



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**RESUMEN DE RECOMENDACIONES PARA MANEJO DE MATERIALES
GRANULARES Y SU CARACTERIZACIÓN ORIENTADO AL
PROCESAMIENTO INDUSTRIAL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Mecánico

AUTOR: JOSÉ ENRIQUE BERMEO VALLEJO

TUTOR: ING. PAÚL BOLÍVAR TORRES JARA, M.Sc.

Cuenca - Ecuador

2023

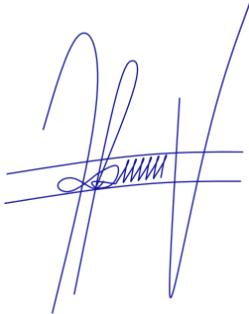
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, José Enrique Bermeo Vallejo con documento de identificación N° 0302025614, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 20 de julio del 2023

Atentamente,



José Enrique Bermeo Vallejo

0302025614

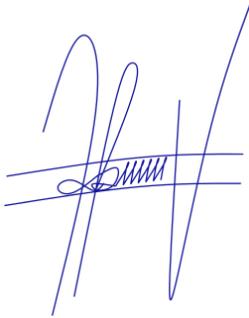
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, José Enrique Bermeo Vallejo con documento de identificación N° 0302025614, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto técnico: “Resumen de recomendaciones para manejo de materiales granulares y su caracterización orientado al procesamiento industrial”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 20 de julio del 2023

Atentamente,



José Enrique Bermeo Vallejo

0302025614

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Paúl Bolívar Torres Jara con documento de identificación N° 0102776036, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: RESUMEN DE RECOMENDACIONES PARA MANEJO DE MATERIALES GRANULARES Y SU CARACTERIZACIÓN ORIENTADO AL PROCESAMIENTO INDUSTRIAL, realizado por José Enrique Bermeo Vallejo con documento de identificación N° 0302025614, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 20 de julio del 2023

Atentamente,



Ing. Paúl Bolívar Torres Jara, MSc.

0102776036

Dedicatoria

El presente trabajo lo dedico a mi esposa Lourdes, a mi padre José Antonio, mi madre Teresa y mi hijo Leonardo. Siempre han estado con su apoyo y han dado un impulso cada vez que haga falta para culminar cada una de las metas que me he propuesto. Lo conseguido ha sido gracias a su fe en mi y no he podido dejarme vencer por el mismo motivo.

Agradecimiento

El mayor agradecimiento hacia mis padres y mi esposa por no dejarme renunciar ni un momento, a mis hermanas por también estar pendientes de finalizar mi carrera, y a toda mi familia por tener siempre su mano abierta para saludar en los buenos momentos y extenderla cuando era necesario.

Al Ing. Paul Torres quien ha guiado el presente trabajo y sin su ayuda no se hubiera conseguido el resultado esperado.

Contenido

I.	Tema	1
II.	Introducción.....	1
III.	Planteamiento del Problema.....	2
3.1.	Antecedentes	2
3.2.	Problema general.....	2
3.3.	Problemas específicos.....	2
IV.	Objetivos	3
4.1.	Objetivo general	3
4.2.	Objetivos específicos	3
V.	Marco Teórico	3
5.1.	Material o Medio Granular	3
5.2.	Reología de Polvos	3
5.3.	Manejo de Material Granular	4
5.3.1.	En la Industria Farmacéutica.....	4
5.3.2.	En la Industria Agrícola.....	4
5.4.	Análisis DEM.....	4
VI.	Operaciones Unitarias de procesamiento industrial de materiales granulares	5
6.1	Introducción	5
6.2	Operaciones Unitarias consideradas para el estudio	7
6.2.1	Transporte	7
6.2.2	Almacenamiento y Descarga	11
6.2.3	Reducción de Partículas.....	14
Figura 6.14	Trituradora de rodillos con cuchillas	15
6.2.4	Fluidización	19
6.2.5	Separación.....	20
VII.	Características Reológicas de materiales Granulares para Operaciones Unitarias	22
7.1	Introducción	22
7.2	Propiedades Reológicas y su influencia en Operaciones Unitarias.....	22
7.3	Relación entre Propiedades y Operaciones unitarias consideradas en el proyecto	23
7.4	Definición de propiedades reológicas.....	24
7.4.1	Tamaño de Partícula.....	24
7.4.2	Densidad	24
7.4.3	Forma.....	25
7.4.4	Higroscopía.....	25
7.4.5	Adhesividad	25

7.4.6	Dureza.....	26
7.4.7	Friabilidad.....	26
7.4.8	Distribución de Tamaño	26
7.4.9	Toxicidad	26
7.4.10	Inflamabilidad.....	27
VIII.	Fichas de organización entre operaciones unitarias junto con sus variables y propiedades a considerar para conseguir resultados óptimos	28
8.1	Introducción	28
IX.	Conclusiones y Recomendaciones.....	34
	Al finalizar el presente proyecto, las conclusiones y recomendaciones se detallan a continuación:	34
❖	Conclusiones	34
❖	Recomendaciones	34
X.	Referencias	35

I. Tema

Resumen de Recomendaciones para Manejo de Materiales Granulares y su Caracterización Orientado al Procesamiento Industrial.

II. Introducción

Los materiales granulares son considerados por algunos científicos como el cuarto estado de la materia [1], debido a su comportamiento distinto a los tres estados fundamentales como son líquido, sólido y gaseoso.

Estos materiales forman parte de la vida cotidiana en todos los lugares de la naturaleza y formas creadas, citando algunos ejemplos se tienen: los cereales, tubérculos, harinas, arena, rocas, cemento, comprimidos medicinales, polvos cosméticos, pellets, croquetas para mascotas, patatas chips [2], y un sinnúmero de productos que para manejarlos es necesario darles un tratamiento distinto al comúnmente usado para los estados fundamentales e incluso a si están agrupados o individualizados [3].

De los ejemplos que se citaron, es de notar que existen en todas las áreas cotidianas como la alimentación, medicamentos, construcción y ninguna está fuera del alcance del hombre.

Todos tienen diferente forma de ser tratados para llegar a un producto terminado listo para su consumo o aplicación. Describiendo brevemente algunos como el trabajo con áridos (piedra, arena, asfalto, etc.) [4], involucra varios procesos que van desde la extracción de las rocas, su transporte hacia la planta de trituración o reducción y se almacena apilado para el despacho. En la planta se dan varios procesos unitarios como son: cribado, trituración, molienda, transporte en bandas, calentamiento, mezclas con aglomerantes para asfalto u otros, todo esto dependerá del producto final a obtener y se requiere tener del conocimiento lo suficientemente profundo para obtener la calidad deseada. Generalmente el proceso en sí, es definido por el laboratorista de producción, pero la distribución de toda la línea, determinación de las velocidades de transporte por bandas, así como su pendiente máxima y su dureza, montaje, mantenimiento y facilidades está en manos de un ingeniero mecánico, y tener un sólido conocimiento de los procesos unitarios involucrados le dará el valor agregado para cumplir no solamente con la correcta operación sino además de funcionar de forma muy eficiente.

En el sector productivo del cemento se involucran de igual manera procesos unitarios [5] similares a los citados en el párrafo anterior, pero su producto terminado resultan ser partículas finas y, por ejemplo, para la operación de transporte, transportarlo por bandas puede no ser una buena alternativa y considerar transporte neumático dará mejores resultados; su almacenamiento para despacho el apilarlo al aire libre puede traer consecuencias económicas y ambientales, y mantenerlo dentro de silos resolverá algunos problemas. El almacenamiento que en sí es una operación unitaria muy amplia, al utilizar los silos es necesario considerar la descarga y los problemas que se pueden tener al trabajar específicamente con cemento por aparecer fuerzas internas y dificultan su fluidez [6], y es preciso conocer las propiedades reológicas para poder actuar y usar herramientas que permitan mantener una descarga constante [7] del material para su despacho. Nuevamente definir las herramientas, diseñar el sistema, calcular los requerimientos energéticos, implementarlo y mantenerlo recaen dentro del área de la ingeniería mecánica, pero es exigente en cuanto al conocimiento del material que se está tratando para cumplir con los requerimientos del proyecto.

El libro de Introducción a tecnología de partículas [8] manifiesta que algunas de las industrias en las que se manejan materiales granulares son: farmacéutica, química, petrolera, minería, metalurgia, detergentes, pinturas, plásticos y cosméticas y estas implican la participación de científicos e ingenieros y de estos últimos están los ingenieros mecánicos, químicos, físicos, de materiales, en minas, ambientales, en combustión, civiles, etc. Compañías como DuPont cuya actividad cubre industria química, agrícola, farmacéutica, pintura, cerámica y otras, de las cuales dos tercios de sus productos está en relación directa con el manejo de materiales granulares.

El presente trabajo ha sido solicitado por la empresa INMEDICOM, cuya actividad se centra en la Ingeniería Mecánica y Consultoría para aplicaciones Industriales, y parte de la necesidad de resumir qué propiedades de estos

materiales deberán ser caracterizados en función de la operación que se efectúe, para poder de esta manera acelerar el desarrollo de un sistema o mecanismo de resolución de un problema específico; pues ha detectado esta carencia de información de acceso directo, y plantea como proyecto el compilarla, resumirla y finalmente generar la información específica para el caso que se esté tratando.

En la sección 6 de este documento, se describen las operaciones unitarias que mayormente están dentro de las áreas de la empresa solicitante y que además están muy ligadas con las diferentes ramas de la ingeniería mecánica, se describen las variables y/o propiedades de influencia en las operaciones. En la sección 7 se relacionan las propiedades de los materiales granulares específicamente relacionadas con las operaciones dando énfasis a su descripción y su forma de ser valoradas. Finalmente, en la sección 8 se generan las fichas que resumen y presentan de forma directa las operaciones unitarias con las variables y/o propiedades que deben ser valoradas para conseguir los mejores resultados.

III. Planteamiento del Problema

3.1. Antecedentes

Los materiales granulares se conocen como material a granel y se encuentran en diferentes áreas como: agrícola con los cereales [9] en grano o las frutas, en la medicina [10] como los comprimidos, o los suplementos en polvo, en minería [11], Geotecnia [12], cementera, cerámica, y muchas otras tanto a escala industrial como artesanal.

El material granular a diferencia de los sólidos, líquidos o gases, tienen su comportamiento propio que puede o no interactuar con el medio circundante y depende incluso de si está una sola partícula o varias partículas confinadas[3], por lo que se ha estudiado y continúa estudiando para comprender su comportamiento [13].

Al mencionar además el manejo de dicho material, el cual puede ser reducido en su tamaño con diferentes métodos como el triturado o molienda [14], almacenado en silo convenientemente diseñados [15] y además sobre los cuales se estudia cómo descargar de forma eficiente el material dependiendo de sus propiedades y características [16], y el transportarlo con distintos métodos [17] y manteniendo la precaución y seguridad con los mismos para evitar explosiones [18].

Con esto se ha mencionado muy brevemente una parte que comprende el manejo de material granulado, y se muestra la importancia que este implica para los procesos productivos.

3.2. Problema general

El manejo adecuado del material granular puede permitir mejorar su procesamiento antes, durante y después de ser trabajados, sin embargo, la falta de conocimiento para caracterizarlo con las propiedades que sean las apropiadas para fines específicos, son la limitante para tener un punto de partida y posteriormente plantear las mejoras convenientes. Para ello, la interrogante planteada como el problema general de la investigación será:

- ¿Cuáles es la forma apropiada de manejar los materiales granulares y cuáles son las propiedades que deben ser definidas?

3.3. Problemas específicos

Se ha mencionado anteriormente, que los materiales granulares tienen su comportamiento propio, este irá ligado a sus características físicas, químicas, etc., [19] con las cuales podrá tener un tipo de flujo distinto a otro. Si bien se ha mostrado literatura que pone en manifiesto que este campo ha sido estudiado en sus diferentes áreas, la información en idioma español es muy limitada acerca de su manejo apropiado y por tal motivo, existen algunos problemas para su manejo y mucho más para su mejoramiento.

Mucha información se encuentra indicada en los libros [20]–[22] que tratan de su manejo, caracterización, precauciones, transporte, y otras operaciones unitarias, sin embargo todos están en inglés y la información es abundante, de forma que si se pretende hacer alguna modificación en una operación unitaria es preciso revisar toda la literatura y conocer exactamente todos los conceptos, siendo este un medio poco práctico para solventar de manera rápida o en corto plazo la propuesta de una mejora o corrección consciente de la operación.

Con lo antes mencionado, se plantean las siguientes interrogantes:

- ¿Cuáles son las características o propiedades que deben ser definidas en el material granulado que se está trabajando y en qué incluyen dentro de las operaciones?
- ¿Cuáles son las operaciones comunes par producción industrial para procesos de materiales granulares?
- ¿Se dispone de un resumen que indique de forma ordenada y directa qué variables debo considerar para la operación junto con las características que el material granulado debe cumplir?

IV. Objetivos

4.1. Objetivo general

- Resumir las recomendaciones para Manejo de Materiales Granulares y su Caracterización Orientado al Procesamiento Industrial

4.2. Objetivos específicos

- Enumerar, Describir y Definir las variables de las operaciones unitarias de materiales granulares
- Clasificar las características reológicas de materiales granulares en base a su influencia en operaciones Unitarias
- Resumir y Organizar en fichas informativas las operaciones unitarias junto con sus variables y las propiedades que debe tener el material granulado para conseguir resultados óptimos del proceso.

V. Marco Teórico

5.1. Material o Medio Granular

Este material es considerado por algunos científicos como un cuarto estado de la materia [1], por su comportamiento que no permite ser directamente clasificado como líquido, sólido o gas.

Resulta además curioso, notar que las partículas que forman un medio granular, tienen un comportamiento distinto al interactuar con otras partículas o si se trabaja con una sola. Por ejemplo [23] indica el comportamiento de una pelota de tenis que rebota individualmente, difiere a que si varias pelotas confinadas en una bolsa, siendo el primer escenario en el que la pelota individual da mayor rebote que en grupo y esto se atribuye a los choques inelásticos entre todas las partículas [24].

El material granulado, es parte común de la vida cotidiana. Por ejemplo, el azúcar, el café, las frutas, el maíz, todos ellos resultan ser materiales granulados que son familiares, así como en el área civil el material pétreo para las construcciones de muros, para obras viales, para la mampostería.

5.2. Reología de Polvos

La Reología es la Parte de la física que estudia la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad y el derrame de la materia. Al complementar con reología de polvos, se refiere o otras propiedades que son propiamente de materiales

granulados, por ejemplo, la granulometría, la geometría, la densidad aparente, los coeficientes de fricción entre partículas y con el medio, etc. [19].

Por lo mencionado en el párrafo anterior, se esperaría que con la reología se pudiera predecir exactamente el comportamiento de este material, sin embargo, varios documentos [13], [25], [6] estudian fuerzas y energías (cohesión, adhesión, fricción, flujo, etc.) que se desarrollan con estos materiales, que complican aún más su manejo y aparecen nuevas variables que deben ser consideradas para hacerlo de forma correcta.

5.3. Manejo de Material Granular

Una vez que se ha descrito, la complejidad del manejo de materiales particulados, se indicará algunas de las áreas de aplicación en las que están involucrados directamente con su manejo, y el saber cómo, dará éxito o el fracaso de la operación.

5.3.1. En la Industria Farmacéutica

Dentro de la Industria Farmacéutica, dos de los procesos más comunes y fácilmente reconocibles, son los comprimidos o las pastillas dispensadas en las farmacias. Para elaborar estos comprimidos, a grandes rasgos se toman dos pasos que comprenden la mezcla, y se busca mejorar la mezcla del medicamento antes de ser comprimido [26]. Y como paso final está la elaboración del comprimido el cual resulta del material granulado en partículas muy finas [10] para su distribución al público.

5.3.2. En la Industria Agrícola

Esta industria está ligada también con los productos de consumo humano, tanto de frutales, gramíneas como el maíz, fréjol, etc., y se han desarrollado investigaciones para caracterizar polvos obtenidos de subproductos de frutales [27] considerando dos tipos de granulometría. Por otro lado, en la misma industria agrícola y el almacenamiento de productos, al involucrarla con el tema estructural da como resultado la ingeniería para el diseño de silos para almacenamiento de productos agrícolas [28], en el cual determinan las características mecánicas del material granular como información de entrada a un método de cálculo en la resistencia y para la descarga del silo.

5.4. Análisis DEM

Se han desarrollado algunas investigaciones de simulación con análisis DEM o más conocido como Método de Elementos Discretos traducido al español, el trabajo con aplicaciones en minería [29] cuya finalidad es plantear el análisis de sensibilidad para calibrar el modelo usado para el análisis y manejar un menor rango de incertidumbre. Se estudia además con el mismo método la descarga de silos [30] para asegurar que todo el material sea descargado y no existan estancamientos. Es posible la integración de CFD y DEM, tanto con paquetes comerciales como software libre, en el trabajo revisado [31] usa OpenFoam para CFD y LIGGGHTS para análisis DEM, con ayuda de PARAVIEW como interfaz para el acoplamiento multifásico de fluidos y material granulado. Dependiendo de la precisión de la información de las variables y propiedades e interacciones con el medio entre partículas y/o con el medio de confinamiento, los cálculos del comportamiento o trayectoria de las partículas (material granular) serán más aproximados al comportamiento real.

VI. Operaciones Unitarias de procesamiento industrial de materiales granulares

6.1 Introducción

Las operaciones unitarias son operaciones individuales dependientes unas con otras y cada una provoca un cambio del producto que entra, iniciando con la materia prima hasta el producto terminado.

Dicho termino es utilizado con la finalidad de estandarizar y sistematizar los procesos dentro de los ámbitos industriales cuya importancia es mejorar el desarrollo en los procesamientos de materiales. Se introdujeron en zonas industriales a través de procesos físicos, químicos y/o mecánicos como evaporación, destilación, pulverización, etc. Debido las grandes cantidades de material de granel que son producidas en las zonas industriales y la mayoría de estas no han abarcado su importancia [22] se ha tomado en cuenta ciertas consideraciones involucradas con los sólidos granulares, flujo y manejo del material.

Los sectores industriales según sus ámbitos económicos son clasificados en cuatro sectores principales para la economía como muestra la Fig. 6.1 para una nación o región [32].

Sectores de Actividades Económicas			
Primario	Secundario	Terciario	Cuaternario
Extracción de Recursos Naturales	Transformación	Servicios	Explotación Tecnológica
- Agricultura - Pesca - Minería - Petrolero, etc.	- Industria	- Comercio - Bancario - Transporte, etc.	- Investigación - Desarrollo - Diseño

Figura 1.1 Clasificación de los sectores industriales por ámbitos económicos

Fuente: Ortega-Rivas [32]

El mismo autor Ortega-Rivas subdivide al sector industrial o de Transformación como se muestra en la figura 6.2, considerando que este sector recibe materias primas del sector primario y las devuelve como productos procesados, agrupando así a la subdivisión de Procesamiento en cuatro grandes industrias mostradas en la misma figura.

Sector de Transformación o Industrial		
Manufactura	Construcción	Procesamiento de Materiales
		- Química - Farmacéutica - Alimentación - Metalurgia

Figura 6.2 Subdivisión del Sector de Transformación

Fuente: Ortega-Rivas [32]

Las operaciones unitarias abarcan el manejo de la materia prima a cualquier escala, debido al crecimiento industrial los criterios utilizados en la categorización son extensos ya que involucran varios razonamientos específicos para cada material y/o proceso coordinado. La selección de la maquinaria a ser utilizada para trabajarlos

debe estar basada no solo en el proceso sino además en las propiedades individuales de las partículas y el material para condiciones estáticas o dinámicas con el fin de conseguir una planta plenamente productiva [33].

En la figura 6.3 se muestran algunas propiedades de los materiales granulares definidas por el autor Shamlou [33], que deberán ser caracterizadas en función de la operación que se requiera.

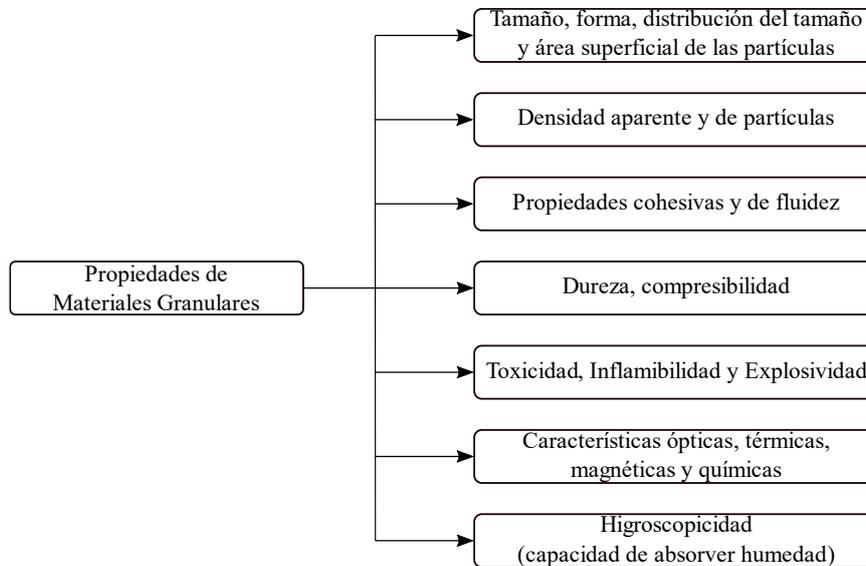


Figura 6.3. Propiedades de los materiales granulares.

Fuente: Shamlou [33]

Por otra parte, las propiedades que sirven para conocer el comportamiento y manejo de estos materiales, sirven para identificar los potenciales problemas que se pueden presentar asociados a las mismas, y al reconocerlas permitirán evitarlas o sobrellevarlas implementando soluciones para mitigarlas. Esto se presenta en la figura 6.4 teniendo las propiedades y en qué áreas se pueden presentar problemas.

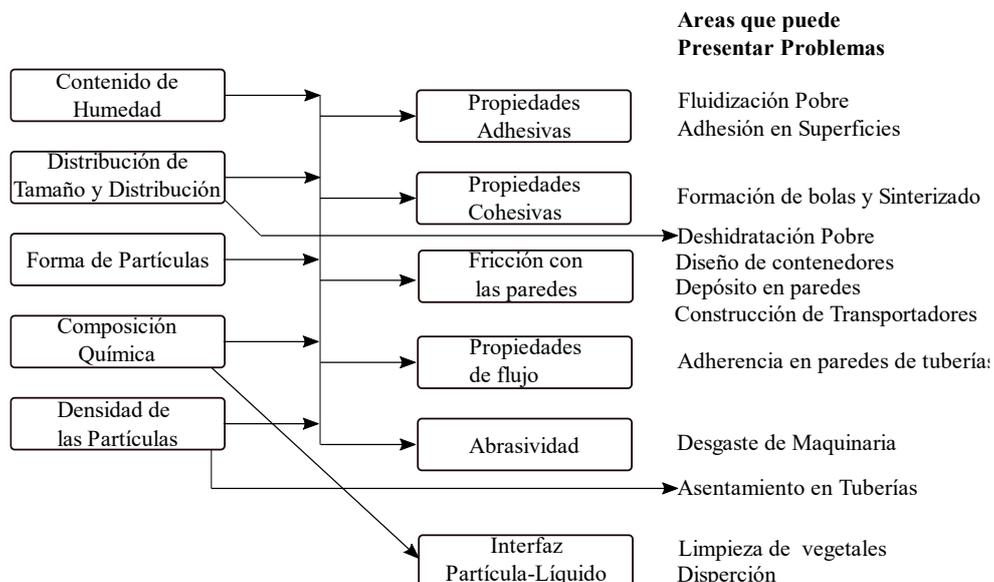


Figura 6.4 Propiedades de los materiales granulares y las áreas que pueden presentar problemas

Fuente: Adaptado de McGlinchey [20]

6.2 Operaciones Unitarias consideradas para el estudio

Toda esta sección tratará de operaciones unitarias industriales para el manejo de materiales granulares de forma global y sin enfocar en un proceso específico como puede ser el farmacéutico, pero varias de las operaciones descritas podrán ser aplicadas a este proceso para obtener los medicamentos en alguna de sus presentaciones.

Además, se ha tomado en cuenta las operaciones en las cuales la empresa solicitante ha considerado están en estrecha relación con sus actividades involucradas en la rama de ingeniería mecánica y procesos industriales. De las cuales se presentan a continuación e inmediatamente se describirán.

- Transporte
- Almacenamiento y Descarga
- Reducción de Partículas
- Fluidización
- Separación

6.2.1 Transporte

Se refiere al transporte de materiales granulares desde un punto de suministro hasta la siguiente operación. No es una operación que agrega valor al producto, pero es una facilidad que permite abastecer de forma continua a las siguientes etapas de proceso y su falta de operación puede ocasionar parada en toda la línea.

Se consideran tres formas de transporte comúnmente usados independientemente de la industria y son:

- Transporte por banda
- Transporte neumático
- Elevadores de cangilones

6.2.1.1 Transporte por banda

❖ Descripción

Se usan cintas transportadoras generalmente de caucho o neopreno para trasladar sólidos sin límite de distancias. En la figura 6.5 se muestra una parte de este sistema en operación, el material transportado se asienta sobre la banda y esta a su vez sobre rodillos. La banda es impulsada en un extremo por un rodillo motriz que puede ser impulsado por un motor de combustión o motor eléctrico y en el otro extremo un rodillo conducido.

El tamaño de las partículas a transportar está únicamente limitado por el tamaño de la banda y la capacidad de los rodillos que vienen con valores estándar, si excede estas dimensiones se debería considerar otros métodos como transporte con camiones o volquetes.

Su pendiente de ascenso puede variar entre 0° a 20° [32], la temperatura también depende de la resistencia de la banda y rodillos, sin embargo se considera una temperatura máxima de 50°C.



Figura 6.5 Transporte por bandas

Fuente: 911Metalurgis [34]

❖ **Variables y Valoración del transporte por bandas**

Variable	Valoración
Distancia	Ilimitada
Capacidad de Carga	Limitada por los rodillos y la banda
Rangos de Pendientes	0° a 20°
Temperatura máx	50°C
Materiales Tóxicos	No Recomendado
Materiales Higroscópicos	No Recomendado
Materiales Explosivos	No Recomendado
Materiales Abrasivos	OK
Materiales Cohesivos	OK
Materiales Mezclados	OK

Tabla 6.1 Variables y Valoración

Fuente: Autor

6.2.1.2 Transporte Neumático

❖ **Descripción**

Es un método de transporte que no está limitado por la pendiente, es decir puede funcionar horizontal o vertical. Usado para polvos finos máximo de 6,35mm y 3200kg/m³ [34]. Se usan ductos rígidos con los cambios de dirección que sean necesarios.

En la figura 6.6 se muestra un esquema de funcionamiento en dos métodos. La primera con presión positiva en la cual se impulsa aire en el ducto y por efecto Venturi el material es arrastrado hacia el separador, y el segundo con presión negativa en la cual el ventilado se ubica a la salida del separador y arrastra todo el material. Y su configuración depende de la operación efectuada.

En la figura 6.7 se muestra una termografía de transporte neumático de un alimentador hacia el separador operando con presión negativa hacia el separador con filtros. La temperatura está en función de la resistencia estructural del ducto de transporte y en la figura se muestra a 180°C, con un diámetro de aproximadamente 1m.

En necesario que los ductos estén completamente herméticos, ya sea para presión positiva o negativa para evitar fugas de aire y/o material.

Si el material es cohesivo o pegajoso podría pegarse en las paredes o aglomerarse. En materiales mezclados con tamaños y/o densidades distintas podría separarse a lo largo del ducto de transporte.

La distancia y capacidad máxima se limita a 300toneladas/hora y 1000m [34].

A diferencia del transporte con cangilones o banda, se puede controlar la atmósfera en la que circula el aire, es decir que si se trabajan con polvos explosivos se puede usar un gas inerte, y si se usa un material higroscópico se puede usar aire seco, y en el caso de usar materiales tóxicos también es posible al circular por una atmósfera aislada. [21].

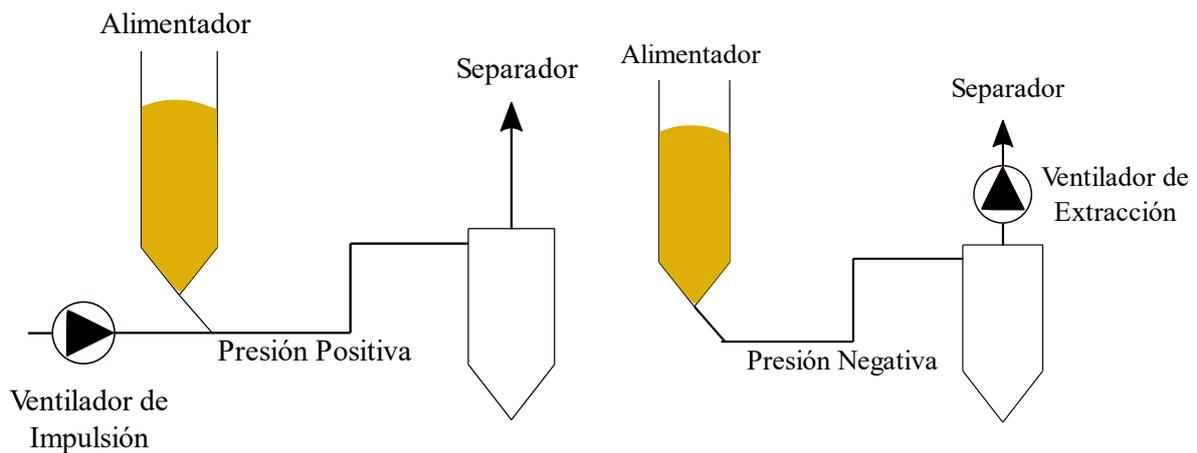


Figura 6.6 Configuración de transporte neumático con presión positiva y negativa
Fuente: Autor

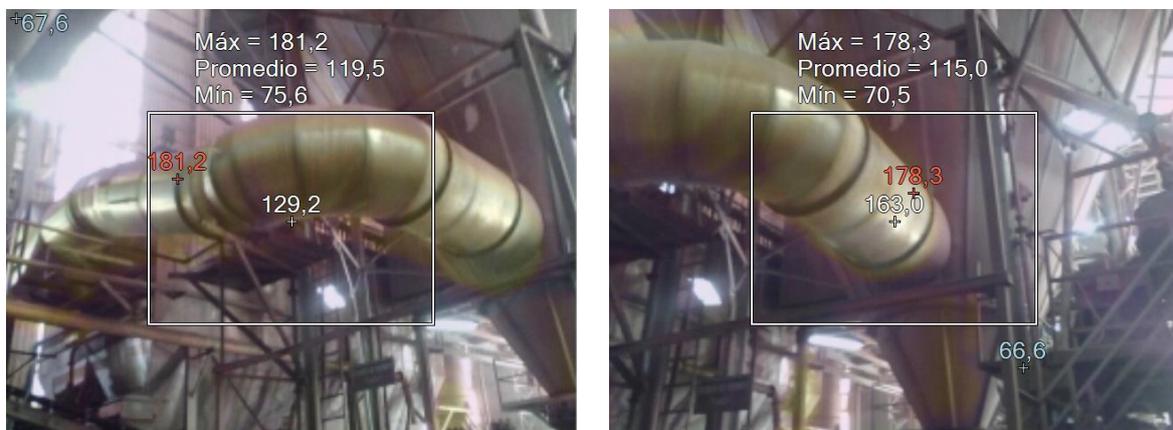


Figura 6.7 Termografía de ducto de transporte de material granulado desde alimentador hacia el separador
Fuente: Autor

❖ **Variables y Valoración del transporte neumático**

Variable	Valoración
Distancia	1000m
Capacidad de Carga	300toneladas/hora
Rangos de Pendientes	Ilimitado
Temperatura máx	En función del material del ducto
Materiales Tóxicos	OK
Materiales Higroscópicos	OK
Materiales Explosivos	OK
Materiales Abrasivos	No Recomendado
Materiales Cohesivos	No Recomendado
Materiales Mezclados	No Recomendado

Tabla 6.2 Variables y Valoración
Fuente: Autor

6.2.1.3 Elevadores de cangilones

Descripción

Un método de transporte usado principalmente para ascenso completamente vertical y en cielos abiertos. Si se transporta materiales cohesivos o adhesivos puede reducir su eficiencia, y si se transportan materiales abrasivos puede desgastar las paredes del cangilón.



Fuente: Metalmont [35]



Fuente: Meproza [36]

Figura 6.8 Elevadores de canguilones

Existen dos tipos de configuraciones de cangilones, los espaciados y continuos, su descripción se muestra en la figura 6.9 [34].

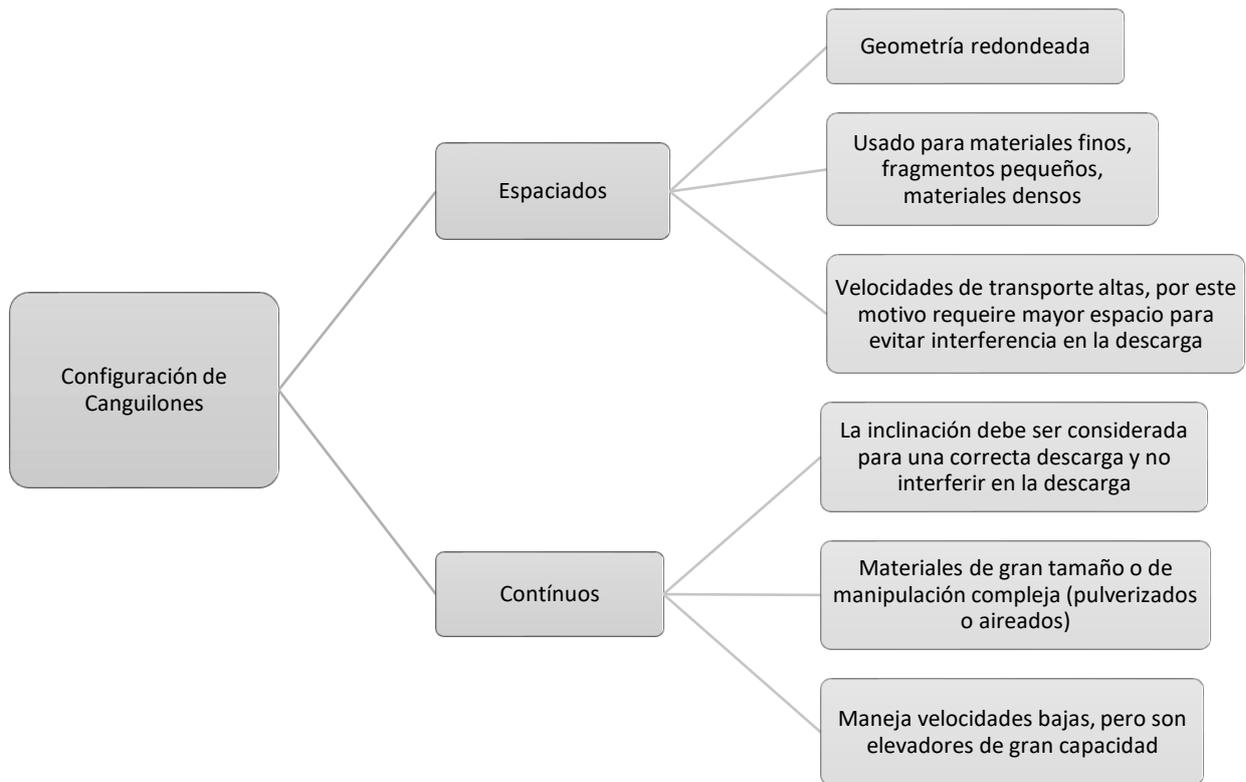


Figura 6.9 Configuración de cangilones

Fuente: Autor

Variables y Valoración de elevadores de cangilones

Variable	Valoración
Distancia	Ilimitado
Capacidad de Carga	Limitado por el tamaño del cangilón
Rangos de Pendientes	90°
Temperatura máx	En función del material del cangilón
Materiales Tóxicos	No Recomendado
Materiales Higroscópicos	No Recomendado
Materiales Explosivos	No Recomendado
Materiales Abrasivos	Con recubrimientos Interiores
Materiales Cohesivos	No Recomendado
Materiales Mezclados	OK

Tabla 6.3 Variables y Valoración

Fuente: Autor

6.2.2 Almacenamiento y Descarga

La operación de almacenamiento es otra operación que no agrega valor al producto, pero si no está bien planificado provocará pérdidas del valor del producto o en su cantidad.

El método más común es almacenarlo apilado y puede resultar el más económico si el material no se ve afectado por las condiciones del entorno. Sin embargo, si el material será afectado deberá ser almacenado en contenedores cerrados que aseguren que las condiciones del producto se mantengan estables.

En esta sección se dará a conocer algunas características de la operación de almacenamiento y además la operación de descarga, esto se divide a que cada uno tiene sus propias características y variables asociadas.

6.2.2.1 Descripción de Almacenamiento en Silos

Los silos son depósitos que pueden tener su sección en forma cilíndrica o prismática izada, generalmente vertical para almacenamiento estacionario y horizontal para transporte en tractocamión, ambos casos se ilustran en la figura 6.10.



Silos Verticales para almacenamiento estacionario
Fuente: AIMIX [37]



Silo horizontal, usado para transporte con tractocamión
Fuente: Altron Ingeniería [38]

Figura 6.10 Dos configuraciones de Silos de almacenamiento

Los silos pueden tener su base plana o en forma cónica, esta última más conocida como tolva, y en todos los casos se alimentan por la parte superior. Permiten el almacenamiento del material desde unos kilos hasta varias toneladas.

Variables y Valoración para el almacenamiento en silos

Si bien las variables de las propiedades del material son de mayor relevancia para el diseño del silo y su geometría para la descarga [39], existen también variables relevantes [40]–[42] a ser consideradas y se listan a continuación.

Variable	Valoración
Capacidad de Almacenamiento	Limitado por el tamaño
Conservación del Producto	No está contemplado para productos perecibles
Materiales Tóxicos	Recomendado con precauciones
Materiales Higroscópicos	Recomendado con precauciones
Materiales Explosivos	Recomendado con precauciones
Materiales Abrasivos	Con recubrimiento interior
Materiales Cohesivos	Con recubrimiento interior
Materiales Mezclados	Puede producirse segregación

Tabla 6.4 Variables y Valoración

Fuente: Autor

6.2.2.2 Descripción de Descarga

Luego de tener el material almacenado, debe ser descargado para un proceso siguiente o su despacho o lo que tenga que continuar en la línea. En el libro de diseño de silos consultado [15] indica que los ángulos de la tolva pueden variar dependiendo de las propiedades del material y la facilidad a ser descargado y/o vaciado, puesto que

en el caso de que material sea perecible y se haya estancado dentro del silo puede favorecer el crecimiento de bacterias u hongos [43].

Existen algunos problemas asociados a la descarga como son el arqueo o el agujero de ratón [7], [22] que provoca que el material se estanque y no tenga flujo constante. En la figura 6.11 se muestran estos dos problemas de descarga.

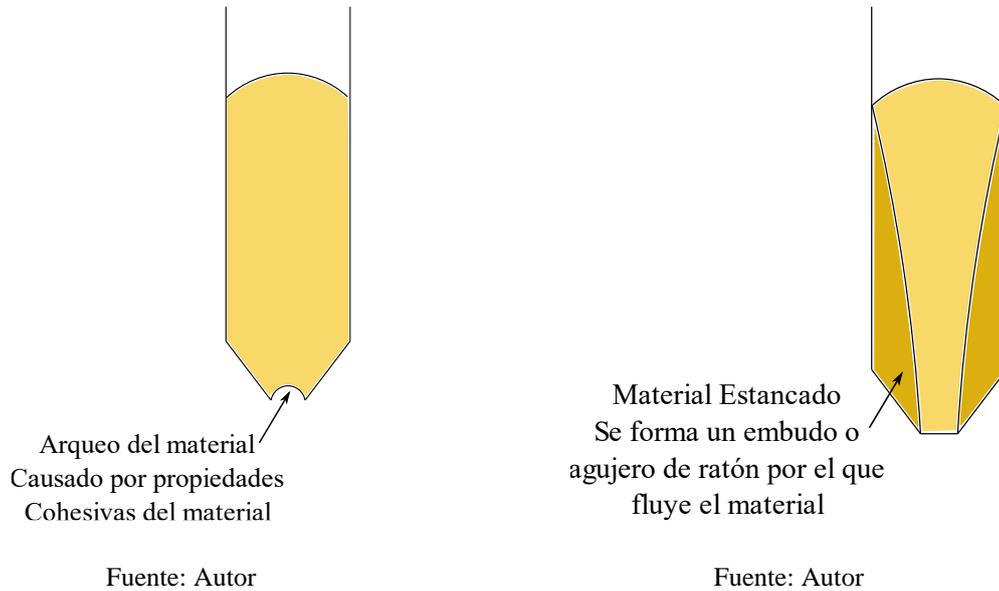


Figura 6.11 Problemas asociados a la descarga de material en la tolva de los silos

Debido a esto, se ha desarrollado varias ayudas para la descarga, todas ellas tienen la misión de desestabilizar la estructura estable del material que se forma, ya sea por arqueo o estancamiento como los describe el autor Schulze [22] y se presentarán a continuación.

6.2.2.3 Ayudas para la descarga del material

Schulze presenta [22] 6 alternativas con accesorios que se instalan en las paredes inclinadas de la tolva, todas ellas funcionan con aire comprimido y pueden funcionar inyectado aire comprimido para conseguir un lecho fluidizado (su definición se verá en la operación de 6.2.4 de fluidización) como en los casos a-d de la figura 6.12, haciendo vibrar una membrana flexible (e), o liberando bruscamente aire comprimido como en el caso (f).

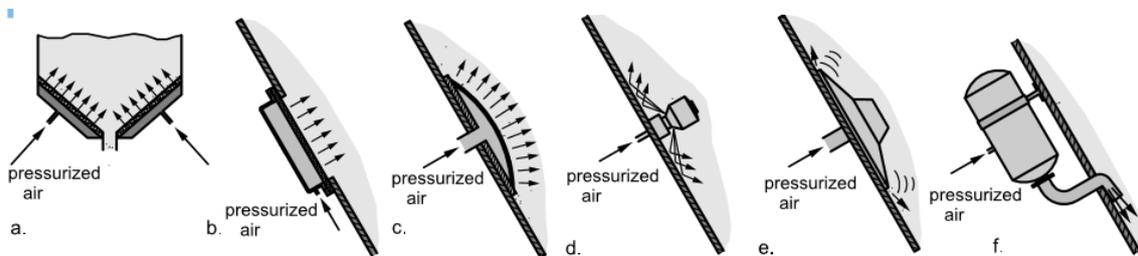


Figura 6.12 Ayuda para la descarga de silos

Fuente: Schulze [22]

VARIABLES Y VALORACIÓN PARA DESCARGA DE SILOS

Variable	Valoración
Ángulos de la tolva (eje horizontal)	30° - 60°, dependiendo de su cohesión
Materiales Tóxicos	Recomendado con precauciones
Materiales Higroscópicos	El aire debe ser secado
Materiales Explosivos	No recomendado
Materiales Abrasivos	OK
Materiales Cohesivos	Recomendado
Materiales Mezclados	Puede producirse segregación

Tabla 6.5 Variables y Valoración

Fuente: Autor

6.2.3 Reducción de Partículas

Con reducción de tamaño de partículas, se hace referencia a reducir el tamaño de los materiales granulares por medios mecánicos siendo los más usados en el medio la trituración para los más gruesos o de primera etapa y molienda para obtener partículas finas.

En esta etapa sí se agrega valor al producto, debido a que se produce un cambio en su tamaño llegando hasta el deseado para una aplicación específica.

Para su descripción se dividirá en dos grupos, el primero de trituración y el segundo de molienda, para ambos casos se indicarán sus variantes y aplicaciones.

6.2.3.1 Trituración

Para esta operación se utilizan trituradoras de diferentes tipos dependiendo del tamaño de partícula que se desee obtener. Estas máquinas son utilizadas como una etapa primaria para reducción de partículas dividiéndose según su necesidad, estos se basan principalmente en el impacto [44]. Existen cuatro tipos como se muestran en la figura 6.13 y se describirán muy brevemente a continuación.

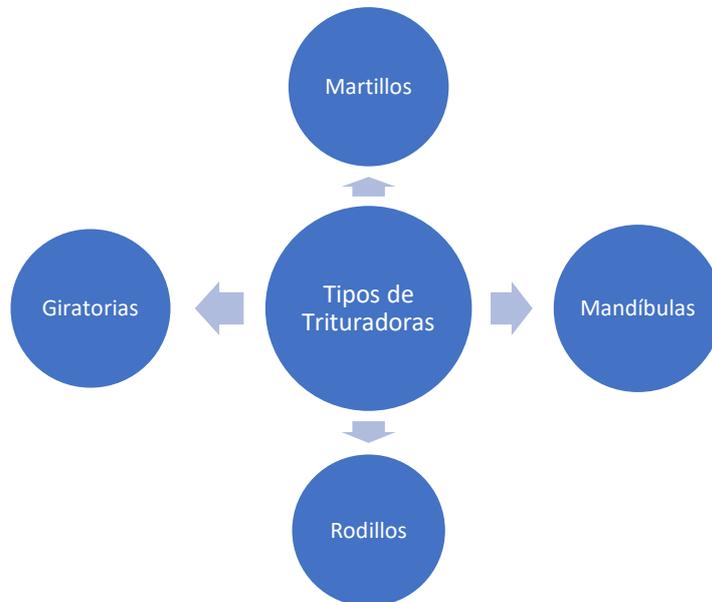


Figura 6.13 Tipos de Trituradoras

Fuente: Autor

Trituradora de rodillos

Desgarran y trituran materiales blandos como es el caso del carbón, madera, plástico, yeso, piedra de caliza, etc., Están formadas de dos rodillos paralelos dotados de cuchillas y el material ingresa por la parte superior [45] (figura 6.14).

Trituradora de Mandíbulas

Son equipos para triturar materia prima o de gran volumen (ejemplo, piedras de mina), están compuestos de dos placas o mandíbulas, una en posición vertical fijada al bastidor de la máquina, la segunda está articulada con un mecanismo que genera un movimiento de balancín, acercándose y alejándose de la fija. El material es alimentado por la parte superior y se desplaza en sentido vertical siendo triturado por la compresión entre las dos placas, producen hasta 600 toneladas/h de material triturado. [14]

En la figura 6.15. se muestra un ejemplo de este tipo de trituradora, conforme el material va descendiendo es reducido hasta volverlo lo suficientemente pequeño para caer a través de los espacio inferior entre las mandíbulas [44].

Trituradora de Martillos

Los martillos pueden ser oscilantes o fijos, son utilizadas como trituradoras primarias de un solo paso o como secundarias en el caso de productos procedentes de una primaria; son triturados mediante el impacto entre los martillos y las placas rompedoras, en la parte inferior del rotor se coloca una rejilla cilíndrica o una criba los cuales reciben el material con el tamaño suficiente para que pase a través de los espacios.

Los martillos se diseñan en forma simétrica y el tamaño del producto se regula mediante la separación de las barras de la rejilla o la apertura de la criba o alargando o reduciendo el tamaño de los brazos.

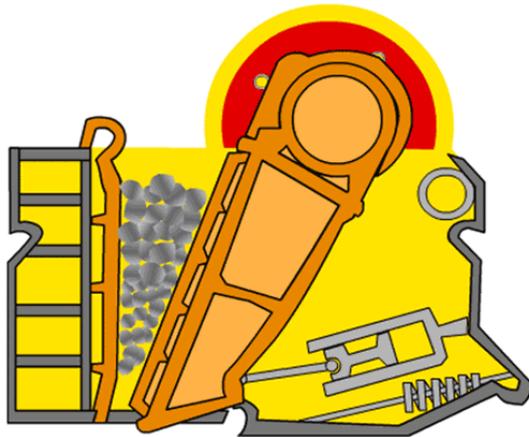
Trituradora giratoria (de cono)

Tiene forma cónica y sobre un eje excéntrico, tritura el material cuando el cono comprime el material sobre las paredes descendiendo hasta el tamaño que permita pasar la abertura inferior, su esquema se observa en la figura 6.17 el material, es una trituración secundaria para obtener materiales de menor tamaño y geometría muy regular como la grava [44].



Figura 6.14 Trituradora de rodillos con cuchillas

Fuente: LITech [46]



Vista Seccionada de una trituradora de mandíbulas
Fuente: Camelway [47]

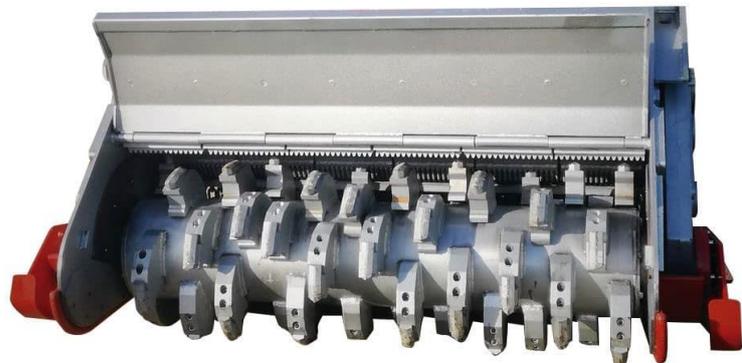


Vista externa de una trituradora de mandíbulas
Fuente: TECMAQ [48]

Figura 6.15 Trituradora de mandíbulas

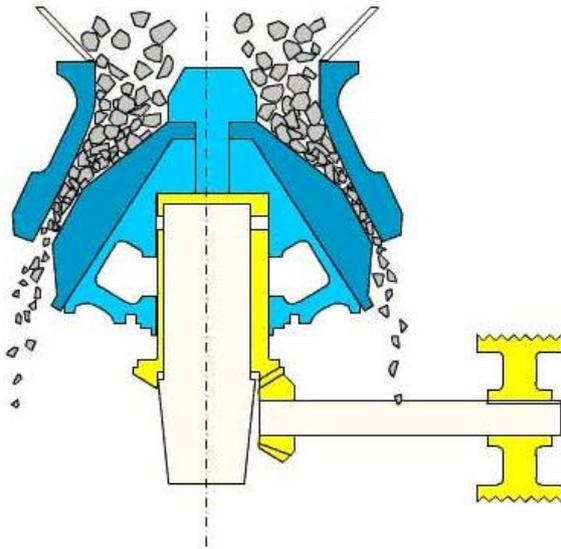


Vista seccionada de trituradora de martillos oscilantes
Fuente: Apuntes de Ingeniería Mecánica [49]



Vista exterior de una trituradora de Martillos fijos
Fuente: Ventura [50]

Figura 6.16 Trituradora de Martillos



Vista Seccionada de Trituradora de cono
Fuente: Unique [51]



Vista Exterior de Trituradora de Cono
Fuente: Symons [52]

Figura 6.17 Trituradora de Giratoria o de Cono

Variables y Valoración de Trituración

Trituradora	Materiales					Precisión Reducción
	Tipo	Explosivos	Tóxicos	Abrasivos	Mezclados	
Rodillos	Blandos	Con	Con			Alta
Mandíbulas	Duros	precauciones,	precauciones,	OK	Segregación	Media
Martillos	Duros	depende del	depende del			Alta
Cono	Duros	material	material			Muy Alta

Tabla 6.6 Variables y Valoración
Fuente: Autor

6.2.3.2 Molienda

Esta operación permite obtener partículas finas en rangos de $10\mu\text{m}$, existen varios tipos de molinos siendo el más usado en la industria el molino de bolas [44], debido a que al interior circula el material a ser molido junto con bolas de distintos tamaños y materiales. El proceso puede ser seco o húmedo y dependerá del material manejado. Puede tener una sola etapa o varias etapas como el mostrado en la figura 6.18 de dos etapas. En la primera etapa las bolas serán de mayor diámetro e irán reduciendo su tamaño conforme las partículas vayan avanzando en las distintas etapas.

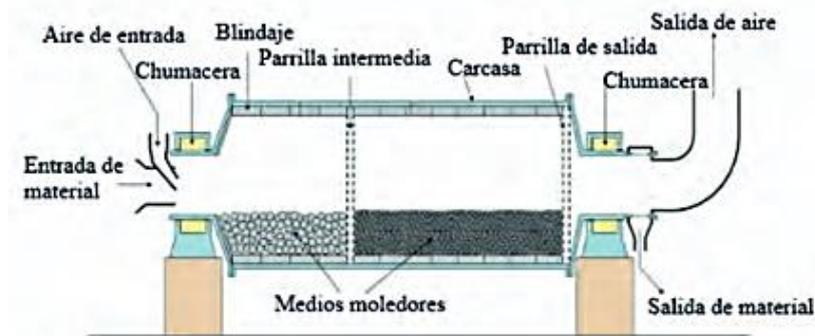


Figura 6.18 Molino de bolas
Fuente: Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias [53]

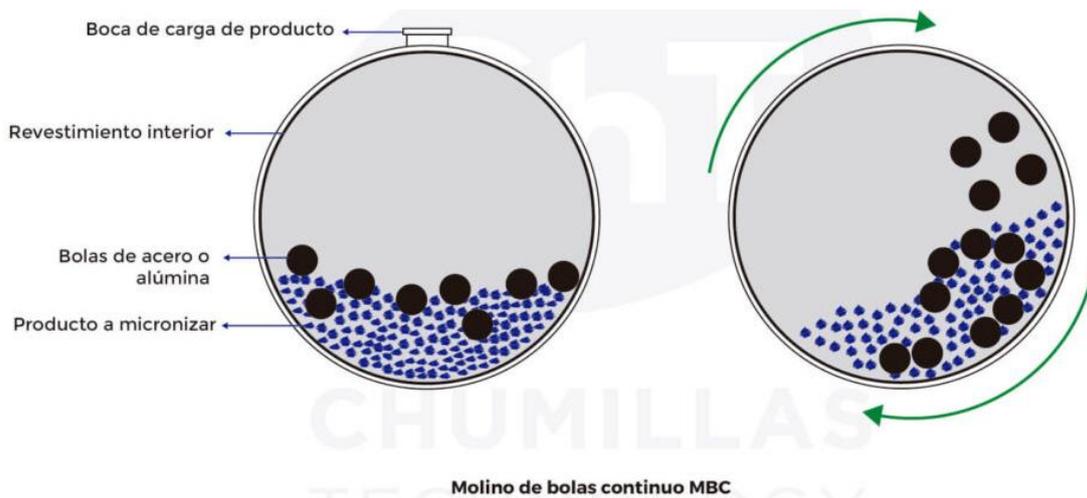


Figura 6.19 Operación de Molienda al interior del molino de bolas
Fuente: Chumillas Technolusy [54]

Variables y Valoración de Molienda

Molino	Tipo	Materiales				Precisión Reducción
		Explosivos	Tóxicos	Abrasivos	Mezclados	
Molino de bolas	Molienda final	Con precauciones, depende del material	Con precauciones, depende del material	OK	OK	Muy Alta

Tabla 6.7 Variables y Valoración
Fuente: Autor

6.2.4 Fluidización

Descripción de fluidización

Las partículas al ser empaquetadas dentro de un recipiente, su disposición permite un espacio vacío entre estas y puede ser llenado con gas a una presión mayor a la del recipiente, provocando una expansión proporcional a la presión y flujo de aire suministrado [21]. Esta expansión se denomina como lecho fluidizado, y es un término que fue usado en la sección de ayudas para la descarga.

En la figura 6.20 se muestra el funcionamiento del lecho fluidizado, al lado derecho se muestra una gráfica del incremento de presión frente a la velocidad de ingreso del aire (proporcional al flujo de aire). En los esquemas del lado izquierdo se muestra cómo se comportan las partículas de acuerdo al incremento de presión y flujo de aire; para que se inicie un lecho fluidizado debe superarse un valor mínimo de presión y flujo de aire, una vez superado este valor la presión se mantiene constante pero la velocidad seguirá incrementándose. Superada la velocidad mínima existirá un rango en el cual el lecho será estable, y al superar cierto valor de velocidad empezará con el transporte de partículas de forma neumática (transporte neumático se estudió en secciones anteriores).

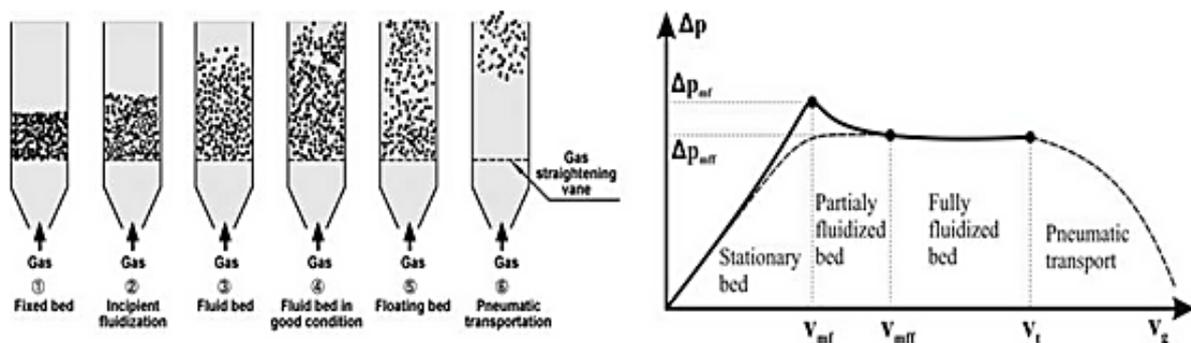


Figura 6.20 Funcionamiento del lecho fluidizado

Fuente: Madrid Blogs [55]

La fluidización en sí no aportaría un valor agregado al producto, pero dependiendo de su uso puede ser útil para separar partículas mezcladas por el efecto de segregación, mantener una descarga constante, minimizar la fricción de partículas sobre una superficie para favorecer su traslado, es usado también para incrementar la eficiencia de combustión [56] y en procesos químicos en reactores [57]. Es decir, la fluidización es un proceso unitario que puede funcionar de forma independiente del principio de funcionamiento de otras operaciones. Por tal motivo se le ha dado una sección y definición de variables de forma independiente.

Variables y Valoración de Fluidización

Operación	Materiales					
	Higroscópicos	Explosivos	Tóxicos	Abrasivos	Mezclados	Cohesivos
Fluidización	El aire debe ser secado	Con precauciones, depende del material	Con precauciones, depende del material	OK	Puede causar segregación	No Aplicable

Tabla 6.8 Variables y Valoración

Fuente: Autor

6.2.5 Separación

Con esta operación se busca conseguir la separación Líquido-Partícula o Gas-Partícula. El primero es más extenso en el área de plantas de tratamiento de aguas residuales y su proceso es más complejo por involucrar mezclas con químicos de sedimentación y medios mecánicos activos y pasivos [58]. En cuanto a Gas-Partículas es de uso muy extenso en el sector industrial, ya sea para recuperar las partículas o extraer partículas contaminantes.

Cuando se hace referencia a ventilación industrial, en los casos de contaminación del aire con partículas sólidas finas como: madera en aserríos, polvos metálicos por pulido en talleres de metalmecánica, polvos cerámicos cementicios, entre otras fuentes, al estar dispersos en el aire que absorben los ocupantes de un recinto, su salud estará comprometida si se tratan de materiales nocivos. Para estas condiciones un ingeniero mecánico diseña un sistema que tome en cuenta estos aspectos para capturar estas partículas y transportarlas para posteriormente ser tratada o desechada [59].

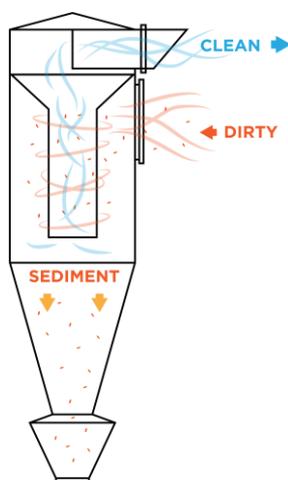
En el caso de recuperar partículas, es decir que es de mayor relevancia la partícula que el aire (gas) del medio, al igual que el caso anterior se capturan y se transportan para su almacenamiento.

Cualquiera que sea el caso, el método de separación comúnmente usado es el separador tipo ciclón y puede usar sistemas complementarios como filtros [60] para incrementar la eficiencia de recolección.

Descripción de separación con ciclones

Son dispositivos que no constan de partes móviles y por tanto más económicos, libres de mantenimiento, pueden usarse a temperaturas altas y se ubica en la parte final de un sistema de transporte neumático (figura 6.4) con presión positiva o negativa. Se instalan junto con los recolectores para el almacenamiento de polvos de procesos previos como molienda o para la separación del aire como en el caso de ventilación industrial. Los diámetros de estos dispositivos pueden variar desde unos centímetros hasta 10m, y sus concentraciones de alimentación desde 0,1kg/m³ hasta aproximadamente 50kg/m³, con velocidades del orden de 15 a 35m/s [32].

En la figura 6.21 se muestra la vista seccionada de un ciclón y el aspecto externo del mismo. Se puede notar la simplicidad del equipo, sin embargo se continúa investigando para incrementar la eficiencia de recolección de este dispositivo y como consecuencia incrementar eficiencia energética [61]–[64].



Aspecto interno de un ciclón industrial



Ubicación del ciclón en la línea de recolección

Figura 6.21 Ciclón de recolección

Fuente: Imperial Systems [65]

Variables y Valoración de Separación con Ciclones de Recolección

Operación	Materiales					
	Higroscópicos	Explosivos	Tóxicos	Abrasivos	Mezclados	Cohesivos
Separación	Mantener seco el contenedor de recolección	Aplicable con precaución	OK	Las paredes internas deben ser recubiertas para reducir desgaste	Puede causar segregación	No Aplicable

Tabla 6.9 Variables y Valoración
Fuente: Autor

Habiendo concluido con las distintas operaciones unitarias consideradas, y obtenido las variables que van a influir en las mismas, en la siguiente sección se definirán las propiedades reológicas de los materiales granulares que puedan influir en las variables y por lo tanto en cada una de las operaciones específicas.

VII. Características Reológicas de materiales Granulares para Operaciones Unitarias

7.1 Introducción

De acuerdo a Eugene Cook Bingham (1878–1945), la reología es el estudio del resultado de una fuerza externa sobre la fluidez de un material. De tal forma que en los materiales granulares, para conocer la fuerza o capacidad de fluidez, estas deberán ser identificadas para predecir su comportamiento frente a condiciones establecidas.

En esta sección se determinarán qué propiedades de estos materiales son las que influyen y se agruparán en las operaciones tomadas en consideración de la sección anterior, para finalmente describir estas propiedades y tener claro su concepto y su cuantificación o cualificación. No se profundizará en la forma de obtener su valoración para no alargar el contenido además de que no forma parte de lo perseguido por este proyecto, para esto está los textos de referencia y otras obras similares que darán mucho detalle.

7.2 Propiedades Reológicas y su influencia en Operaciones Unitarias

Existen varias propiedades de los materiales granulares que pueden ser definidas, para iniciar con esto se toma como referencia el autor Shamlou [33] y McGlinchey [21], quienes además ya relacionan estas propiedades con las operaciones unitarias así como los problemas que pueden ocasionar las mismas.

En la tabla 7.1 se indican las propiedades agrupadas por ambos autores. Coincidiendo en la mayoría de las propiedades, y cada uno tiene propiedades particulares.

Shamlou	McGlinchey
Tamaño, forma, distribución de tamaño y área superficial	Distribución del tamaño y área superficial específica Distribución de formas de partículas
Densidad volumétrica y de partícula	Densidad volumétrica
Dureza, compresibilidad	Relación y compresibilidad volumétrica
Flotabilidad	Flotabilidad
Propiedades cohesivas y fluidicidad	Propiedades de Falla y Ángulo de fricción Interno
Toxicidad, inflamabilidad y explosividad	Cohesión, rigidez y adhesividad
Ópticas, térmicas, magnéticas y características químicas	
Higroscopicidad	

Tabla 7.1 Propiedades de materiales granulares agrupadas por dos autores

Fuente: Autor

Shamlou agrupa además las operaciones unitarias y las relaciona con las propiedades como se muestra en la tabla 7.2, y la figura 6.4 se relaciona las propiedades y los posibles problemas que se pueden presentar con los materiales granulares.

Es posible notar que propiedades como el tamaño, densidad y forma influyen dentro de todas las operaciones unitarias y propiedades como cohesión y adhesividad está muy ligado a almacenamiento y descarga.

Operación Unitaria	Propiedad de partícula o volumétrica importante
Almacenamiento y descarga por gravedad de silos u otros contenedores	Tamaño, distribución de tamaño, forma, densidad de partículas y de empaquetamiento, propiedades cohesivas y friccionales, fluidicidad, flotabilidad, explosividad, toxicidad y compresibilidad
Transporte neumático y mecánico	Tamaño, distribución de tamaño y forma, densidad de partícula y de empaquetamiento, friabilidad, toxicidad, explosividad
Transporte Hidráulico	Tamaño, distribución de tamaño, densidad de partícula, friabilidad y dispersabilidad.

Tabla 7.2 Relación entre Operaciones unitarias y Propiedades de materiales granulares

Fuente: Adaptado de Shamlou [33]

7.3 Relación entre Propiedades y Operaciones unitarias consideradas en el proyecto

En la tabla 7.3 se presentan las variables que se relacionan entre las operaciones unitarias que se listaron en la sección anterior, para pasar a definir las e indicar los motivos de haberlas considerado como una propiedad relevante.

El criterio para la definición de las propiedades de si es o no de importancia, es la consideración de que la falta de ser identificado pueda dificultar las operaciones normales, es decir, que si no se cuenta con el dato se tendrán consecuencias o la eficiencia de la operación puede decaer. No se considerarán otras afectaciones como las estructurales o para el diseño del sistema como tal, por no ser parte del estudio y no alargar en extremo esta definición. Haría falta un estudio específico de la operación y del material a ser manejado, pero con el presente estudio se determinan cuáles deberán ser definidas y no caer en la falta de consideración o y enfrentar problemas del comportamiento del material durante la puesta en marcha u operación.

Operación Unitaria Enlistada	Tipo	Tamaño	Densidad	Forma	Higroscopia	Cohesividad	Adhesividad	Dureza	Friabilidad	Distribución de Tamaño	Toxicidad	Inflamabilidad
		Transporte	Banda	■	■							
	Neumático	■	■		■	■		■	■	■	■	■
	Cangilones	■	■				■					
Almacenamiento y Descarga		■	■			■	■			■	■	■
Reducción	Trituración	■	■	■				■				
	Molienda	■	■	■								
Fluidización		■	■		■	■	■			■	■	■
Separación	Gas-Sólido	■	■		■	■	■					

Tabla 7.3 Relación de las Propiedades Reológicas con las operaciones unitarias

Fuente: Autor

7.4 Definición de propiedades reológicas

Esta definición de propiedades reológicas se limitará a la definición muy puntual y práctica de las propiedades expuestas en la tabla 7.3, de esta información se podrá continuar con los fines específicos como puede ser valoración de activos, diseño, implementación de sistemas auxiliares, reacondicionamiento o recuperación, etc.

7.4.1 Tamaño de Partícula

Al hablar de materiales granulares se refiere a toda la gama de tamaños que deben ser identificados para poderlos calificar de manera conveniente y para poderlos estudiar. En la tabla 7.4 se muestran los rangos de tamaño junto con su denominación y además las características para el manejo de cada tamaño.

Rango de tamaño (μm)	Componente	A granel	Característica
30000 – 3000 Pero puede ser tan bajo como 1000 μm	Grano y volumen	Sólido fracturado	Fluye libremente, pero podría causar problemas de arqueo durante la descarga de contenedores y silos.
1000-100	Granulo	Sólido granular	Fácil de fluir, efectos cohesivos si el % de finos es alto.
< 100	Partícula	Polvo	
100 - 10	Partícula	Polvo granular	Puede mostrar efectos cohesivos y algunos problemas de manejo.
10 - 1	Partícula	Polvo extrafino	Altamente cohesivo; muy difícil de manejar.
< 1	Partícula	Polvo ultrafino	Extremadamente difícil (o imposible) de manejar.

Tabla 7.4 Clasificación de materiales granulares acorde a su tamaño

Fuente: Adaptado de Shamlou [33]

7.4.2 Densidad

Para la definición de la densidad, existe la clasificación de Geldart, que relaciona el tamaño de la partícula con su densidad, y además los relaciona con cuatro tipos de materiales que presentan características específicas.

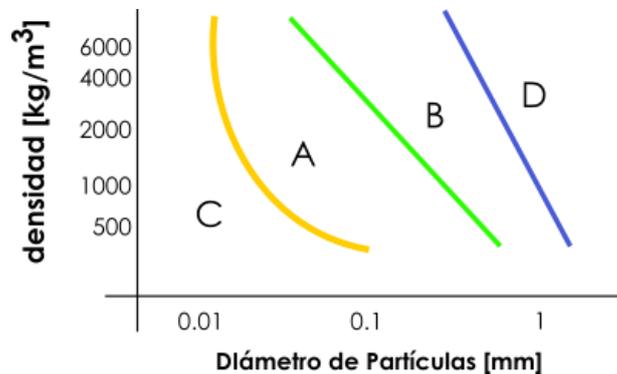


Figura 7.1 Densidad de partículas en función de su tamaño de acuerdo a la clasificación de Geldart

Fuente: Autor

- ❖ **Polvos tipo A:** Se denominan ligeramente cohesivos o de tipo catalizador, muestran gran expansión después de una fluidización mínima antes de la iniciación de burbujeo.

- ❖ **Polvos tipo B:** Son conocidos como arenas y se presenta burbujeante a la velocidad mínima de fluidización con una pequeña expansión del lecho. En este tipo, la velocidad mínima de fluidización es igual a la mínima velocidad de burbujeo para que las burbujas aparezcan inmediatamente con la expansión del lecho.
- ❖ **Polvos tipo C:** Llamados cohesivos son difíciles de fluidizar, cuando la expansión mínima supera la velocidad estos polvos no se expanden ni forman burbujas y el aire es liberado a través de grietas que se forman mediante caminos de canales irregulares dentro de su volumen de masa. No presentan ningún tipo de expansión debido a que la caída de presión a través del lecho es considerablemente menor que su peso sobre el área de la sección transversal.
- ❖ **Polvos tipo D:** Conocidos como granos, pueden formar camas estables con chorro si el aire se admite solo a través de una posición de agujero central.

7.4.3 Forma

La forma de las partículas puede ser muy variada y su caracterización tiene varios métodos definidos que lo pueden cualificar dentro de geometrías aceptadas [66]. Sin embargo, para los fines de este estudio se tomarán dos categorías que servirán luego para determinar el proceso para el cual se considera para la operación unitaria específica en la cual influye. Estas formas son:

- ❖ **Esférica.** Cuya forma se aproxima a una esfera, por ejemplo, las rocas que pueden ser trituradas por trituradora de mandíbulas, por tener mayor homogeneidad en su tamaño.
- ❖ **Plana.** Placas planas, en las cuales una de sus dimensiones es comparativamente menor que las otras dos, esta forma para operaciones como trituración, se podrá efectuar de mejor manera en una trituradora de martillos, con el antecedente de que por su bajo espesor podría no ser alcanzado por una trituradora de mandíbulas.

Existen otras geometrías como cúbicas, cilíndricas, piramidales, etc., pero se pueden aproximar a las dos formas primitivas que se han descrito. Existen herramientas computacionales (análisis DEM visto en las primeras secciones del documento) que permitirán detallar con precisión las formas macroscópicas más complejas como el paraboloides hiperbólico o silla de montar y mostrarán cuál será su interacción con otras partículas de igual geometría e incluso los puntos por los cuales se podría romper. Por lo que no se ha entrado en más detalle sobre la descripción de la forma de las partículas y con saber aproximar con claridad la más similar a las dos descritas dará información suficiente para el proceso involucrado.

7.4.4 Higroscopía

Particularmente para las operaciones unitarias descritas en la tabla 7.3, la higroscopía o capacidad de absorber humedad puede ser resuelta si el aire que se usa es tratado hasta los niveles que son aceptables para el material que se esté manejando [21]. Conocer esta información indicará que se deben usar secadores o cualquier dispositivo para mantener la humedad que evite cualquier alteración del material.

7.4.5 Adhesividad

La adhesión es la tendencia que presentan las partículas sólidas a pegarse a una superficie contenedora como una pared o una tolva; es medida a través del ángulo de reposo la cual toma a la superficie libre de un material a granel hacia arriba cuando se produce el deslizamiento gravitatorio [21]. Los valores de los ángulos de reposo y un esquema del ensayo se muestran en la tabla 7.5 y figura 7.2.

Ángulo de reposo	
Ángulo	Fluidez
25-30°	Muy fluido
30-38°	Fluye libremente
38-45°	Fluye con dificultad
45-55°	Adhesivo
>55°	Muy adhesivo

Tabla 7.5 Fluidez del material en función del ángulo de reposo
Fuente: McGlinchey [21]



Figura 7.2 Medición del ángulo de reposo
Fuente: McGlinchey [21]

7.4.6 Dureza

Esta propiedad es cuantificada en base a la escala de Mohs, y sus detalles se indican en la tabla 7.6. Para trituración es una variable relevante para los cálculos que se deben efectuar [21].

Escala de dureza de Mohs	Material	Concepto
1	Talco	Muy suave se puede pulverizar con el dedo.
2	Yeso	Maderablemente suave, cero polvos.
3	Calcita	Puede rascarse con la uña.
4	Fluorita	Puede rayar una moneda de cobre.
5	Apatito	Puede rayar la hoja de un cuchillo con dificultad.
6	Feldespato	Puede rayar la hoja de un cuchillo.
7	Cuarzo	
8	Topacio	Todos los productos más duros después de 6 rayarán el vidrio de la ventana.
9	Corundo	
10	Diamante	

Tabla 7.6 Escala de dureza de materiales granulares
Fuente: Ortega-Rivas [32]

7.4.7 Friabilidad

Esta es una propiedad cualitativa que indica la dificultad de fragmentación de las partículas, y para cuantificarlo se usa el índice de friabilidad con valores de 0 a 1, siendo 0 el más difícil de fragmentar [67].

Si se usa transporte neumático en donde es posible que se usen cambios de dirección, si el material se impacta en las paredes a la salida de un codo puede ocurrir que el material se fragmente (se deteriore si es el caso), o que desgaste las paredes del ducto [21].

7.4.8 Distribución de Tamaño

La distribución de tamaño de partículas en almacenamiento puede causar segregación. La segregación es la agrupación de partículas de tamaño y formas similares [68], a causa de que las partículas más finas pueden precipitarse o segregarse en el fondo del contenedor [21]. En la parte de fluidización o transporte neumático puede también facilitar la segregación por el movimiento que provoca en las partículas [22].

7.4.9 Toxicidad

Esta propiedad deberá ser identificada para poder diseñar un sistema completamente hermético, por lo que el único método que permite su manipulación para el transporte es un sistema neumático de circuito cerrado [21].

7.4.10 Inflamabilidad

Este efecto ocurre en materiales granulados cuyo tamaño es tan reducido que cualquier incremento de temperatura puede ser punto de ignición [69], y para poderlo transportar de igual manera es necesario aislar el material y eliminar la posibilidad de ignición con un gas inerte, es decir, usar un circuito cerrado y completo de transporte neumático [21].

Con todas las variables definidas y su descripción en base a las operaciones unitarias que se han considerado, se condensará la información para de un solo vistazo identificar variables y operaciones asociados a una operación específica.

VIII. Fichas de organización entre operaciones unitarias junto con sus variables y propiedades a considerar para conseguir resultados óptimos

8.1 Introducción

El aporte de este proyecto, es facilitar la identificación de qué va a influir en una determinada operación unitaria, cuál se podría considerar para una determinada etapa de un proceso (variables) y qué puede ocurrir con el material manejado (propiedades) para conseguir los resultados esperados y todo esto presentado en fichas.

Estas fichas estarán organizadas por proceso unitario, en caso de existir divisiones se detallarán las variables y propiedades para cada uno junto con las recomendaciones para conseguir el resultado esperado, pudiendo ser este: diseño básico del equipo para la operación puesto que el diseño en detalle dependerá de los requerimientos específicos del proyecto, establecimiento de las condiciones que debe cumplir con los sistemas que intervenga como por ejemplo el aire suministrado para las ayudas en la descarga, determinar las mejores condiciones para las facilidades o suministro de una operación. En resumen, al momento de iniciar un proyecto de diseño o consultoría que involucre materiales granulares, pueda tener respuesta inmediata o en un plazo muy corto para solventar una solicitud de un cliente.

Se agrega además las consideraciones que se debe tener en las operaciones para maximizar los resultados y ahorrar tiempo y los recursos involucrados, garantizando así el rendimiento esperado.

RESUMEN DE RECOMENDACIONES PARA MANEJO DE MATERIALES GRANULADOS Y CARACTERIZACIÓN ORIENTADO AL PROCESO INDUSTRIAL.

Elaborado por: Bermeo Vallejo J. **Fecha:** Septiembre 2022 **Estado:** **Ficha:** 1 de 1

TRANSPORTE

Tipos	Variables	Valoración	Propiedades a conocer	Comentarios
Banda	Distancia	Ilimitada	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño - Densidad - Toxicidad - Inflamabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar el detonante de inflamabilidad para mantenerlo aislado. - Tomar precauciones en toxicidad
	Capacidad de Carga	Limitada por los rodillos y la banda		
	Rangos de Pendientes	0° a 20°		
	Temperatura máxima	50°C (considerar el material de la banda)		
	Materiales Tóxicos	No Recomendado		
	Materiales Higroscópicos	No Recomendado		
	Materiales Explosivos	No Recomendado		
	Materiales Abrasivos	OK		
	Materiales Cohesivos	OK		
	Materiales Mezclados	OK		
Neumático	Distancia	1000m	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño - Densidad - Higroscopicidad - Cohesividad - Dureza - Friabilidad - Distribución de Tamaño - Toxicidad - Inflamabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar el detonante de inflamabilidad para mantenerlo aislado. - Puede usarse gas inerte - Para materiales abrasivos o corrosivos, usar recubrimiento en paredes internas para prolongar vida útil - Tomar precauciones en toxicidad
	Capacidad de Carga	300toneladas/hora		
	Rangos de Pendientes	Ilimitado		
	Temperatura máxima	En función del material del ducto		
	Materiales Tóxicos	OK		
	Materiales Higroscópicos	OK		
	Materiales Explosivos	OK		
	Materiales Abrasivos	No Recomendado		
	Materiales Cohesivos	No Recomendado		
	Materiales Mezclados	No Recomendado		
Cangilones	Distancia	Ilimitado	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño - Densidad - Adhesividad - Toxicidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar el detonante de inflamabilidad para mantenerlo aislado. - Tomar precauciones en toxicidad
	Capacidad de Carga	Limitado por el tamaño del cangilón		
	Rangos de Pendientes	90°		
	Temperatura máxima	En función del material del cangilón		
	Materiales Tóxicos	No Recomendado		
	Materiales Higroscópicos	No Recomendado		
	Materiales Explosivos	No Recomendado		
	Materiales Abrasivos	Con recubrimientos Interiores		
	Materiales Cohesivos	No Recomendado		
	Materiales Mezclados	OK		

RESUMEN DE RECOMENDACIONES PARA MANEJO DE MATERIALES GRANULADOS Y CARACTERIZACIÓN
ORIENTADO AL PROCESO INDUSTRIAL.

Elaborado por: Bermeo Vallejo J. **Fecha:** Septiembre 2022 **Estado:** **Ficha:** 1 de 1

ALMACENAMIENTO Y DESCARGA

Tipos	Variables	Valoración	Propiedades a conocer	Comentarios	
Almacenamiento	Capacidad de Almacenamiento	Limitado por el tamaño	- Tamaño - Higroscopicidad - Cohesividad - Distribución de Tamaño - Toxicidad - Inflamabilidad	- Determinar el detonante de inflamabilidad para mantenerlo aislado. - Puede usarse gas inerte - Para materiales abrasivos o corrosivos, usar recubrimiento en paredes internas para prolongar vida útil - Tomar precauciones en toxicidad	
	Conservación del Producto	No está contemplado para productos perecibles			
	Materiales Tóxicos	Con precauciones, depende del material			
	Materiales Higroscópicos	Recomendado con precauciones			
	Materiales Explosivos	Recomendado con precauciones			
	Materiales Abrasivos	Con recubrimiento interior			
	Materiales Cohesivos	Con recubrimiento interior			
	Materiales Mezclados	Puede producirse segregación			
Descarga	Ángulos de la tolva (eje horizontal)	30° - 60°, dependiendo de su cohesión		- Toxicidad - Inflamabilidad	- Determinar el detonante de inflamabilidad para mantenerlo aislado. - Puede usarse gas inerte - Para materiales abrasivos o corrosivos, usar recubrimiento en paredes internas para prolongar vida útil - Tomar precauciones en toxicidad
	Materiales Tóxicos	Recomendado con precauciones			
	Materiales Higroscópicos	El aire debe ser secado			
	Materiales Explosivos	No recomendado			
	Materiales Abrasivos	OK			
	Materiales Cohesivos	Recomendado			
	Materiales Mezclados	Puede producirse segregación			

RESUMEN DE RECOMENDACIONES PARA MANEJO DE MATERIALES GRANULADOS Y CARACTERIZACIÓN ORIENTADO AL PROCESO INDUSTRIAL.

Elaborado por: Bermeo Vallejo J. **Fecha:** Septiembre 2022 **Estado:** **Ficha:** 1 de 2

REDUCCIÓN

Tipos	Variables	Valoración	Propiedades a conocer	Comentarios	
Trituración Rodillos	Tipo de Materiales	Blandos	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño - Forma - Dureza - Toxicidad - Inflamabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar el detonante de inflamabilidad para mantenerlo aislado. - Tomar precauciones en toxicidad 	
	Materiales Explosivos	Con precauciones, depende del material			
	Materiales Tóxicos	Con precauciones, depende del material			
	Materiales Abrasivos	OK			
	Materiales Mezclados	Segregación			
	Relación de Reducción	Alta			
Trituración Mandíbulas	Tipo de Materiales	Duros		<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño - Forma - Dureza - Toxicidad - Inflamabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - No usar para formas tipo placa - Determinar el detonante de inflamabilidad para mantenerlo aislado. - Tomar precauciones en toxicidad
	Materiales Explosivos	Con precauciones, depende del material			
	Materiales Tóxicos	Con Precauciones, depende del material			
	Materiales Abrasivos	OK			
	Materiales Mezclados	Segregación			
	Relación de Reducción	Media			
Trituración Martillos	Tipo de Materiales	Duros	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño - Forma - Dureza - Toxicidad - Inflamabilidad 		<ul style="list-style-type: none"> - Usar para formas tipo placa - Determinar el detonante de inflamabilidad para mantenerlo aislado. - Tomar precauciones en toxicidad
	Materiales Explosivos	Con precauciones, depende del material			
	Materiales Tóxicos	Con Precauciones, depende del material			
	Materiales Abrasivos	OK			
	Materiales Mezclados	Segregación			
	Relación de Reducción	Alta			

RESUMEN DE RECOMENDACIONES PARA MANEJO DE MATERIALES GRANULADOS Y CARACTERIZACIÓN
ORIENTADO AL PROCESO INDUSTRIAL.

Elaborado por: Bermeo Vallejo J. **Fecha:** Septiembre 2022 **Estado:** **Ficha:** 2 de 2

REDUCCIÓN

Tipos	Variables	Valoración	Propiedades a conocer	Comentarios
Trituración Cono (Rotativa)	Tipo de Materiales	Blandos	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño - Forma - Dureza - Toxicidad - Inflamabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - No usar para formas tipo placa - Determinar el detonante de inflamabilidad para mantenerlo aislado. - Tomar precauciones en toxicidad
	Materiales Explosivos	Con precauciones, depende del material		
	Materiales Tóxicos	Con Precauciones, depende del material		
	Materiales Abrasivos	OK		
	Materiales Mezclados	Segregación		
	Relación de Reducción	Muy Alta		
Molienda	Tipo de Materiales	Molienda Final	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño - Forma - Toxicidad - Inflamabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar el detonante de inflamabilidad para mantenerlo aislado. - Tomar precauciones en toxicidad
	Materiales Explosivos	Con precauciones, depende del material		
	Materiales Tóxicos	Con Precauciones, depende del material		
	Materiales Abrasivos	OK		
	Materiales Mezclados	OK		
	Relación de Reducción	Muy Alta		

RESUMEN DE RECOMENDACIONES PARA MANEJO DE MATERIALES GRANULADOS Y CARACTERIZACIÓN
ORIENTADO AL PROCESO INDUSTRIAL.

Elaborado por: Bermeo Vallejo J. **Fecha:** Septiembre 2022 **Estado:** **Ficha:** 1 de 1

FLUIDIZACIÓN

Tipos	Variables	Valoración	Propiedades a conocer	Comentarios
Fluidización	Materiales Higroscópicos	El aire debe ser secado	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño - Densidad - Higroscopía - Cohesividad - Adhesividad - Toxicidad - Inflamabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar el detonante de inflamabilidad para mantenerlo aislado. - Puede usarse gas inerte - Tomar precauciones en toxicidad
	Materiales Explosivos	Con precauciones, depende del material		
	Materiales Tóxicos	Con Precauciones, depende del material		
	Materiales Abrasivos	OK		
	Materiales Mezclados	Segregación		
	Materiales Cohesivos	No Aplicables		

RESUMEN DE RECOMENDACIONES PARA MANEJO DE MATERIALES GRANULADOS Y CARACTERIZACIÓN ORIENTADO AL PROCESO INDUSTRIAL.

Elaborado por: Bermeo Vallejo J. **Fecha:** Septiembre 2022 **Estado:** **Ficha:** 1 de 1

SEPARACION – CICLONES DE RECOLECCION

Tipos	Variables	Valoración	Propiedades a conocer	Comentarios
Sólido – Gas. Ciclones de recolección	Materiales Higroscópicos	Mantener Seco Contenedor de recolección	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño - Higroscopía - Toxicidad - Cohesividad - Inflamabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar el detonante de inflamabilidad para mantenerlo aislado. - Puede usarse gas inerte - Para materiales abrasivos o corrosivos, usar recubrimiento en paredes internas para prolongar vida útil
	Materiales Explosivos	Con precauciones, depende del material		
	Materiales Tóxicos	Con Precauciones, depende del material		
	Materiales Abrasivos	Las paredes internas deben estar recubiertas		
	Materiales Mezclados	Segregación		
	Materiales Cohesivos	No Aplicables		

IX. Conclusiones y Recomendaciones

Al finalizar el presente proyecto, las conclusiones y recomendaciones se detallan a continuación:

❖ Conclusiones

- De entre todos los libros y publicaciones que se han revisado para presentar la información en este documento, muchos entran de lleno con modelos matemáticos, otros aportan abundante información de los procesos unitarios o propiedades de los materiales granulares, pero resulta imposible desarrollar un proyecto de ingeniería mecánica que tenga iteración directa con estos materiales sin entender su comportamiento, y obtener la información directa de la literatura especializada exige tiempo, el cual un cliente no dispone o no puede esperar. Es por tal motivo que se han sintetizado, condensado y resumido la abundante información que se ha encontrado para presentarla de forma muy compacta y tener claro lo que se necesita conocer sin ser experto en materiales granulares o procesos unitarios de su manejo.
- Se ha presentado únicamente variables que involucran los procesos unitarios, no se ha hecho una revisión profunda en temas dinámicos o de resistencia de materiales por no ser parte de los objetivos. Todas las variables se han relacionado con el manejo de estos materiales para establecer la manera más apropiada una operación que funcione de forma óptima tanto para el proceso como el uso de recursos.
- En cuanto a las propiedades, de igual manera se presentaron las que tengan relación con las variables previamente definidas. No se profundizó en cómo se cuantifican o cualifican porque se busca conocer y entender el comportamiento del material en base a sus propiedades más no el cómo obtenerlos.
- Todas las tablas presentadas son aplicables de forma general, pero la influencia de las propiedades o variables para las operaciones especificadas en cada una tendrá influencia directa en los resultados obtenidos. Para un material en específico se deberán conseguir los datos de las propiedades presentadas y relacionarlas con las variables para conseguir los resultados esperados.

❖ Recomendaciones

- Considerando que los materiales granulares existen en todas las áreas de interacción humana, se recomienda usar la información del presente documento para desarrollar proyectos en los cuales el comportamiento de estos materiales pueda afectar el resultado esperado y analizarlos usando para ello la información presentada.
- Este estudio puede además ser usado como base para estudiar casos usando simulación basada en elementos discretos o DEM, los cuales permiten simular una operación unitaria de forma dinámica interactuando tanto el efecto entre las partículas como el efecto de las partículas con las paredes. Pudiendo optimizar equipos o maquinaria desde el punto de vista estructural, pero para ello de igual manera es imprescindible conocer las propiedades que intervengan en cada operación y las condiciones dinámicas del sistema en estudio.

X. Referencias

- [1] H. M. Jaeger, S. R. Nagel, y R. P. Behringer, «Granular solids, liquids, and gases», *Rev. Mod. Phys.*, vol. 68, n.º 4, pp. 1259-1273, oct. 1996, doi: 10.1103/RevModPhys.68.1259.
- [2] J. W. Park, R. f. Testin, P. J. Vergano, H. j. Park, y C. l. Weller, «Application of Laminated Edible Films to Potato Chip Packaging», *J. Food Sci.*, vol. 61, n.º 4, pp. 766-768, 1996, doi: 10.1111/j.1365-2621.1996.tb12200.x.
- [3] J. Darias, «LOS MATERIALES GRANULARES: UNA MIRADA AL INTERIOR DEL PIMENTERO», *Acta Científica Venez.*, vol. 65, pp. 62-72, ene. 2014.
- [4] M. D. del Río, *Manual de maquinaria de construcción, 2a Ed.* McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2007.
- [5] Z. Zhang, M. K. Nielsen, S. Hørsholt, G. Muralidharan, y J. B. Jørgensen, «Digitalization, Control and Optimization for Cement Plants», en *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 50, M. Türkay y R. Gani, Eds. Elsevier, 2021, pp. 1319-1324. doi: 10.1016/B978-0-323-88506-5.50203-5.
- [6] J. Visser, «Van der Waals and other cohesive forces affecting powder fluidization», *Powder Technol.*, vol. 58, n.º 1, pp. 1-10, may 1989, doi: 10.1016/0032-5910(89)80001-4.
- [7] A. Cannavacciuolo, D. Barletta, G. Donsì, G. Ferrari, y M. Poletto, «Arch-Free flow in aerated silo discharge of cohesive powders», *Powder Technol.*, vol. 191, n.º 3, pp. 272-279, abr. 2009, doi: 10.1016/j.powtec.2008.10.013.
- [8] M. J. Rhodes, *Introduction to Particle Technology*. John Wiley & Sons, 2008.
- [9] Janaina Camile Pasqua, Harry Alberto Bollmann, y Christopher Scott, «Water-Energy-Food Nexus: Background and Perspectives for Brazil and the United States by 2050», *J. Agric. Sci. Technol. B*, vol. 6, n.º 2, feb. 2016, doi: 10.17265/2161-6264/2016.02.006.
- [10] A. F. Salazar, «Estudio sobre la compactación de materiales granulares para la manufactura de comprimidos», p. 68.
- [11] L. Dorador, «Estimación de Densidad de Materiales Quebrados en Minería de Hundimiento (Block/Panel Caving)», p. 11, 2018.
- [12] L. Dorador, «Consideraciones en la Caracterización Geotécnica de Materiales Granulares Gruesos», p. 11, 2018.
- [13] M. Baldini *et al.*, «Mecánica de materiales granulares y aplicaciones», p. 1.
- [14] M. L. Castelló Gómez, M. C. Barrera Puigdollers, E. Pérez Esteve, y N. Betoret Valls, «Reducción del tamaño de partícula y tamizado de partículas», jun. 2017, Accedido: 22 de octubre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/82132>
- [15] J. R. Catalán, *Silos*. Reverte, 1998.
- [16] J. Neto y J. Nascimento, «Características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais», *Rev. Bras. Eng. Agríc. E Ambient.*, vol. 17, pp. 339-345, mar. 2013, doi: 10.1590/S1415-43662013000300014.
- [17] R. D. Marcus, L. S. Leung, G. E. Klinzing, y F. Rizk, «Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical and Practical Approach», *Dry. Technol.*, vol. 11, n.º 4, pp. 859-860, ene. 1993, doi: 10.1080/07373939308916871.
- [18] M. Glor, «Ignition hazard due to static electricity in particulate processes», *Powder Technol.*, vol. 135-136, pp. 223-233, oct. 2003, doi: 10.1016/j.powtec.2003.08.017.
- [19] S. Enferad *et al.*, «Effect of particle size and formulation on powder rheology», *Part. Sci. Technol.*, vol. 39, n.º 3, pp. 362-370, mar. 2021, doi: 10.1080/02726351.2020.1738605.
- [20] J. Fruchtbaum, *Bulk Materials Handling Handbook*. Springer US, 1988. doi: 10.1007/978-1-4757-4695-2.
- [21] «Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation | Wiley», *Wiley.com*. <https://www.wiley.com/en-us/Bulk+Solids+Handling%3A+Equipment+Selection+and+Operation-p-9781405158251> (accedido 12 de septiembre de 2022).
- [22] *Powders and Bulk Solids*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-73768-1.
- [23] J. Darias, «LOS MATERIALES GRANULARES: UNA MIRADA AL INTERIOR DEL PIMENTERO», *Acta Científica Venez.*, vol. 65, pp. 62-72, ene. 2014.
- [24] S. McNamara y W. R. Young, «Inelastic collapse in two dimensions», *Phys. Rev. E*, vol. 50, n.º 1, pp. R28-R31, jul. 1994, doi: 10.1103/PhysRevE.50.R28.
- [25] D. A. Augenstein y R. Hogg, «Friction factors for powder flow», *Powder Technol.*, vol. 10, n.º 1, pp. 43-49, jul. 1974, doi: 10.1016/0032-5910(74)85030-8.
- [26] L. F. Tenas López, «Mejora del índice de mezcla de fármacos sólidos granulares a través de la reducción de tiempo de mezclado para una empresa farmacéutica», other, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2017. Accedido: 22 de octubre de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>

- [27] M. Juliá Medina, «Caracterización de polvos deshidratados obtenidos a partir de bagazo de arándano y valoración de su utilización como ingrediente funcional», oct. 2017, Accedido: 22 de octubre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/89432>
- [28] M. Moya, F. Ayuga, M. Guatia, y P. J. Aguado, «Determinación de las características mecánicas de materiales agrícolas granulares aplicables al cálculo de silos por métodos numéricos», *Rev. Digit. Cedex*, n.º 125, Art. n.º 125, ene. 2002.
- [29] V. Anton Tasayco, «Estudio del manejo de materiales granulares en la industria minera mediante el método de elementos discretos», *Pontif. Univ. Católica Perú*, nov. 2019, Accedido: 22 de octubre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/15429>
- [30] G. Arévalo-Mendoza, A. M. Ramos-Cañón, y L. F. Prada-Sarmiento, «Análisis de confiabilidad en un modelo de descarga de silos de almacenamiento mediante el Método de Elementos Discretos DEM», *Obras Proy.*, n.º 15, pp. 21-30, 2014, doi: 10.4067/S0718-28132014000100002.
- [31] C. E. Guamushig Gualotuña, «Modelamiento y simulación multifísica de materiales granulares», abr. 2016, Accedido: 22 de octubre de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15864>
- [32] E. Ortega-Rivas, *Unit Operations of Particulate Solids: Theory and Practice*. Taylor & Francis, 2011. doi: 10.1201/b11059.
- [33] «Handling of Bulk Solids - 1st Edition». <https://www.elsevier.com/books/handling-of-bulk-solids/shamlou/978-0-407-01180-9> (accedido 8 de septiembre de 2022).
- [34] David, «Conveyor Belts», *Metallurgist & Mineral Processing Engineer*, 20 de enero de 2017. <https://www.911metallurgist.com/conveyor-belts> (accedido 14 de septiembre de 2022).
- [35] «Elevador de cangilones para semillas, cereales y granos - Serie ET», *Metalmont Srl*. <https://metalmont.it/es/productos/elevadores-de-cangilones/> (accedido 14 de septiembre de 2022).
- [36] «Funcionamiento del elevador de cangilones en la industria agroalimentaria | Meprosa», 24 de agosto de 2019. <https://meprosa.mx/funcionamiento-del-elevador-de-cangilones-en-la-industria-agroalimentaria/> (accedido 14 de septiembre de 2022).
- [37] «Silos De Almacenamiento de Granos - AIMIX Grupo Fabricante Profesional», *AIMIX Grupo*. <https://aimixgrupo.com.mx/silos-de-almacenamiento-de-granos/> (accedido 14 de septiembre de 2022).
- [38] «Cisterna para Transporte de Cemento a Granel». <http://www.altroningeneria.com/cisterna-para-transporte-de-cemento-a-granel> (accedido 14 de septiembre de 2022).
- [39] R. K. Eckhoff y P.-G. Leversen, «A further contribution to the evaluation of the Jenike method for design of mass flow hoppers», *Powder Technol.*, vol. 10, n.º 1, pp. 51-58, jul. 1974, doi: 10.1016/0032-5910(74)85031-X.
- [40] A. Dyrøy, M. Karlsen, G. G. Enstad, y S. de Silva, «A system for the reduction of air current segregation in silos», en *Handbook of Powder Technology*, vol. 10, A. Levy y H. Kalman, Eds. Elsevier Science B.V., 2001, pp. 623-630. doi: 10.1016/S0167-3785(01)80064-6.
- [41] R. K. Eckhoff, «Chapter Seven - Dust Explosions», en *Explosion Hazards in the Process Industries (Second Edition)*, R. K. Eckhoff, Ed. Gulf Professional Publishing, 2016, pp. 253-383. doi: 10.1016/B978-0-12-803273-2.00007-4.
- [42] T. Tefera *et al.*, «The metal silo: An effective grain storage technology for reducing post-harvest insect and pathogen losses in maize while improving smallholder farmers' food security in developing countries», *Crop Prot.*, vol. 30, n.º 3, pp. 240-245, mar. 2011, doi: 10.1016/j.cropro.2010.11.015.
- [43] Th. Schuricht, Ch. Füll, y G. G. Enstad, «Full scale silo tests and numerical simulations of the „cone in cone” concept for mass flow», en *Handbook of Powder Technology*, vol. 10, A. Levy y H. Kalman, Eds. Elsevier Science B.V., 2001, pp. 175-180. doi: 10.1016/S0167-3785(01)80019-1.
- [44] H. Masuda, K. Higashitani, y H. Yoshida, *Powder Technology Handbook*. CRC Press, 2006.
- [45] F. VASCONEZ-BASANTES, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO DE LOS RESIDUOS DE PODA DE LA ESPOCH.», 2015.
- [46] «Trituradora de rodillos», *LITech GmbH*. <https://litech-eu.com/es/roll-crusher/> (accedido 14 de septiembre de 2022).
- [47] Elon, «Trituradora de mandíbulas en Venta», *IP LLC «CAMELWAY Perú»*, 26 de mayo de 2020. <https://www.camelway.pe/noticias/trituradora-de-mandibulas-en-venta.html> (accedido 14 de septiembre de 2022).
- [48] «TECMAQ S.R.L - Maquinaria y Equipos para Minería, procesamiento de áridos y suelos.» <https://www.tecmaqsr.com/html/section/productos/proceso-de-trituracion> (accedido 14 de septiembre de 2022).

- [49] I. J. C. M. R., «APUNTES DE INGENIERIA MECANICA: TRITURADORAS DE IMPACTO I», *APUNTES DE INGENIERIA MECANICA*, 17 de abril de 2014. <https://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2014/04/trituradoras-de-impacto-i.html> (accedido 14 de septiembre de 2022).
- [50] «TFMFH - AWASH - Trituradora forestal de martillos fijos de widia para excavadora de 25 a 40tn - Ventura Máquinas Forestales». <https://www.venturamaq.com/es/trituradoras-para-excavadoras/tfmfh-awash-trituradora-forestal-de-martillos-fijos-de-widia-para-excavadora-de-25-a-40tn/> (accedido 14 de septiembre de 2022).
- [51] «trituradora de cono tipo, el rendimiento del cono triturador - ¿Cómo funciona la trituradora de cono». <http://www.stonecrushern.com/es/cone-crusher-works.html#.YyHsUbTMLIU> (accedido 14 de septiembre de 2022).
- [52] «TRITURADORA DE CONO SYMONS», en *Peru Lima Cusco Arequipa Trujillo Puno Tacna :: Venta y Compra*, 2 de julio de 2018. <http://larevista.aqpsoluciones.com/2018/07/02/trituradora-de-cono-symons-2/> (accedido 14 de septiembre de 2022).
- [53] M. A. O. Ramírez, I. D. F. Valdés, y D. G. U. Sosa, «Evaluación de la integridad estructural de un molino de bolas usando elemento finito», vol. 25, n.º 2, p. 12, 2016.
- [54] «Sistema de micronización MCB», *CHUMILLAS TECHNOLOGY*. <https://www.chumillastechnology.com/productos/sistema-de-micronizacion-mbc/> (accedido 14 de septiembre de 2022).
- [55] «Reactor de lecho fluidizado solarizados - Energía y Sostenibilidad», 2 de diciembre de 2016. <https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2016/12/02/133311> (accedido 14 de septiembre de 2022).
- [56] J. R. Howard, «Fluidized beds: combustion and applications», ene. 1983, Accedido: 14 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/5205264>
- [57] J. Werther, «Fluidized-Bed Reactors», en *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, John Wiley & Sons, Ltd, 2007. doi: 10.1002/14356007.b04_239.pub2.
- [58] R. G. Holdich, A. Rushton, y A. S. Ward, *Solid-Liquid Filtration and Separation Technology*. John Wiley & Sons, 2008.
- [59] H. D. Goodfellow y E. Tahti, *Industrial Ventilation Design Guidebook*. Academic Press, 2001.
- [60] J. R. Couper, W. R. Penney, J. R. Fair, y S. M. Walas, Eds., «Chapter 20 - Gas-Solid Separations», en *Chemical Process Equipment (Second Edition)*, Burlington: Gulf Professional Publishing, 2005, pp. 693-718. doi: 10.1016/B978-075067510-9/50052-8.
- [61] M. E. Moore y A. R. McFarland, «Design Methodology for Multiple Inlet Cyclones», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 30, n.º 1, pp. 271-276, dic. 1996, doi: 10.1021/es950302e.
- [62] J. G. Valdez, L. D. Pérez, R. Cabello, W. A. Blanco, G. Lombano, y J. Segura, «Experimental Evaluation of a Gas Liquid Axial Cyclone Separator», presentado en SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, nov. 2015. doi: 10.2118/177183-MS.
- [63] M. B. Ray, P. E. Luning, A. C. Hoffmann, A. Plomp, y M. I. L. Beumer, «Improving the removal efficiency of industrial-scale cyclones for particles smaller than five micrometre», *Int. J. Miner. Process.*, vol. 53, n.º 1, pp. 39-47, feb. 1998, doi: 10.1016/S0301-7516(97)00055-0.
- [64] S. Pirker, D. Kahrmanovic, y G. Aichinger, «Modeling mass loading effects in industrial cyclones by a combined Eulerian-Lagrangian approach», *Acta Mech.*, vol. 204, n.º 3, pp. 203-216, may 2009, doi: 10.1007/s00707-008-0086-7.
- [65] «Cyclone Dust Collectors», *Imperial Systems, Inc.* <https://www.isystemsweb.com/dust-collection-equipment/cyclone-dust-collectors/> (accedido 15 de septiembre de 2022).
- [66] B. H. Kaye, «Particle Shape Characterization», en *Handbook of Powder Science & Technology*, M. E. Fayed y L. Otten, Eds. Boston, MA: Springer US, 1997, pp. 35-52. doi: 10.1007/978-1-4615-6373-0_2.
- [67] L. J. Munkholm, «Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management», *Geoderma*, vol. 167-168, pp. 236-246, nov. 2011, doi: 10.1016/j.geoderma.2011.08.005.
- [68] J. Sánchez-Guzmán y G. Auvinet-Guichard, «Segregación inherente en medios granulares», *Ing. Investig. Tecnol.*, vol. 12, n.º 4, pp. 429-438, dic. 2011.
- [69] R. K. Eckhoff, «Chapter 1 - Dust Explosions—Origin, Propagation, Prevention, and Mitigation: An Overview», en *Dust Explosions in the Process Industries (Third Edition)*, R. K. Eckhoff, Ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2003, pp. 1-156. doi: 10.1016/B978-075067602-1/50002-0.