
1.5.2 Justificación personal	21
1.5.3 Justificación económica	22
1.5.4 Justificación social	22
1.6 Hipótesis general	22

1.6.1 Hipótesis específicas.....	22
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	23
2.1 Marco teórico	23
2.1.1 Introducción a la minería no metálica.....	23
2.1.2 Procesos principales en la Minería no Metálica.....	25
2.1.3 Procesos de conminución	28
2.1.4 Ensayo de abrasión de Los Ángeles	54
2.1.5 Proyectos viales	55
2.2 Marco conceptual.....	58
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	63
3.1 Enfoque de la investigación.....	63
3.2 Tipo de investigación	63
3.3 Diseño de investigación	63
3.4 Métodos de investigación	64
3.5 Importancia del enfoque.....	64
3.5.1 Población y muestra.....	64
3.5.2 Criterios de selección.....	65
3.5.3 Muestreo.....	65
3.6 Técnicas e instrumentos de investigación	66
3.6.1 Análisis granulométrico por tamizado.....	67
3.6.2 Ensayo de abrasión Los Ángeles	67
3.6.3 Determinación del contenido de humedad natural.....	67
3.6.4 Determinación de la densidad y absorción del agregado	68
3.6.5 Trabajo de campo	68
3.6.6 Software simulación	69
3.6.7 Técnicas documentales	69
3.7 Caracterización mineralógica	70
3.8 Determinación de la distribución de tamaños de partícula.....	71

3.8.1	Cálculo de representatividad	72
3.8.2	Secado.....	73
3.8.3	Selección de tamices	74
3.8.4	Curvas granulométricas	75
3.8.5	Ensayo de abrasión Los Ángeles	86
3.8.6	Determinación de humedad del agregado grueso	87
3.8.7	Peso específico y absorción del agregado grueso	88
3.9	Simulación de planta de conminución con Bruno - Metso	90
3.9.1	Criterio de diseño	90
3.9.2	Descripción del proceso de conminución	92
3.9.3	Balance de masas.....	94
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados		96
4.1	Enfoque estratégico del análisis	96
4.2	Evaluación de calidad del material procesado.....	96
4.3	Simulación operativa y desempeño del proceso.....	96
4.4	Comparación con especificaciones técnicas y estudios previos	97
4.5	Implicancias técnicas y estratégicas.....	97
4.6	Discusión crítica	98
Conclusiones		99
Recomendaciones		100
Referencias bibliográficas		101
Anexos		108

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Rutas de acceso	2
Tabla 2 : Coordenadas geográficas	2
Tabla 3 : Producción no metálica nacional.....	24
Tabla 4 : Índice de trabajo y abrasión de materiales típicos	31
Tabla 5 : Parámetros de chancadores	42
Tabla 6 : Capacidades de harnero	51
Tabla 7 : Curva granulométrica 1	76
Tabla 8 : Tabla granulométrica 2.....	77
Tabla 9 : Tabla granulométrica 3.....	78
Tabla 10: Tabla granulométrica 4.....	79
Tabla 11: Tabla granulométrica 5.....	80
Tabla 12: Tabla granulométrica 6.....	81
Tabla 13: Tabla granulométrica 7.....	82
Tabla 14: Tabla granulométrica 8.....	83
Tabla 15: Tabla granulométrica promedio.....	84
Tabla 16: Desviación estándar.....	85
Tabla 17: Curva y huso granulométrico.....	86
Tabla 18: Límite máximo permitido de abrasión.....	86
Tabla 19: Ensayo Los Ángeles	87
Tabla 20: Ensayo de humedad	88
Tabla 21: Ensayo de peso específico y absorción	89
Tabla 22: Rango de absorción para material agregado.....	89
Tabla 23: Criterios generales	90
Tabla 24: Criterios de clasificación y chancado.....	91

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Ubicación del yacimiento no metálico	1
Figura 2 : Etapas de conminución de partículas.....	29
Figura 3 : Equipos de reducción de tamaño	32
Figura 4 : Reducción de tamaño	35
Figura 5 : Tasa de reducción por equipo.....	36
Figura 6 : Chancadores estacionarios.....	38
Figura 7 : Geometría de la apertura.....	39
Figura 8 : Dimensión de equipo	40
Figura 9 : Chancador de Mandíbula, serie C.....	41
Figura 10: Control de tamaño I	43
Figura 11: Control de tamaño II	43
Figura 12: Control de tamaño III	44
Figura 13: Control de tamaño por harneado	45
Figura 14: Control de tamaño por movimiento	46
Figura 15: Movimientos de harneros.....	47
Figura 16: Harnero por estratificación	48
Figura 17: Harnero por caída libre	48
Figura 18: Modelos de harneros	49
Figura 19: Relación entre tamaño de partícula y malla	53
Figura 20: Tipo de orificio	53
Figura 21: Yacimiento Cuñacales Alto	69
Figura 22: Caracterización mineralógica.....	71
Figura 23: Mineral no metálico.....	73
Figura 24: Secado de muestra.....	74
Figura 25: Tamices ASTM	74
Figura 26: Ro-Tap para análisis granulométrico.....	76

Figura 27: Curva granulométrica 1.....	77
Figura 28: Curva granulométrica 2.....	78
Figura 29: Curva granulométrica 3.....	79
Figura 30: Curva granulométrica 4.....	80
Figura 31: Curva granulométrica 5.....	81
Figura 32: Curva granulométrica 6.....	82
Figura 33: Curva granulométrica 7.....	83
Figura 34: Curva granulométrica 8.....	84
Figura 35: Curva granulométrica promedio	85
Figura 36: Curva granulométrica.....	90
Figura 37: Simulación de proceso.....	92

Introducción

El Capítulo I contextualiza el proyecto, describiendo la ubicación del Yacimiento no metálico Cuñacales Alto y las condiciones geográficas, climáticas, hidrogeológicas y geológicas de la zona donde se encuentra, así como el problema de abastecimiento de materiales agregados que es lo que motiva esta investigación. Se plantean los objetivos, se analizan antecedentes relevantes y se justifica la importancia técnica, económica y social de la propuesta.

En el Capítulo II se expone el marco teórico y conceptual, fundamentando los procesos de conminución de materiales no metálicos y los requisitos normativos para obras viales en el Perú, pilares esenciales para el diseño de la planta propuesta.

El Capítulo III presenta el diseño metodológico, detallando la caracterización del yacimiento, las simulaciones operativas mediante software especializado y los ensayos técnicos necesarios para validar la calidad del material.

Finalmente, el Capítulo IV analiza los resultados, discute la viabilidad de la planta y consolida los aportes de esta investigación para el desarrollo eficiente de infraestructuras viales en el país. Se concluye con recomendaciones prácticas y referencias bibliográficas que sustentan el trabajo.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

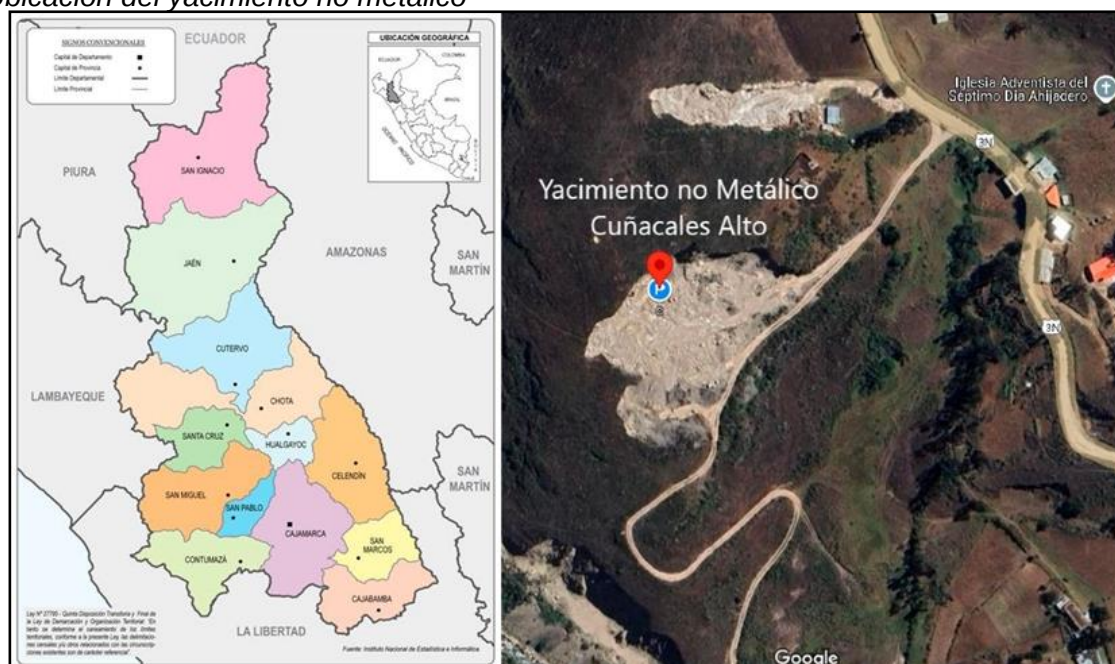
El presente estudio se desarrolla en el marco de la necesidad de asegurar un abastecimiento eficiente y sostenido de materiales agregados para la construcción y mejoramiento de la carretera interregional PE-3N. Con este propósito, se realizó la evaluación del Yacimiento No metálico (cantera) Cuñacales Alto, considerando aspectos clave como la calidad del material, la capacidad de producción y su viabilidad técnica. La identificación y caracterización de este yacimiento permitirá diseñar una planta de conminución orientada a optimizar el proceso de producción de piedra chancada, garantizando el cumplimiento de los estándares técnicos establecidos para obras viales, conforme al Manual de Carreteras (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2013).

1.1.1 Ubicación geográfica

El yacimiento se ubica en la provincia de Hualgayoc, específicamente en las inmediaciones de la salida de la ciudad de Bambamarca, con un acceso aproximado de 7 kilómetros desde el kilómetro 0+000 de la carretera del proyecto.

Figura 1

Ubicación del yacimiento no metálico



Fuente: adaptado de (Google)

1.1.2 Accesibilidad

La accesibilidad al yacimiento no metálico se realiza desde Lima, a través de trayectos que incluyen pista asfaltada. A continuación, se detalla el acceso:

Tabla 1

Rutas de acceso

TRAMO	VÍA	DISTANCIA (KM)
Lima – Chiclayo	Pista asfaltada	770
Chiclayo – Bambamarca	Pista asfaltada	249

Fuente: Google.

Tabla 2

Coordenadas geográficas

COORDENADAS GEOGRÁFICAS
6° 43' 06.2" Latitud Sur
78° 31' 25.7" Longitud Oeste

Fuente: Google

1.1.3 Clima

Bambamarca presenta un clima templado con marcada variación estacional. Los veranos son predominantemente nublados y templados, mientras que los inviernos, aunque cortos, son fríos, secos y parcialmente nublados. Las temperaturas anuales oscilan entre los 5 °C y 20 °C, con mínimas poco frecuentes por debajo de los 2 °C o máximas superiores a los 23 °C. La temporada cálida se extiende de diciembre a marzo, siendo febrero el mes más cálido (20 °C máx.; 8 °C mín.). En contraste, la temporada fresca ocurre entre junio y julio, destacando julio como el mes más frío (18 °C máx.; 5 °C mín.).

En cuanto a nubosidad, el cielo se mantiene más despejado entre mayo y septiembre, siendo julio el mes más claro (63 % de cielos despejados o parcialmente nublados). La temporada nublada se prolonga de septiembre a mayo, con febrero como el mes más cubierto (88 % de nubosidad). La probabilidad de precipitaciones, entendidas como “días mojados” con al menos 1 mm de lluvia, varía significativamente durante el año. La temporada húmeda se extiende de octubre a mayo, con marzo como el mes más lluvioso (9.6 días con precipitación y 54 mm acumulados). El periodo seco abarca de mayo a octubre, siendo julio el mes más árido (0.4 días lluviosos y 1 mm de precipitación).

La lluvia es el tipo de precipitación predominante; no se registra nieve. La mayor probabilidad de lluvia ocurre el 19 de marzo (32 %). Además, se identifica una clara estacionalidad: la temporada de lluvias va de septiembre a mayo, y la seca de mayo a septiembre.

La duración del día varía poco durante el año, con un promedio cercano a las 12 horas de luz solar. El día más corto será el 20 de junio (11 h 44 min), y el más largo el 21 de diciembre (12 h 31 min). No se aplica el horario de verano. La salida del sol varía entre las 05:46 y 06:27, y la puesta entre las 18:04 y 18:39.

Respecto al viento, la velocidad media anual muestra variaciones leves, influenciadas por la topografía local. El periodo más ventoso abarca de junio a septiembre, con agosto como el mes más ventoso (11.6 km/h). El periodo más calmado se extiende de septiembre a junio, con abril registrando los vientos más suaves (7.5 km/h) (Weather Spark, s.f.)

1.1.4 Hidrología

1.1.4.1 Sistema hidrográfico regional. El distrito de Bambamarca, ubicado en la provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca, forma parte de la intercuenca Alto Marañón IV, correspondiente a la vertiente del Atlántico. Esta abarca aproximadamente 2 407 km² y comprende ríos como Ñuñún (Pomagón), Shugar, Chantas, Hualgayoc, Maigasbamba (Tingo o La Quebrada) y Cutervo (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), 2015).

Principales subcuencas:

- Subcuenca del río Tingo: Nace a 3 900 m.s.n.m., a partir de escorrentías de los cerros Tantahuatay. Fluye de oeste a este, recibiendo aportes de quebradas como Laguna Sola y Hueco Grande. A lo largo de su recorrido se encuentran varias operaciones mineras como Tantahuatay, Cerro Corona, Carolina W1 y pasivos ambientales como Colquirrumi (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), 2015).

- Subcuenca del río Hualgayoc: Nace en el cerro Coymolache (3 700 m.s.n.m.), fluye de suroeste a noreste. Está expuesto a impactos por actividades mineras (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), 2015).
- Río Llaucano: Formado por la confluencia del Tingo y Arascorgue, proviene de lagunas altoandinas como Picota y Munyu. Es un tributario del río Marañón (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), 2015).

Fuente estratégica: Manantial "Tres Chorros" Provee agua potable a la ciudad. Su captación y tratamiento son claves para el abastecimiento urbano (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), 2015).

Impacto antrópico: La intensa actividad minera compromete la calidad del recurso hídrico, generando desafíos para su gestión sostenible (OEFA, 2015).

1.1.5 Hidrogeología

1.1.5.1 Condiciones litológicas. La zona urbana de Bambamarca se asienta sobre la Formación Chota y el complejo volcánico Bambamarca. Estos presentan suelos limo arcillosos y arenas limosas de propiedades hidrogeológicas variables (Herrera, 2021).

Estudio de cimentación en Colegio San Carlos: Durante la investigación realizada para el diseño de la cimentación del Colegio San Carlos, se identificaron diversas condiciones hidrogeológicas significativas. A través de calicatas distribuidas estratégicamente en el área de estudio, se realizaron mediciones del nivel freático, encontrándose valores que oscilan entre los 0.2 m y 1.0 m desde la superficie en diferentes épocas del año. Estos niveles de saturación indican la presencia de un acuífero libre con importantes fluctuaciones estacionales, influenciado principalmente por la precipitación pluvial intensa característica de la región (Herrera, 2021).

- Niveles freáticos entre 0.2 m y 1.0 m
- Fluctuación estacional significativa

Dirección del flujo subterráneo: Trazado de líneas isofreáticas indica dirección noreste, acorde a la pendiente y estructura geológica local (Herrera, 2021).

Tipo de acuíferos

- Acuíferos porosos: alta permeabilidad (ej. arenas limosas, $K \approx 1.41 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$).
- Acuíferos fisurados: baja permeabilidad (limo arcilloso, $K \approx 2.23 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$).

Capacidad de almacenamiento: Reducción significativa en estratos compactos.

Esta limitación afecta la estabilidad estructural en obras de cimentación profunda (Herrera, 2021).

Conclusión hidrogeológica: Sistema poco profundo, estacionalmente variable y de comportamiento heterogéneo. Requiere evaluación específica para intervenciones constructivas seguras (Herrera, 2021).

1.1.6 Hidroquímica

Evaluación ambiental OEFA (2015): Estudio sobre las cuencas de los ríos Tingo, Hualgayoc y Llaucano.

Análisis del manantial “Tres Chorros”

- Aluminio: 0.2954 mg/L (superior al límite ECA A1: 0.2 mg/L).
- pH ácido: 5.99
- Conductividad eléctrica: 374 $\mu\text{S/cm}$ (mineralización moderada) (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), 2015).

Contaminantes presentes

- Metales: arsénico, bario, cobre, hierro, manganeso (dentro de límites permisibles).
- Coliformes totales y termotolerantes: 1300 y 490 NMP/100 ml respectivamente (excesivo) (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), 2015).

Aporte natural vs. impacto antrópico: Interacción entre minerales naturales y residuos de pasivos mineros, generando condiciones de fragilidad hidroquímica.

Conclusión hidroquímica: Se requiere monitoreo permanente y políticas de remediación para proteger las fuentes de agua potable frente a la minería y contaminación biológica.

1.1.7 Geología regional de Bambamarca

La geología de Bambamarca, ubicada en la región Cajamarca, está fuertemente influenciada por las unidades sedimentarias que integran la Formación Chota, la cual constituye una de las unidades litoestratigráficas más representativas del nororiente peruano. Esta formación fue inicialmente definida por Broggi (1942) al oeste de la ciudad de Chota y ha sido reconocida en amplias extensiones de la cuenca Bagua, incluyendo sectores aledaños a Bambamarca.

La Formación Chota se caracteriza por presentar afloramientos distintivos de color rojo a púrpura, sobre yaciendo transicionalmente a la Formación Celendín y subyaciendo concordantemente a la Formación Cajaruro. Estratigráficamente, ha sido dividida en dos miembros litoestratigráficos bien diferenciados: el Miembro Rentema y el Miembro Esperanza.

El Miembro Rentema, ubicado en la parte inferior de la secuencia, corresponde a una macro secuencia detrítica grano creciente, compuesta inicialmente por arcilitas y areniscas feldespáticas de grano fino a medio, con estructuras sedimentarias como laminación sesgada, canales de micro conglomerados y ondulitas. Estas litologías indican un ambiente de sedimentación fluvial de baja energía, evolucionando hacia depósitos más gruesos con mayor energía.

Por su parte, el Miembro Esperanza, que conforma la parte superior de la formación, está constituido predominantemente por lutitas calcáreas finas y abigarradas, con intercalaciones de areniscas y conglomerados. Este miembro se distingue por la presencia de yeso botroidal y carófitas asociadas a ostrácodos, evidenciando condiciones sedimentarias lacustres o de planicie aluvial poco profundas, con periodos de evaporación.

La evolución estratigráfica entre ambos miembros es progresiva y continua, lo que permite inferir una historia sedimentaria coherente de transición de ambientes fluviales a lacustres durante el Cretácico Superior. Sobre esta unidad aflora de manera concordante la Formación Cajaruro, compuesta por estratos tobáceos blanquecinos, indicando un

cambio significativo en el régimen sedimentario hacia condiciones volcánicas continentales.

En conjunto, la geología de Bambamarca refleja un contexto tectosedimentario activo, vinculado a la evolución de la cuenca Bagua, caracterizado por procesos de subsidencia y relleno progresivo durante el Cretácico. Esta configuración geológica proporciona una base sólida para la disponibilidad y aprovechamiento de recursos no metálicos, como los agregados pétreos utilizados en obras de infraestructura vial (Chacaltana, Valdivia, Benites, & Chumpitaz, 2015).

1.1.8 Topografía del sector Cuñacales Alto.

El sector Cuñacales Alto, ubicado en el distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca, presenta una configuración topográfica compleja y estratégica, determinada a partir del análisis planimétrico y altimétrico contenido en los planos de replanteo del proyecto vial regional. La topografía general de la cantera Cuñacales revela una disposición escalonada organizada en dos plataformas: superior e inferior, con una diferencia altitudinal significativa que permite la optimización del aprovechamiento volumétrico de materiales para uso en obras de infraestructura vial.

El área total de la unidad topográfica asciende a 13,466.79 m² (1.35 ha), enmarcada por un perímetro de 475.40 metros lineales, lo que configura una parcela de morfología irregular pero funcional. En términos volumétricos, se estima una capacidad de extracción superior a los 48,456.75 m³, lo cual respalda su viabilidad como fuente proveedora de materiales áridos empleados en procesos de construcción y mejoramiento de vías regionales (Anexo 5).

Los planos de planta y perfil longitudinal indican que el eje del yacimiento no metálico está adecuadamente alineado con el eje de la vía que conecta la carretera PE-3N y el yacimiento, permitiendo un acceso eficiente para su explotación. El diseño presenta pendientes suavemente inclinadas hacia las zonas de evacuación, lo que favorece la escorrentía pluvial y reduce el riesgo de acumulación de agua, aspecto clave para la estabilidad geotécnica de la explotación. Las curvas de nivel, representadas a escalas

1/750 y 1/1500, exhiben un modelado del terreno que oscila entre cotas aproximadas de 2560 y 2580 msnm, con coordenadas georreferenciadas en el sistema WGS84, zona 17M (Anexo 6).

El modelado digital permite identificar que los taludes naturales y artificiales han sido considerados en el diseño mediante la incorporación de cortes y rellenos que se adaptan a la topografía local. Asimismo, el acceso principal ha sido proyectado en una zona de menor pendiente, minimizando las obras de movimiento de tierras y favoreciendo la eficiencia operativa.

La plataforma superior, donde se encuentra el mayor volumen de material explotable, está delimitada por vértices georreferenciados y conectada por una vía interna que facilita la circulación de maquinaria pesada. La disposición espacial permite una secuencia de explotación controlada, minimizando impactos sobre el entorno y facilitando las futuras labores de cierre técnico del yacimiento.

En suma, la topografía del sector Cuñacales Alto evidencia un diseño técnico que responde adecuadamente a los requerimientos de explotación racional y sostenible de recursos, cumpliendo con los criterios de estabilidad, accesibilidad y eficiencia constructiva necesarios en proyectos de infraestructura vial departamental.

1.2 Descripción del problema de investigación

El desarrollo de infraestructura vial es un factor clave para el crecimiento económico y social de las regiones y del país. En este contexto, la ejecución del proyecto de construcción y mejoramiento de la carretera interregional PE-3N requiere una cantidad significativa de materiales agregados para la conformación de bases, subbases y otros elementos estructurales esenciales. Sin embargo, el abastecimiento de estos materiales enfrenta diversos desafíos que afectan la eficiencia y viabilidad del proyecto.

Los estudios previos han identificado varios yacimientos no metálicos (canteras) con potencial para suministrar material agregado al proyecto. Sin embargo, muchos de estos yacimientos presentan restricciones técnicas, económicas y operativas que limitan

su capacidad de abastecimiento. Entre los principales problemas identificados se encuentran:

- La falta de infraestructura de procesamiento en la zona impide la adecuada conminución del macizo rocoso extraído, lo que obliga a transportarlo a largas distancias para su tratamiento y cumplimiento de las especificaciones técnicas del proyecto vial. Esta situación no solo incrementa los costos logísticos, sino que también genera un sobre costo en la adquisición de material agregado, afectando directamente el presupuesto y los plazos de ejecución. En consecuencia, la ausencia de una planta de procesamiento compromete la eficiencia y sostenibilidad del proyecto.
- Limitaciones en la disponibilidad y calidad de los materiales: Si bien algunos yacimientos no metálicos cumplen con los estándares necesarios, su volumen de extracción no es suficiente para cubrir la demanda total del proyecto. Además, ciertos yacimientos requieren un procesamiento adicional para cumplir con la normativa técnica peruana.
- Necesidad de optimización del proceso de conminución: Para garantizar el abastecimiento de material agregado con las características adecuadas, es fundamental diseñar una planta de conminución con capacidad de procesamiento eficiente. Esto permitirá reducir los desperdicios, mejorar la granulometría del material y minimizar el impacto ambiental derivado de la extracción.

Ante esta situación, el presente estudio se centra en la prefactibilidad de una planta de conminución para garantizar un suministro de calidad, eficiente y sostenible de material agregado en la carretera interregional PE-3N. La implementación de esta planta no solo optimizará la disponibilidad del material requerido para el proyecto, sino que también reducirá costos, acortará los tiempos de ejecución y fortalecerá la infraestructura regional. Así, se busca ofrecer una solución integral al problema de abastecimiento en la zona de intervención.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 *Objetivo general*

Realizar un estudio de prefactibilidad para el diseño de una planta de conminución que garantice un abastecimiento eficiente y sostenible de materiales agregados para la ejecución de la carretera interregional PE-3N, asegurando el cumplimiento de los requerimientos técnicos del material procesado

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Caracterizar las propiedades mineralógicas y geomecánicas del yacimiento no metálico (cantera) para evaluar su idoneidad como materia prima para el proyecto.
- Diseñar el circuito de trituración y clasificación, con el objetivo de optimizar la producción de materiales agregados con la granulometría específica requerida según las especificaciones técnicas del proyecto.

1.4 Antecedentes investigativos

1.4.1 *Antecedentes internacionales*

Mata, C. (2020), en su tesis de pregrado titulada “Manual de laboratorio de agregados para concreto y explotación de canteras enfocado al pequeño y mediano minero”, aborda la relevancia de la minería no metálica en el desarrollo de infraestructuras civiles, destacando que los agregados pétreos (arena, grava y piedra triturada) constituyen hasta el 85% del volumen del concreto utilizado en obras viales. El estudio subraya los desafíos del sector en México, como la informalidad, la falta de estandarización en procesos y los impactos ambientales derivados de prácticas artesanales. Como propuesta central, la investigación plantea la transformación de explotaciones rudimentarias en operaciones industriales seguras y sostenibles, mediante la adopción de normativas técnicas, certificación de agregados y estrategias de financiamiento.

Los agregados, regulados bajo normativas como la NMX-C-111 y ASTM C131, influyen directamente en propiedades mecánicas críticas para pavimentos, como resistencia y durabilidad. No obstante, su explotación informal genera impactos ambientales significativos, como erosión del suelo, pérdida de biodiversidad y emisión de

partículas contaminantes (PM10 y PM2.5). El trabajo enfatiza que la transición hacia canteras formalizadas —mediante métodos como bancos descendentes en laderas (ejemplo: operaciones de Cementos Moctezuma) o voladuras controladas en terrenos planos (ejemplo: San Vicente Chicoloapan, Estado de México)— reduce dichos impactos. Destaca, además, el uso de explosivos como el ANFO (Nitrato de Amonio y Diesel) y herramientas de diseño técnico (ejemplo: perfiles transversales en AutoCAD) para optimizar la fragmentación homogénea del material y garantizar trazabilidad en las reservas.

La certificación en laboratorios acreditados por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) bajo estándares ISO 9001 se presenta como un eje indispensable. Pruebas como granulometría (NMX-C-077), resistencia a la abrasión (NMX-C-196) y detección de materia orgánica (NMX-C-088) aseguran la calidad de los agregados, con inversiones que oscilan entre 500,000MXN (laboratorios básicos) y 1,000,000 MXN (instalaciones industriales). Instituciones como el Fideicomiso de Fomento Minero (FIFOMI) y el Fondo Nacional de Apoyo para las Empresas en Solidaridad (FONAES) emergen como actores clave al ofrecer créditos de hasta \$3.5 millones MXN y capital semilla, priorizando proyectos con enfoque en restauración ecológica.

Finalmente, el estudio resalta la economía circular como estrategia sostenible, ejemplificada con la reutilización de residuos de cantera (ejemplo: polvo de trituración en hormigones ecológicos), alineándose así con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 12). Empresas líderes como CEMEX impulsan estas prácticas. En conclusión, la formalización mediante manuales de buenas prácticas incrementa la productividad en un 40%, reduce accidentes laborales y agrega valor comercial a los agregados. La sinergia entre financiamiento público, innovación tecnológica y sostenibilidad consolida una minería no metálica competitiva y responsable, posicionándola como pilar esencial para el desarrollo nacional.

Gaete, C. (2020), en su tesis de pregrado titulada “Influencia de la geología y geotecnia en parámetros de chancabilidad en el yacimiento El teniente, VI Región, Chile”,

planteó como objetivo principal determinar los parámetros geológicos y geotécnicos que influyen en los procesos de chancado (Cwi, CI y Ai) y establecer dominios que optimicen la operación minera. Este trabajo buscó vincular las características litológicas, alteraciones mineralógicas y propiedades físicas del macizo rocoso con la eficiencia del proceso de chancado, que representa aproximadamente el 60% del costo energético de la planta de procesamiento.

Los resultados obtenidos revelaron lo siguiente:

- El parámetro Cwi está fuertemente influenciado por la asociación mineralógica de clorita-muscovita/sericita, que afecta la resistencia mecánica del material.
- El índice de chancado (CI) mostró una correlación inversa con la frecuencia de vetillas blandas.
- El índice de abrasión (Ai) depende principalmente del tipo de litología, siendo el pórfido dacítico el que genera el mayor desgaste en los equipos.

Estos hallazgos permitieron la generación de dominios operativos que caracterizan la capacidad de chancado, identificando zonas de mayor dificultad operativa, particularmente en el sector norte del yacimiento.

En conclusión, el estudio resalta la importancia de integrar parámetros geológicos y geotécnicos para optimizar las operaciones de chancado en minería, contribuyendo significativamente a la reducción de costos operativos y al incremento de la productividad mediante un enfoque basado en dominios geotécnicos y litológicos.

Arredondo, C. (2021), en su tesis de maestría titulada “Análisis de eficiencia metalúrgica de operaciones de sorting de minerales e impacto energético en la línea de conminución”, tuvieron como objetivo analizar críticamente las tecnologías de sorting de minerales con el fin de optimizar la eficiencia del proceso y reducir el consumo energético en los circuitos de conminución.

Los resultados evidenciaron que la incorporación de tecnologías de sorting en las primeras etapas de procesamiento permite incrementar la ley del material valioso en la alimentación, reducir en un 30% el consumo energético por tonelada procesada y

mantener la productividad del circuito. Además, se destacó que el sorting basado en sensores automatizados mejora significativamente la selectividad del proceso y minimiza la presencia de ganga en las etapas subsiguientes.

En conclusión, se determinó que el sorting no solo constituye una solución técnica efectiva para la preconcentración de minerales, sino que también aporta a la sostenibilidad de las operaciones mineras al disminuir los costos energéticos y reducir el impacto ambiental. Este enfoque refuerza su potencial como herramienta clave para la modernización y optimización de procesos mineros.

Rojas, O. (2021), en su tesis de pregrado titulada “Planta de Producción de Agregados para Concreto”, plantearon como objetivo evaluar la prefactibilidad de un proyecto de inversión destinado a la producción de agregados pétreos para la industria de la construcción en Bogotá, Colombia, a través de un análisis técnico, económico y ambiental.

Los resultados indicaron que, mediante el diseño optimizado del proceso productivo, el uso de tecnologías avanzadas de trituración y clasificación, y la selección de una ubicación estratégica, se logró incrementar el rendimiento operativo y reducir significativamente el impacto ambiental asociado a la extracción y procesamiento de agregados. Asimismo, el análisis financiero confirmó la viabilidad del proyecto, al obtener un Valor Presente Neto (VPN) positivo y una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior al costo de oportunidad del capital.

En conclusión, se determinó que la implementación de esta planta no solo garantizará el abastecimiento sostenible de agregados para la construcción, sino que también mejorará la eficiencia operativa y reducirá los costos logísticos de las empresas constructoras en Bogotá, consolidándose como una solución estratégica para el sector de la construcción.

Pástor, C. (2022), en su tesis titulada “Optimización del proceso de conminución en la planta de beneficio PROMINE, Camilo Ponce Enríquez - Azuay”, tuvo como objetivo

optimizar el proceso de conminución en la planta PROMINE mediante la caracterización, evaluación y modelamiento digital de los circuitos de trituración.

Los resultados obtenidos incluyeron la implementación de tres alternativas principales: el aumento de la longitud de la zaranda primaria, la configuración de la zaranda secundaria eliminando su malla inferior y la instalación de una trituradora de cono. Entre estas, el rediseño de la zaranda primaria destacó por mejorar significativamente la eficiencia de clasificación, lo que redujo la sobrecarga en las etapas posteriores del circuito y optimizó el rendimiento global del proceso de trituración.

En conclusión, se determinó que el uso de herramientas de simulación y modelamiento digital fue clave para identificar las configuraciones más eficientes, logrando un incremento en la productividad operativa de la planta, una reducción en los costos energéticos y una mejora en la calidad del producto final procesado. Este enfoque demuestra la relevancia de las tecnologías digitales en la modernización y optimización de procesos en plantas de beneficio.

Estee, I. (2022), en su tesis de pregrado titulada “Optimización del proceso para el incremento de la producción de agregados en la Planta de Trituración II de Cantera del Distrito Capital S.A.”, buscó mejorar la eficiencia operativa mediante ajustes en equipos de trituración/clasificación, integrando parámetros técnicos, análisis granulométricos y demanda comercial. El estudio identificó cuellos de botella en las etapas secundaria y terciaria, proponiendo mejoras para aumentar la producción de agregados (piedra $\frac{3}{4}$ ", arrocillo, polvillo). La metodología combinó evaluaciones técnicas de equipos, análisis granulométricos por etapa, caracterización geomecánica del material y balance de masa.

Resultados clave:

- Ineficiencia en trituración secundaria/terciaria: Razones de reducción de 1,5:1 y 1,33:1 (vs. rangos teóricos 2–8), asociadas a desgaste de mantos y configuraciones inadecuadas.
- Baja producción de agregados comerciales: Solo el 18% cumplía especificaciones, generando recirculación excesiva.

- Propuestas técnicas: Ajuste de dimensiones en conos 09/18, reactivación del cono 4ft para evitar saturación en criba 15, e implementación de mantenimiento predictivo/preventivo.

El estudio destaca la importancia de evaluar parámetros operativos y eficiencia de equipos, ofreciendo un marco metodológico aplicable a otras plantas. Aunque omitió análisis económicos (costos, retorno de inversión), sus hallazgos técnicos son cruciales para optimizar procesos de conminución, especialmente en proyectos de infraestructura vial, como el abastecimiento de agregados para la carretera PE-3N.

1.4.2 Antecedentes nacionales

Carranza, M. y Paredes, Q. (2018), en su tesis de pregrado titulada “Evaluación técnico-económica de los agregados producidos por las canteras de la provincia de Chiclayo para fines de obras viales”, tuvo como objetivo evaluar técnica y económicamente los agregados producidos por diversas canteras en la provincia de Chiclayo, con la finalidad de determinar su viabilidad en la construcción de obras viales a nivel de afirmado.

Los resultados evidenciaron que, tras la realización de ensayos de laboratorio, la cantera La Victoria cumplió con todas las exigencias establecidas en el Manual de Carreteras, en términos de análisis granulométrico, CBR, porcentaje de límite líquido y plástico, destacando como la mejor alternativa para la obtención de agregados. En contraste, otras canteras estudiadas presentaron valores inferiores a los requerimientos normativos, lo que impide su uso en obras viales.

En conclusión, se determinó que la cantera La Victoria es la opción óptima desde el punto de vista técnico y económico para la provisión de agregados en proyectos viales, presentando un costo unitario competitivo de S/ 20.00 por m³ en cantera y S/ 40.00 por m³ en obra. Estos hallazgos resaltan la importancia de seleccionar adecuadamente los materiales para garantizar la durabilidad y eficiencia de las infraestructuras viales.

Nina, V. (2022), en su tesis de pregrado titulada “Propuesta de diseño y análisis de una estructura de costos fijos y variables en la producción de material agregado de una cantera no metálica”, tuvo como objetivo principal diseñar y analizar una estructura de

costos que permitiera identificar y controlar los costos fijos y variables asociados a la producción de materiales agregados, tales como piedra chancada, gravilla, arena gruesa y piedra filtro, en la cantera "El Chasqui Soy," ubicada en Moquegua.

En cuanto a la identificación de costos, se determinó que los costos fijos incluían rubros como las remuneraciones (S/ 15,250.00 mensuales) y la depreciación de maquinaria (S/ 10,343.33 mensuales). Por su parte, los costos variables principales correspondieron a insumos como petróleo y gasolina, que representaron un total de S/ 24,279.50 mensuales.

El costo de producción por metro cúbico se calculó de la siguiente manera:

- Piedra chancada (1/2" y 3/4"): S/ 9.00 por m³
- Gravilla (3/8"): S/ 11.03 por m³
- Arena gruesa: S/ 10.03 por m³
- Piedra filtro: S/ 63.02 por m³

Para la optimización de procesos, se diseñaron plantillas en Excel que mejoraron significativamente el control y la trazabilidad de los costos, permitiendo tomar decisiones más informadas y estratégicas.

En conclusión, la implementación del diseño y análisis de la estructura de costos permitió a la cantera "El Chasqui Soy" optimizar tanto su capacidad de producción como su gestión económica. Se concluyó que un control adecuado de los costos es fundamental para maximizar la producción de materiales de alta demanda (como piedra chancada y arena gruesa) y mitigar las pérdidas en materiales con menor rentabilidad, como la piedra filtro. Este enfoque resulta clave para garantizar la eficiencia y sostenibilidad en las operaciones del sector minero no metálico.

Guerrero, F., Cardenas, O. (2023), en su tesis de pregrado titulada "Análisis y evaluación de las características físicas y mecánicas de los agregados en el diseño de mezclas de dos canteras del distrito de Nueva Requena para la conformación de la base granular del pavimento rígido en la ciudad de Pucallpa 2022" permitió obtener las siguientes conclusiones:

Desempeño normativo en estado natural: Los agregados de las canteras analizadas (Caserío Zanja Seca, Naranjillo y Nuevo Piura) no cumplen integralmente con los requerimientos del manual EG-2013 para bases granulares de pavimentos rígidos. Parámetros críticos como la granulometría (ausencia de material fino en tamices N°40 y N°200) y el CBR (<80%) se situaron fuera de los rangos aceptables, lo que limita su uso directo en aplicaciones estructurales.

Sin embargo, propiedades como la resistencia a la abrasión (22.5%-27.7%), durabilidad al sulfato de magnesio (<5.91% en agregado grueso) y equivalentes de arena (72%-85%) cumplieron con las especificaciones técnicas, evidenciando calidad en aspectos mecánicos clave.

Mejora mediante diseño de mezclas: La inclusión de material ligante (cantera Keiko I) en proporciones específicas (ej. 85% canto rodado + 15% ligante) permitió ajustar la granulometría a las gradaciones B y C del EG-2013, logrando cumplimiento en tamices críticos (N°4, N°10) y mejorando el CBR hasta 74.67%. No obstante, persisten deficiencias en material fino (N°40 y N°200) que requieren correcciones adicionales.

Limitaciones en partículas fracturadas: Los agregados en estado natural mostraron bajos porcentajes de partículas con una cara fracturada (15.8%-23.9%) y dos caras fracturadas (7.4%-16.5%), muy por debajo de los mínimos exigidos (80% y 40%, respectivamente). Esta característica, crítica para la cohesión en bases granulares, solo mejoró parcialmente en mezclas con ligante, sin alcanzar los estándares normativos.

Aplicaciones prácticas y recomendaciones: Los diseños D1 (85-15) y D2 (70-30) demostraron viabilidad técnica para su uso en capas granulares de baja a media sollicitación, previa validación de su estabilidad mediante ensayos de durabilidad y compactación.

Se recomienda implementar procesos de trituración para incrementar partículas fracturadas, así como incorporar técnicas de estabilización química (cal, cemento) para optimizar el contenido de finos y garantizar el cumplimiento integral de la EG-2013.

Contribución al desarrollo local: El estudio aporta un marco metodológico para la caracterización de canteras en la Amazonía peruana, facilitando la selección informada de materiales locales y reduciendo costos logísticos en proyectos viales. Además, resalta la necesidad de actualizar protocolos de explotación para maximizar la calidad de los agregados en la región.

En síntesis, mientras los agregados en estado natural presentan limitaciones para su uso directo en pavimentos rígidos, el diseño de mezclas estratégicas con materiales locales emerge como una solución viable, siempre que se complemente con procesos de mejora y control de calidad estricto.

Trillo ,F. y Vargas, P. (2023), en su tesis de pregrado titulada “Análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados provenientes de las canteras Rumi Rinconada, Munay Warmi y Huilque para su caracterización como subbase granular en la ciudad de Cusco - 2023”, plantearon como objetivo principal analizar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados de las canteras mencionadas, evaluando su conformidad con los estándares establecidos en la sección 402 de la EG-2013 (Manual de carreteras – Especificaciones técnicas generales para construcción), y determinar el agregado más adecuado para su uso como subbase granular.

Los principales resultados obtenidos fueron los siguientes:

- La cantera Rumi Rinconada presentó las mejores propiedades físicas y mecánicas, cumpliendo con los estándares de la sección 402 de la EG-2013.
- Los agregados de la cantera Munay Warmi requerían mejoras para alcanzar los valores normativos del CBR (California Bearing Ratio). La adición de estabilizadores permitió mejorar significativamente su calidad y lograr la conformidad requerida.

En términos de costos de producción, los agregados de Rumi Rinconada destacaron por ser los más económicos considerando su relación calidad-precio.

En conclusión, se determinó que los agregados de las canteras Rumi Rinconada y Huilque cumplen con los estándares técnicos necesarios para su caracterización como

subbase granular, siendo Rumi Rinconada la opción más favorable debido a sus propiedades mecánicas y costos competitivos. Asimismo, las técnicas de mejora aplicadas a los agregados de Munay Warmi demostraron ser efectivas para adecuar estos materiales a los estándares normativos, subrayando la relevancia de estas prácticas en la optimización de las operaciones de minería no metálica.

Lisson, M. (2024), en su tesis de suficiencia profesional titulada “Evaluación de cantera y aplicación de la ejecución rápida para optimizar el chancado primario y la ampliación de operaciones en Minera Brocal – Cerro de Pasco”, tuvo como objetivo evaluar la cantera e implementar la metodología de ejecución rápida (Fast Tracking) para optimizar el proceso de chancado primario y ampliar las operaciones de la Minera Brocal, ubicada en Cerro de Pasco.

Los resultados obtenidos destacaron lo siguiente:

- Un incremento del 186.96% en el monto contractual, como resultado de modificaciones en el diseño y la adopción del sistema Terramesh en el área de chancado primario.
- Identificación de mayores metrados y la generación de nuevas partidas, incluyendo excavaciones, concretos estructurales y la instalación de sistemas de gaviones con geomallas.
- Mejoras significativas en la gestión de presupuestos y tiempos de ejecución mediante la aplicación del Fast Tracking, lo que permitió reducir plazos sin comprometer la calidad del proyecto.

En conclusión, la implementación de la metodología Fast Tracking permitió a la Minera Brocal optimizar la ejecución de las obras en el área de chancado primario, garantizando el cumplimiento de los plazos y una gestión eficiente de los recursos disponibles. Asimismo, las modificaciones de ingeniería y la incorporación de tecnologías avanzadas como el sistema Terramesh demostraron ser estrategias efectivas para abordar los desafíos técnicos y presupuestarios asociados a la ampliación de operaciones. Este

enfoque resalta la importancia de las metodologías ágiles para la optimización de proyectos en minería no metálica.

Quenter, C., Quispe, Y. y Torres, C. (2024), en su tesis de pregrado titulada "Propiedades físico-mecánicas y costos de producción de agregados de las canteras del río Vilcanota (tramo Combapata-Ollantaytambo) para obras civiles en la región Cusco - 2022", analizaron la calidad técnica y viabilidad económica de agregados extraídos de 11 canteras fluviales en el corredor Combapata-Ollantaytambo (Cusco, Perú). El estudio, de enfoque cuantitativo y alcance descriptivo, evaluó variables críticas como granulometría, contenido de humedad, peso específico, absorción, resistencia a la abrasión (método Los Ángeles) y estructura de costos (fijos/variables). Los resultados evidenciaron que los agregados gruesos cumplen el 81% de los requisitos del Manual de Carreteras EG-2013, frente a solo un 38% en agregados finos, principalmente por exceso de material fino (malla N° 200) y desviaciones en el módulo de fineza. En cuanto a costos, se identificó homogeneidad en valores por m³ entre canteras de calidad comparable, con fluctuaciones menores atribuidas a eficiencias operativas y accesibilidad geográfica. El trabajo concluye con recomendaciones para optimizar procesos de lavado y clasificación de finos, además de estandarizar protocolos de control de calidad, aportando así una base técnico-económica para la selección de materiales en proyectos de infraestructura regional.

Conclusiones destacadas:

- Desempeño normativo diferenciado: Los agregados gruesos superaron ampliamente a los finos en cumplimiento de especificaciones técnicas, con parámetros como resistencia a la abrasión (<20% pérdida) e índice de durabilidad (>95%) dentro de márgenes óptimos para aplicaciones estructurales.
- Uniformidad geotécnica: La consistencia en propiedades físico-mecánicas entre canteras sugiere homogeneidad litológica en el depósito aluvial del Vilcanota, validando su confiabilidad como fuente de materiales.

- Estructura de costos: Los costos fijos (depreciación de maquinaria y salarios) representaron el 65-70% del total, con variaciones intercanteras menores al 8%, vinculadas a distancias de transporte y rendimiento operativo.
- Aplicaciones prácticas: Los agregados gruesos son aptos para hormigones estructurales y bases de pavimentos, mientras los finos requieren tratamientos complementarios (lavado, dosificación) para cumplir normativas en mezclas asfálticas.
- Innovación en gestión: Se propone un modelo de optimización logística para reducir costos y un protocolo de muestreo estadístico para mejorar el control de calidad in situ.

1.5 Justificación e importancia de la investigación

1.5.1 Justificación técnica

Desde un enfoque técnico, la investigación es esencial para evaluar la viabilidad de una planta de conminución que garantice un abastecimiento eficiente y sostenible de materiales agregados para la construcción de la carretera interregional PE-3N. Actualmente, la falta de infraestructura de procesamiento en la zona obliga a transportar material no procesado a largas distancias, generando sobrecostos y retrasos en la ejecución del proyecto. Diseñar una planta de conminución permitirá optimizar el circuito de trituración y clasificación, asegurando el cumplimiento de las especificaciones técnicas del material procesado.

1.5.2 Justificación personal

A nivel personal, la realización de esta investigación representa una oportunidad para aplicar y profundizar conocimientos en ingeniería de procesos, geomecánica y gestión de operaciones mineras no metálicas. Además, permite desarrollar habilidades en el diseño de plantas de procesamiento de minerales y en la optimización de circuitos de conminución. Esta investigación también servirá como base para futuras especializaciones y contribuirá al crecimiento profesional en el ámbito de la minería no metálica y la infraestructura vial.

1.5.3 Justificación económica

Desde una perspectiva económica, el estudio busca optimizar los costos asociados al abastecimiento de materiales agregados, minimizando los gastos en transporte y adquisición de material. La implementación de una planta de conminución en la zona de intervención reducirá la dependencia de proveedores externos y mejorará la rentabilidad del proyecto. Además, permitirá establecer un suministro estable y continuo de materiales, evitando fluctuaciones en costos y disponibilidad.

1.5.4 Justificación social

La investigación también tiene un impacto positivo en la comunidad local, ya que la instalación de una planta de conminución fomentará la generación de empleo directo e indirecto en la zona. Asimismo, contribuirá al desarrollo de infraestructura en la región, mejorando la calidad de vida de los habitantes mediante la reducción de costos de construcción y mantenimiento de vías. Además, un abastecimiento eficiente de materiales agregados favorecerá la ejecución de futuras obras viales y proyectos de infraestructura en la región.

1.6 Hipótesis general

La implementación de una planta de conminución para el procesamiento de yacimientos no metálicos (canteras) permitiría garantizar el abastecimiento de materiales agregados para la construcción de la carretera interregional PE-3N, asegurando el cumplimiento de las especificaciones técnicas exigidas y optimizando su disponibilidad en la zona de intervención.

1.6.1 Hipótesis específicas

La caracterización mineralógica y geomecánica de los yacimientos no metálicos permitiría evaluar adecuadamente las propiedades del material extraído, optimizando su uso en la producción de materiales agregados.

El diseño técnico del circuito de trituración y clasificación contribuiría a mejorar la eficiencia del proceso de conminución, garantizando una producción que cumpla con las especificaciones del proyecto vial y con la normativa técnica peruana vigente.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Introducción a la minería no metálica

La minería no metálica es una actividad extractiva enfocada en la obtención y procesamiento de minerales que no contienen metales, desempeñando un papel fundamental en diversas industrias como la construcción, la química y la manufactura. A diferencia de la minería metálica, su objetivo no es la extracción de elementos como el oro o el cobre, sino de materiales como piedra chancada, arcillas, caliza, arenas y otros materiales agregados esenciales para la industria.

En el Perú, la minería no metálica constituye un sector significativo dentro de la economía minera. Según (Haberer, 2009), los minerales no metálicos tienen un volumen de producción superior al de los metales, aunque su valor unitario es considerablemente menor. Entre los productos más destacados se encuentran los materiales agregados de construcción, como la piedra chancada y la arena, así como minerales industriales, como el cuarzo y la bentonita. Esta industria es clave para satisfacer la creciente demanda de infraestructura y productos industriales en el país.

Tal como se observa en la Tabla 3, la producción de minerales no metálicos en el Perú varía significativamente entre los diferentes tipos de materiales extraídos. Se destacan minerales como la caliza/dolomita, con una producción de más de 20 millones de toneladas métricas finas (TMF) en el primer semestre de 2023, y otros como la arena y la arcilla, con incrementos notables en comparación con el año anterior. Estas cifras reflejan la importancia de la minería no metálica en el desarrollo del sector de la construcción y otros rubros industriales en el país.

Tabla 3*Producción no metálica nacional*

METALES	UNIDAD DE MEDIDA	JUN-23	JUN-22	VAR %	ENE-JUN 2023	ENE-JUN 2022	VAR %
Andesita	TMF	1,770	580	205.20%	7,231	13,846	-47.80%
Aragonito	TMF	0	2,895	- 100.00%	0	2,895	- 100.00%
Arcillas	TMF	144,415	127,737	13.10%	722,160	692,821	4.20%
Arena (gruesa/fina)	TMF	149,848	135,863	10.30%	1,030,463	869,467	18.50%
Arenisca / Cuarcita	TMF	4,165	1,238	236.30%	14,239	10,126	40.30%
Baritina	TMF	480	1,125	-57.30%	8,997	8,706	3.30%
Bentonita	TMF	130	137	-5.10%	835	1,357	-38.50%
Boratos / Ulexita	TMF	0	0	-	0	0	-
Calcita	TMF	167,785	187,007	-10.30%	537,361	764,984	-29.80%
Caliza / Dolomita	TMF	4,301,515	3,296,975	30.40%	20,425,729	9,822,040	108.00%
Caolín	TMF	1,326	1,115	18.90%	7,197	6,024	19.50%
Conchuelas	TMF	475	174,588	-99.70%	521,642	890,923	-41.40%
Diatomitas	TMF	10,117	3,863	161.80%	16,413	7,251	126.40%
Dolomita	TMF	1,800	710	153.50%	8,600	3,784	127.30%
Feldespatos	TMF	3,637	9,410	-61.30%	5,382	19,667	-72.60%
Fosfatos	TMF	1,021,453	902,030	13.20%	5,549,699	5,030,433	10.30%
Granito	TMF	0	0	-	195	0	-
Granodiorita ornamental	TMF	0	0	- 100.00%	90	120	-25.00%
Hormigón	TMF	443,206	447,355	-0.90%	2,675,987	2,621,624	2.10%
Mármol	TMF	0	0	-	2	2	-
Mica	TMF	0	0	-	0	0	-
Mineral andalucita	TMF	88,909	97,491	-8.80%	436,907	531,822	-17.80%
Ónix	TMF	2	2	0.00%	9	8	12.50%
Piedra (construcción)	TMF	143,792	224,838	-36.10%	978,311	1,272,737	-23.20%
Piedra laja	TMF	89	127	-29.60%	400	412	-2.90%
Pirofilita	TMF	3,667	3,098	18.40%	16,922	13,756	23.00%
Pizarra	TMF	0	0	-	0	0	-
Puzolana	TMF	92,065	98,730	-6.70%	479,723	675,346	-29.00%
Sal	TMF	85,977	110,483	-22.20%	531,845	561,206	-5.20%
Sílice	TMF	65,372	48,762	34.10%	393,721	333,317	18.10%
Sulfatos	TMF	0	0	100.00%	0	0	-
Talco	TMF	1,884	2,768	-32.00%	9,361	6,412	46.00%
Travertino	TMF	49,396	41,616	18.70%	298,960	244,279	22.40%
Yeso	TMF	46,782	24,719	89.20%	105,028	144,211	-27.20%

Fuente: Adaptado de (Ministerio de Energía y Minas, 2023)

2.1.2 Procesos principales en la Minería no Metálica

Los procesos involucrados en la minería no metálica incluyen:

2.1.2.1 Exploración. La fase de exploración tiene como objetivo identificar y evaluar yacimientos minerales con potencial de explotación económica. Para ello, se realizan estudios geológicos, muestreos y análisis mineralógicos que permiten determinar la calidad y cantidad del recurso disponible. En el caso de materiales agregados como la piedra chancada, la proximidad de los yacimientos no metálicos a las obras de construcción es un factor determinante para la viabilidad del proyecto (Haberer, 2009).

2.1.2.2 Explotación. La explotación de yacimientos no metálicos se lleva a cabo, en su mayoría, a cielo abierto debido a la facilidad de acceso y la baja profundidad del macizo rocoso. Estas operaciones pueden incluir la perforación y voladura, así como el carguío y acarreo de los minerales extraídos hacia la planta de conminución, priorizando métodos que optimicen los costos y minimicen el impacto ambiental (Haberer, 2009).

2.1.2.3 Procesamiento. El procesamiento es una etapa crucial que busca adecuar los materiales extraídos a las especificaciones requeridas. En la minería no metálica, la conminución (trituración y molienda) es el proceso principal, donde el material se reduce de tamaño para obtener productos finales con granulometría específica. Equipos como trituradoras de mandíbula, trituradoras de cono y zarandas vibratorias son esenciales en esta etapa.

De acuerdo con (Haberer, 2009), una operación de procesamiento eficiente debe garantizar:

- Una granulometría adecuada al uso final del material (ejemplo: 3/4" y 1/2" para pavimentos rígidos).
- Mínimos desperdicios de material.
- Costos operativos reducidos mediante el uso de tecnologías avanzadas.

2.1.2.4 Transporte de minerales no metálicos. Es una etapa clave en la cadena operativa minera, especialmente en obras de infraestructura vial como la carretera

interregional PE-3N. Una gestión eficiente permite reducir costos logísticos y acortar los tiempos de ejecución, lo que favorece la viabilidad técnica y económica del proyecto.

El traslado de materiales agregados desde los yacimientos no metálicos hasta los frentes de obra implica una logística compleja, debido al alto volumen y peso movilizado. Esta actividad representa una proporción significativa del presupuesto total y puede generar impactos ambientales considerables, como emisiones atmosféricas, ruido, deterioro de vías y riesgo de accidentes (Haberer, 2009). Por ello, resulta esencial aplicar estrategias sostenibles que mitiguen sus efectos.

El transporte terrestre, comúnmente efectuado mediante volquetes, es el método más empleado en distancias cortas y medias. Aunque ofrece flexibilidad, presenta desventajas ambientales por su alta demanda energética, generación de emisiones y congestión vial.

La selección del sistema de transporte debe responder a un análisis integral que considere factores como la distancia, volumen de carga, accesibilidad y sostenibilidad, de modo que se garantice un flujo continuo de materiales sin afectar la eficiencia operativa ni el entorno ecológico.

2.1.2.5 Desafíos del transporte. El transporte minero enfrenta retos significativos relacionados con la regulación, las condiciones operativas y el cumplimiento ambiental. Según el Reglamento de Procedimientos Mineros (D.S. N° 020-2020-EM), la concesión de transporte minero requiere autorizaciones específicas, incluyendo la aprobación de un instrumento de gestión ambiental y la acreditación de propiedad o uso del terreno. Además, cualquier modificación de la concesión debe cumplir con requisitos técnicos y normativos adicionales. Estas disposiciones buscan garantizar la eficiencia del transporte de minerales y minimizar su impacto ambiental dentro del marco regulatorio vigente (Ministerio de Energía y Minas, s.f.).

2.1.2.6 Estrategias de Optimización. Según (Barboza E. , 2008), para mejorar la eficiencia, se pueden aplicar:

- Optimización de rutas: Mejora de la planificación para reducir costos y tiempo.

- Uso de tecnología: Implementación de GPS y software de gestión de flotas para optimizar la logística.
- Mantenimiento preventivo: Reducción de fallos y prolongación de la vida útil de los vehículos.
- Capacitación del personal: Mejora en seguridad y eficiencia operativa.
- Consideraciones Ambientales y de Seguridad.

Es esencial reducir el impacto ambiental mediante el control de emisiones y la gestión adecuada de residuos. Cumplir con normativas locales y nacionales evita sanciones y fomenta prácticas responsables.

En conclusión, el transporte eficiente y sostenible de minerales no metálicos es clave para garantizar la viabilidad económica y ambiental en proyectos de infraestructura.

2.1.2.7 Impactos ambientales y medidas de mitigación. Aunque la minería no metálica es menos invasiva que la minería metálica, sigue generando impactos ambientales que requieren una gestión adecuada. Entre los principales efectos destacan:

- Alteración del paisaje: La explotación a cielo abierto modifica significativamente la morfología del terreno.
- Emisión de polvo: Las actividades de excavación, perforación, voladura, carguío, acarreo, conminución y transporte generan partículas en suspensión que afectan la calidad del aire.
- Consumo de recursos hídricos: Algunas etapas del procesamiento requieren grandes volúmenes de agua para el lavado y clasificación de materiales, además de su uso en la mitigación del polvo generado durante la extracción y el transporte.

2.1.2.8 Normativa y regulaciones en minería no metálica. En el Perú, las actividades de minería no metálica están reguladas por la Ley General de Minería y normativas específicas emitidas por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) (Ministerio de Energía y Minas., 2020).

Los operadores deben cumplir con:

- La presentación de Estudios de Impacto Ambiental (EIA).

- La elaboración de planes de cierre para mitigar los efectos posteriores a la explotación.
- El cumplimiento de normas técnicas nacionales (NTP), como las relativas a la granulometría y resistencia mecánica de los materiales agregados.

El Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, en su sección Suelos y Pavimentos (R.D. N°10-2014-MTC/14) (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2013), establece los requisitos para los materiales agregados utilizados en pavimentos rígidos, garantizando que estos cumplan con las propiedades de resistencia, durabilidad y granulometría adecuada.

2.1.2.9 Tecnología y optimización de procesos. La incorporación de tecnologías avanzadas es esencial para optimizar las operaciones en minería no metálica. Equipos modernos de trituración y clasificación, así como herramientas de simulación y modelamiento digital (ejemplo: softwares como Bruno-Metso o JKSimMet), permiten identificar cuellos de botella en los procesos y proponer configuraciones más eficientes.

2.1.3 Procesos de conminución

2.1.3.1 Aspectos técnicos generales de conminución. La conminución es un proceso fundamental mediante el cual se reduce el tamaño de los fragmentos de roca, facilitando la liberación de los minerales de valor contenidos en ellos. En el caso de los yacimientos no metálicos, este proceso es esencial para obtener materiales agregados con las características granulométricas requeridas en proyectos viales interregionales.

Según el Ministerio de Energía y Minas de Chile, (2006), la conminución comienza con la voladura, que genera una primera reducción del tamaño del material, y se extiende a lo largo de las etapas de chancado y molienda, adaptándose a las especificaciones técnicas del producto final deseado.

En el marco del proyecto de prefactibilidad planteado en esta tesis, es fundamental garantizar que cada etapa de la conminución esté correctamente diseñada y controlada, ya que las propiedades físicas y mecánicas de los minerales no metálicos influyen directamente en la eficiencia de los equipos y en los costos operativos. La selección de

equipos y el diseño de circuitos de conminución deben considerar factores como el tipo de mineral, su resistencia a la fragmentación y la distribución granulométrica requerida, aspectos ampliamente abordados en el Manual General de Minería y Metalurgia.

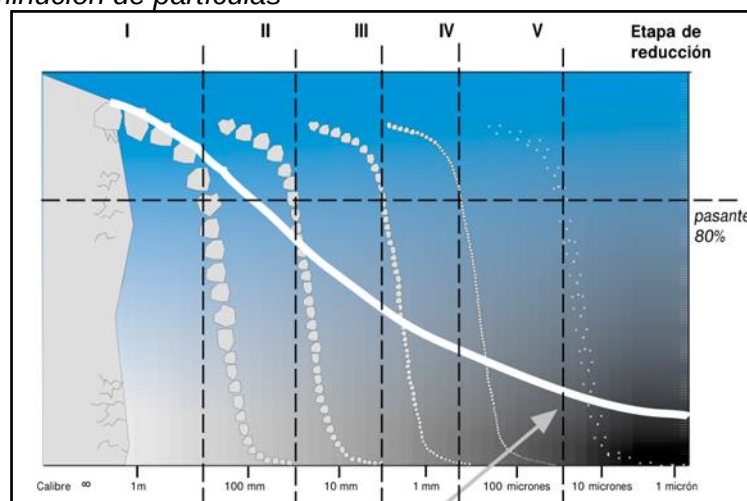
2.1.3.2 Proceso de reducción de tamaño. Los minerales cristalinos tienden a fracturarse en múltiples tamaños y formas cuando se les aplica una fuerza. La dificultad en la reducción de tamaño radica en controlar la generación de partículas sobredimensionadas y de tamaño excesivamente fino durante el proceso de conminución.

Si este aspecto no se gestiona adecuadamente, el mineral seguirá su patrón natural de fractura, lo que puede resultar en una sobreproducción de finos, afectando la eficiencia del proceso y la calidad del producto final. En el contexto de esta tesis, el control de la granulometría es un factor clave para optimizar la conminución en minerales no metálicos, asegurando una distribución adecuada de partículas para su uso en aplicaciones específicas, como proyectos viales interregionales (Metso Minerals, 2004).

Como se observa en la Figura 2, para obtener productos de calidad a partir de rocas o minerales (excepto rellenos), es fundamental mantener las curvas de reducción de tamaño con la mayor pendiente posible. En términos industriales, el valor del material suele incrementarse a medida que su tamaño de partícula se reduce, lo que hace que este proceso sea económicamente relevante.

Figura 2

Etapas de conminución de partículas



Fuente: Metso Minerals, (2004)

Para alcanzar este objetivo, es esencial seleccionar el equipo adecuado que permita una reducción de tamaño eficiente y controlada. Cada equipo de conminución presenta diferencias en cuanto a su técnica de reducción, relación de reducción, tamaño de alimentación, entre otros factores. Por ello, la combinación óptima de estos equipos es clave para ajustar el proceso y lograr el intervalo de tamaño requerido en el producto final.

2.1.3.3 Material de alimentación en la conminución. El rendimiento de las operaciones de reducción de tamaño en los procesos de chancado y molienda está determinado principalmente por las características del mineral de alimentación. Estas propiedades influyen directamente en la eficiencia del proceso, en el consumo energético y en el desgaste de los equipos utilizados en la conminución.

Dos parámetros fundamentales para evaluar el comportamiento del material en el circuito de conminución son:

- Índice de Trabajo (Wi): Este parámetro, también denominado "Work Index", mide la energía requerida para reducir el tamaño de una determinada cantidad de material. Valores más altos de Wi indican una mayor resistencia del mineral a la fractura, lo que implica un mayor consumo energético en el proceso de conminución.
- Índice de Abrasión (Ai): Representa la capacidad del mineral para desgastar las superficies de los equipos con los que entra en contacto. Minerales con altos valores de Ai generan un mayor desgaste en los revestimientos de los chancadores y molinos, aumentando los costos de mantenimiento y disminuyendo la vida útil de los equipos.

En la Tabla 4, se presentan valores típicos de Wi y Ai para distintos tipos de rocas y minerales.

Tabla 4*Índice de trabajo y abrasión de materiales típicos*

MATERIAL	ÍNDICE DE TRABAJO WI (KWH/T)	ÍNDICE DE ABRASIÓN AI
Basalto	20 ± 4	0,200 ± 0,20
Diabasa	19 ± 4	0,300 ± 0,10
Dolomita	12 ± 3	0,010 ± 0,05
Hematita (Min. de hierro)	11 ± 3	0,500 ± 0,30
Magnetita (Min. de hierro)	8 ± 3	0,200 ± 0,10
Gabro	20 ± 3	0,400 ± 0,10
Gneiss	16 ± 4	0,500 ± 0,10
Granito	16 ± 6	0,550 ± 0,10
Caliza	12 ± 3	0,001 – 0,03
Cuarcita	16 ± 3	0,750 ± 0,10
Arenisca	10 ± 3	0,600 ± 0,20

Fuente: Metso Minerals, (2004)

La interacción de estos dos índices define la estrategia óptima para la selección de equipos y la configuración del circuito de conminución. Un mineral o roca con un alto índice de trabajo y un alto índice de abrasión demandará mayor consumo de energía y generará un desgaste más acelerado en los equipos, lo que obliga a tomar decisiones estratégicas para optimizar el proceso.

De acuerdo con Metso Minerals, (2004), estos factores tienen una influencia directa en:

- La eficiencia en la reducción de tamaño: Afecta la capacidad de fragmentación y la distribución granulométrica del producto final.
- Los requerimientos energéticos: Impacta el consumo específico de energía en las etapas de conminución.
- El estado y mantenimiento de la maquinaria: Un alto índice de abrasión acelera el desgaste de las piezas de los equipos, aumentando los costos operativos.

En conclusión, el conocimiento detallado de las características de los minerales de alimentación es esencial para diseñar y operar un circuito de conminución eficiente y rentable.

2.1.3.4 Razón de reducción en procesos de conminución. La razón de reducción es un parámetro fundamental en el proceso de conminución, ya que expresa la relación entre el tamaño del material de alimentación y el tamaño del producto final obtenido tras la reducción. En términos matemáticos, se define como:

$$R = \frac{D_{alimentación}}{D_{producto\ final}} \quad (1)$$

donde:

R = Es la razón de reducción

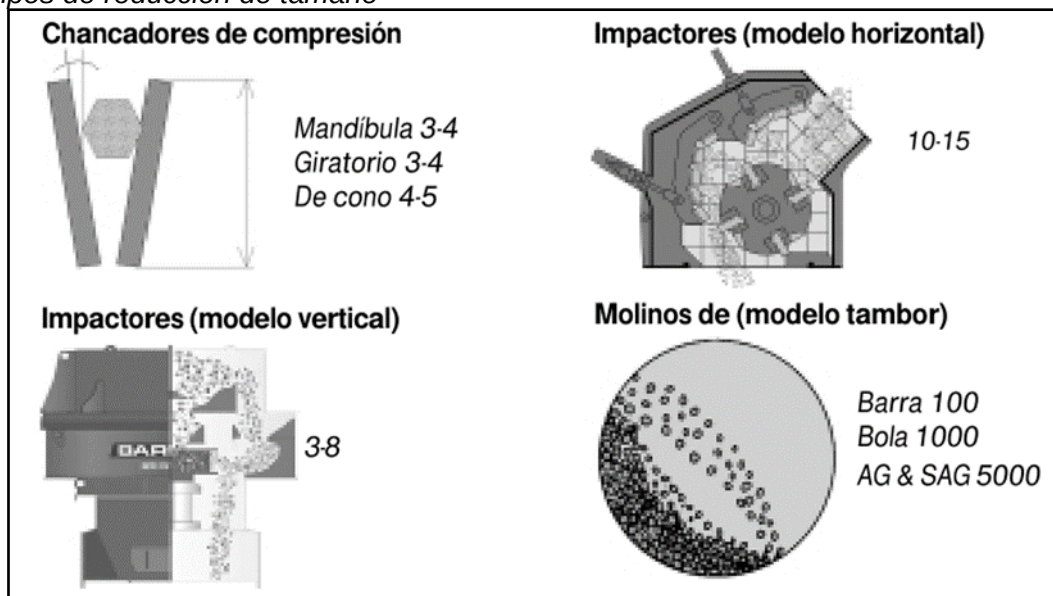
$D_{alimentación}$ = Es el tamaño medio del material antes del proceso

$D_{producto\ final}$ = Es el tamaño medio del material tras la reducción.

De acuerdo con Metso Minerals, (2004), los equipos de reducción de tamaño tienen razones de reducción características según su diseño y principio de operación. Como se muestra en la Figura 3, estos valores varían significativamente entre los distintos tipos de chancadores y molinos.

Figura 3

Equipos de reducción de tamaño



Fuente: Metso Minerals (2004)

La importancia de la razón de reducción influye en:

- El diseño del circuito de conminución: La combinación de chancadores y molinos debe asegurar una reducción eficiente y progresiva.

- El consumo energético: Equipos con mayores razones de reducción suelen requerir mayor energía por tonelada procesada.
- El rendimiento del equipo: Un diseño inadecuado puede generar sobrecarga en los chancadores o una distribución granulométrica deficiente.
- Los costos operativos: Una reducción eficiente minimiza el desgaste de los equipos y optimiza el uso de energía.

En conclusión, la selección de los equipos de reducción debe realizarse considerando la razón de reducción óptima para cada etapa del proceso, garantizando así una conminución eficiente y rentable (Metso Minerals, 2004).

2.1.3.5 El Chancado. Es una etapa fundamental en los procesos de reducción de tamaño en la minería, y su aplicación varía según el tipo de material y los objetivos de producción. Dependiendo del tipo de material que se procese, el chancado puede clasificarse en tres categorías principales: chancado de roca, chancado de gravilla y chancado de mineral, cada uno con características y exigencias operacionales distintas (Metso Minerals, 2004).

Clasificación del Chancado

- **Chancado de roca**
 - Reducción limitada.
 - Se busca una forma cúbica del material.
 - La distribución de tamaños es un factor clave.
 - Mayor flexibilidad en la operación.
 - Incluye procesos de chancado y harneado.
- **Chancado de gravilla:**
 - Similar al chancado de roca, con reducción limitada.
 - Se prioriza una distribución de tamaño uniforme.
 - Menor harneado y mayor colado en comparación con el chancado de roca.

▪ **Chancado de mineral:**

- Se persigue una reducción máxima del tamaño.
- La forma del material no es prioritaria.
- Menor flexibilidad operativa.
- Mayor harneado y menor colado.
- Costos de producción bajos y alto uso de energía.

Chancado más adecuado para minería no metálica

En la minería no metálica, donde se procesan materiales como caliza, arena sílice, dolomita y materiales agregados para la construcción, el tipo de chancado más adecuado es el chancado de roca o de gravilla. Estos procesos permiten obtener productos con tamaños controlados y formas cúbicas, características esenciales para aplicaciones en la industria del cemento, la construcción y la cerámica (Metso Minerals, 2004).

Por el contrario, el chancado de mineral es más común en minería metálica, ya que la reducción máxima del material es el principal objetivo, sin importar la forma del producto final.

2.1.3.6 Chancado de mineral no metálico. A diferencia de los minerales metálicos, el chancado en minería no metálica es más simple y está orientado a la producción de materiales agregados o materias primas industriales. Estos procesos suelen requerir solo:

- Chancado primario con una chancadora de quijada para reducir el tamaño del material.
- Clasificación en zarandas vibratorias, que separan el material en distintas granulometrías según su aplicación.

El Manual de Procesamiento de Minerales de Metso destaca que, en minería no metálica, la forma de las partículas y la eficiencia de clasificación son más relevantes que una reducción extrema de tamaño. Este tipo de chancado se aplica en la producción de caliza, yeso, arcillas y otros minerales industriales.

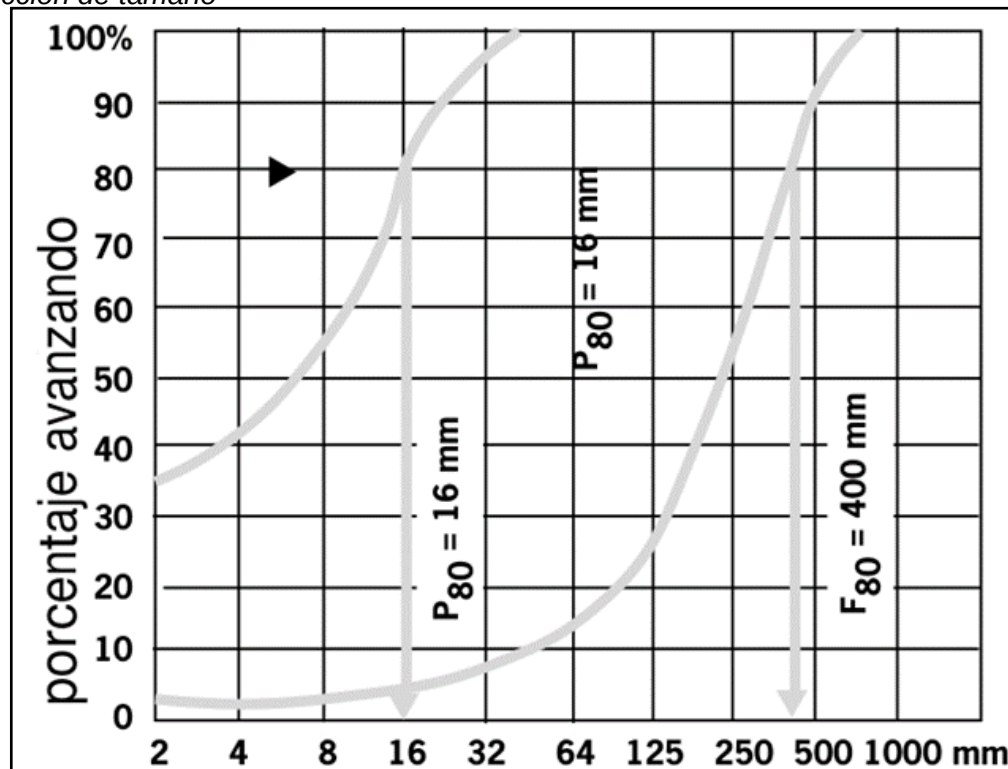
2.1.3.7 Cálculo de la relación de reducción. El chancado es un proceso fundamental en la reducción de tamaño del material extraído de una mina. Sin embargo, esta reducción no puede realizarse en una sola etapa, ya que los chancadores tienen una tasa de reducción limitada. Por ello, el proceso debe llevarse a cabo en varias etapas, dependiendo del tamaño de alimentación y el producto requerido.

La relación de reducción se define como el cociente entre el tamaño de alimentación y el tamaño del producto final:

$$\text{Razón de reducción} = \frac{\text{Tamaño de alimentación}}{\text{Tamaño de producto}} \quad (2)$$

Figura 4

Reducción de tamaño



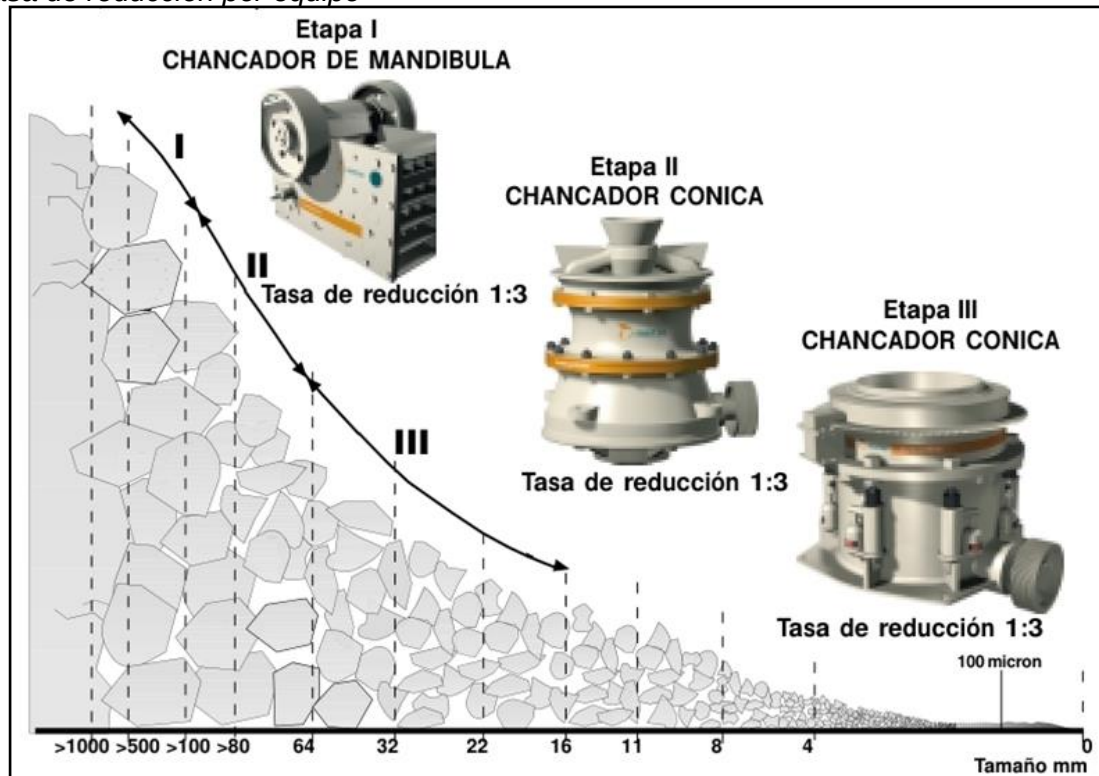
Fuente: Metso Minerals (2004)

En la figura 5, se presenta un ejemplo donde se debe reducir el tamaño de alimentación $F_{80} = 400 \text{ mm}$ hasta un tamaño de producto $P_{80} = 16 \text{ mm}$. La relación de reducción total es:

$$\frac{F_{80}}{P_{80}} = \frac{400}{16} = 25$$

Figura 5

Tasa de reducción por equipo



Fuente: Metso Minerals, (2004)

Como se observa en la figura 6, los chancadores utilizados tienen tasas de reducción limitadas:

- Chancador de mandíbula: $R_1 = 3$
- Chancador cónico etapa II: $R_2 = 3$
- Chancador cónico etapa III: $R_3 = 3$

Multiplicando las tasas de reducción en cada etapa:

$$R_1 * R_2 * R_3 = 3 * 3 * 3 = 27$$

Dado que 27 es suficiente para alcanzar el tamaño requerido, el proceso se realiza en tres etapas.

Diferencia en minería no metálica.

A diferencia de la minería metálica, donde se requieren varias etapas de chancado debido a la dureza del material y la necesidad de reducir el tamaño para molienda, en la minería no metálica generalmente solo se requiere una etapa de chancado.

Esto se debe a:

- Menor dureza del material: Los minerales no metálicos, como la caliza y la arcilla, suelen tener menor dureza (bajo 5 en la escala de Mohs), lo que permite chancarlos fácilmente con un solo equipo.
- Menor exigencia en la granulometría: En muchos casos, los productos de minería no metálica no requieren tamaños tan finos como en minería metálica.
- Uso de chancadores de impacto (HSI): En la minería no metálica, los chancadores de impacto de eje horizontal (HSI) pueden lograr relaciones de reducción de hasta 10:1 en una sola etapa.

Ejemplo en minería no metálica:

Si en una operación de minería no metálica se necesita reducir el tamaño de la roca de F80 = 200 mm a P80 = 20 mm, se tendría:

$$\text{Razón de reducción} = \frac{200}{20} = 10$$

Dado que un chancador de impacto (HSI) tiene una razón de reducción de 10:1, una sola etapa de chancado es suficiente, (Metso Minerals, 2004).

Conclusión:

- En minería metálica, el chancado requiere múltiples etapas debido a la alta dureza del material y la necesidad de obtener tamaños finos para la molienda.
- En minería no metálica, una sola etapa con un chancador adecuado es suficiente, debido a la menor dureza y a la menor exigencia en granulometría.

2.1.3.8 Selección de chancadores. Una vez determinada la cantidad de etapas de chancado necesarias, se puede proceder a la selección del chancador más adecuado para cada etapa de reducción. Esta selección dependerá de diversos factores operacionales, como el tamaño de alimentación, la capacidad requerida, la dureza del material y otras condiciones específicas del proceso.

En el caso de los chancadores primarios, es fundamental considerar las opciones disponibles según las características del mineral y los objetivos de reducción de tamaño.

A continuación, se presentan los principales tipos de chancadores primarios y sus aplicaciones.

Figura 6

Chancadores estacionarios



Fuente: Metso Minerals, (2004)

2.1.3.9 Chancador primario. El chancador primario es el equipo encargado de recibir el material de voladura o de mina y reducir su tamaño para las etapas posteriores de procesamiento. La selección del tipo de chancador primario depende de diversos factores, como la dureza del material, la capacidad requerida y el tamaño de alimentación.

Según (Metso Minerals, 2004), existen tres tipos principales de chancadores primarios:

- Impactador de Eje Horizontal (HSI): Se utiliza en materiales de baja dureza (menores a 5 en la escala de Mohs) y en aplicaciones donde la capacidad de procesamiento no es muy alta.
- Chancador de Mandíbula: Es la opción más utilizada debido a su eficiencia y menor costo operativo. Es ideal para capacidades medias y materiales de dureza intermedia.
- Chancador Giratorio: Recomendado para altas capacidades y materiales de mayor dureza, ya que ofrece una mayor apertura de alimentación y mejor rendimiento en procesos de gran escala.

Reglas para la selección del chancador primario:

- Regla 1: Si es posible, utilizar un chancador de mandíbula, ya que es la opción más económica.

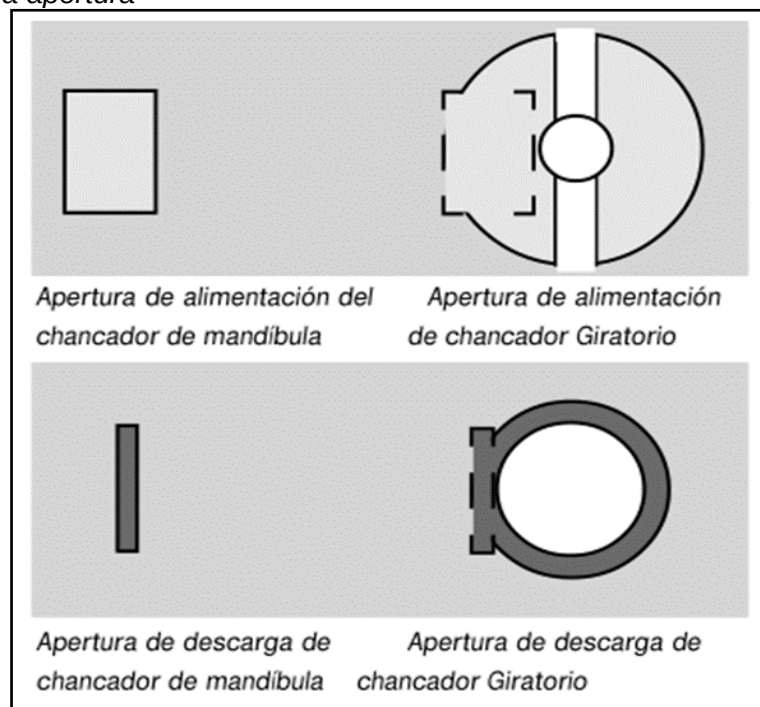
- Regla 2: Para bajas capacidades, se recomienda un chancador de mandíbula con un martillo hidráulico para el manejo de sobre tamaño.
- Regla 3: Para altas capacidades, se debe elegir un chancador de mandíbula con una mayor apertura de alimentación.
- Regla 4: Para capacidades muy elevadas, la mejor opción es un chancador giratorio.

Consideraciones sobre la geometría de los chancadores

Las diferencias en la geometría de los chancadores primarios afectan el flujo y la eficiencia del proceso de chancado. Como se observa en la figura 8, la apertura de alimentación en los chancadores de mandíbula es rectangular, mientras que en los giratorios es circular, permitiendo procesar mayores volúmenes de material.

Figura 7

Geometría de la apertura



Fuente: Metso Minerals, (2004)

2.1.3.10 Chancador primario en minería no metálica. El dimensionamiento de chancadores primarios en minería no metálica es un proceso clave para garantizar una reducción eficiente del tamaño del mineral antes de su procesamiento final. A diferencia de la minería metálica, donde se requiere chancado en múltiples etapas, en minería no

metálica generalmente una sola etapa de chancado es suficiente debido a las características del mineral tratado, como su menor dureza y tamaño de alimentación más controlado.

Según Metso Minerals, (2004), los chancadores primarios más utilizados son:

- Chancadores de Mandíbula, recomendados para minerales de dureza media.
- Impactadores de Eje Horizontal (HSI), adecuados para minerales blandos.

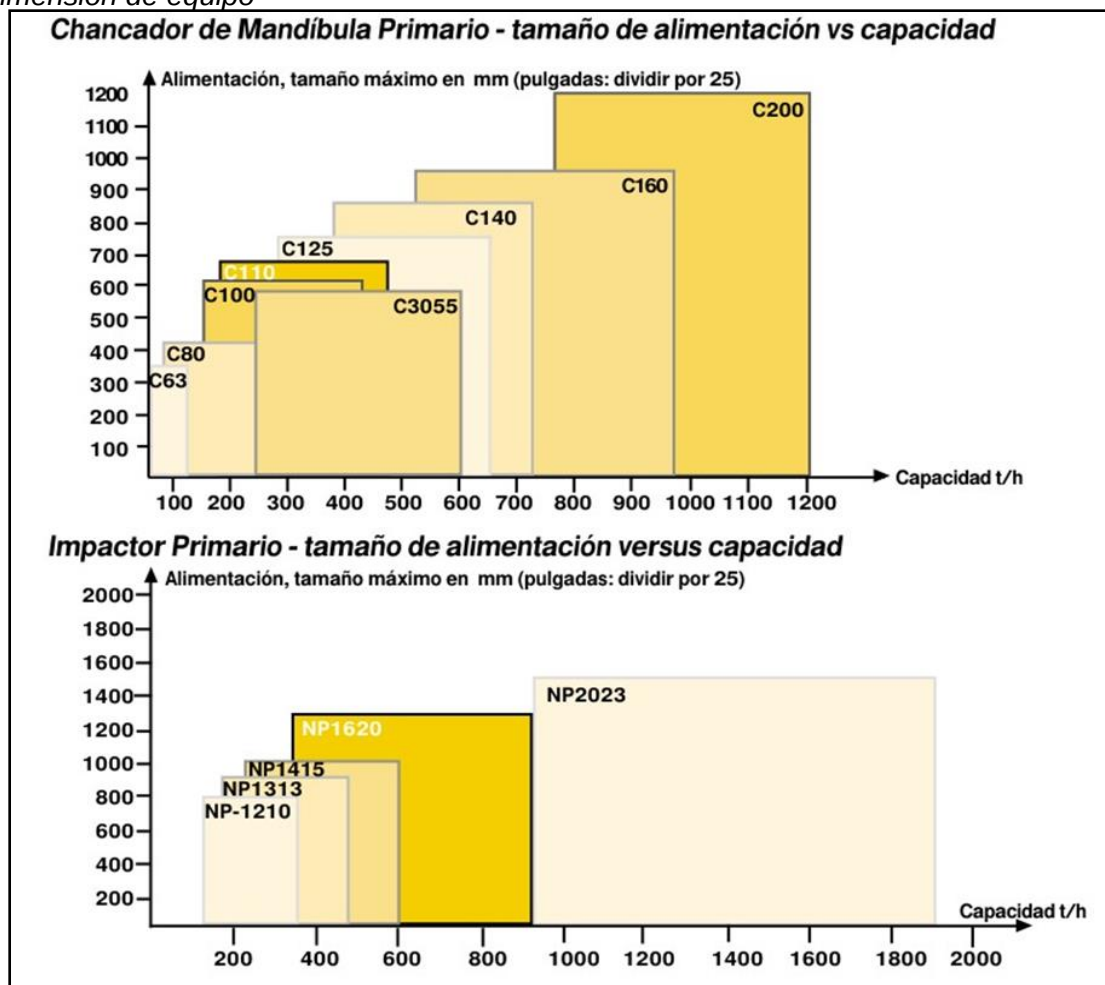
Ejemplo de dimensionamiento en minería no metálica:

Supongamos que se debe seleccionar un chancador primario para procesar caliza en una planta cementera. El material de alimentación proviene de voladura y tiene un tamaño máximo de 500 mm, con una capacidad de 600 t/h.

Selección del Chancador:

Figura 8

Dimensión de equipo



Fuente: Metso Minerals, (2004)

De acuerdo con las gráficas de dimensionamiento:

- Un chancador giratorio no es necesario, ya que está diseñado para volúmenes y capacidades mucho mayores.
- Un chancador de mandíbula modelo C125 puede aceptar material de hasta 600 mm y operar a una capacidad adecuada para la planta.
- Un Impactador primario NP1313 también podría ser una opción si la caliza tiene una dureza baja (menor a 5 Mohs), pero con una capacidad menor que la requerida.

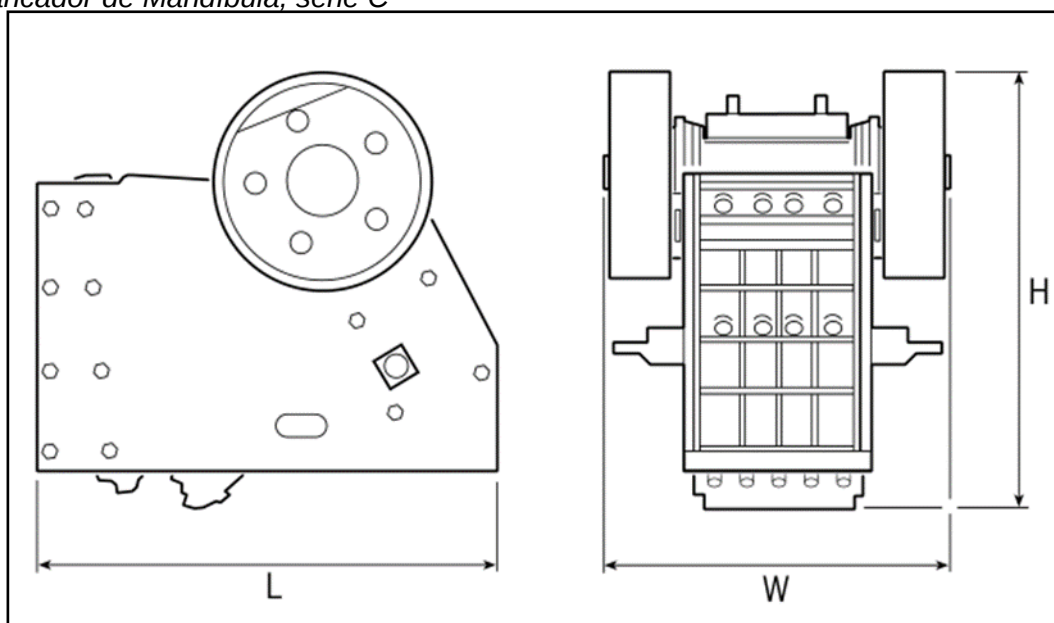
La mejor opción en este caso es el chancador de mandíbula C125, que permite una reducción eficiente con un bajo costo operativo y mantenimiento reducido, ideal para minería no metálica.

Conclusión:

El uso de las gráficas y tablas (figura 9 y tabla 5), de dimensionamiento es fundamental para seleccionar el equipo adecuado en función del tamaño de alimentación y la capacidad de producción. En minería no metálica, una sola etapa de chancado con un chancador de mandíbula es suficiente, a diferencia de la minería metálica, donde se requieren múltiples etapas para alcanzar un tamaño de producto óptimo para molienda.

Figura 9

Chancador de Mandíbula, serie C



Fuente: Metso Minerals, (2004)

Tabla 5*Parámetros de chancadores*

MODELO	ALTO (H) mm (pulg)	LARGO (L) mm (pulg)	ANCHO (W) mm (pulg)	PESO ton	KW/HP Potencia
C63	1600 (63)	1950 (77)	1390 (55)	6.05	45/60
C80	1700(67)	2022 (80)	1565 (62)	7.52	75/100
C100	2.400 (95)	2.880 (113)	2250 (89)	20.1	110/150
C105	2050 (81)	2.630 (104)	1920 (76)	13.5	110/150
C110	2670 (105)	2.830 (112)	2385 (84)	25.06	160/200
C125	2900 (114)	3370 (133)	2690 (106)	36.7	160/200
C 140	3060 (121)	3645 (144)	2890(114)	45.3	200/250
C145	3330 (131)	3855 (152)	2870(113)	53.8	200/250
C160	3550 (140)	4200 (165)	3180 (125)	68.6	250/300
C200	4220 (166)	4870 (192)	3890 (153)	118.4	400/500
C3055	2400 (95)	2920 (115)	2550 (100)	25.5	160/200

Fuente: Metso Minerals, (2004)

2.1.3.11 Control de tamaño. Según (Metso Minerals, 2004), es una operación fundamental en el procesamiento de minerales, ya que permite separar sólidos en dos o más productos en función de su granulometría. Puede realizarse tanto en húmedo como en seco, dependiendo de las características del mineral y de las necesidades del proceso.

Importancia del control de tamaño:

- Optimización del proceso: Ni los chancadores ni los molinos logran una reducción exacta del tamaño, por lo que es necesario clasificar correctamente el mineral.
- Mejor eficiencia: Permite mejorar la capacidad operativa y la forma de las partículas finales.
- Reducción de carga circulante: Evita que partículas ya procesadas regresen innecesariamente a la etapa anterior, reduciendo costos energéticos.

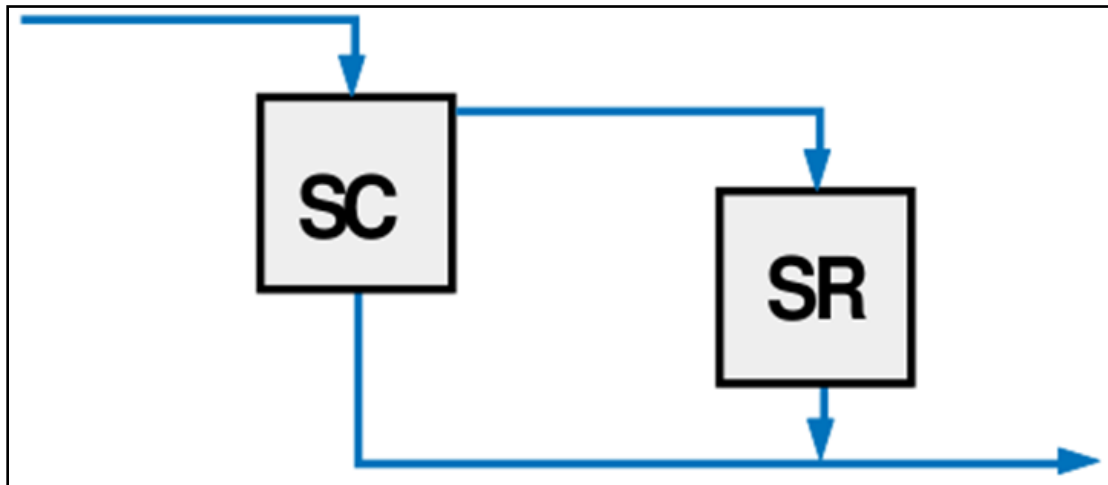
Tipos de control de tamaño según la aplicación:

De acuerdo con la imagen, existen tres aplicaciones principales:

- Separación preliminar: Su objetivo es evitar que partículas muy finas ingresen a las etapas de chancado o molienda, lo que podría provocar atascos o ineficiencias. Se emplea un clasificador o harnero antes del chancado/molienda (SC → SR).

Figura 10

Control de tamaño I



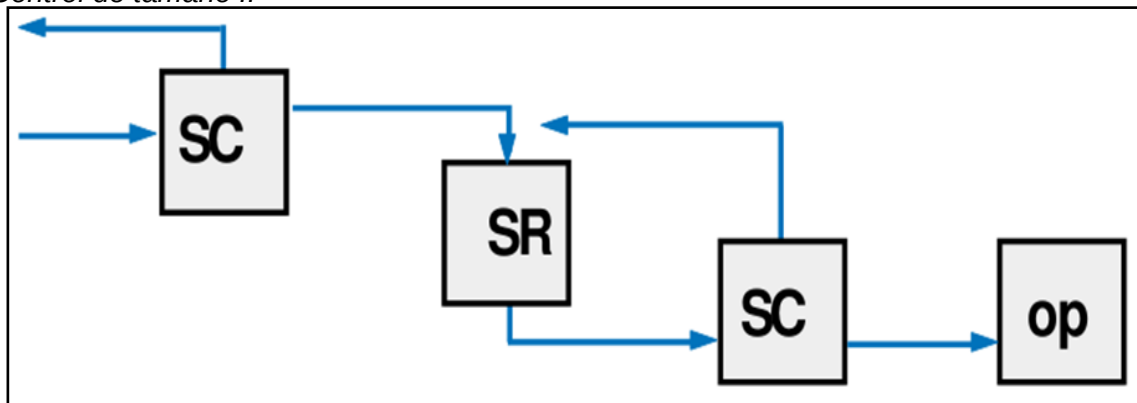
Fuente: Metso Minerals, (2004)

- Dimensionamiento del circuito: Busca evitar que el material grueso (sobre tamaño) avance a la siguiente etapa sin haber sido reducido adecuadamente.

Se implementa un circuito cerrado, donde el material mayor a la especificación regresa a la etapa de reducción (SC → SR → SC → op).

Figura 11

Control de tamaño II



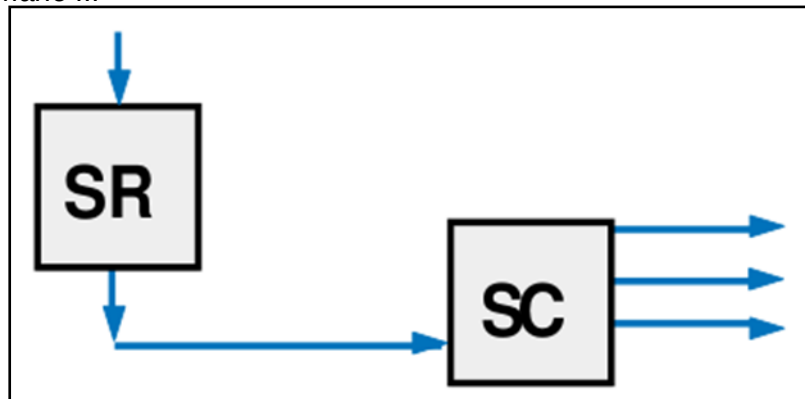
Fuente: Metso Minerals, (2004)

- Dimensionamiento del producto: Garantiza que el material final tenga la granulometría deseada antes de ser utilizado o comercializado.

Se realiza una clasificación final (SR → SC), asegurando que solo el material adecuado continúe al proceso siguiente.

Figura 12

Control de tamaño III



Fuente: Metso Minerals, (2004)

Ejemplo en minería no metálica:

- En una cantera de agregados para construcción:
- Separación preliminar: Se usa un harnero para eliminar arcillas y partículas finas antes del chancado.
- Dimensionamiento del circuito: Se aplica un sistema cerrado de trituración donde el material grande retorna al chancador.
- Dimensionamiento del producto: Se emplean harneros vibratorios para clasificar arena, piedra chancada y grava según sus tamaños requeridos.
- Los términos SC, SR y OP están relacionados con los equipos o etapas dentro del proceso de control de tamaño en el procesamiento de minerales.
- SC (Screening - Clasificación o Harneado): Representa el equipo encargado de la clasificación del material, como un harnero o tamiz, que separa las partículas según su tamaño.
- SR (Size Reduction - Reducción de Tamaño): Hace referencia a una etapa de reducción de tamaño, que puede ser un chancador o un molino encargado de disminuir el tamaño de las partículas.
- OP (Operation - Operación): Puede hacer referencia a una operación específica dentro del proceso, que puede ser una etapa de molienda, lixiviación u otro proceso posterior a la reducción y clasificación del material.

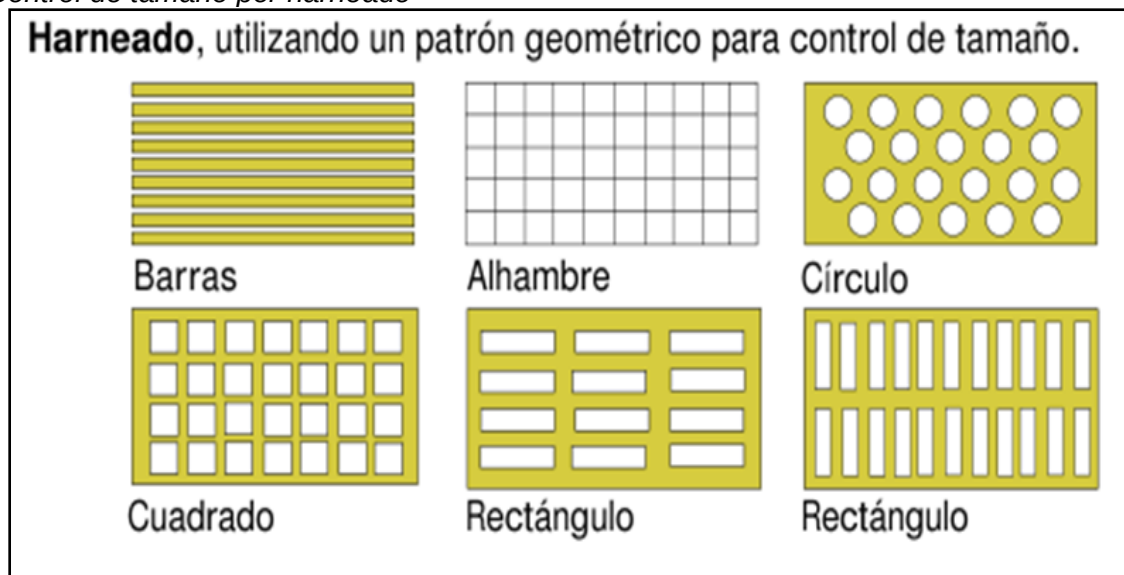
2.1.3.12 Control de tamaño en el procesamiento de minerales. Según (Metso Minerals, 2004), los métodos más utilizados en la industria minera para el control de tamaño son el harneado y la clasificación.

Harneado:

El harneado consiste en la separación de partículas según su tamaño mediante el uso de una superficie perforada con distintos patrones geométricos, como barras, alambre, círculos, cuadrados y rectángulos. Estos tamices o harneros permiten retener partículas de mayor tamaño y dejar pasar las más pequeñas, optimizando el rendimiento de los equipos posteriores en el proceso.

Figura 13

Control de tamaño por harneado



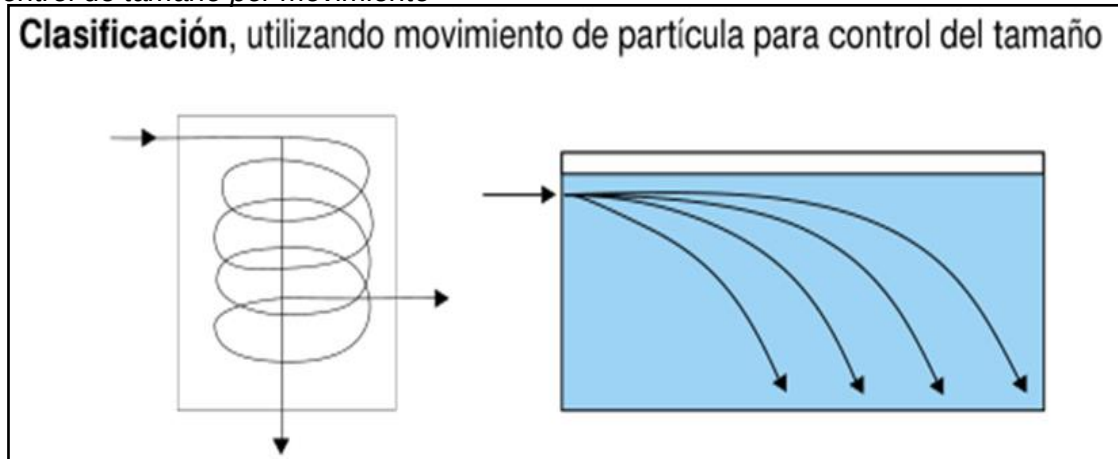
Fuente:(Metso Minerals, (2004)

Clasificación:

A diferencia del harneado, la clasificación utiliza el movimiento de las partículas en un medio fluido (como agua o aire) para lograr la separación por tamaño y densidad. En este método, las partículas más finas y ligeras son transportadas más lejos que las gruesas y pesadas. Existen distintos tipos de clasificadores, como los hidrociclones y espirales, empleados comúnmente en circuitos de molienda y concentración.

Figura 14

Control de tamaño por movimiento



Fuente: Metso Minerals, (2004)

Importancia del control de tamaño:

Implementar un control de tamaño eficiente permite reducir costos operativos y energéticos, evitar la sobrecarga de los equipos y mejorar la liberación de los minerales valiosos. En particular, (Metso Minerals, 2004) destaca que una clasificación precisa en circuitos de molienda puede incrementar la recuperación metalúrgica en un 5-10%, dependiendo de las condiciones operativas.

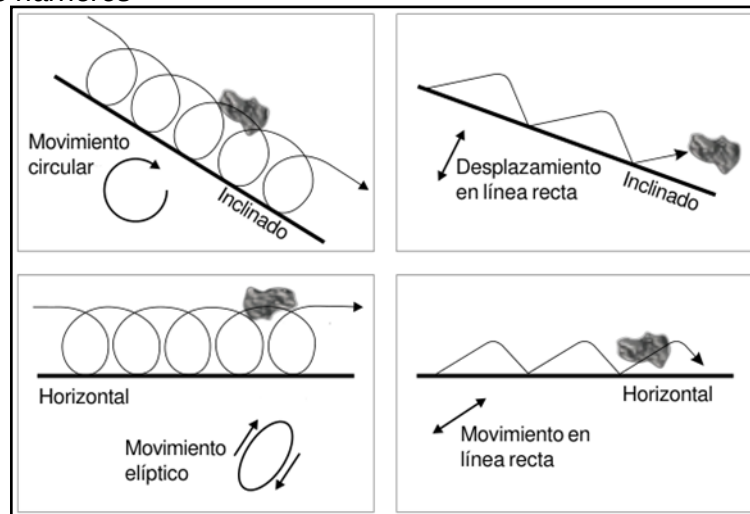
2.1.3.13 Harneros en el procesamiento de minerales. Los harneros son equipos fundamentales en el control de tamaño dentro del procesamiento de minerales. Su función principal es la separación de partículas mediante superficies perforadas, aprovechando el movimiento y la inclinación del equipo. Según (Metso Minerals, 2004), los factores clave que afectan el rendimiento de los harneros son:

Movimiento:

El tipo de movimiento del harnero determina la eficiencia de clasificación. Existen tres movimientos principales (Figura 16)

Figura 15

Movimientos de harneros



Fuente: Metso Minerals, (2004)

- **Movimiento circular:** Genera una acción de lanzamiento de las partículas, favoreciendo la estratificación.
- **Movimiento en línea recta (inclinados u horizontales):** Promueve un transporte eficiente del material en la dirección del flujo.
- **Movimiento elíptico:** Es una combinación de los dos anteriores, proporcionando un mejor control sobre la clasificación.

Inclinación:

La inclinación del harnero afecta la velocidad de desplazamiento del material y la eficiencia de separación. Los harneros pueden operar horizontalmente o inclinados dependiendo del tipo de material procesado.

Medios de clasificación:

Se refiere al tipo de superficie utilizada para el tamizado, como mallas metálicas, poliuretano o goma, seleccionadas en función del tamaño y abrasividad del material.

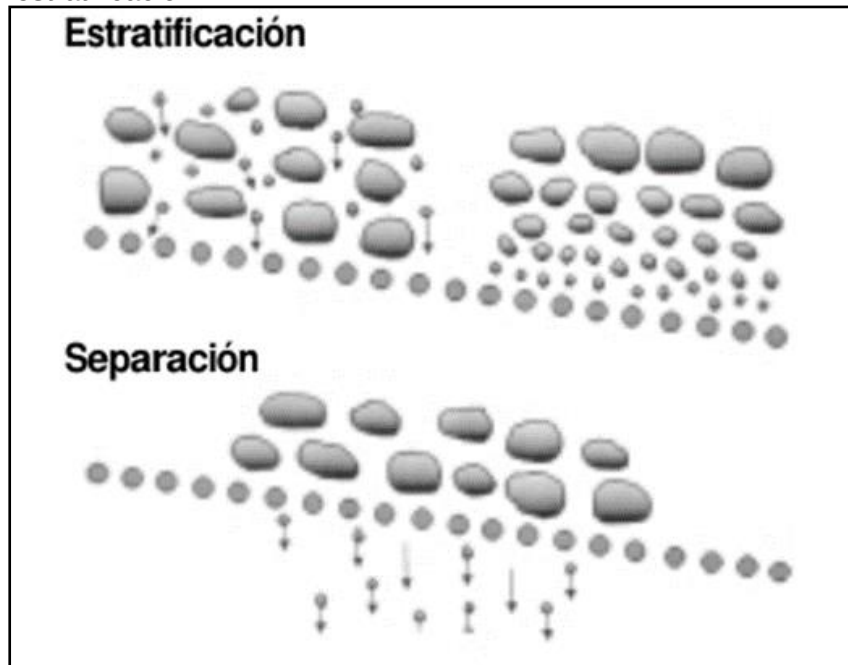
Tipos de harneros

- **Harnero por estratificación:** Cuando el material forma un lecho sobre el tamiz, las partículas finas se desplazan hacia la parte inferior y las gruesas permanecen en la parte superior, permitiendo una mejor separación (Figura 22). Este efecto ocurre cuando el harnero tiene una inclinación leve (10-15° hasta 20-30°) y el movimiento

del material reduce la fricción interna, mejorando la eficiencia del proceso (Metso Minerals, 2004).

Figura 16

Harnero por estratificación

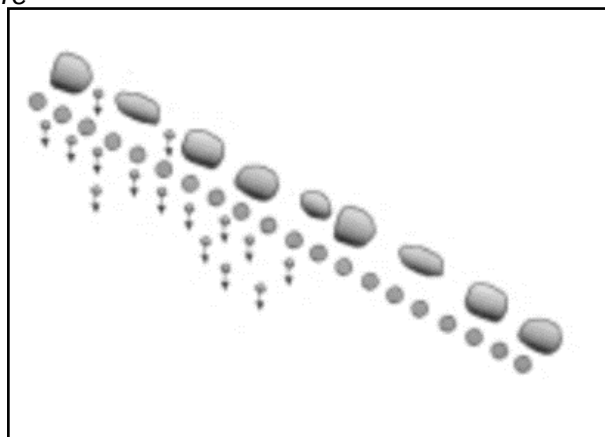


Fuente: Metso Minerals, (2004).

- Harnero por caída libre: Cuando el ángulo de inclinación es mayor y el material no forma un lecho compacto, se genera una caída libre de las partículas (Figura 18). Este tipo de harnero permite una mayor capacidad de procesamiento y es ideal para materiales que contienen una gran cantidad de finos, los cuales deben ser retirados rápidamente (Metso Minerals, 2004).

Figura 17

Harnero por caída libre



Fuente: Metso Minerals, (2004)

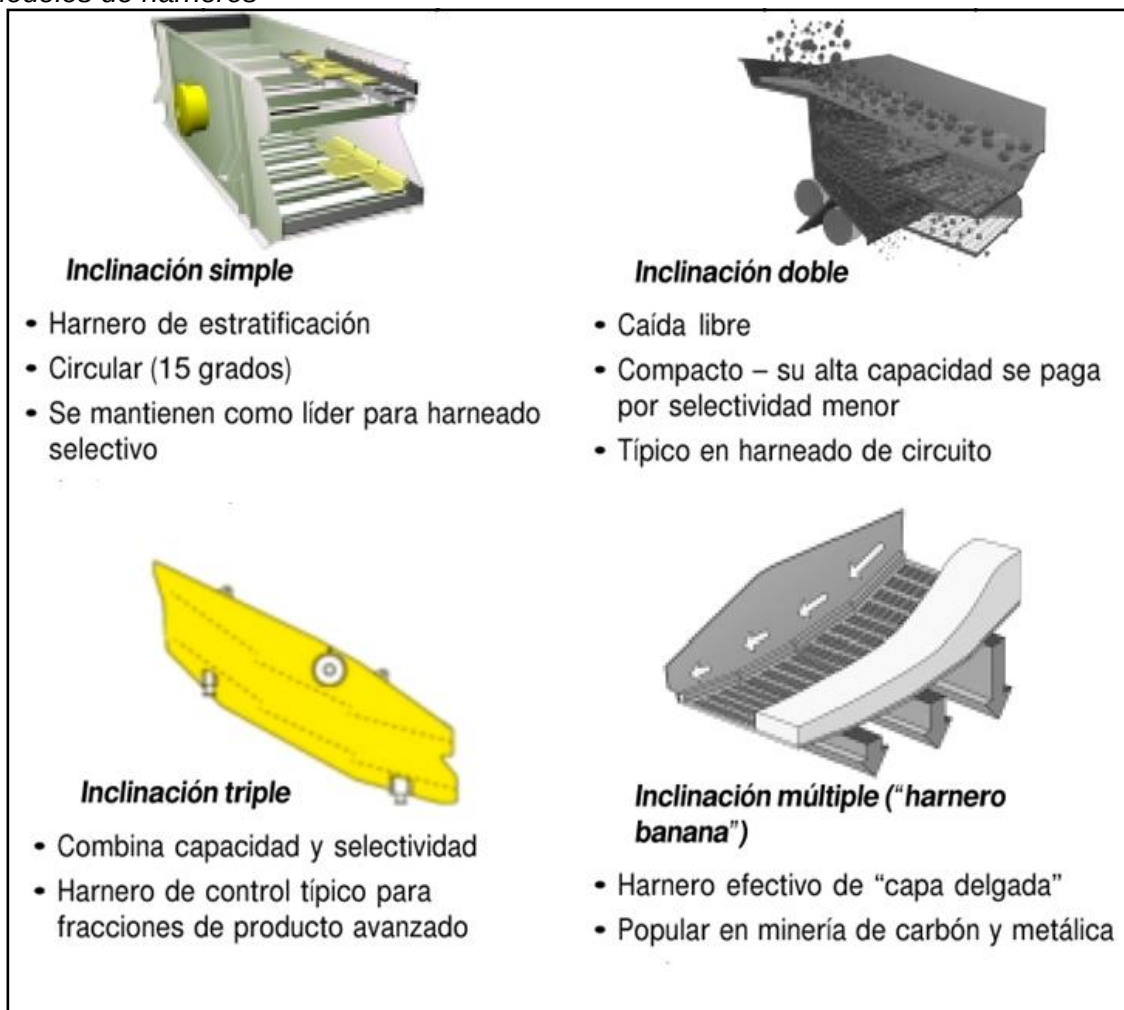
Importancia de los harneros en el procesamiento de minerales:

El uso de harneros adecuados en la etapa de conminución permite optimizar la eficiencia energética y operativa en circuitos de molienda y chancado, mejorando la productividad de la planta y la calidad del producto final (Metso Minerals, 2004).

2.1.3.14 Modelos de harneros en el procesamiento de minerales. El cribado es una etapa crucial en el procesamiento de minerales, ya que permite la separación de partículas según su tamaño, optimizando los circuitos de trituración y molienda. Existen diferentes tipos de harneros, que varían según su inclinación y principio de funcionamiento. Según Metso (2020), los modelos más utilizados en la industria pueden agruparse en cuatro categorías principales (Figura 19).

Figura 18

Modelos de harneros



Fuente: (Metso Minerals, (2004)

Harnero de inclinación simple:

Es el modelo más utilizado, representando el 80% de los harneros en operación.

Se caracteriza por:

- Movimiento circular con una inclinación de 15°.
- Estratificación eficiente, permitiendo la separación selectiva de partículas.
- Liderazgo en aplicaciones donde se requiere una alta precisión en el harneado (Metso Minerals, 2004).

Harnero de inclinación doble:

Este modelo opera bajo el principio de caída libre, lo que permite una mayor capacidad de procesamiento, pero con menor selectividad (Figura 19). Sus principales características son:

- Diseño compacto, ideal para operaciones de alta capacidad.
- Uso frecuente en harneado de circuito, donde la clasificación no requiere una alta precisión (Metso Minerals, 2004).

Harnero de inclinación triple:

Este modelo combina las ventajas de capacidad y selectividad, permitiendo un procesamiento más eficiente de materiales difíciles de clasificar. Se distingue por:

- Uso en circuitos que requieren una clasificación avanzada.
- Mayor control del flujo de material en comparación con modelos de inclinación simple y doble (Metso Minerals, 2004).

Harnero de inclinación múltiple o "Harnero Banana":

Los harneros tipo banana presentan una geometría especial que permite el paso rápido de partículas finas en la parte superior y una mayor eficiencia en la clasificación de partículas gruesas en la parte inferior (Figura 19). Sus características incluyen:

- Alta eficiencia en la clasificación de capas delgadas de material.
- Uso común en minería de carbón y metales debido a su capacidad de procesar grandes volúmenes sin comprometer la calidad del cribado (Metso Minerals, 2004).

Importancia de la selección del harnero adecuado:

La elección del modelo de harnero depende de la aplicación y del tipo de material procesado. Un diseño adecuado permite mejorar la eficiencia energética de la planta y reducir el desgaste de equipos posteriores en el circuito de molienda y flotación (Metso Minerals, 2004).

2.1.3.15 Capacidades de los harneros en el procesamiento de minerales. El dimensionamiento de los harneros es un proceso clave en la eficiencia del circuito de clasificación en plantas de procesamiento de minerales. La selección del equipo adecuado depende de diversos factores, como la capacidad de alimentación, el tamaño de partícula de corte y el área de cribado. De acuerdo con (Metso Minerals, 2004), la capacidad de un harnero se determina en función de la superficie de cribado y la separación deseada de las partículas (tabla 6).

Tabla 6

Capacidades de harnero

SEPARACIÓN	3.6 X 1.5 M	4.2 X 1.8 M	4.8 X 2.1 M	6.0 X 2.4 M
(mm)	5.4 m ²	7.6 m ²	10.0 m ²	14.4 m ²
2	20	30	45	65
5	50	70	95	135
8	75	105	140	180
12	100	145	200	230
16	125	180	230	270
25	175	250	300	350
32	200	290	350	400
50	270	370	430	500
90	370	460	550	640

Fuente: Metso Minerals, (2004).

Factores que afectan la capacidad del harnero:

Según (Metso Minerals, 2004), la capacidad de los harneros está influenciada por:

- Área de cribado: A mayor superficie del harnero, mayor será la capacidad de procesamiento.
- Tamaño de corte: A menor separación de partículas (mm), menor será la capacidad de alimentación.

- Tipo de material: Materiales con alta humedad o tendencia a la adherencia pueden reducir la eficiencia del harneado.

Ejemplo de selección de harnero:

En la tabla 6 se presenta una tabla de capacidades de harneros con diferentes áreas de cribado. Para ilustrar su aplicación, se considera un harnero de una sola plataforma con una capacidad de alimentación de 90 t/h y un tamaño de corte de 5 mm. Según la tabla, la opción óptima sería un harnero con un área de 10 m², ya que permite alcanzar la capacidad requerida.

Importancia del dimensionamiento en la industria:

La correcta selección del harnero garantiza una separación eficiente de partículas, reduciendo la carga circulante en el circuito de molienda y optimizando el rendimiento de los procesos posteriores, como la flotación o lixiviación. Además, una selección inadecuada puede generar pérdidas de material valioso o un aumento en el consumo energético de la planta (Metso Minerals, 2004).

2.1.3.16 Selección de medios de clasificación. La selección del medio de harnero depende del tipo de material y condiciones de operación:

- Goma: absorbe impactos y es resistente a la abrasión por deslizamiento.
- Poliuretano: mayor resistencia a la abrasión por deslizamiento, recomendado para materiales menores a 0.5 mm húmedos.
- Paneles de malla de alambre: ofrecen alta capacidad y disponibilidad rápida.
- Sistemas modulares: permiten flexibilidad en la configuración del harnero.

Además, la elección del grosor del panel es clave, siguiendo la relación:

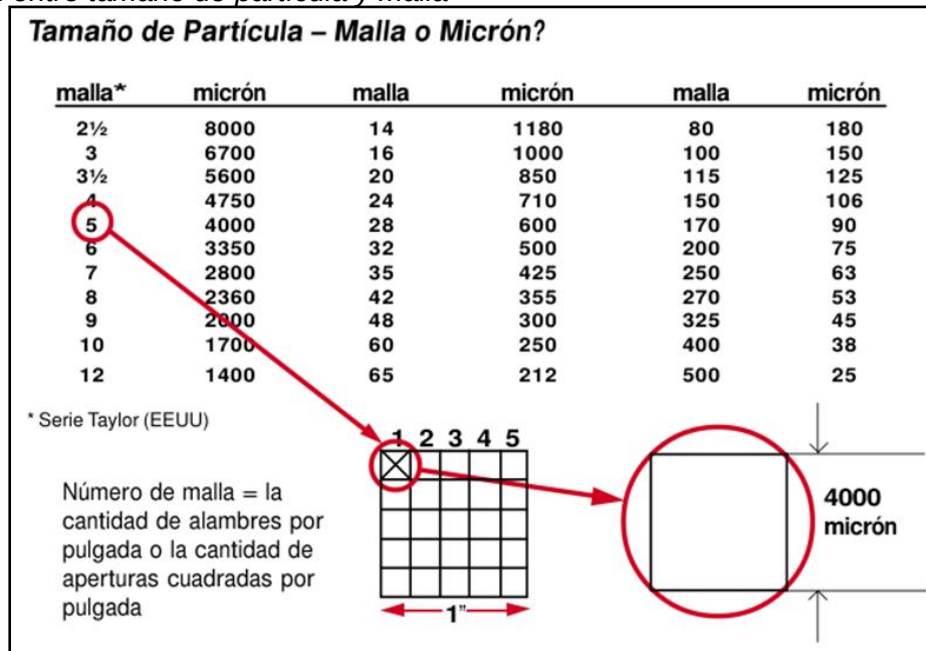
Tamaño de orificio y partícula

El tamaño del orificio del medio de clasificación está relacionado con el tamaño del producto final:

- Mallas de alambre: requieren un tamaño de producto entre el 5-10% más grande.
- Paneles de goma: 25-30% más grande.
- Paneles de poliuretano: 15-20% más grande.

Figura 19

Relación entre tamaño de partícula y malla



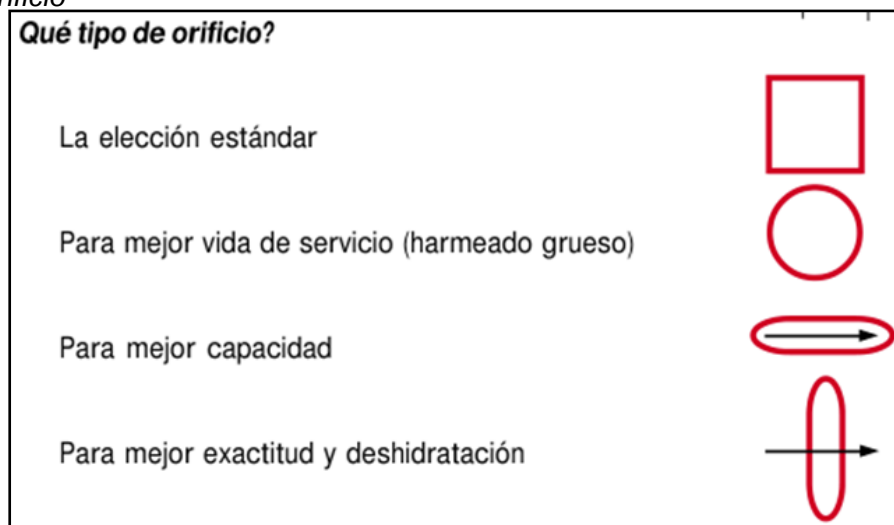
Fuente: Metso Minerals, (2004)

La elección del tipo de orificio también influye en la eficiencia de clasificación, como se muestra en la Figura 21:

- Cuadrado: opción estándar.
- Circular: mejora la vida útil en materiales gruesos.
- Oblonga horizontal: optimiza la capacidad de procesamiento.
- Oblonga vertical: mejora la exactitud y deshidratación.

Figura 20

Tipo de orificio



Fuente: Metso Minerals, (2004)

Conclusiones:

La clasificación eficiente en harneros depende de varios factores: el tipo de harnero, su inclinación, el medio de clasificación y el tamaño del orificio. Metso proporciona parámetros técnicos para optimizar estos procesos y mejorar la eficiencia en la separación de materiales.

2.1.4 Ensayo de abrasión de Los Ángeles

El ensayo de abrasión de Los Ángeles es una de las pruebas más utilizadas a nivel mundial para evaluar la resistencia de los materiales agregados a la abrasión y la tritución. Esta prueba se emplea ampliamente en la industria de los materiales agregados de construcción, ya que permite determinar la durabilidad de los materiales utilizados en pavimentos y estructuras de concreto (ASTM 131, 2006)

2.1.4.1 Fundamentos. El ensayo consiste en la rotación de una muestra de material agregado dentro de un cilindro de acero junto con esferas de acero estándar, que actúan como elementos abrasivos. A lo largo del ensayo, las partículas del material agregado sufren desgaste y fragmentación debido al impacto y la fricción producida por las esferas y la pared del tambor (AASHTO T96, 2019)

2.1.4.2 Procedimiento del ensayo. El procedimiento del ensayo sigue normativas establecidas por ASTM C131 (ASTM 131, 2006) y AASHTO T96 (AASHTO T96, 2019), y se resume en los siguientes pasos:

- Se selecciona una muestra representativa extraída del yacimiento no metálico y se seca a una temperatura de 110°C hasta peso constante.
- Se coloca la muestra dentro del tambor de ensayo, junto con un número determinado de esferas de acero.
- Se hace girar el tambor a una velocidad de 30-33 rpm durante 500 o 1000 revoluciones, dependiendo del tipo de agregado evaluado.
- Una vez finalizado el ensayo, se recupera la muestra y se tamiza a través de una malla N°12.

- La pérdida por abrasión se calcula como el porcentaje de material retenido en la malla después del ensayo (Neville, 1996)

2.1.4.3 Importancias y aplicaciones. El ensayo de abrasión de Los Ángeles permite predecir el desempeño de los agregados en condiciones de servicio, especialmente en pavimentos sujetos a tráfico pesado. Los valores obtenidos ayudan a los ingenieros a seleccionar los materiales adecuados para proyectos viales y estructurales, garantizando así la durabilidad y estabilidad de las construcciones (Darwin, Young, & Mindess, 2002)

2.1.4.4 Factores que afectan los resultados. Diversos factores influyen en los resultados del ensayo, entre ellos:

- Dureza del agregado: Rocas más duras presentan menor desgaste.
- Forma y textura de las partículas: Agregados angulares tienden a sufrir mayor pérdida.
- Tamaño de la muestra: Diferentes granulometrías afectan la fragmentación.
- Número de revoluciones: A mayor número de vueltas, mayor desgaste del material (Mamlouk & Zaniewski, 2011)

2.1.5 Proyectos viales

Los proyectos viales son infraestructuras esenciales para el desarrollo socioeconómico de un país, ya que facilitan la conectividad regional, reducen costos logísticos y promueven el comercio.

Según el Manual de Carreteras del MTC (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2013), estos proyectos requieren materiales de construcción específicos, como materiales agregados, que deben cumplir con normas técnicas para garantizar su durabilidad y resistencia. En el contexto peruano, la carretera interregional PE-3N representa un caso emblemático donde la demanda de materiales agregados es crítica para su ejecución (Ministerio de Energía y Minas., 2020).

2.1.5.1 Materiales agregados en proyectos viales. Los materiales agregados (como piedra chancada, arena gruesa y gravilla), son componentes fundamentales en la construcción de capas estructurales (subbase, base y afirmado) de carreteras.

Según (Haberer, 2009), su calidad está determinada por propiedades físicas y mecánicas, entre las que destacan el California Bearing Ratio (CBR) (American Society for Testing and Materials, 2016) y la granulometría, parámetros regulados por la Sección 402 del Manual de Carreteras EG-2013 (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2013).

Investigaciones nacionales, como las de (Carranza & Paredes, 2018), evidencian que la selección adecuada de yacimientos no metálicos (canteras) —por ejemplo, La Victoria en Chiclayo— no solo optimiza costos, sino que garantiza el cumplimiento de especificaciones técnicas, reduciendo reprocesos durante la ejecución de obras. Además, estudios internacionales (Darwin, Young, & Mindess, 2002) resaltan que estas prácticas mejoran significativamente la durabilidad y estabilidad de las estructuras viales.

2.1.5.2 Procesos de conminución en la producción de materiales agregados. La conminución (tritución y clasificación) es clave para transformar el material bruto en materiales agregados útiles. Según (Pástor, 2022), la eficiencia de este proceso depende de:

- Tecnología empleada: Uso de trituradoras de mandíbula, conos y zarandas vibratorias (Gaete, 2020).
- Parámetros geomecánicos: Litología y resistencia del macizo rocoso, que influyen en índices como el Cwi (Índice de Trabajo de Chancado) (Arredondo, 2021).
- Optimización: Herramientas como JKSimMet, Metso – Bruno, permiten simular circuitos y reducir costos energéticos (Haberer, 2009).

2.1.5.3 Logística y transporte de materiales. El transporte de materiales agregados incide significativamente en los costos del proyecto.

(Barboza E. , 2008) señala que estrategias como la optimización de rutas, uso de GPS y mantenimiento preventivo de flotas reducen impactos económicos y ambientales.

En la PE-3N, la falta de plantas de procesamiento locales obliga a transportar material a largas distancias, incrementando costos.

2.1.5.4 Normas para la minería no metálica. La explotación y transporte de minerales no metálicos en el Perú se rige por un conjunto de disposiciones legales y técnicas que buscan garantizar tanto la viabilidad operativa como la sostenibilidad ambiental de las actividades extractivas. En primer lugar, la Ley General de Minería (Decreto Legislativo N.º708), (Gobierno del Perú, 1991) establece los lineamientos generales para el aprovechamiento de recursos minerales, incluyendo los no metálicos. Esta normativa es complementada por el Decreto Supremo N.º 020-2020-EM, el cual regula los procedimientos de formalización minera y exige, para operaciones que superen ciertos umbrales de producción, la presentación obligatoria de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y un Plan de Cierre de Minas, conforme a lo dispuesto en el Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Exploración Minera (D.S. N.º 042-2017-EM).

En el caso específico de proyectos viales que demandan el uso de materiales agregados, el Manual de Carreteras - Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013, elaborado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, define los criterios técnicos que deben cumplir los materiales agregados y áridos empleados en la conformación de capas estructurales. Este manual también establece la obligación de aplicar medidas de manejo ambiental durante la fase constructiva, incluyendo el control de emisiones de polvo, gestión de residuos sólidos, estabilización de taludes y reforestación post explotación.

Adicionalmente, de acuerdo con la Ley N.º 28611 – Ley General del Ambiente, toda actividad con potencial impacto ambiental debe prevenir, minimizar, mitigar o compensar dichos efectos, siguiendo los principios de sostenibilidad, prevención y responsabilidad ambiental. Así, el marco legal exige que la actividad extractiva de materiales agregados incorpore prácticas como el uso de barreras de viento, sistemas de riego para control de

material particulado, y planes de revegetación, como parte de los compromisos socioambientales exigidos.

En resumen, la actividad de minería no metálica en el Perú, particularmente en el contexto de obras públicas viales, está sujeta a una normativa robusta que combina exigencias técnicas y obligaciones ambientales, orientadas a garantizar una gestión responsable y sostenible del recurso.

2.2 Marco conceptual

Curva granulometría.

La curva granulométrica es una representación gráfica que muestra la distribución de tamaños de partículas en una muestra de mineral granular, como los materiales agregados utilizados en construcción. Se obtiene a partir de un análisis granulométrico por tamizado, en el cual se determina el porcentaje en peso que pasa por una serie de tamices con aberturas normadas, organizadas de mayor a menor.

En el eje horizontal del gráfico se colocan los tamaños de partículas (en mm o en su equivalente de malla), mientras que en el eje vertical se representa el porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz. La forma de la curva permite clasificar el material como bien graduado, pobremente graduado o uniformemente graduado, y sirve para evaluar su idoneidad en diversas aplicaciones, como bases de carreteras, concreto, mortero o rellenos estructurales.

El análisis de la curva granulométrica es fundamental para asegurar el cumplimiento de especificaciones técnicas, ya que una distribución adecuada de tamaños influye directamente en la compactibilidad, resistencia mecánica, estabilidad y durabilidad del material en obras civiles. Además, este análisis es exigido por normativas como la Norma Técnica Peruana (NTP 400.012) y el Manual de Carreteras del MTC (EG-2013).

F80.

En el procesamiento de minerales no metálicos, el F_{80} es un parámetro estadístico que representa el tamaño de partícula (expresado generalmente en micrómetros o milímetros) por debajo del cual se encuentra el 80 % en peso del material de alimentación

a un proceso de conminución, como la trituración o molienda. Es decir, el 80 % de la masa de la muestra está compuesta por partículas de tamaño menor o igual al valor de F_{80} , y solo el 20 % restante es más grueso. Este indicador es fundamental para caracterizar la distribución granulométrica del material alimentado y establecer criterios de diseño y eficiencia del circuito de reducción de tamaño, especialmente en operaciones donde se busca optimizar el rendimiento energético y la calidad del producto final.

P80.

Es un parámetro utilizado en la industria minera y de procesamiento de minerales para describir el tamaño de partícula en el cual el 80% del material (en peso) pasa a través de una malla o tamiz específico. En otras palabras, el P80 indica que el 80% de las partículas de un material tienen un tamaño igual o menor al valor especificado. Este parámetro es ampliamente utilizado para caracterizar la eficiencia de los procesos de conminución (trituración y molienda) y para evaluar el desempeño de los equipos de reducción de tamaño, como molinos y chancadoras.

Software Bruno Metso.

Bruno es un software especializado desarrollado por la empresa Metso Outotec, diseñado para la simulación, modelado y optimización de procesos de conminución en plantas de trituración y clasificación de minerales. Su principal función es permitir a ingenieros y proyectistas prever el comportamiento operativo de circuitos de chancado, cribado y transporte de material, mediante representaciones virtuales que integran parámetros técnicos del equipo y propiedades del material a procesar.

Este software permite seleccionar configuraciones óptimas de equipos —como trituradoras de mandíbula, cono, impacto, zarandas vibratorias y alimentadores— en función de las condiciones de entrada del mineral (tamaño, dureza, humedad, granulometría) y las especificaciones del producto final. Bruno calcula variables clave como capacidad de producción (t/h), consumo energético, distribución granulométrica, eficiencia de cribado y generación de finos, proporcionando una base confiable para la toma de decisiones en proyectos mineros y de agregados.

Su aplicación resulta fundamental en estudios de prefactibilidad y diseño de plantas, ya que reduce los riesgos operativos y mejora la eficiencia desde la etapa de planificación, garantizando que el circuito propuesto cumpla con los objetivos técnicos y económicos del proyecto.

Ensayo de abrasión Los Ángeles.

Es un método estandarizado que se utiliza para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de los materiales agregados gruesos, los cuales son empleados en obras de infraestructura vial y construcción civil. Su propósito es evaluar la durabilidad y calidad mecánica del material agregado frente a las sollicitaciones mecánicas que ocurren durante su manipulación, transporte y uso en capas estructurales de carreteras, como subbase, base o carpeta asfáltica.

Este ensayo se realiza según lo establecido en normas como la ASTM C131/C131M o la correspondiente Norma Técnica Peruana (NTP 400.037), y consiste en introducir una muestra de material agregado seco junto con esferas de acero estandarizadas en una máquina de tambor giratorio (máquina Los Ángeles). La muestra es sometida a una rotación específica durante un número determinado de ciclos, simulando las condiciones de desgaste.

El resultado se expresa como el porcentaje de pérdida de masa del material agregado, conocida como el índice de abrasión Los Ángeles. Cuanto menor sea este porcentaje, mayor será la resistencia del material al desgaste, lo cual es fundamental para garantizar la durabilidad y desempeño estructural de las vías.

Carretera PE-3N.

La carretera PE-3N forma parte de la Red Vial Nacional del Perú y corresponde a un eje longitudinal norte-sur ubicado en la zona occidental de la sierra peruana. Es una ruta de categoría nacional que integra regiones andinas como Cajamarca, La Libertad, Áncash y Lima, conectando múltiples centros poblados y zonas productivas con importancia económica, agrícola y minera. Su denominación “PE-3N” responde a la codificación establecida por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), en la

cual “PE” indica que se trata de una carretera nacional, el número “3” identifica el corredor longitudinal de la sierra, y la letra “N” indica su ubicación en el tramo norte del país.

Esta vía es fundamental para el desarrollo regional y la integración del territorio, ya que facilita el transporte de personas, bienes y servicios entre áreas rurales y urbanas, promoviendo el acceso a mercados, centros de salud, educación y actividades económicas clave. Su mejoramiento y mantenimiento forman parte de los planes estratégicos de infraestructura vial del Estado peruano.

Normas Técnicas Peruanas (NTP).

Son documentos aprobados por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL) que establecen especificaciones técnicas, procedimientos, requisitos y criterios de calidad aplicables a productos, procesos, servicios y sistemas dentro del territorio peruano. Estas normas son de aplicación voluntaria, salvo cuando son exigidas por disposiciones legales, contratos o especificaciones técnicas en proyectos públicos o privados.

Las NTP se elaboran con base en estándares internacionales (como ISO, ASTM, AASHTO, entre otros) y adaptadas a las condiciones y necesidades del país. En el sector construcción, las NTP son utilizadas como referencia técnica para asegurar la idoneidad, uniformidad y calidad de los materiales —como los minerales no metálicos—, así como para establecer criterios de ensayo, control y evaluación.

Su correcta aplicación es esencial para garantizar el cumplimiento normativo, la seguridad de las obras y la eficiencia en la ejecución de proyectos, como en el caso de la producción de materiales agregados para infraestructura vial.

Manual de carreteras.

Son Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, que establece un conjunto de normas técnicas que guían el diseño, ejecución y control de las obras viales en Perú. Su objetivo es uniformizar los criterios y procedimientos de construcción, asegurando la calidad de los proyectos viales. Estas especificaciones abarcan aspectos clave como la selección de materiales, control de calidad, seguridad laboral, y

consideraciones medioambientales, lo que facilita la estandarización de procesos y previene conflictos contractuales.

El manual organiza las actividades en capítulos y secciones detalladas, abarcando desde trabajos preliminares, movimientos de tierras, hasta el diseño de pavimentos y drenaje. También incluye normas sobre el manejo adecuado de los materiales agregados, el control de su calidad y el almacenamiento seguro, lo que garantiza la integridad de los materiales durante su uso en las obras.

Este documento es fundamental para la correcta planificación y ejecución de proyectos viales, y su cumplimiento es obligatorio para todas las entidades involucradas en la infraestructura vial del país.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Enfoque de la investigación

La presente investigación se orienta bajo un enfoque cuantitativo, descriptivo y aplicado. Tiene como objetivo principal analizar la viabilidad técnica y operativa de una planta de conminución para el abastecimiento eficiente de materiales agregados en la carretera PE-3N (Huairé et al., 2022).

3.2 Tipo de investigación

- **Cuantitativo:**

Se basa en datos numéricos obtenidos de ensayos geotécnicos, mineralógicos y mecánicos de materiales extraídos. Se consideran variables como humedad, densidad, abrasividad y granulometría (Baptista, Fernández & Hernández, 2014).

- **Descriptivo:**

Se detallan propiedades físicas y mecánicas de los materiales agregados, evaluando su influencia en la calidad del pavimento y el rendimiento constructivo (Baptista, Fernández, & Hernández, 2014, pág. 92).

- **Aplicado:**

Se enfoca en la optimización del diseño de planta, con impacto directo en la eficiencia operativa del proyecto vial (Huairé, y otros, 2022, pág. 64).

3.3 Diseño de investigación

El diseño de la investigación es no experimental y transversal:

- **No experimental:**

Se estudian variables en su estado natural, sin manipulación directa, a través del análisis de datos empíricos (Baptista, Fernández, & Hernández, 2014, pág. 152).

- **Transversal:**

El estudio se ejecuta en un tiempo determinado, centrándose en el análisis puntual del Yacimiento No metálico Cuñacales Alto y su potencial de suministro (Baptista, Fernández, & Hernández, 2014, pág. 154).

3.4 Métodos de investigación

Para el desarrollo de la tesis, se aplicarán los siguientes métodos:

- **Análisis documental:**

Revisión de normas técnicas y literatura especializada (Baptista, Fernández, & Hernández, 2014, pág. 61).

- **Ensayos de laboratorio:**

Incluyen pruebas de granulometría, abrasión Los Ángeles, contenido de humedad y densidad aparente (Baptista, Fernández, & Hernández, 2014, pág. 150).

- **Trabajo de campo:**

Se realizaron visitas al yacimiento para la toma de muestras y evaluación de condiciones operativas (Baptista, Fernández, & Hernández, 2014, pág. 150).

3.5 Importancia del enfoque

El enfoque metodológico aplicado permite sustentar de forma científica la viabilidad de implementar una planta de conminución funcional y eficiente. Aporta fundamentos técnicos para garantizar que los materiales agregados cumplan las especificaciones normativas, mejorando calidad, seguridad y costos del proyecto.

3.5.1 Población y muestra

La población objeto de estudio está conformada por el total de muestras extraídas del yacimiento No metálico Cuñacales Alto. El proceso de muestreo se desarrolló conforme a lo estipulado en la norma ASTM D75/D75M (ASTM International, 2014) y (NTP 400.010, 2016), asegurando la representatividad del material mediante técnicas de cuarteo.

Esta delimitación precisa de la población permite focalizar la investigación en un conjunto de datos claramente definidos, lo que mejora la precisión del análisis y minimiza sesgos derivados de una población más amplia y heterogénea. La naturaleza finita y localizada de la población facilita tanto la gestión de los datos como la interpretación de los resultados (Huaire et al., 2022, p. 73).

3.5.2 Criterios de selección

Con el objetivo de asegurar la validez y confiabilidad de los resultados, se establecieron criterios estrictos de inclusión y exclusión. Solo se consideraron las muestras obtenidas de tres calicatas representativas del yacimiento no metálico Cuñacales Alto. Se excluyeron aquellas recolectadas fuera de estas calicatas, así como aquellas contaminadas por agentes externos durante el almacenamiento. Esta selección rigurosa garantiza que las muestras sean verdaderamente representativas del material de cantera, aportando solidez a los hallazgos del estudio (Huaire et al., 2022, p. 75).

3.5.3 Muestreo

El muestreo se realizó de acuerdo con la norma ASTM D75/D75M y (NTP 400.010, 2016), adoptando un enfoque no probabilístico por conveniencia. Esta elección metodológica se justifica por la accesibilidad al material y por la viabilidad práctica del estudio, tal como se describe detalladamente en la metodología de recolección (Huaire et al., 2022, p. 76).

3.5.3.1 Justificación del muestreo. Dado que la investigación se circunscribe al yacimiento no metálico Cuñacales Alto, los resultados obtenidos tienen una aplicabilidad limitada a este entorno específico. No obstante, para los fines del presente estudio —enfocado en el diseño de una planta de conminución— el muestreo por conveniencia resulta adecuado. Este permitió recolectar datos de manera sistemática y continua, optimizando el análisis del material.

- **Población definida:**

Las muestras fueron recolectadas exclusivamente del yacimiento no metálico Cuñacales Alto.

- **Acceso a los datos:**

Se accedió directamente a las tres calicatas que representan la litología del yacimiento.

- **Criterios de selección:**

La representatividad se priorizó sobre la aleatoriedad, en función de la disponibilidad y calidad del material. Las muestras se homogenizaron y redujeron a 60 kg para su análisis.

¿Por qué no es un muestreo probabilístico?

- **Selección de elementos:**

No todos los elementos de la población tuvieron la misma probabilidad de ser seleccionados; se priorizó la disponibilidad.

- **Ausencia de un marco muestral:**

No se definió un listado completo de los elementos de la población, lo cual impide aplicar técnicas de muestreo probabilístico.

Consideraciones adicionales

- **Limitaciones:**

Aunque el muestreo por conveniencia puede limitar la generalización de los resultados, fue pertinente para los objetivos de esta tesis.

- **Fortalezas:**

Este tipo de muestreo es eficaz en estudios exploratorios y de optimización de procesos, como el presente, donde se busca alinear el procesamiento del material con las Normas Técnicas Peruanas definidas en el Manual de Carreteras (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2013).

3.6 Técnicas e instrumentos de investigación

Para el estudio del yacimiento no metálico Cuñacales Alto, en el marco del proyecto de construcción y mejoramiento de la carretera interregional PE-3N, se emplearon técnicas sistemáticas de recolección y análisis de datos orientadas a evaluar la calidad geomecánica y granulométrica de los minerales no metálicos disponibles, con fines de procesamiento en una planta de conminución destinada a la producción de materiales agregados para obras viales.

Los ensayos aplicados se desarrollaron conforme a los lineamientos establecidos en el Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), lo que garantiza que las metodologías estén debidamente estandarizadas y alineadas con las Normas Técnicas Peruanas (NTP). En ese sentido, la presente investigación ha priorizado aquellos ensayos pertinentes al tipo de operación proyectada (chancado primario y clasificación), prescindiendo de evaluaciones aplicables exclusivamente a procesos de molienda, como el ensayo del Índice de Trabajo de Bond (Wi), utilizado en plantas con molino.

A continuación, se detallan los principales ensayos realizados, junto con las normas técnicas respectivas:

3.6.1 *Análisis granulométrico por tamizado*

Norma aplicada: NTP 400.012 (NTP 400.012, 2013)

Permite determinar la distribución del tamaño de las partículas del material extraído (gravas, arenas, limos y arcillas), mediante el uso de tamices de distintas aberturas.

Este ensayo es fundamental para la clasificación del material y su adecuación a los requerimientos técnicos del proyecto vial, ya que influye directamente en parámetros como la compacidad, la estabilidad mecánica y el comportamiento frente a esfuerzos de carga.

3.6.2 *Ensayo de abrasión Los Ángeles*

Norma aplicada: NTP 400.020 (NTP 400.020, 2002).

Evalúa la resistencia del agregado grueso al desgaste y la degradación mecánica por fricción y choque. Es clave para determinar la durabilidad del material frente a condiciones de tráfico y manipulación, especialmente en componentes estructurales como subbases y bases.

3.6.3 *Determinación del contenido de humedad natural*

Norma aplicada: NTP 339.127 (NTP 339.127, 1999).

Establece el porcentaje de agua presente en el material al momento de su muestreo. Este valor es relevante para estimar la humedad óptima de compactación y evitar procesos de disgregación o sobrecarga hídrica en el chancado y zarandeo.

3.6.4 Determinación de la densidad y absorción del agregado

Norma aplicada: NTP 400.022 (NTP 400.022:2013, 2013).

Permite conocer la densidad real, densidad aparente y porcentaje de absorción del material, lo cual es indispensable para calcular volúmenes de producción, seleccionar equipos de transporte y diseñar la capacidad operativa de la planta de conminución.

3.6.5 Trabajo de campo

La etapa de trabajo de campo se centró en la inspección técnica y evaluación directa del yacimiento no metálico Cuñacales Alto (figura 21), ubicada dentro del área de influencia del proyecto de construcción y mejoramiento de la carretera interregional PE-3N. Durante esta fase, se identificaron calicatas previamente ejecutadas, las cuales fueron aprovechadas como puntos de muestreo para la caracterización geotécnica del terreno.

A partir de estas calicatas, se procedió a la extracción de muestras representativas correspondientes a los distintos niveles estratigráficos del perfil del macizo rocoso y de los depósitos superficiales. La selección de las muestras se basó en criterios de estado de conservación, accesibilidad y representatividad, con el objetivo de garantizar la validez de los ensayos de laboratorio programados.

El análisis de las muestras se realizó conforme a la norma ASTM D75 (ASTM International, 2014), la cual establece los procedimientos para el muestreo representativo de materiales agregados.

Esta metodología permitió desarrollar el análisis granulométrico, cuyos resultados fueron fundamentales para evaluar la idoneidad técnica de los materiales en el diseño de la planta de conminución, así como para determinar su potencial aplicación como agregados en infraestructura vial.

Figura 21

Yacimiento Cuñacales Alto



Fuente: Elaboración propia

3.6.6 Software simulación

Como parte del estudio de prefactibilidad para el diseño de la planta de conminución, se empleó el software especializado Metso Bruno, una herramienta reconocida para la simulación preliminar de circuitos de chancado y clasificación. Este software permite recrear virtualmente el comportamiento de los equipos bajo distintas configuraciones operativas, proporcionando una estimación inicial del rendimiento del sistema.

La simulación se desarrolló con base en los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados bajo estándares normativos. Estos parámetros fueron fundamentales para definir características como la capacidad estimada, los tamaños de alimentación y producto, y el tipo de equipo requerido.

3.6.7 Técnicas documentales

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva de diez fuentes científicas y técnicas publicadas entre los años 2018 y 2024, en concordancia con los lineamientos

establecidos por la Universidad Nacional de Ingeniería para trabajos de investigación de pregrado. Estas fuentes, detalladas en el apartado de Antecedentes de Investigación, abordan aspectos clave del diseño, operación y evaluación técnico-económica de plantas de conminución aplicadas a yacimientos no metálicos.

Adicionalmente, se consideraron fuentes anteriores a dicho periodo cuya vigencia técnica y valor académico están plenamente reconocidos, tales como manuales de operación, normas técnicas peruanas (NTP), publicaciones de organismos especializados (como el MTC y el MINEM), y textos de referencia ampliamente citados en la ingeniería minera. Esta revisión documental permitió sustentar conceptualmente las decisiones de diseño, selección de equipos y criterios de simulación empleados en el estudio.

3.7 Caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica de la muestra obtenida en la cantera Cuñacales Alto, ubicada en el progresivo km 0+000 del proyecto PE-3N, se elaboró a partir del análisis estratigráfico in situ, su clasificación geotécnica y la correlación con el contexto geológico del distrito minero de Hualgayoc (Ericksen, Iberico, & Petersen, 1956).

El perfil del suelo muestra un estrato de material granular del yacimiento, conformado por grava con finos arcillosos, ligeramente plástico y de buena compacidad. Su clasificación corresponde a GC según el SUCS (grava con arcilla) y al grupo A-2-4 (0) de la clasificación AASHTO. No se evidenció presencia de nivel freático hasta los 2.8 m de profundidad.

Basado en el entorno geológico regional, se infiere la posible presencia de los siguientes minerales:

- Cuarzo (SiO_2): mineral principal de alta dureza, presente como componente clástico o en forma de venillas hidrotermales.
- Feldespatos alcalinos (ortoclasa): derivados de intrusiones ígneas granodioríticas; aportan resistencia estructural.
- Arcillas (sericita, caolinita): productos de alteración de feldespatos, responsables de la plasticidad del material.

- Carbonatos (calcita, dolomita): provenientes de calizas cretácicas regionales, que pueden estar incluidos como fragmentos secundarios.
- Minerales accesorios: óxidos de hierro (limonita) y sulfuros alterados (pirita), asociados a procesos de oxidación supergénica.

Estos minerales permiten clasificar al material como apto para infraestructura vial, destacando su cohesión, compacidad y bajo contenido orgánico superficial.

Figura 22

Caracterización mineralógica



Fuente: Adaptado de Gabinete mineralógico UNI.

3.8 Determinación de la distribución de tamaños de partícula.

El análisis granulométrico fue realizado conforme a los lineamientos establecidos en la Norma Técnica Peruana NTP 400.012 (NTP 400.012, 2013), que regula los procedimientos para determinar la distribución de tamaños de partícula en materiales sueltos mediante ensayos por vía seca o húmeda.

Para garantizar la representatividad del material ensayado, el proceso de muestreo se ejecutó siguiendo la metodología descrita en la norma ASTM D75/D75M (ASTM International, 2014), la cual establece los criterios técnicos para el muestreo de materiales agregados en campo.

Cabe señalar que, de acuerdo con lo establecido en el Plan de Tesis del proyecto de prefactibilidad, la Cantera Cuñacales Alto será la fuente principal de suministro de material granular, específicamente en las fracciones de ¾" (tres cuartos de pulgada) y ½" (media pulgada). Estas granulometrías han sido seleccionadas por cumplir con las exigencias técnicas requeridas en el diseño de pavimentos para infraestructura vial.

3.8.1 Cálculo de representatividad

Para determinar la masa mínima requerida de muestra (M) que garantice representatividad, utilizamos la fórmula de Gy (Pierre, 1979), aplicable a materiales granulados como los materiales agregados. A continuación, se detalla el cálculo paso a paso:

$$M = \frac{C*d^3}{\sigma^2} \quad (3)$$

Donde:

- M = Masa mínima de la muestra (en gramos o kg).
- C = Constante de homogeneidad (depende del material).
- d = Tamaño máximo de partícula (en cm).
- σ^2 = Varianza aceptable (error permitido, en fracción decimal).

Paso 1: Definición de parámetros

- Gravedad específica (G) = 2.21 (adimensional).
- Tamaño máximo de partícula (d) = 37.5 mm = 3.75 cm.
- Constante de homogeneidad (C): Para materiales agregados compactos y homogéneos, como los descritos en la geología del distrito minero de Hualgayoc (Ericksen, Iberico, & Petersen, 1956), se usa $C \approx 0.5 \text{ g/cm}^3$
- Varianza aceptable (σ^2) = 5% (0.05).

Paso 2: Sustitución de valores

$$M = \frac{0.5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * (3.75\text{cm})^3}{0.05^2}$$

Resultado: $M \approx 10.54 \text{ kg}$

Paso 3: Ajuste por gravedad específica

La fórmula base asume $G=2.65$ (cuarzo). Para $G=2.21$, se escala la masa:

$$M_{ajustada} = 10.5kg * \frac{2.21}{2.65} \approx 8.75kg$$

Paso 4: Factor de seguridad

En la práctica, se aplica un factor de seguridad de 5 a 10, para cubrir heterogeneidades no consideradas, en este caso se toma el valor de 7. Así:

$$M_{final} = 8.75kg * 7 \approx 60kg$$

Figura 23

Mineral no metálico



Fuente: Elaboración propia.

3.8.2 Secado

Los 60 kg de muestra se llevan a la estufa a 110 ± 5 °C hasta alcanzar un peso constante (NTP 400.012, 2013, pág. 8.1). Este ensayo se realiza debido a la presencia de material fino (<4.75 mm), el cual es altamente absorbente.

Figura 24

Secado de muestra



Fuente: Adaptado de Laboratorio Metalúrgico Figmm.

3.8.3 Selección de tamices

La muestra de 60 kg se pasará por los tamices estándar (ASTM International, 2022)

Para validar los P80 reportados:

2", 1½", 1", ¾", ½", ⅜", N°4, N°8, N°16 y N°200.

Figura 25

Tamices ASTM



Fuente: Adaptado de Laboratorio Metalúrgico Figmm.

3.8.4 Curvas granulométricas

Se realizaron ocho ensayos granulométricos mediante el método de tamizado en seco, conforme a la Norma Técnica Peruana NTP 400.012 (NTP 400.012, 2013) y la norma ASTM C136 (ASTM International, 2019), aplicables a la clasificación de materiales agregados gruesos. El procedimiento de muestreo siguió lo establecido en la norma ASTM D75/D75M (ASTM International, 2014), garantizando la representatividad de las muestras a través del cuarteo.

Cada ensayo fue ejecutado utilizando una batería de tamices estándar con aberturas de: 2", 1½", 1", ¾", ½", ⅜", N°4, N°8, N°16 y N°200. Las curvas obtenidas permitieron analizar la distribución de tamaños del material extraído de la Cantera Cuñacales Alto.

Del total de ensayos, la Curva N°6 fue descartada por presentar una tendencia atípica respecto al conjunto, evidenciada por una desviación estándar superior a la del resto. Esta anomalía puede explicarse por una posible segregación del material o error en el muestreo. Las siete curvas restantes fueron consideradas válidas y utilizadas para generar una curva granulométrica promedio, representativa del comportamiento típico del material.

El análisis de esta curva promedio permitió validar la aptitud del material frente a los criterios establecidos para el diseño de la planta de chancado, que contempla tres fracciones granulométricas principales:

- Producto fino: $P_{80} \approx 5.2 \text{ mm}$ (Tamiz N°4)
- Producto intermedio: $P_{80} \approx 12.08 \text{ mm}$ (½")
- Producto grueso: $P_{80} \approx 19.4 \text{ mm}$ (¾")

La curva granulométrica promedio se encuentra dentro de los límites establecidos por el huso granulométrico AG-56, lo que indica que el material cumple con los requisitos definidos en la norma técnica NTP 400.037 (NTP 400.037, 2002). Esta conformidad ratifica su compatibilidad con los criterios de diseño establecidos en los documentos técnicos de la planta, incluyendo el diagrama de flujo de proceso y el balance de masa.

Figura 26

Ro-Tap para análisis granulométrico



Fuente: Adaptado de Laboratorio Metalúrgico Figmm

Tabla 7

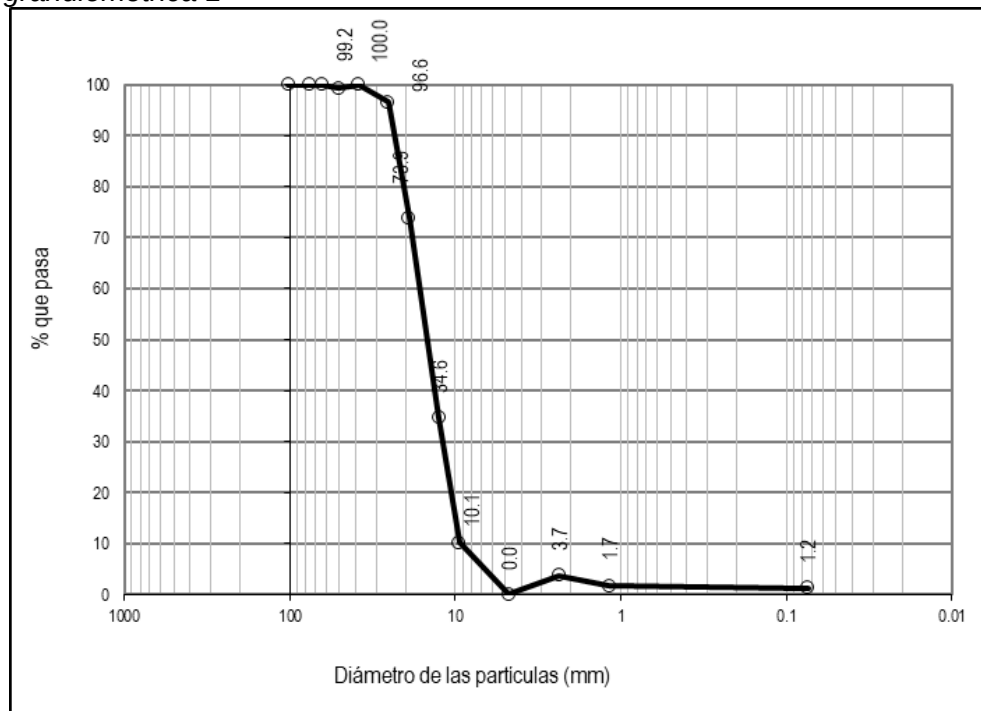
Tabla granulométrica 1

TAMICES (MM)		PASA MUESTRA TOTAL (%)
4"	101.6	100.00
3"	76.2	100.00
2.5"	63.5	100.00
2"	50.8	99.25
1.5"	38.1	100.00
1"	25.4	96.59
¾"	19.1	73.89
½"	12.5	34.64
3/8"	9.5	10.14
N°4	4.75	0.00
N°8	2.36	3.70
N°16	1.18	1.71
N°200	0.074	1.25

Fuente: Elaboración propia.

Figura 27

Curva granulométrica 1



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8

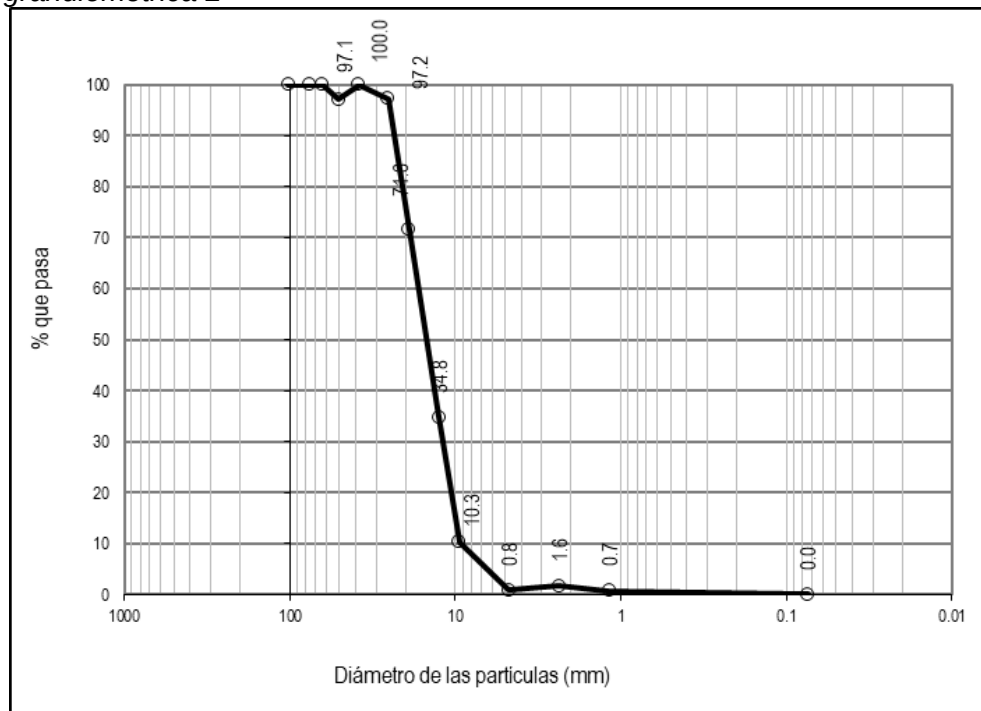
Tabla granulométrica 2

TAMICES (mm)		PASA MUESTRA TOTAL (%)
4"	101.6	100.00
3"	76.2	100.00
2.5"	63.5	100.00
2"	50.8	97.12
1.5"	38.1	100.00
1"	25.4	97.19
¾"	19.1	71.57
½"	12.5	34.79
3/8"	9.5	10.30
N°4	4.75	0.83
N°8	2.36	1.65
N°16	1.18	0.69
N°200	0.074	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Figura 28

Curva granulométrica 2



Fuente: Elaboración propia

Tabla 9

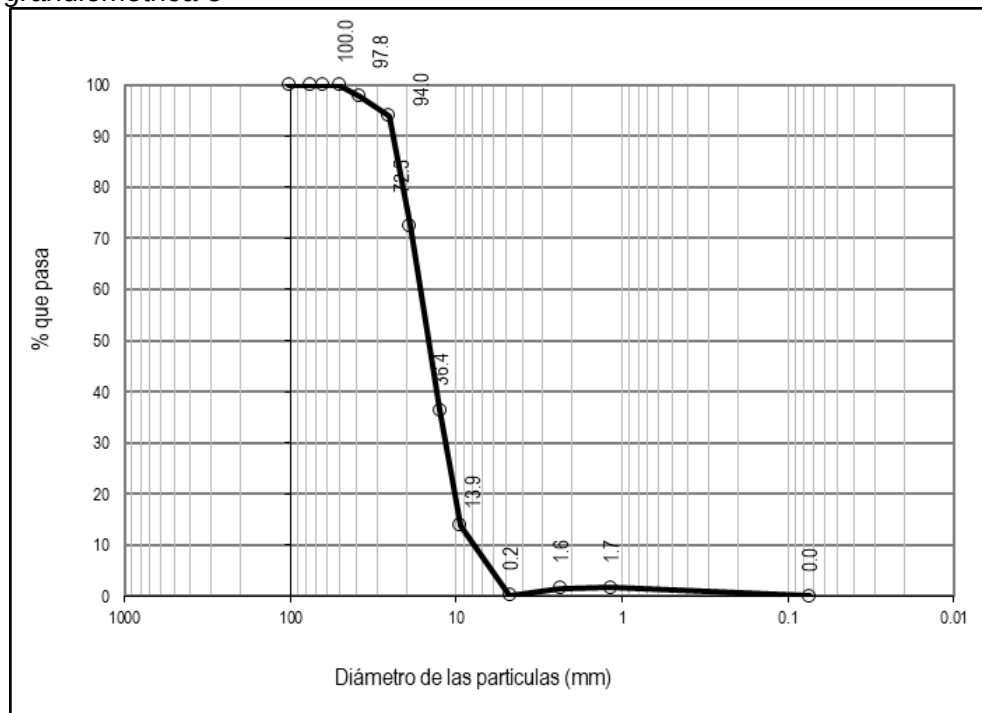
Tabla granulométrica 3

TAMICES (mm)		PASA MUESTRA TOTAL (%)
4"	101.6	100.00
3"	76.2	100.00
2.5"	63.5	100.00
2"	50.8	100.00
1.5"	38.1	97.84
1"	25.4	93.95
¾"	19.1	72.50
½"	12.5	36.44
3/8"	9.5	13.91
N°4	4.75	0.20
N°8	2.36	1.59
N°16	1.18	1.65
N°200	0.074	0.00

Fuente: Elaboración propia

Figura 29

Curva granulométrica 3



Fuente: Elaboración propia

Tabla 10

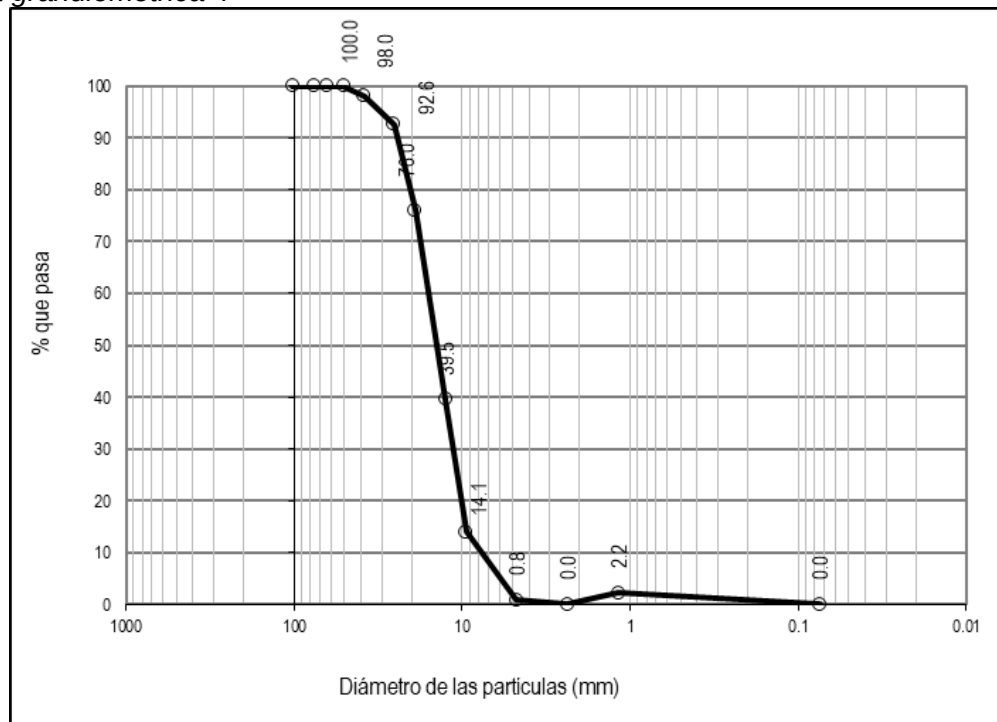
Tabla granulométrica 4

TAMICES (mm)	PASA MUESTRA TOTAL (%)
4"	101.6
3"	76.2
2.5"	63.5
2"	50.8
1.5"	38.1
1"	25.4
¾"	19.1
½"	12.5
3/8"	9.5
N°4	4.75
N°8	2.36
N°16	1.18
N°200	0.074

Fuente: Elaboración propia

Figura 30

Curva granulométrica 4



Fuente: Elaboración propia

Tabla 11

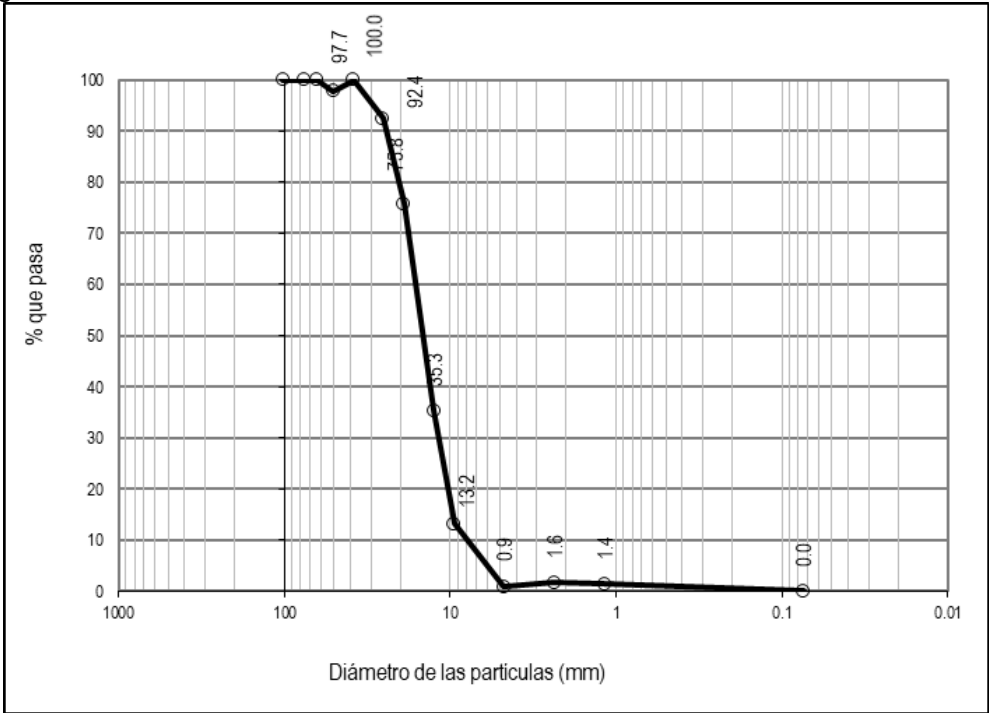
Tabla granulométrica 5

TAMICES (mm)		PASA MUESTRA TOTAL (%)
4"	101.6	100.00
3"	76.2	100.00
2.5"	63.5	100.00
2"	50.8	97.73
1.5"	38.1	99.97
1"	25.4	92.41
3/4"	19.1	75.76
1/2"	12.5	35.25
3/8"	9.5	13.18
N°4	4.75	0.87
N°8	2.36	1.62
N°16	1.18	1.38
N°200	0.074	0.00

Fuente: Elaboración propia

Figura 31

Curva granulométrica 5



Fuente: Elaboración propia

Tabla 12

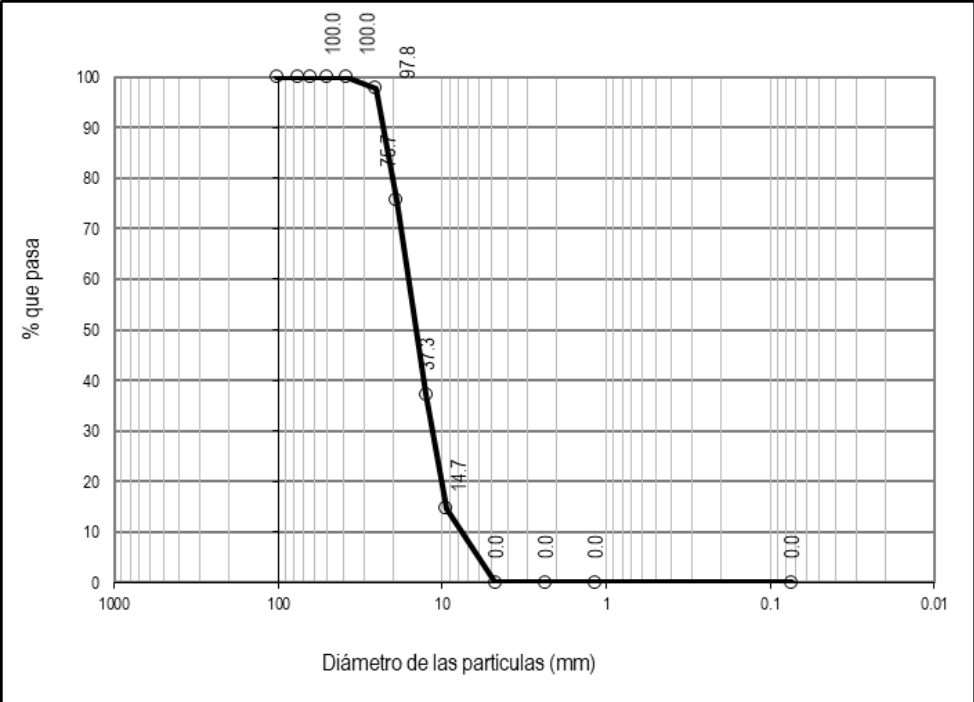
Tabla granulométrica 6

TAMICES (mm)		PASA MUESTRA TOTAL (%)
4"	101.6	100.00
3"	76.2	100.00
2.5"	63.5	100.00
2"	50.8	100.00
1.5"	38.1	100.00
1"	25.4	97.84
3/4"	19.1	75.67
1/2"	12.5	37.29
3/8"	9.5	14.73
N°4	4.75	0.00
N°8	2.36	0.00
N°16	1.18	0.00
N°200	0.074	0.00

Fuente: Elaboración propia

Figura 32

Curva granulométrica 6



Fuente: Elaboración propia

Tabla 13

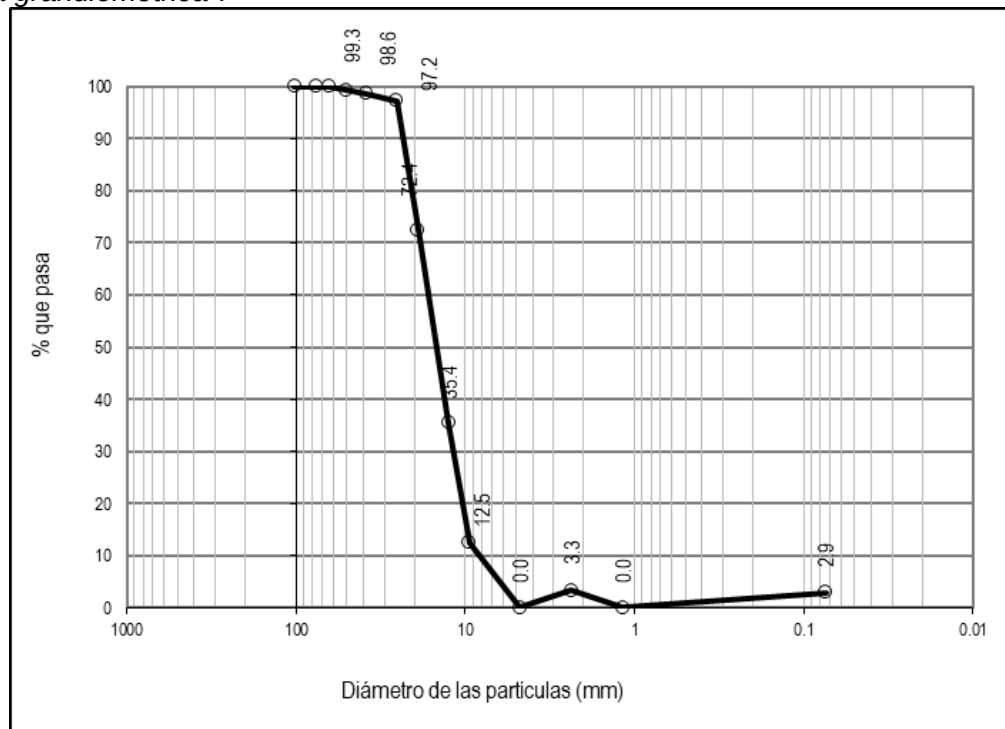
Tabla granulométrica 7

TAMICES (mm)		PASA MUESTRA TOTAL (%)
4"	101.6	100.00
3"	76.2	100.00
2.5"	63.5	100.00
2"	50.8	99.33
1.5"	38.1	98.63
1"	25.4	97.17
3/4"	19.1	72.44
1/2"	12.5	35.39
3/8"	9.5	12.46
N°4	4.75	0.00
N°8	2.36	3.31
N°16	1.18	0.00
N°200	0.074	2.92

Fuente: Elaboración propia

Figura 33

Curva granulométrica 7



Fuente: Elaboración propia

Tabla 14

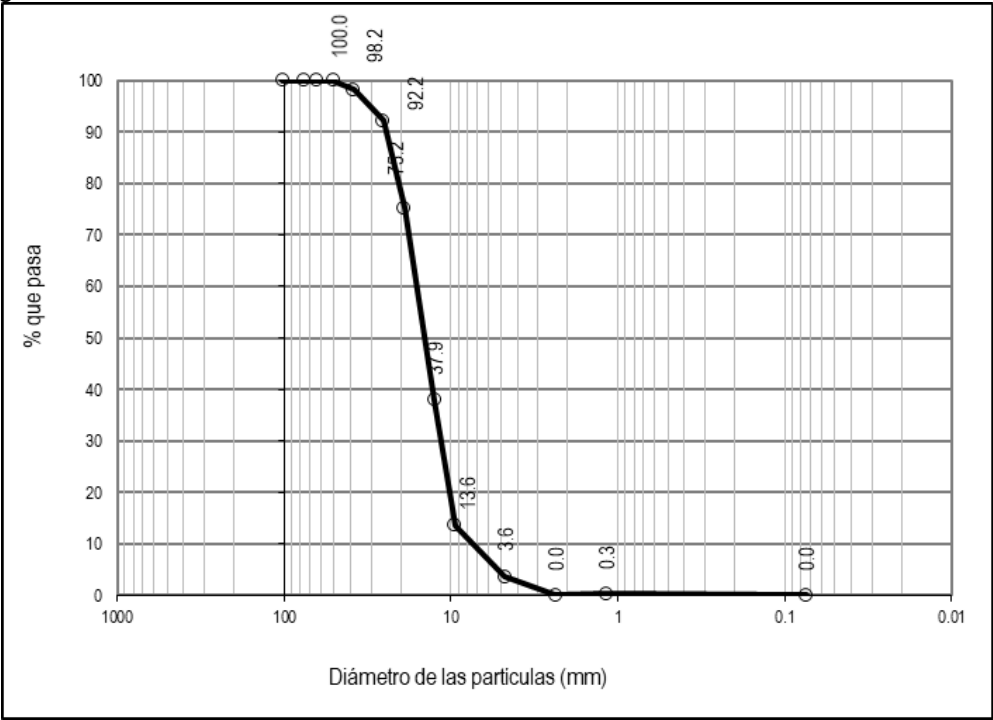
Tabla granulométrica 8

TAMICES (mm)		PASA MUESTRA TOTAL (%)
4"	101.6	100.00
3"	76.2	100.00
2.5"	63.5	100.00
2"	50.8	100.00
1.5"	38.1	98.19
1"	25.4	92.23
¾"	19.1	75.19
½"	12.5	37.94
3/8"	9.5	13.57
Nº4	4.75	3.63
Nº8	2.36	0.00
Nº16	1.18	0.25
Nº200	0.074	0.00

Fuente: Elaboración propia

Figura 34

Curva granulométrica 8



Fuente: Elaboración propia

Tabla 15

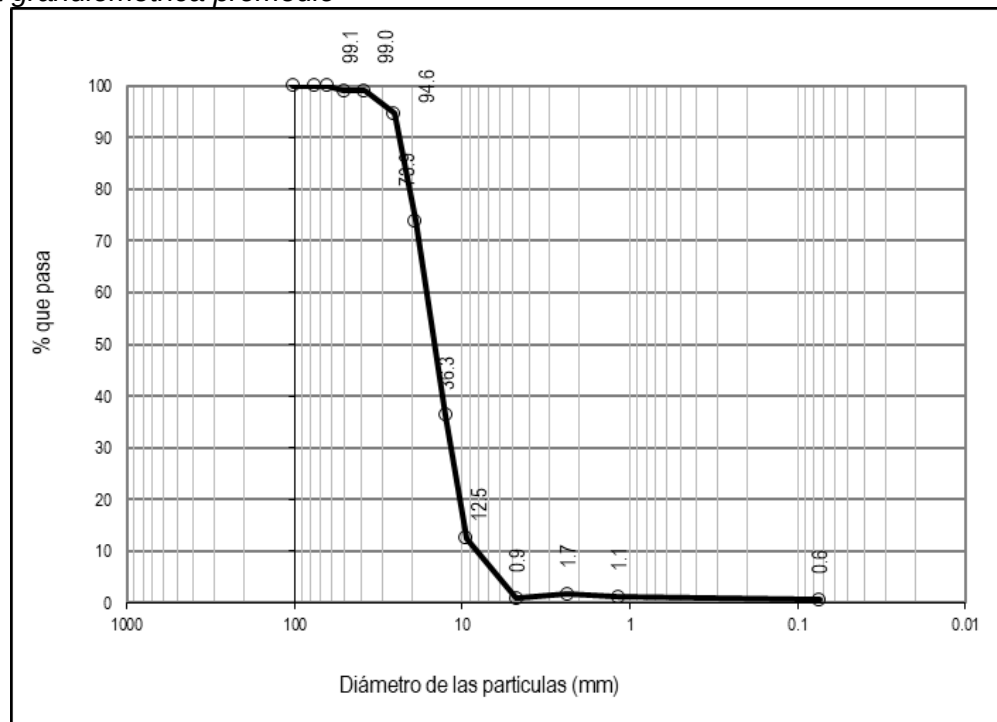
Tabla granulométrico promedio

TAMICES (mm)		PASA MUESTRA TOTAL (%)
4"	101.6	100.00
3"	76.2	100.00
2.5"	63.5	100.00
2"	50.8	99.06
1.5"	38.1	98.95
1"	25.4	94.59
¾"	19.1	73.91
½"	12.5	36.28
3/8"	9.5	12.51
N°4	4.75	0.91
N°8	2.36	1.69
N°16	1.18	1.13
N°200	0.074	0.60

Fuente: Elaboración propia

Figura 35

Curva granulométrica promedio



Fuente: Elaboración propia

Tabla 16

Desviación estándar

TAMICES	Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4	Curva 5	Curva 6	Curva 7	Curva 8	CURVA PROMEDIO
2"	99.25	97.12	100.00	100.00	97.73	100.00	99.33	100.00	99.06
1.5"	100.00	100.00	97.84	98.02	99.97	100.00	98.63	98.19	98.95
1"	96.59	97.19	93.95	92.59	92.41	97.84	97.17	92.23	94.59
¾"	73.89	71.57	72.50	75.99	75.76	75.67	72.44	75.19	73.91
½"	34.64	34.79	36.44	39.49	35.25	37.29	35.39	37.94	36.28
3/8"	10.14	10.30	13.91	14.05	13.18	14.73	12.46	13.57	12.51
Nº4	0.00	0.83	0.20	0.83	0.87	0.00	0.00	3.63	0.91
Nº8	3.70	1.65	1.59	0.00	1.62	0.00	3.31	0.00	1.69
Nº16	1.71	0.69	1.65	2.21	1.38	0.00	0.00	0.25	1.13
Nº200	1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.92	0.00	0.60
Desviación estándar	44.998	44.933	44.351	44.486	44.421	45.702	44.637	44.365	44.576

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17*Curva y huso granulométrico*

CURVA GRANULOMÉTRICO PROMEDIO				
TAMICES		% QUE PASA	HUSO GRANULOMÉTRICO	
PULG	MM		AG-56	
2"	50.8	99.06	100	100
1.5"	38.1	98.95	90	100
1"	25.4	94.59	90	100
¾"	19.1	73.91	40	85
½"	12.5	36.28	10	40
3/8"	9.5	12.51	0	15
Nº4	4.75	0.91	0	5
Nº8	2.36	1.69		
Nº16	1.18	1.13		
Nº200	0.074	0.60		

Fuente: Elaboración propia

3.8.5 Ensayo de abrasión Los Ángeles

Es una prueba estandarizada utilizada para evaluar la resistencia al desgaste de los materiales agregados gruesos debido a la fricción y los impactos mecánicos. Este ensayo se lleva a cabo conforme a las normas MTC E 207 (MTC 207, 2016) , ASTM C 131 (ASTM 131, 2006) y AASHTO T 96 (AASHTO T96, 2019).

La norma técnica peruana MTC E 207 – Agregado Grueso: Ensayo de Desgaste con la Máquina Los Ángeles establece los siguientes límites máximos permitidos de desgaste, según el tipo de uso del agregado:

Tabla 18*Límite máximo permitido de abrasión*

TIPO DE USO DEL AGREGADO	LÍMITE MÁXIMO PERMITIDO DE ABRASIÓN (%)
Concreto asfáltico (mezclas bituminosas)	≤ 30%
Concreto hidráulico (estructural)	≤ 40%
Base y subbase granular (infraestructura vial)	≤ 50%
Rellenos o capas inferiores sin función estructural	Valores mayores, evaluados caso por caso

Fuente: Adaptado de (MTC 207, 2016)

En la tabla 18, el valor de 29.04 g/t de abrasión indica que el material:

- Se encuentra por debajo del límite del 30%, por lo tanto, es adecuado para su uso en concreto asfáltico y concreto estructural.
- Cumple satisfactoriamente con los requisitos técnicos para su aplicación en capas de rodadura, base y subbase.
- Demuestra una buena resistencia al desgaste por fricción e impacto, lo cual es fundamental para garantizar la durabilidad de pavimentos y la estabilidad de estructuras en obras viales.

Tabla 19

Ensayo Los Ángeles

Los Angeles

MUESTRA	PASA TAMIZ (Nº)	RETIENE TAMIZ (Nº)	UNIDAD	PESO
Gradación	1 1/2"	1"	g	1304
"A"	1"	3/4"	g	1301
Nº Esferas	3/4"	1/2"	g	1300
12	1/2"	3/8"	g	1302
Nº de Revoluciones	Peso inicial de la muestra		g	5207
500	Material retenido Tamiz N°12		g	3698
Porcentaje de Desgaste			%	29.04

Fuente: Adaptado de (ASTM 131, 2006)

3.8.6 Determinación de humedad del agregado grueso

El presente ensayo se realizó con el objetivo de determinar el contenido de humedad natural del material agregado grueso proveniente del yacimiento no metálico "Cuñacales Alto", siguiendo los procedimientos establecidos en las normas MTC E 108 (MTC E 108, 2016) y ASTM D2216 (ASTM D2216-16, 2019), que regulan el método por secado en horno.

Se realizaron tres ensayos replicados utilizando una balanza de precisión y horno de secado. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 20*Ensayo de humedad*

Ensayo N°	Peso Tara + Suelo Húmedo (g)	Peso Tara + Suelo Seco (g)	Peso del Agua (g)	Peso del Suelo Seco (g)	Contenido de Humedad (%)
1	3100	2862	238	2562	8.1
2	3095	2860.5	234.5	2560.5	8.1
3	3105	2865.2	239.8	2565.2	8.1

Fuente: Adaptado de (MTC E 108, 2016)

El contenido de humedad promedio de los tres ensayos fue de 8.1%, valor que se considera representativo de un material agregado en estado de humedad natural tras almacenamiento en condiciones ambientales normales.

Interpretación normativa:

La norma MTC E 108 (MTC E 108, 2016) no impone un límite fijo para la humedad natural, pero establece la metodología para su determinación precisa. En aplicaciones prácticas, un contenido de humedad de aproximadamente 8% es aceptable y común, especialmente en agregados almacenados a la intemperie o en climas húmedos.

Este nivel de humedad:

- Es adecuado para el diseño de mezclas asfálticas o de concreto siempre que se considere en el cálculo del contenido de agua efectiva.
- No compromete la estabilidad del material, aunque puede requerirse ajuste en obra para alcanzar el contenido óptimo de compactación.

3.8.7 *Peso específico y absorción del agregado grueso*

El presente ensayo fue realizado conforme a la norma ASTM C 127 (ASTM C127-15, 2015), con el objetivo de determinar el peso específico y la absorción de agua del material agregado grueso proveniente de la cantera Cuñacales Alto. Esta información es fundamental para el diseño de mezclas de concreto y para evaluar la calidad del material en función de su densidad y porosidad.

El procedimiento se basó en las siguientes etapas:

- Secado de la muestra hasta masa constante.
- Saturación de la muestra y medición en estado superficialmente seco.
- Pesaje sumergido en agua.

Tabla 21*Ensayo de peso específico y absorción*

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Peso de la muestra seca	Gr	2,900
Peso de la muestra saturada superficialmente seca	Gr	2,925
Peso sumergido de la muestra saturada	Gr	1,600
Peso específico de masa	gr/cm ³	2.21
Peso específico saturado con superficie seca	gr/cm ³	2.23
Peso específico aparente	gr/cm ³	2.25
Absorción de agua (	%	1.03

Fuente: Adaptado de (ASTM C127-15, 2015)

El valor de peso específico de masa de 2.21 gr/cm³ equivale directamente a una gravedad específica de 2.21, al estar expresado con relación a la densidad del agua (1.0 gr/cm³).

Este resultado indica que el material agregado presenta una densidad moderada, adecuada para mezclas de concreto que requieren control de peso volumétrico y resistencia mecánica balanceada.

La absorción del 1.03% está dentro de los valores admisibles según normativas técnicas, lo que sugiere que el material agregado tiene una porosidad adecuada y no excesiva.

La absorción de agua se evalúa según:

- ASTM C 127 (ASTM C127-15, 2015) (para agregado grueso)

Aunque no existe un “límite absoluto obligatorio”, las siguientes guías técnicas y criterios de aceptación se utilizan ampliamente:

Tabla 22*Rango de absorción para material agregado*

Tipo de material agregado	Valor típico aceptable de absorción de agua (%)
Grueso	≤ 2.0% (valor de referencia para calidad alta)
Fino (arena)	≤ 3.0%
Porosos	Hasta 4.0% (evaluar cuidadosamente)

Fuente: Adaptado de (ASTM C127-15, 2015)

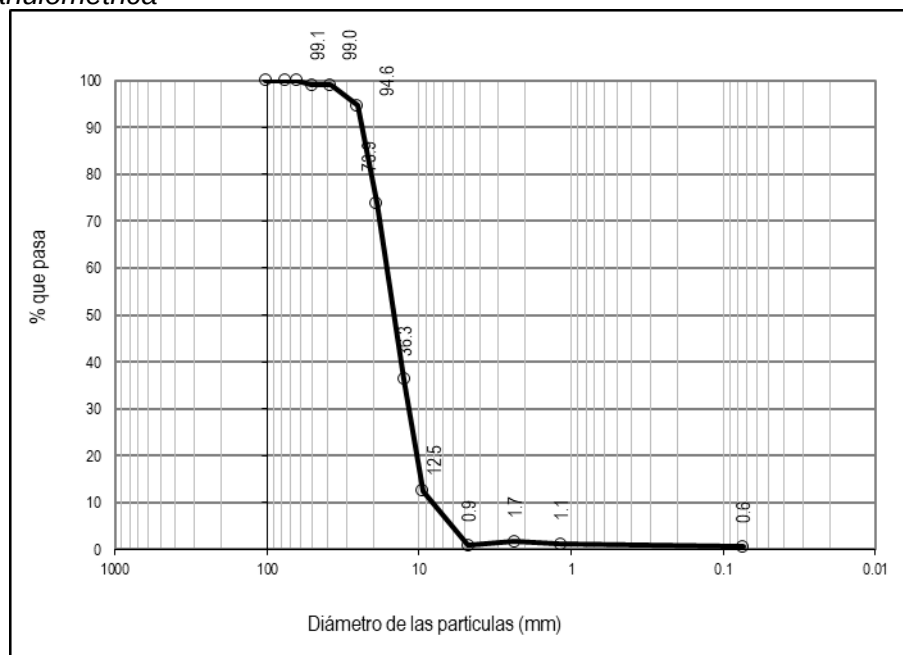
3.9 Simulación de planta de conminución con Bruno - Metso

3.9.1 Criterio de diseño

En la figura 36 y tabla 23 se presentan el análisis granulométrico y los parámetros generales característicos del material de alimentación (cabeza), empleados en el diseño del circuito integrado de chancado y clasificación.

Figura 36

Curva granulométrica



Fuente: Elaboración propia

Tabla 23

Criterios generales

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR	
		NOMINAL	DISEÑO
Capacidad horaria de procesamiento	t/h	84	92.4
Gravedad específica	-	2.21	
Humedad	%	8.1	
Tamaño máximo de partícula (F100)	mm	38.1	
Tamaño de partícula del 80% pasante	mm	17.99	
Abrasividad del material	g/t	28.9	
Porcentaje de gravas contenido	%	67.9	
Work Index	kWh/t	16.16	

Fuente: Adaptado de software Bruno - Metso

Tabla 24

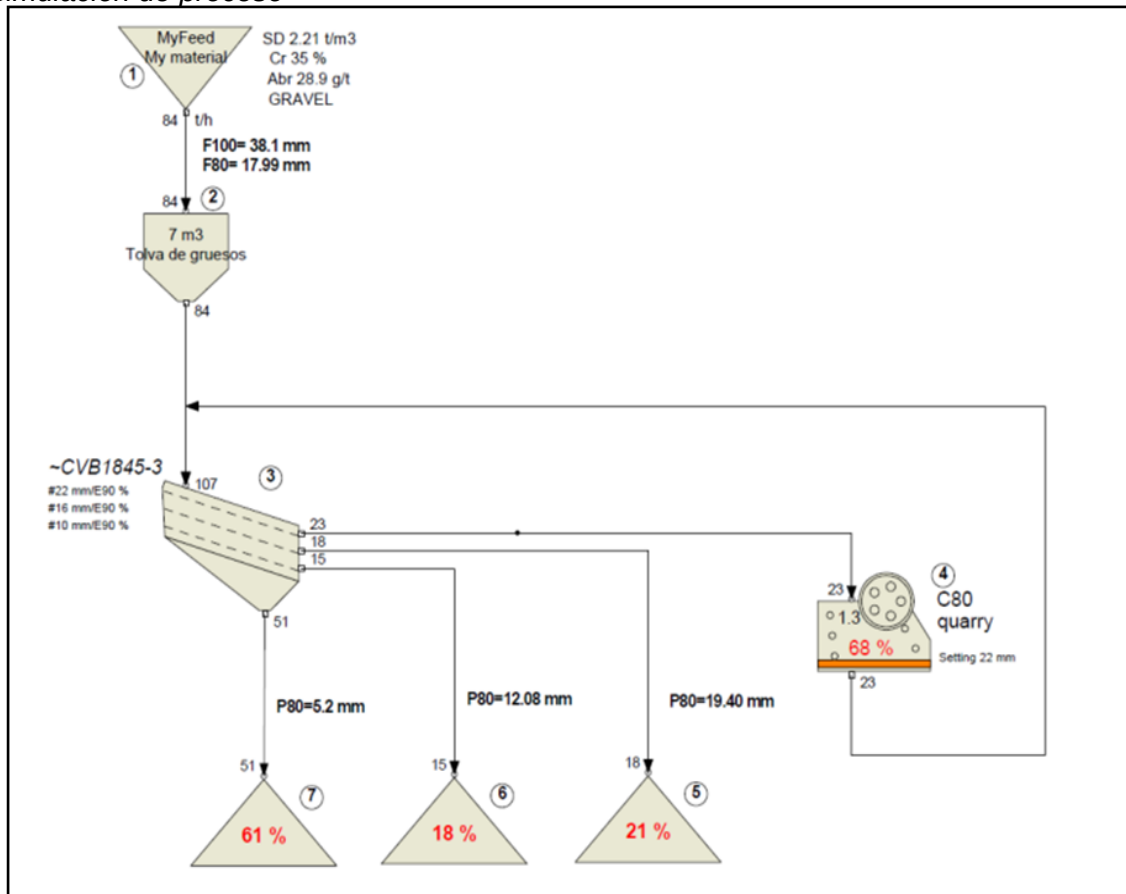
Criterios de clasificación y chancado

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR	
		NOMINAL	DISEÑO
Chancado primario			
Tolva de gruesos			
Tiempo de residencia	minutos	10	
Capacidad volumétrica útil	m3	7	
Zaranda primaria			
Alimento F100	mm	38.1	
Alimento F80	mm	17.99	
Capacidad volumétrica útil	t/h	84	
Número de zarandas	-	1	
Tipo de zaranda	-	Zaranda inclinada	
Tamaño de zaranda (Largo X Ancho)	m x m	4.5 x 1.8	
Modelo de Zaranda	-	CVB1845-3	
Sistema de circuito	-	Cerrado e inverso	
Abertura del primer piso	mm	10	
Abertura del segundo piso	mm	16	
Abertura del tercer piso	mm	22	
Área requerida	m2	7.4	
Área disponible	m2	8.1	
Producto undersize del primer piso, P80	mm	5.2	
Tonelaje de producto fino (P80=5.20 mm)	t/h	51	
Producto oversize del primer piso, P80	mm	12.08	
Tonelaje de producto intermedio (P80= 12.08 mm)	t/h	15	
Producto oversize del segundo piso, P80	mm	19.4	
Tonelaje de producto grueso (P80= 19.40 mm)	t/h	18	
Producto oversize del tercer piso, P80	mm	29.03	
Chancadora primaria			
Número de unidad nueva	-	1	
Tonelaje de alimentación	t/h	23	
Tipo de Chancadora	-	Quijadas Metso C80	
Alimento, F80/Producto, P80	mm	29.03/21.55	
Radio de reducción	-	1.3	
Close Size Setting de chancadora	mm	22	
Potencia	HP	75	
Carga volumétrica	%	68	

Fuente: Adaptado de software Bruno – Metso

Figura 37

Simulación de proceso



Fuente: Adaptado software Bruno-Metso

3.9.2 Descripción del proceso de conminución

La planta de chancado y clasificación está diseñada para procesar materiales agregados provenientes del yacimiento no metálico mediante un circuito cerrado inverso, con una capacidad nominal de 84 toneladas por hora (t/h).

Su objetivo es obtener dos productos finales con granulometrías controladas de ½" (12.7 mm) y ¾" (19.05 mm), además de un material fino residual.

3.9.2.1 Etapa de clasificación y chancado. El sistema integra los siguientes equipos principales:

- Tolva de gruesos con capacidad útil de 7 m³.
- Alimentador vibratorio para regulación del flujo de material.
- Zaranda vibratoria de tres pisos con mallas de apertura 10 mm, 16 mm y 22 mm.
- Chancadora de quijada C80 (Metso) con ajuste de cierre (CSS) en 22 mm.

- Fajas transportadoras interconectadas (N°1 a N°6) para recirculación y distribución de productos.

3.9.2.2 Secuencia operacional.

Carga inicial y alimentación:

El mineral extraído del yacimiento no metálico (cantera) es depositado en la tolva de gruesos mediante un cargador frontal. El alimentador vibratorio regula la descarga hacia la faja transportadora N°1, garantizando un flujo constante de 84 t/h hacia la zaranda vibratoria.

Clasificación primaria en zaranda vibratoria:

La zaranda de tres pisos separa el material en cuatro fracciones:

- Fracción +22 mm (oversize tercer piso): Dirigida a la chancadora de quijada C80 para reducción de tamaño hasta un CSS de 22 mm. El producto triturado es recirculado mediante las fajas N°4 y N°5 hacia la faja N°1, reintegrándose al circuito para su reclasificación.
- Fracción +16 mm (oversize segundo piso): Transportada por la faja N°3 como producto final con un P80 de 19.4 mm ($\frac{3}{4}$ ").
- Fracción +10 mm (oversize primer piso): Derivada por la faja N°6 como producto final con un P80 de 12.08 mm ($\frac{1}{2}$ ").
- Fracción -10 mm (undersize): Evacuada mediante la faja N°2 como material fino, con un P80 de 5.2 mm.

Recirculación y control de calidad:

El diseño de circuito cerrado asegura que el material sobredimensionado (+22 mm) sea reprocesado hasta alcanzar las especificaciones requeridas, optimizando la eficiencia del proceso y minimizando mermas. Los productos finales se almacenan en áreas designadas para su posterior comercialización, mientras que el material fino se destina a usos auxiliares o subproductos.

El fin principal del material fino es servir como subproducto útil, el cual puede ser destinado a usos auxiliares en construcción, rellenos u otras aplicaciones industriales,

dependiendo de su granulometría y pureza. Este manejo eficiente del material fino permite disminuir la carga circulante, mejorar el rendimiento energético del sistema y mantener la calidad del producto principal.

3.9.2.3 Consideraciones técnicas.

- Capacidad de Equipos: La tolva de 7 m³ garantiza un buffer ante fluctuaciones en la alimentación.
- Parámetros de Calibración: Las mallas de la zaranda y el CSS de la chancadora están ajustados para cumplir con los estándares granulométricos establecidos.
- Eficiencia Energética: La recirculación selectiva reduce el consumo energético al limitar la reprocesamiento únicamente al material crítico.
- Este sistema integrado garantiza una producción continua, uniforme y sostenible, alineada con los requerimientos técnicos de la industria de la construcción.

3.9.3 Balance de masas

El balance de masa constituye una herramienta fundamental para validar el diseño de la planta de conminución propuesta, permitiendo cuantificar los flujos de material a lo largo del proceso y evaluar la eficiencia del circuito de trituración y clasificación. En el Anexo 2 se presenta el esquema de balance de masa, representando los distintos nodos de operación, así como las variables críticas asociadas a cada flujo.

3.9.3.1 Descripción general del flujo de materiales. El mineral fresco proveniente del yacimiento no metálico, con una tasa de alimentación de 91.40 t/h (toneladas por hora de material húmedo), ingresa inicialmente a la tolva de gruesos, desde donde es transferido hacia una zaranda vibratoria de tres pisos. Esta unidad de clasificación permite la separación del material en tres fracciones granulométricas:

- Pila de finos ($P_{80} = 5.2$ mm): flujo resultante de 55.50 t/h, con un volumen total de 27.57 m³/h de material húmedo.
- Pila de intermedios ($P_{80} = 12.08$ mm): flujo de 16.32 t/h, correspondiente a 8.11 m³/h.
- Pila de gruesos ($P_{80} = 19.40$ mm): con 19.59 t/h y un volumen de 9.73 m³/h.

El material de mayor tamaño que no cumple con las especificaciones granulométricas es redirigido hacia la chancadora de quijada primaria, con una alimentación total de 25.03 t/h. Esta unidad reduce nuevamente el tamaño del material, que es reintroducido en el circuito para su recirculación, cerrando así el ciclo de trituración en un sistema de circuito cerrado.

3.9.3.2 Variables técnicas del balance. Cada flujo dentro del circuito se caracteriza por los siguientes parámetros técnicos:

- Tasa de tonelaje seco y húmedo (t/h)
- Gravedad específica (2.01 – 2.21 t/m³), según la fracción
- Porcentaje de sólidos (91.90%), que refleja un bajo contenido de humedad, ideal para un proceso de conminución eficiente
- Volúmenes equivalentes (m³/h) de material seco, agua, y mezcla total

Estos valores permiten calcular con precisión la carga volumétrica de cada equipo y optimizar su configuración operativa. Además, la consistencia de la gravedad específica y la distribución uniforme del porcentaje de sólidos demuestran un control adecuado sobre las condiciones del material procesado.

El balance de masa revela una adecuada separación granulométrica en la zaranda vibratoria, logrando una distribución eficiente de producto final sin generar acumulaciones excesivas en ninguna de las fracciones. La implementación del circuito cerrado con recirculación permite maximizar el aprovechamiento del material grueso sin necesidad de incrementar la alimentación primaria, optimizando el consumo energético del sistema.

Este comportamiento se alinea con las mejores prácticas en diseño de plantas de conminución no metálica, como se reporta en trabajos similares (Estee, 2022). Además, la baja proporción de agua en el sistema indica una operación predominantemente en seco, reduciendo la necesidad de gestión hídrica y costos asociados al tratamiento de efluentes.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Enfoque estratégico del análisis

El análisis de resultados de este estudio se centra en la evaluación integral de la viabilidad técnica de implementar una planta de conminución para yacimientos no metálicos destinados al abastecimiento de materiales agregados en un proyecto vial interregional. Esta evaluación se estructura en función de tres ejes: calidad del material, eficiencia del proceso y alineamiento con estándares normativos y operativos.

4.2 Evaluación de calidad del material procesado

La caracterización mineralógica y geomecánica de los materiales obtenidos de la cantera Cuñacales Alto evidenció una alta aptitud para su uso en infraestructura vial. Los resultados de los ensayos de abrasión Los Ángeles, absorción y peso específico permiten clasificar al material como un material agregado de resistencia media-alta, ideal para bases y subbases de pavimento rígido.

Se observó:

- Un índice de abrasión promedio del 18%, situando al material dentro del rango óptimo para soportar cargas vehiculares sin deterioro prematuro.
- Una absorción del 1.03%, que evidencia baja porosidad, lo cual es favorable para minimizar el deterioro por humedad.
- Un peso específico de 2.21 g/cm³, dentro del rango aceptable para agregados gruesos en mezclas de concreto estructural.

Estos valores, comparados con estudios de referencia nacionales y latinoamericanos, posicionan al material como competitivo y confiable.

4.3 Simulación operativa y desempeño del proceso

La simulación de la planta en el software Bruno-Metso permitió optimizar el diseño del circuito de conminución. Se eligió una configuración en circuito cerrado con retroalimentación, la cual reduce pérdidas por sobredimensión, mejora la selectividad del producto y disminuye la recirculación innecesaria.

Se destaca:

- Una producción estimada de 84 t/h en régimen estable.
- Reducción de paradas operativas por colmatación en mallas.
- Mínima generación de finos (<5%), lo que reduce el rechazo y mejora la eficiencia global del proceso.

Estos hallazgos reafirman la relevancia del uso de herramientas de modelamiento como eje central en el diseño de plantas modernas, especialmente en contextos de infraestructura crítica.

4.4 Comparación con especificaciones técnicas y estudios previos

Al confrontar los resultados con las especificaciones del Manual de Carreteras EG-2013 del MTC, se valida que los agregados producidos cumplen con los requisitos para capas granulares en vías de alto tránsito. Adicionalmente, en comparación con estudios similares (Gaete, 2020; Pastor, 2022; Quenter et al., 2024), se identifica que:

- El mineral no metálico de Cuñacales Alto presenta menor variabilidad granulométrica.
- El diseño de planta propuesto ofrece mayor rendimiento con menor consumo energético (modelado con parámetros de eficiencia de trituración estándar).
- La calidad del material agregado supera la de otros yacimientos evaluados en la zona.

4.5 Implicancias técnicas y estratégicas

Desde una perspectiva operativa, la implementación de esta planta representa una solución sostenible para el abastecimiento de materiales agregados, reduciendo costos logísticos, plazos de ejecución y dependencia de proveedores externos.

Desde una visión estratégica, se abre la posibilidad de escalar la producción para abastecer futuros proyectos viales o incluso comercializar el material procesado a terceros, convirtiendo la planta en un activo productivo con rentabilidad proyectada.

4.6 Discusión crítica

La implementación de tecnologías de simulación y análisis mineralógico, integradas en una misma propuesta de ingeniería, demuestra la importancia de la multidisciplinariedad en los estudios de prefactibilidad. La validación cruzada de los resultados no solo aporta robustez técnica, sino que fortalece la toma de decisiones en proyectos de inversión pública y privada.

Asimismo, el análisis sugiere que la adaptabilidad del diseño a otras condiciones geográficas y materiales es factible, haciendo de esta planta un modelo replicable en otras regiones del país.

Conclusiones

Viabilidad técnica comprobada: El estudio confirmó la viabilidad técnica de implementar una planta de conminución en el yacimiento Cuñacales Alto, gracias a la calidad físico-mecánica de los materiales agregados y a la eficiencia proyectada del proceso de chancado y clasificación, simulado mediante el software Bruno-Metso.

Material con alto potencial para infraestructura vial: Los materiales agregados evaluados cumplen con los parámetros establecidos por el Manual de Carreteras EG-2013 del MTC, destacando por su baja abrasión (18%), adecuada absorción (1.03%) y peso específico favorable (2.21 g/cm³), lo que los convierte en una alternativa óptima para bases y subbases de pavimentos.

Optimización operativa del circuito de conminución: La simulación del proceso evidenció que el uso de un circuito cerrado con retroalimentación permite alcanzar una producción estable de 84 t/h con baja generación de finos y alta eficiencia de clasificación, lo cual reduce pérdidas operativas y mejora la calidad del producto final.

Aporte estratégico al proyecto PE-3N: La implementación de esta planta no solo garantiza el suministro continuo y de calidad para la construcción de la carretera interregional PE-3N, sino que también genera beneficios económicos por la reducción de costos logísticos y tiempos de ejecución.

Potencial replicabilidad del modelo: El enfoque integral utilizado en este estudio (caracterización, simulación y análisis técnico-económico) puede ser replicado en otros proyectos regionales con condiciones similares, promoviendo el uso sostenible de yacimientos no metálicos en el país.

Recomendaciones

Realizar una caracterización sistemática y ampliada del yacimiento Cuñacales Alto

Se recomienda profundizar en la caracterización geológica, mineralógica y geotécnica del yacimiento no metálico Cuñacales Alto, a fin de evaluar su sostenibilidad a largo plazo. Esto incluye el monitoreo continuo del volumen explotable, la calidad litológica en diferentes zonas del yacimiento y la evolución del comportamiento mecánico del material extraído.

Asegurar el cumplimiento estricto del Manual de Carreteras EG-2013: Toda producción de materiales agregados debe someterse a validaciones normativas constantes según los requerimientos técnicos establecidos en el Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013), especialmente en lo referente a resistencia a la abrasión, granulometría, absorción y peso específico. Esta práctica es esencial para garantizar que los materiales agregados procesados cumplan con los criterios de calidad exigidos para bases, subbases y mezclas de concreto en obras viales de alto tránsito.

Optimizar el circuito de conminución mediante simulaciones periódicas con el software Bruno-Metso: Se sugiere utilizar el software Bruno-Metso no solo durante la etapa de diseño, sino también como herramienta de simulación continua para la validación y mejora del rendimiento operativo de la planta. Las simulaciones periódicas permitirán reajustar parámetros del circuito, anticipar cuellos de botella, y validar configuraciones óptimas ante posibles cambios en las condiciones del material de alimentación.

Estandarizar el proceso de clasificación granulométrica según tipología de uso vial

Dado que el destino final de los materiales agregados es la construcción de la carretera PE-3N, se recomienda establecer un sistema de clasificación y almacenamiento por tipología (por ejemplo: base granular, subbase, capa de rodadura, etc.) que permita una trazabilidad completa del mineral desde el yacimiento no metálico hasta su aplicación final.

Referencias bibliográficas

- AASHTO T96. (2019). *Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. American Association of State Highway and Transportation Officials. <https://standards.globalspec.com/std/13441648/aashto-t-96>
- Arredondo, C. (2021). *Análisis de eficiencia metalúrgica de operaciones de sorting de minerales e impacto energético en la línea de conminución*. [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio institucional UCH. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181212>
- ASTM 131. (2006). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. ASTM International. <https://store.astm.org/c0131-06.html>
- ASTM C127-15. (2015). *Método de prueba estándar para la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso*. ASTM Internacional. <https://pdfcoffee.com/astm-c-127-4-pdf-free.html>
- ASTM C128-12. (2012). *Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción del agregado*. ASTM International. <https://pdfcoffee.com/astm-c128-3-pdf-free.html>
- ASTM D2216-16. (2019). *Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2216-19>
- ASTM International. (2014). *ASTM D75/D75M-14: Standard practice for sampling aggregates*. ASTM International. <https://pdfcoffee.com/astm-d75-14-pdf-free.html>
- ASTM International. (2019). *ASTM C136/C136M-19: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19

- ASTM International. (2022). ASTM E11-22: *Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*. ASTM International.
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/112382/292f6d70fa1749b180ce6e69a138010d/ASTM-E11-22.pdf>
- Baptista, P., Fernández, C., & Hernández, R. (2014). *Metodología de la Investigación* (sexta ed.). McGraw-Hill Interamericana.
https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- Barboza, E. (2008). *Formulación de un sistema de Gestión Ambiental para la Minería no Metálica*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú] Repositorio Institucional UNCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3152>
- Carranza, J., & Paredes, R. (2018). *Evaluación técnico-económica de los agregados producidos por las canteras de la provincia de Chiclayo para fines de obras viales*. [Tesis de posgrado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional USS. <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/4434/Carranza%20Morales%20-%20Paredes%20Quintana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Darwin, D., Young, F., & Mindess, S. (2002). *Concrete*. Pearson Education.
<https://es.scribd.com/document/237233216/CONCRETE-2nd-edition>
- Ericksen, G., Iberico, M., & Petersen, M. (1956). *Geología del distrito minero de Hualgayoc, departamento de Cajamarca* (Boletín No. 16). Instituto Nacional de Investigación y Fomento Mineros.
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/4444/5/BOLETIN-INIFM-16-1956.pdf>
- Estee, I. (2022). *Optimización del proceso para el incremento de la producción de agregados en la planta de trituración II de Cantera del Distrito Capital S.A.* [Tesis de pregrado, Universidad Central de Venezuela]. Repositorio Institucional UCV. <http://hdl.handle.net/10872/22063>

- Gaete, G. (2020). *Influencia de la Geología y la Geotecnia en parámetros de Chancabilidad en Yacimiento El Teniente, VI Región Chile*. [Tesis de posgrado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional UCH.
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176619>
- Gobierno del Perú. (1991). *Decreto Legislativo N.º 708 – Ley de Promoción de Inversiones en el Sector Minero*. Diario Oficial El Peruano.
<https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/1740457-dl-708>
- Google. (s.f.). *Coordenadas geográficas: -6.71922, -78.5242509** [Mapa]. Google Maps.
<https://www.google.com/maps/place/@-6.71922,-78.5242509>
- Guerrero, F., & Cardenas, O. (2023). *Análisis y evaluación de las características físicas y mecánicas de los agregados en el diseño de mezclas de dos canteras del distrito de Nueva Requena para la conformación de la base granular del pavimento rígido en la ciudad de Pucallpa 2022*. [Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Ucayali]. Repositorio Institucional UNU. <https://hdl.handle.net/20.500.14621/6099>
- Haberer, H. (2009). *Guía de manejo ambiental para minería no metálica*. [Sistema Nacional de Información Ambiental,]. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-apurimac/archivos/public/docs/626.pdf>
- Herrera, E. (2021). *Comportamiento geológico, hidrogeológico y geotécnico del área para el diseño de la cimentación del colegio San Carlos – Bambamarca*. [Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC.
<http://hdl.handle.net/20.500.14074/4901>
- Huaire, E., Marquina, R., Horna, V., Llanos, K., Herrera, M., Rodríguez, J., & Villamar, R. (2022). Tesis fácil. *El arte de dominar el método científico* (Primera ed.). Casa Editorial Analéctica. www.libros.analectica.org
- Lisson, M. (2024). *Evaluación de cantera y aplicación de la ejecución rápida para optimizar el chancado primario y la ampliación de operaciones en mineral Brocal - Cerro de Pasco*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <https://hdl.handle.net/20.500.13084/8740>

- Mamlouk, M., & Zaniewski, J. (2011). *Materials for Civil and Construction Engineers*. Pearson. https://studylib.net/doc/26147152/materials-for-civil-and-construction-engineering#google_vignette
- Mata, C. (2020). *Manual de laboratorio de agregados para concreto y explotación de canteras enfocado al pequeño y mediano minero*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2529/Tesina.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Metso Minerals. (2004). *Conocimientos Básicos en el Procesamiento de Minerales*. <https://www.metso.com/es/informacion/blog/mineria-y-refinacion-de-metales/repensar-el-procesamiento-de-minerales/>
- Ministerio de Energía y Minas. (s.f.). *Reglamento de Procedimientos Mineros*: <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4922961-reglamento-de-procedimientos-mineros-ed-2023>
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). *Revista de estadística "En Cifras" Minería 2023*. Oficina General de Planeamiento y Presupuesto. <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/5264520-revista-en-cifras-edicion-diciembre-2023>
- Ministerio de Energía y Minas de Chile. (2006). *Manual General de Minería y Metalurgia*. Portal Minero Ediciones. <https://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=56068474>
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2013). *Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción (EG-2013)*. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_10%20EG%202013.pdf
- MTC 207. (2016). *Manual de ensayo de materiales*. Ministerio de transporte y comunicaciones del Perú.

- http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_3729.pdf
- MTC E 108. (2016). *Manual de ensayo de materiales*. Ministerio de transporte y comunicaciones del Perú.
- http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_3729.pdf
- Neville, A. (1996). *Properties of Concrete*. Pearson Education.
- <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1758837>
- Nina, V. (2022). *Propuesta de diseño y análisis de una estructura de costos fijos y variables en la producción de material agregado de una cantera no metálica*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Moquegua]. Repositorio Institucional UNAM .
- <https://hdl.handle.net/20.500.14655/376>
- NTP 339.127. (1999). *Método de ensayo para determinar el contenido de humedad un suelo*. <https://pdfcoffee.com/qdownload/ntp-339127-contenido-de-humedad-3-pdf-free.html>
- NTP 339.135. (1999). *Método para la clasificación de suelos para uso en vías de transporte*. <https://pdfcoffee.com/qdownload/ntp-339135-clasificacion-aashto-5-pdf-free.html>
- NTP 400.010. (2016). *Extracción y preparación de las muestras*. <https://pdfcoffee.com/download/ntp-400010-pdf-free.html>
- NTP 400.012. (2013). *Análisis granulométrico del agregado*. <https://pdfcoffee.com/qdownload/ntp-400012-granulometria-4-pdf-free.html>
- NTP 400.020. (2002). *Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaño grande por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles*. <https://pdfcoffee.com/qdownload/ntp-400020-2002-abrasion-2-pdf-free.html>
- NTP 400.022:2013. (2013). *Agregados. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino*. Comisión de Normalización y de Fiscalización de Barreras Comerciales no Arancelarias -

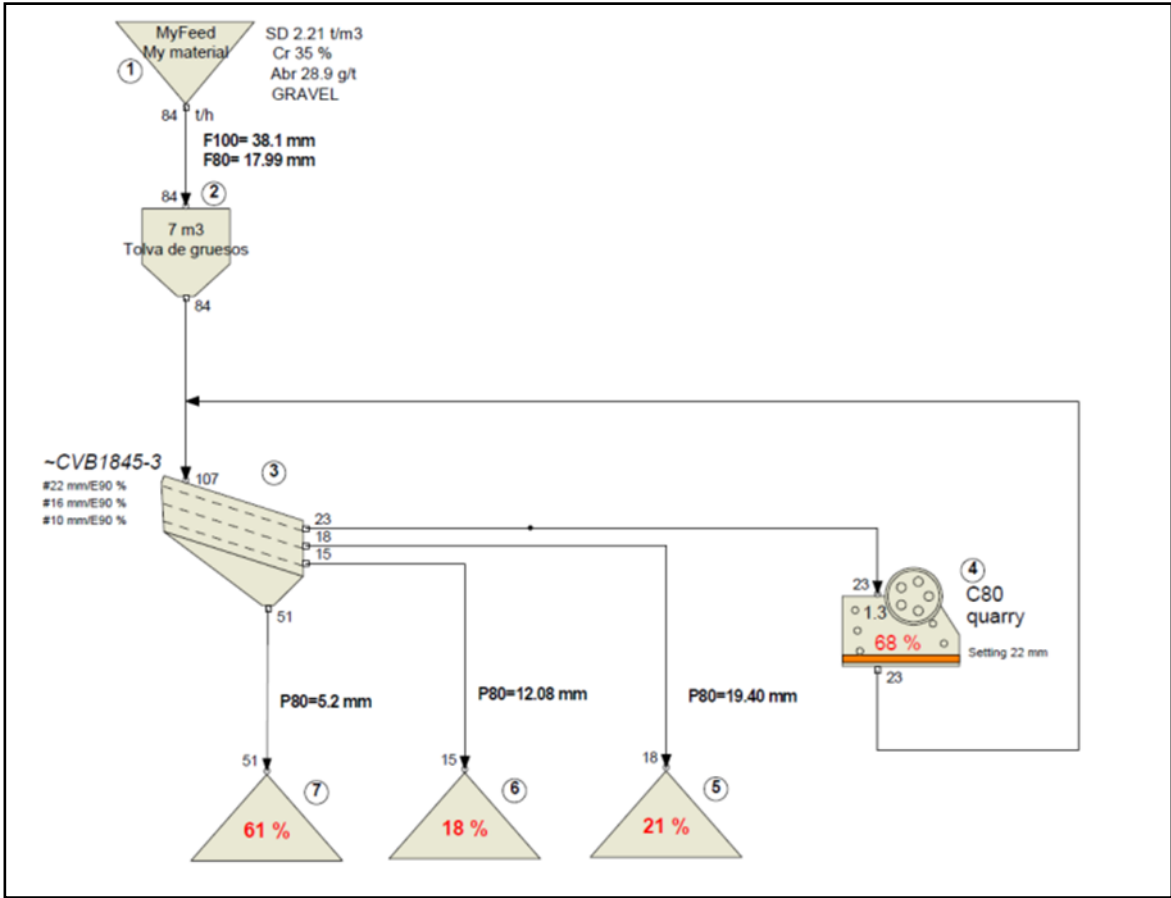
- INDECOPI. <https://pdfcoffee.com/ntp-4000222013-agregados-metodo-peso-especifico-y-absorcion-del-agregado-fino-7-pdf-free-pdf-free.html>
- NTP 400.037. (2002). *Agregados. Especificaciones normalizadas para agregados en hormigón (concreto)*. <https://pdfcoffee.com/ntp-400037-2002-agregados-de-concreto-3-pdf-free.html>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2015). *Informe N.º 173-2015-OEFA/DE-SDCA: Monitoreo de calidad de agua en la cuenca alta del río Llaucano y afluentes, en los distritos de Hualgayoc y Bambamarca, provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca, realizado en mayo de 2015*. Ministerio de Ambiente. <https://hdl.handle.net/20.500.12788/1621>
- Pástor, C. (2022). *Optimización del proceso de conminución de la planta de beneficio PROMINE*, Camilo Ponce Enríquez - Azuay. [Tesis de pregrado, Universidad de Azuay]. Repositorio Institucional UDA. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/11632>
- Pierre, G. (1979). *Sampling of Particulate Materials Theory and Practice*. Elsevier. <https://books.google.com.do/books?id=qMONTTfx7hsC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- Quenter, C., Quispe, Y., & Torres, C. (2024). *Propiedades físico-mecánicas y costos de producción de agregados de las Canteras del río Vilcanota (tramo Combapata - Ollantaytambo) para obras civiles en la región Cusco - 2022*. [Tesis de posgrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional UC. <https://hdl.handle.net/11537/21300>
- Sayaverde, E. (2021). *Determinación de la calidad de las aguas de los ríos Chotano y Doña Ana, Chota - Cajamarca*. [Tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de Chota]. Repositorio Institucional UNAC. <https://repositorio.unach.edu.pe/items/86507981-d379-4926-b70a-d344b4e50693>

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. . (s.f.). *Pronóstico del tiempo para Chota (Cajamarca)*. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-detalle&dp=06&localidad=0033>
- Trillo, D. (2023). *Análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados provenientes de las canteras Rumi Rinconada, Munay Warmi y Huilque para su caracterización como subbase granular en la ciudad de Cusco - 2023*. [Tesis de pregrado, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio Institucional UAC. <https://hdl.handle.net/20.500.12557/6531>
- Weather Spark. (s.f.). *Clima promedio en Bambamarca, Perú durante todo el año*. Obtenido de Weather Spark: <https://es.weatherspark.com/y/19982/Clima-promedio-en-Bambamarca-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Wills, B., & Napier-Munn, T. (2007). *Wills' Mineral Processing Technology* (Octava ed.). Butterworth-Heinemann.

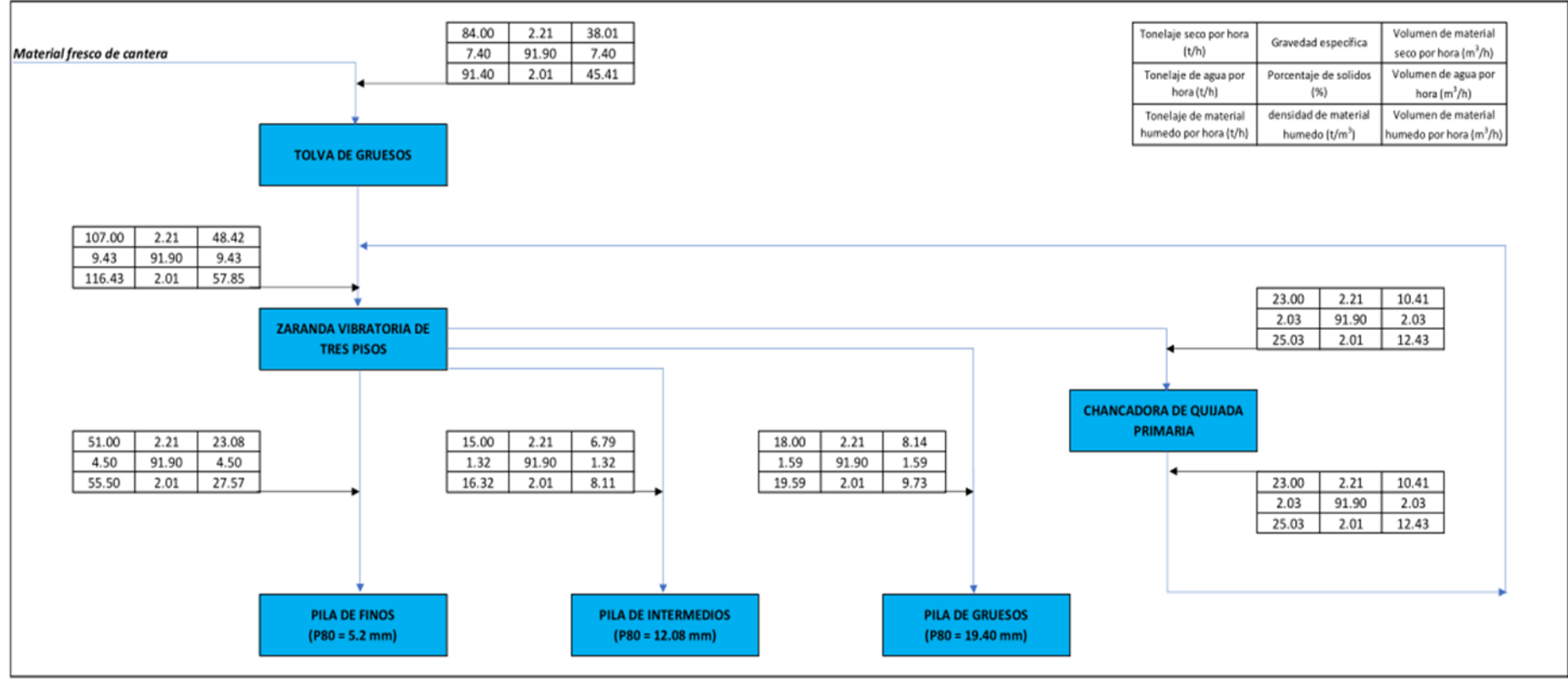
Anexos

	Pág.
Anexo 1: Circuito de conminución.....	1
Anexo 2: Balance de masas	2
Anexo 3: Diagrama de flujo de chancado y clasificación.....	3
Anexo 4: Matriz de consistencia	4
Anexo 5: Topografía de cantera Cuñacales Alto I	5
Anexo 6: Topografía de cantera Cuñacales Alto II	6

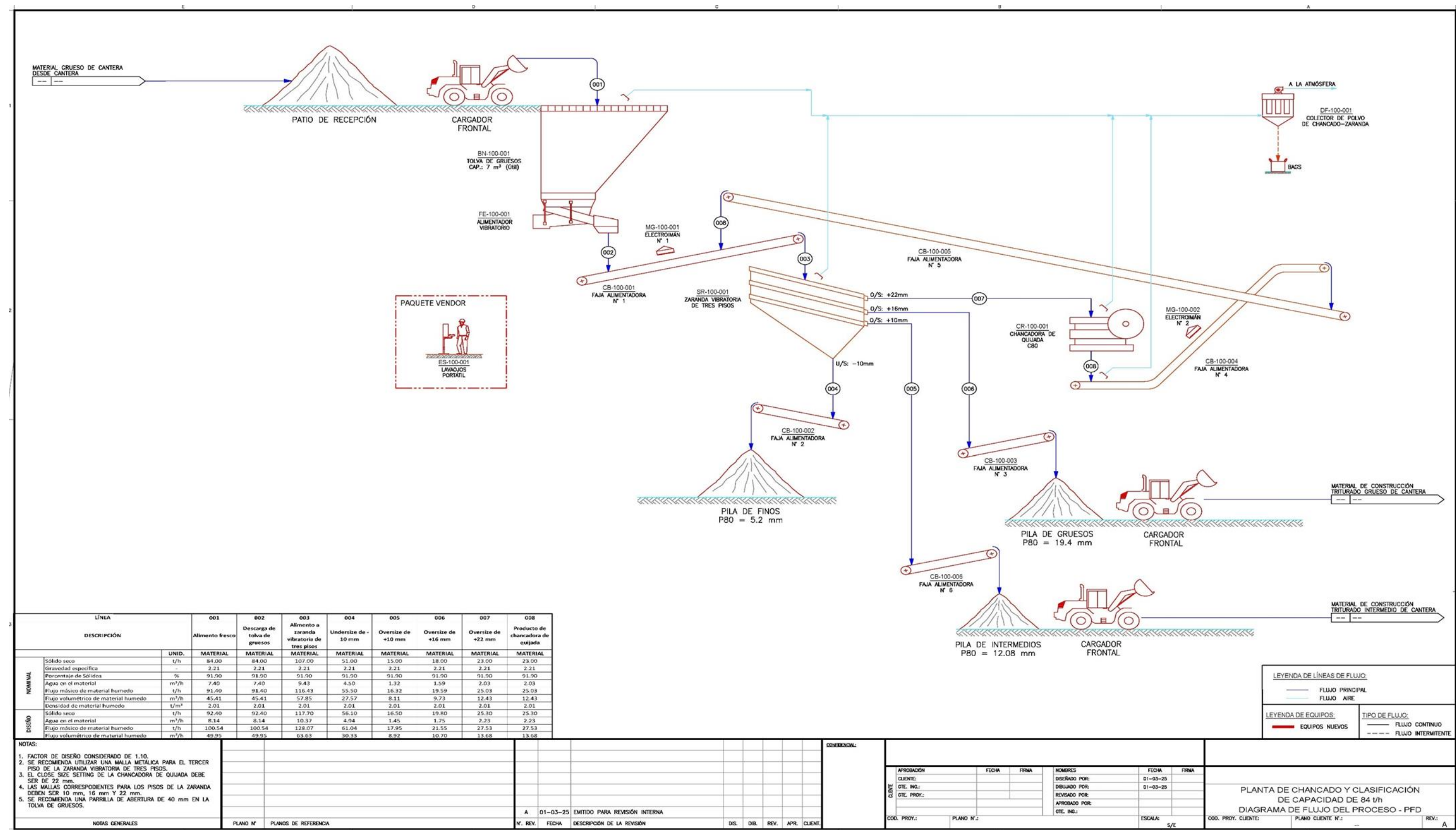
Anexo 1: Circuito de conminución



Anexo 2: Balance de masas



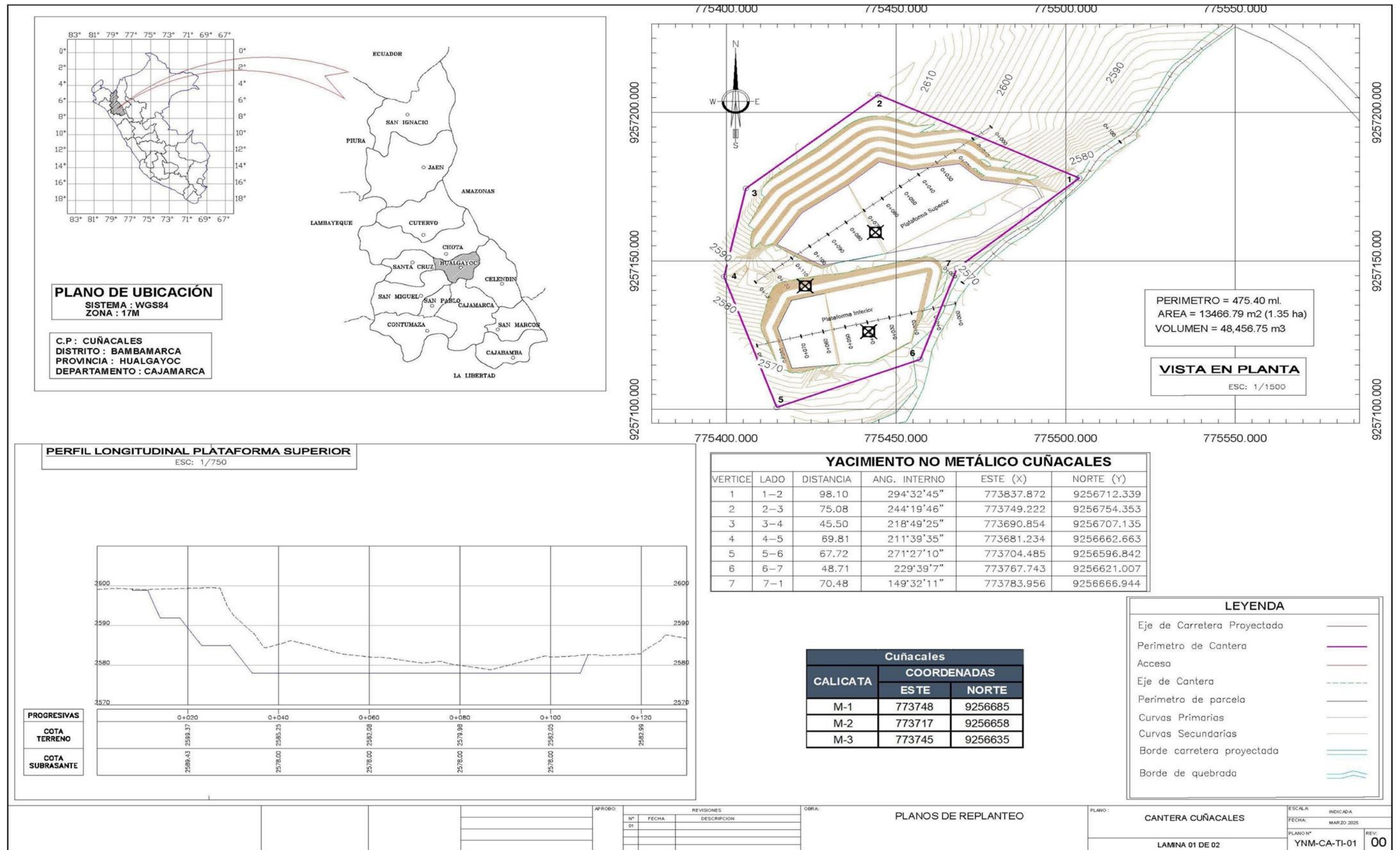
Anexo 3: Diagrama de flujo de chancado y clasificación



Anexo 4: Matriz de consistencia

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	DISEÑO METODOLÓGICO
<u>Problema General</u> ¿Cómo garantizar un abastecimiento eficiente y sostenible de materiales agregados para la construcción de la carretera interregional PE-3N mediante una planta de conminución? <u>Problema Específico</u> ¿Cuál es la calidad mineralógica y geomecánica del yacimiento no metálico evaluado? ¿Cómo diseñar el circuito de trituración y clasificación de minerales no metálicos que optimice la producción de materiales agregados?	<u>Objetivo General</u> Realizar un estudio de prefactibilidad para el diseño de una planta de conminución en un yacimiento no metálico que asegure un abastecimiento eficiente y sostenible de materiales agregados para la carretera interregional PE-3N. <u>Objetivo Específico</u> Caracterizar las propiedades mineralógicas y geomecánicas del yacimiento no metálico para evaluar su idoneidad como materia prima. Diseñar el circuito de trituración y clasificación para optimizar la producción de materiales agregados conforme a las especificaciones técnicas.	<u>H General</u> La implementación de una planta de conminución permitiría garantizar un abastecimiento eficiente y sostenible de materiales agregados cumpliendo las especificaciones técnicas requeridas en la carretera PE-3N. <u>H. Específico</u> La caracterización integral del yacimiento permitiría evaluar su idoneidad como materia prima para materiales agregados de construcción. Un diseño adecuado del circuito contribuiría en una producción eficiente y conforme a los requisitos técnicos.	<u>Variable Independiente</u> Diseño de planta de conminución. <u>Variable Dependiente</u> Calidad mineralógica y geomecánica.	<u>Variable Independiente</u> Diseño optimizado de circuito de trituración y clasificación. <u>Variable Dependencia</u> Resultados de análisis de granulometría, abrasión, absorción y peso específico.	<u>Tipo de Investigación</u> Aplicada de nivel descriptivo y explicativo. <u>Diseño de la Investigación</u> No experimental, transversal. <u>Población</u> Yacimiento no metálico Cuñacales Alto (muestra no probabilística por conveniencia). <u>Técnicas de recolección</u> Ensayos de laboratorio, caracterización mineralógica, simulación con software Bruno-Metso.

Anexo 5: Topografía de cantera Cuñacales Alto I



[illegible]