

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN  
MEZCLADOR PARA SÓLIDOS  
DE CASCOS GEMELOS

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MYNOR ROLANDO MORATAYA MELGAR

AL CONFERIRSELE EL TITULO DE  
INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 1997

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

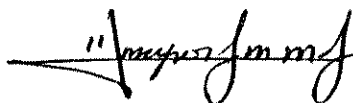
08  
T(4088)  
C.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN  
MEZCLADOR PARA SÓLIDOS DE  
CASCO GEMELOS

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica con fecha 5 de junio de 1996, ref. 169.



MYNOR ROLANDO MORATAYA MELGAR

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL 1o.	Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
VOCAL 2o.	Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
VOCAL 3o.	Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
VOCAL 4o.	Br. Victor Rafael Lobos Aldana
VOCAL 5o.	Br. Wagner Gustavo López Cáceres
SECRETARIO	Ing. Gilda Marina Castellanos de Illescas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Jorge Mario Morales González
EXAMINADOR	Ing. Hector Belisario Santizo Obando
EXAMINADOR	Ing. Osmar Omar Rodas Mazariegos
EXAMINADOR	Ing. Luis Gilberto Pineda Sánchez
SECRETARIO	Ing. Edgar José Bravatti Castro

Guatemala, 2 de mayo de 1997

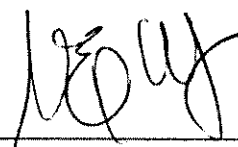
ING. CARLOS PEREZ  
DIRECTOR DE LA ESCUELA DE ING. MECANICA  
FACULTAD DE INGENIERIA. U.S.A.C.

Estimado Sr. Director, después de saludarlo deseo hacer de su conocimiento que he procedido a revisar el trabajo de Tesis del Sr. MYNOR ROLANDO MORATAYA MELGAR, con título: "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MEZCLADOR PARA SOLIDOS DE CASCOS GEMELOS".

Una vez revisado este trabajo, lo he encontrado satisfactorio para su aprobación. Por tanto le pido que se proceda con los trámites subsiguientes al efecto.

Muy atentamente:

(f)



---

Ing. Mariano Eskenasy  
Asesor de Tesis.



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Escuela Técnica, Ingeniería en Sistemas, Ingeniería Electrónica y Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos.

Apartado Postal 217-1-01-907, Guatemala  
Ciudad Universitaria, Zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Coordinador del área de Diseño de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo titulado **Diseño y Construcción de un Mezclador para Sólidos de Cascos Gemelos**, del estudiante **Mynor Rolando Morataya Melgar**, recomienda su autorización.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

*Pedro E. Kubes*  
Ing. Pedro Enrique Kubes Zacek

**Coordinador de Area**

Guatemala, junio de 1.997.

/behdei.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con el visto bueno del Coordinador del Area de Diseño, al trabajo de tesis titulado Diseño y Construcción de un Mezclador para Sólidos de Cascos Gemelos, del estudiante Mynor Rolando Morataya Melgar, procede a la autorización del mismo.

LIBRO Y ENSEÑANZA A TODOS

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

DIRECTOR

Guatemala, agosto de 1,997.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Ingeniero Carlos Humberto Pérez Rodríguez, al trabajo de tesis titulado Diseño y Construcción de un Mezclador para Sólidos de Cascos Gemelos, presentado por el estudiante universitario Mynor Rolando Morataya Melgar, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRIMASE

ING. HERBERT RENE MIRANDA BARRIOS

DECANO



Guatemala, agosto de 1,997.

## DEDICATORIA

A MIS PADRES

Maximiliano Morataya Castro  
Zoila Regina Melgar de Morataya

A MIS HERMANOS

Jorge Eduardo  
Cesar Augusto  
Miriam Victoria  
Edgar Augusto  
Gina Anabella  
Erwin Manolo  
Claudia Eugenia

A MIS TIOS

especialmente a:

Daríá de Guanché  
Victor Manuel Rivera

A MIS PRIMOS

especialmete a:

José Alberto Guanché

A MIS AMIGOS

especialmente a:

José Leonel Contreras  
David Hernández  
Ronaldo Adolfo Mendizabal  
Otto Guillermo Aldana  
Luis Roma



**ÍNDICE GENERAL  
CONTENIDO**

	<b>PÁGINA</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICAS</b>	II
<b>GLOSARIO</b>	III
<b>INTRODUCCIÓN</b>	IV
<b>1. PROPIEDADES DE LA MEZCLA SÓLIDO-SÓLIDO Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MEZCLADORES.</b>	
<b>1.1 Propiedades generales</b>	1
1.1.1 Mezcla sólido-sólido	1
1.1.2 Propiedades de los ingredientes	9
1.1.3 Objetivos contacto sólido-sólido	13
1.1.4 Homogeneidad	14
<b>1.2 Características de funcionamiento     de los mezcladores</b>	16
1.2.1 Uniformidad de la mezcla	16
1.2.2 Tiempo de mezclado	25
1.2.3 Carga y Descarga	25
1.2.4 Potencia	26
1.2.5 Limpieza	28
1.2.6 Carga electrostática	28
1.2.7 Desgaste del equipo	30
1.2.8 Flexibilidad	30
1.2.9 Mezclado continuo	31
<b>1.3 Selección del equipo</b>	33
<b>2. TIPOS DE MEZCLADORES UTILIZADOS EN LA MEZCLA DE SÓLIDO-SÓLIDO.</b>	
2.1 Mezcladores de volteo	36
2.2 Artesa o casco estacionario	38
2.2.1 Mezclador de banda	39
2.2.2 Mezclador de gusano vertical	40
2.2.3 Mezclador de masa trituradora	42
2.2.4 Mezclador de rotores gemelos	43
2.2.5 Mezclador de rotor simple	47
2.2.6 Mezclador de turbina	48
<b>3. CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN</b>	
3.1 Dimensionamiento	50
3.2 Centro de gravedad	57
3.3 Potencia necesaria	62
3.4 Eje de giro	67
3.5 Rodamientos	75
3.6 Volantes de inercia	77
3.7 Transmisión	81
3.8 Tiempo de mezcla	88
<b>4. ANÁLISIS DE PRUEBAS DE ENSAYO</b>	
<b>4.1 Pruebas realizadas</b>	90
4.1.1 Pruebas de granulometría	90
4.1.2 Pruebas de humedad	93
4.1.3 Pruebas respecto a tiempo de mezclado	94
<b>CONCLUSIONES</b>	VI
<b>RECOMENDACIONES</b>	VII
<b>REFERENCIAS</b>	VIII
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	X

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

CONTENIDO	PÁGINA
1.1 Varianza vrs. tiempo para un mezclador de volteo	18
1.2 Mezclado de sal y arena en un tambor de volteo	24
3.1 Pares torsores vrs. ángulos de giro	79
4.1 Curva granulométrica material A	91
4.2 Curva granulométrica material B	92
4.3 Curva granulométrica material B'	93
4.4 Índice de mezcla vrs. tiempo	97

## GLOSARIO

<b>Abrasión.</b>	Desprendimiento de elementos de un sólido por medio de fricción.
<b>Adsorción.</b>	Penetración superficial de un gas o un líquido en un sólido.
<b>Airear.</b>	Ventilar.
<b>Cinética.</b>	Ciencia que estudia el movimiento.
<b>Discreta.</b>	Que presenta separaciones, discontinuidad.
<b>Disolución.</b>	Descomposición de los cuerpos por la acción de un agente que los penetra.
<b>Embalaje.</b>	Envolver.
<b>Erosión.</b>	Desgaste producido por algo que roza.
<b>Fuerza centrífuga.</b>	Fuerza que un cuerpo experimenta cuando se pone a rotar.
<b>Inercia.</b>	Resistencia al cambio de movimiento que un cuerpo experimenta.
<b>Inhibir.</b>	Disminución de una acción reactiva.
<b>Micra.</b>	Unidad de medida equivalente a la milésima parte de un milímetro.
<b>Moletas.</b>	Maza utilizada para efectos de molienda.
<b>Segregación.</b>	Separación.
<b>Termoplástico.</b>	Substancia que adquiere plasticidad por los efectos del calor.

## INTRODUCCIÓN

La mezcla de materiales sólidos se utiliza ampliamente para muchas aplicaciones. Una de ellas es la combinación de ingredientes como por ejemplo, la preparación de alimentos, insecticidas, fertilizantes, cosméticos etc. En otros casos el objetivo puede ser el recubrimiento, como en la fabricación de pigmentos, tintes, minerales y otros productos alimenticios.

Sin importar cual sea el proceso involucrado, el objetivo principal será el de obtener un proceso de mezcla eficiente y económico. La eficiencia de la mezcla depende de muchos factores de los cuales se puede decir que los más importantes son los siguientes:

1. Diferencias en tamaño de partículas de los materiales,
2. Forma de las partículas,
3. Diferencias de densidad,
4. Capacidad de absorber o liberar cargas electrostáticas,
5. Lubricidad del material,
6. Tiempo de mezcla,
7. El equipo utilizado para hacer la mezcla.

Existen muchos diseños de mezcladores en cuanto a capacidades, tipo de proceso (lotes o continuo), materiales a mezclar etc; entre los más comunes se encuentran los siguientes:

1. Mezcladores de volteo (para materiales secos o con muy poca humedad),
2. Mezcladores de banda (para pastas ligeras),
3. Mezcladores de gusano vertical (para sólidos granulares),
4. Mezcladores de maza trituradora (para pastas muy densas),
5. Mezcladores de rotores (para pastas que contienen sólidos y además son muy viscosas),
6. Mezcladores de turbina (para materiales que fluyen fácilmente).

Por lo expuesto anteriormente y puesto que el propósito de esta tesis es el diseño de un mezclador que lleve a cabo la

combinación de dos materiales en cantidades del 48 y 52% en peso, con un contenido de humedad muy bajo y un tamaño de partícula superior a la malla 150, es obvio que la mejor opción es un mezclador de volteo por su construcción relativamente sencilla, bajo costo y fácil mantenimiento.

Existen muchos tipos de mezcladores de volteo, por eje., el de doble cono, el cilíndrico, el de cubo, el de cascos gemelos etc. pero sin duda el que más se adecuó a dichas necesidades fue el de cascos gemelos, ya que debido a su forma de una V genera un movimiento bien definido en las tres dimensiones, haciendo que la mezcla se lleve a cabo más rápida y eficientemente que en otros tipos de mezcladores.

El diseño de un mezclador de volteo consiste esencialmente en especificar su volumen, potencia y velocidad angular. El tamaño quedará determinado al obtener la densidad aparente promedio de los materiales procesados, en tanto que la potencia estará dada por el par torsor, el cual es provocado por la carga contenida en él.

Mientras que la velocidad angular deberá ser tal que, cuando el mezclador gire, la fuerza centrífuga no haga que el material se adhiera a sus paredes. A la velocidad en donde este fenómeno se encuentra a punto de ocurrir, se le denomina velocidad crítica. La velocidad de rotación deberá estar entre un 70 y 80% de la velocidad crítica.

El tiempo de mezcla se determinó para distintas condiciones de trabajo llevándose a cabo las siguientes pruebas:

(todas las pruebas se hicieron con dos materiales a la vez):

1. materiales con granulometría y humedad muy similares
2. materiales con humedad diferente
3. materiales con granulometría diferente.

Es necesario aclarar que las pruebas realizadas sólo son válidas para los materiales utilizados en esta investigación, por lo tanto será necesario que para cada material que se procese, se hagan pruebas específicas.

# 1. PROPIEDADES DE LA MEZCLA SÓLIDO-SÓLIDO Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MEZCLADORES.

## 1.1. Propiedades generales.

### 1.1.1 Mezcla sólido-sólido.

#### ¿Qué es un sólido?

Los fenómenos conocidos de disolución y vaporización, los cuales son reversibles en el caso de algunos materiales, proporcionan convenientes puntos de inicio para describir un sólido.

Un gas cambia tanto su forma como su tamaño muy rápidamente. El volumen que ocupa, es un efecto independiente de la interacción de otros gases que pudieran mezclarse con éste en el proceso. Las mezclas son fáciles de llevarse a cabo porque los efectos térmicos promueven un movimiento continuo al azar de las moléculas.

Un líquido también puede cambiar su forma fácilmente para conformar el espacio que ocupa. Sin embargo, no posee la propiedad de adaptar su volumen a otra posición que no esté influenciada por la gravedad. Por lo tanto, las mezclas pueden llevarse a cabo por simple agitación.

Un líquido congelado puede llamarse un sólido, el cual exhibe una capacidad drásticamente limitada para lograr cambios de forma y tamaño, pero bajo condiciones controladas esto será posible en alguna medida si, examinamos partícula por partícula, se podrá comprobar que cada pieza de material tiene distinta forma y tamaño. Por supuesto, cambios de tamaño pueden lograrse por rompimiento de las partículas sólidas para hacer unas más pequeñas ó, por el contrario, pueden unirse por varios mecanismos para formar unas más grandes.

Partículas sólidas pueden suspenderse en un fluido y sin embargo, este puede seguirse comportando como tal ó, por el

contrario aumentar o disminuir algunas de las propiedades que poseía en su estado puro. Sin embargo, es claro que bajo la influencia de la gravedad, partículas fluyendo llegan a descansar a un "ángulo de reposo" y no a un "nivel líquido".

Estas diferencias y ciertas similitudes hacen hincapié en que el camino claro para distinguir un sólido de un líquido o un gas, es considerar una sola partícula discreta. Si esta pieza de material es un sólido, tiene un tamaño y forma que permanecerán relativamente constantes, a menos que algunos cambios físicos o químicos tomen lugar en él.

### **Una constancia dinámica.**

Una constancia relativa de forma y tamaño puede adoptarse como prueba característica de trabajo práctico de una partícula sólida.

Pero son muy pocas situaciones en la naturaleza en la cual esta constancia es absoluta. Siempre ocurren cambios, y algunos de estos cambios, tales como expansión y contracción térmica, son significativos en grandes masas -por ejemplo en una porción de concreto de carretera-. Otros, tales como adsorción o absorción de humedad, tienden a tener efectos más pronunciados en pequeñas partículas con una enorme razón de superficie a volumen.

Los fenómenos naturales que afectan a pequeñas partículas sólidas más significativamente pueden ser numerosos y algunos de ellos describirse fácilmente.

Una fuerza mecánica puede quebrar una partícula haciendo que ésta se desmenuce y, en algunos casos, producir una multitud de partículas más pequeñas.

Más frecuentemente, fuerzas mecánicas son ejercidas en tal forma que la acción es abrasiva o erosiva, haciendo que una diminuta pizca de material, pequeña en relación a la pieza en si, sea separada de la misma tan rápidamente, que sólo dependerá de la forma, elasticidad y fragilidad de la partícula involucrada y,

en la severidad de la fuerza mecánica ejercida sobre ésta.

Algunas veces, el propósito de aplicar fuerzas mecánicas es el de unir pequeñas partículas para formar partículas mayores. Así, áreas son forzadas lo suficiente para llevar o conducir fuerzas moleculares adhesivas a un cierto grado dentro del proceso. Esto puede ocurrir en la ausencia de otros materiales para servir como un agente adhesivo aunque, en el caso de tener altas temperaturas, esta serviría para producir una cierta cantidad de fluido plástico.

La temperatura influye en la manera en que una partícula reacciona, y podría tener otros efectos severos junto a la fuerza mecánica.

La tendencia de algunos materiales para pegarse y aglomerarse a altas temperaturas debe ser tomada en cuenta. Algunos termoplásticos y compuestos plásticos tienden a ablandarse y a presentar áreas de líquidos viscosos, así como a elevar la temperatura. Pero aunque esto ocurra, cada partícula permanecerá en una forma estable y por lo mismo se reconoce como uno sólido.

Por el contrario a bajas temperaturas ciertos materiales son más frágiles y, por lo tanto, tienden a incrementar su susceptibilidad a fragmentación y erosión.

Temperaturas elevadas, especialmente cuando se combinan con baja presión absoluta, tienden a acelerar la liberación de materiales volátiles del área de una partícula sólida. Efectos de evaporación del material en sí mismo o liberación de constituyentes absorbidos, no son usualmente significativos en el caso de un cuerpo sólido mayor. Pero partículas diminutas con miles de millones más de área por unidad de masa, llaman a un concepto diferente en cuanto a tal fenómeno se refiere.

Absorción y adsorción de cualquier fluido que pueda estar presente en el ambiente de una partícula, pueden crear varias especies de cambios sin destruir la identidad de la misma como una pieza de materia sólida.

La densidad es una propiedad que puede ser incrementada o





disminuida. Así como las condiciones que promueven o inhiben alguna reacción química.

El área de la partícula puede ser cubierta. Usualmente, esto promueve la adherencia a partículas adyacentes y a la aglomeración. Sin embargo, dependiendo de la naturaleza del cubridor, el efecto puede ser totalmente opuesto.

Un cubridor absorbido algunas veces aísla y lubrica cada partícula provocando, una separación entre ellas.

### **El mecanismo de mezclado de sólidos.**

#### **Ayudas en la acción al azar.**

La acción al azar es la herramienta que ayuda a lograr una mezcla. En gases, la energía cinética promueve el mezclado. Los líquidos son mezclados por un fenómeno similar, siendo el proceso usualmente rápido por agitación. Para sólidos, el proceso es análogo pero existen más factores que trabajan para inhibir la libertad en el flujo al azar.

El equipo de mezclado para sólidos cae en dos clases generales: un tipo trabaja por gravedad y el otro es provocado por elementos mecánicos adicionados al mismo para impulsar el movimiento del material. Frecuentemente se incorporan paletas o deflectores para incrementar la complejidad del sendero del flujo.

La teoría es que cuando varios grupos de partículas sólidas son movidas al azar en la presencia de otras, es imposible mantenerlas segregadas. En consecuencia, tenderán a mezclarse.

Cuando el mezclado es completo, cada tipo de partícula constituyente está uniformemente distribuida.

#### **Necesidad de una mira cerrada.**

Un alto incremento en las exigencias y la excelencia en el

mezclado, obliga a tomar una mira cerrada a la perfección de mezclado que se puede lograr.

Productos tales como los farmacéuticos que contienen solamente una fracción de ingrediente activo en un portador neutral, se producen por mezclado. Aquí es vital que el mezclado sea preciso dentro de límites de seguridad y tolerancia aceptables. Esto vale también para contenidos aun menores del constituyente activo, como en el caso de insecticidas, que se mezclan con apenas trazos del mismo.

Un acondicionamiento general que promueva el principio del movimiento al azar y, que además inhiba de alguna forma cualquier otro mecanismo de segregación, es el factor principal para lograr una buena distribución de partículas. Como en una canasta de lotería, la probabilidad estadística que el boleto No. 100 este en una localización es justamente tan grande como la probabilidad de que esté en otro lugar dentro de la canasta.

Pero una distribución al azar no es lo mismo que un mezclado perfecto, lo cual podría ser adecuado para algún propósito, y usualmente lo es. Sin embargo lo que se persigue es un mezclado perfecto, y esto se logra al localizar cada partícula y colocarla donde corresponda obteniendo así una distribución uniforme.

La idea de obtener una distribución al azar por el movimiento, se basa en asumir que otros impulsos no son aplicados a las partículas. En la práctica tal caso es raro. Casi siempre, se trabajan otros factores que pueden promover segregación o mezclado, pudiendo llegar al extremo de formar una aglomeración. Un proceso de revestimiento o recubrimiento, fracasa si las partículas de una misma clase llegan a un lugar al mismo tiempo. Por lo tanto debe tenerse en cuenta que cualquier mecanismo funcional tiende a invalidar, o al menos a modificar, la teoría del mezclado por movimiento al azar.

Así que para lograr un mezclado perfecto deben considerarse los mecanismos que inhiben una distribución al azar.

## Mecanismos de segregación

Mecanismos de segregación que interfieren con el movimiento al azar de las partículas operan en combinación. Problemas industriales son usualmente solucionados al minimizar otros más severos.

Para propósitos de discusión, estos mecanismos de segregación pueden ser considerados separadamente, aunque rara vez se encuentran en forma simple.

Grandes y pequeñas partículas del mismo material tienden a segregarse cuando se hace un intento por mezclarlas con movimiento al azar. Correspondientemente, el mismo fenómeno tiende a ocurrir cuando grandes partículas de un material deben ser mezcladas uniformemente con pequeñas partículas de otro material.

Esto se debe a que las partículas mayores adquieren su movimiento por medio de rodar y fluir sobre otras, en tanto que las partículas pequeñas lo logran más por suspensión aireada saliendo frecuentemente como polvos.

Un remedio teórico debería ser mezclar en vacío. Así existiría una atmósfera para soportar los finos. Esto ha sido explorado en alguna extensión y parece factible para resolver ciertos problemas.

Resultados más benéficos al combatir estas formas de segregación se obtienen, usualmente, al bajar suavemente el movimiento al azar inducido por el mezclador. Rotación ligera del recipiente, o el uso de paletas deflectoras, tratan la masa de la partícula más suavemente y el polvo es minimizado.

Otra fuerza que puede darse dentro del comportamiento del proceso de mezclado, es una tendencia a que las partículas pequeñas recubran a las grandes.

El ingrediente que recubre debe tener un tamaño de partícula uniforme o muy fino, con más área/lbs, para que tienda a envolver más que a cortar o cepillar al que cubre.

Los materiales que se mezclan deberán tener también una

atracción entre ambos. En muchos casos, tal atracción puede ser aumentada al introducir dentro de la mezcla un aditivo que no afecte dañinamente al proceso del producto final.

Diferencias de densidad en partículas esencialmente del mismo tamaño, a lo largo tienden a promover segregación. Las pesadas sedimentan al fondo de una mezcla. Esta acción se agrava si las partículas pesadas son las gruesas y las partículas ligeras son las finas. Diferencias en tamaño y densidad pueden balancear el proceso si los finos son más densos que los constituyentes gruesos.

Mientras el rango de densidad de partículas puede ser algunas veces 10 a 1, el rango de tamaño de partícula puede ser 100 a 1 ó 1000 a 1. Sin embargo, la razón del área a la masa de la partícula puede controlarse.

El "untado" de partículas es una descripción o término para un fenómeno que puede perturbar el patrón de distribución al azar en una operación de mezclado. Una característica de algunos tipos de pigmentos finamente divididos, es que tienen una tendencia de adherirse a otras partículas y hacer que se tenga una pasta. Por lo tanto, el ángulo de reposo del material puede aumentar y acercarse a 90 grados.

Razones para el comportamiento anterior, incluyen el fenómeno de carga estática y la extrema fineza de la partícula envuelta, promoviendo así, un gran embalaje. Estos fenómenos se oponen a la aireación la cual podría facilitar el flujo.

Adicionar el área de un agente dado puede eliminar completamente el carácter de untado en un material. Sin embargo, de igual forma esta medida puede fracasar en algunos casos.

#### **Para prevenir el no mezclado.**

La prevención del no mezclado puede lograrse por varias rutas. La más simple es por el ciclo de mezclado cuando se obtiene la misma.

El beneficio de una distribución al azar podría ser anulado con la intervención de mecanismos antimezclado que afecten a las partículas. Por lo tanto, si éstas son susceptibles a mezclarse por la acumulación de las cargas electrostáticas, por ejemplo, más movimiento podría solamente anular el efecto de mezclado.

La segregación radical de los constituyentes dentro de diferentes regiones de un mezclador muy a menudo puede prevenirse, si se introducen en capas alternativas en lugar de introducirlos completamente separados. Entonces, una vez iniciado el mezclado, se puede completar paulatinamente.

Si un material con cargas estáticas interfiere con la mezcla, algunas veces será posible modificar esta acción y obtener buenas ventajas, por eje., al cargar el mezclador capa por capa se logra el agotamiento deseado de las partículas sin tener que hacer mucho trabajo mecánico.

Algunos materiales pueden pulverizarse húmedos para luego secarse. En los procesos en donde las partículas secas están en suspensión, en lugar de una torta, pueden hacer innecesaria una segunda operación de molido. Sin embargo, donde las consideraciones económicas lo permitan, algunos cambios de esta clase pueden tomarse en cuenta como una ruta para producir más partículas mezcladas.

Hay casos donde la naturaleza de los materiales involucrados y los procesos esenciales para su preparación, se combinan para hacer inevitable el mezclado de las partículas cargadas.

Otro posible remedio es introducir un surfactante dentro de la mezcla. Esta adición tiene sus ventajas pero definitivamente no es la mejor solución, porque el agente humectante debe contactar cada partícula y no crear problemas de segregación.

Tal vez el paso más importante que debe tomarse para combatir la segregación causada por cargas electrostáticas, es reconocer el problema. Entonces, cualquier precaución razonable puede tomarse para evitar que las partículas sean sujetas a un innecesario trabajo mecánico.

Los sólidos son mezclados mecánicamente en el interior de un mezclador, así que las partículas están libres para ir unas hacia otras. Esta libertad de movimiento es esencial para los procesos de mezclado.

Usualmente, muchos resultados se logran al hacer todo lo posible para asegurar una movilidad mecánica uniforme de todas las partículas así como también la mayor libertad de cada partícula individual para fluir al azar.

### 1.1.2 Propiedades de los ingredientes.

#### Cómo se comportan los diferentes tipos de sólidos.

Es difícil nombrar materiales sólidos que en la naturaleza no puedan existir en pequeñas partículas.

Algunos sólidos, tales como madera y concreto, no son homogéneos. Cuando se quiebran en partículas del tamaño del polvo, se convierten en mezclas de un número de diferentes productos químicos.

Otros materiales son difíciles de mantener en el estado de partícula. El hielo es un ejemplo común. Los cristales de nieve pueden ser considerados como partículas de hielo. Estos tienden a aglomerarse en hojuelas de nieve o a evaporarse en pequeñas partículas de hielo que pueden mantenerse bajo un tratamiento muy cuidadoso en condiciones controladas.

En algunas operaciones prácticas con materiales comerciales, es necesario tomar las precauciones correspondientes para mantener la identidad, tamaño y forma de las partículas individuales.

La forma de las partículas se refiere a su estructura y a la manera en que son formadas.

Los cristales asumen la forma característica de su estructura molecular ordenada. Esto puede modificarse por erosión mecánica. Productos fragmentados pueden parecerse a cristales o pueden ser o tener un alto rango de distribución de muchas formas

y tamaños.

Partículas casi esféricas son formadas por ciertos procesos de manufactura. Así también, las partículas grandes que se sujetan a erosión mecánica en una mezcla, tienden a ser esféricas a través de los fragmentos erosionados. Sin embargo, estos pueden no ser parejos.

Otras formas que ocurren, especialmente entre los finos, normalmente llamados polvos, son hojuelas, vástagos, filamentos y astillas.

### **Significancia de la forma.**

La significancia de la forma de la partícula tiene su efecto primeramente dentro del flujo característico de una masa de partículas. Mientras otros factores pueden permanecer constantes como por ejemplo el área. En la forma esférica o de huevo, las partículas tienden a fluir fácilmente, en tanto que las piezas fracturadas rigurosamente son menos móviles. En el otro extremo, filamentos, vástagos y cristales complejos, frecuentemente fluyen pobremente y tienden a construir una escala pequeña equivalente a un aglomerado de leños o troncos.

Otro punto apreciado de la forma, es que la configuración irregular despliega mucho más área que la forma esférica. Esto puede ser importante debido a que afectaría alguna reacción química o absorción. Además, puede realzar la movilidad cuando se crea una suspensión aireada durante el mezclado o manejo.

### **Amplio rango de tamaño.**

Tamaños de partículas consideradas aquí, están en el rango de aproximadamente micrones, en dimensiones principales, hasta piezas relativamente grandes como bolas de plástico, semillas y nueces.

Más importante que el tamaño nominal o medio de la partí-

cula es el rango de tamaño en un lote o grupo. La distribución del tamaño de la partícula puede influir muy profundamente en el comportamiento de un grupo de partículas.

Partículas grandes y pequeñas tienden a segregarse en sí mismas siempre que estén sometidas a agitación mecánica o movimiento de cualquier especie. En una situación las partículas mayores fluyendo dan vueltas más lejos que las finas. En tanto que en otra situación agitada, los finos tienden a salir como polvo mientras que las partículas cubiertas sedimentan por gravedad.

En una mezcla de partículas finas y grandes con formas irregulares, algunas veces ellas mismas son capaces de mantenerse o soportarse en el mezclado.

La densidad de las partículas puede ser alta o baja. Sin embargo, si partículas con densidades radicalmente diferentes se manejan juntas, pueden tender a segregarse en sí mismas, al igual que partículas con una amplia extensión en distribución de tamaño. Este efecto puede evitarse al tener las partículas uniformes y pequeñas. El factor importante es la razón del área soportada o mantenida a la masa.

La composición química de una partícula tiene poco o ningún efecto en su comportamiento como tal, si se provee un ambiente estable y no reactivo. En tanto que si cambia la forma como consecuencia de una reacción química, entonces todos los otros factores mencionados aquí pueden verse afectados por este comportamiento.

#### **Área, efecto importante.**

El área de conductividad de una partícula, su tendencia a mantener una carga estática o para disipar electrones desequilibrados fácilmente, es una propiedad que tiene una profunda influencia en partículas de la misma o diferente composición.

Esta propiedad puede modificarse en varias formas. Así, la



carga que mantiene una partícula puede manejarse de forma opuesta, de manera que ésta acumule muy poca o ninguna carga durante su ciclo de proceso.

Generalmente, los buenos aisladores, plásticos y otros compuestos orgánicos, tienden a ser cargados acumuladamente. Los polvos de metal y granos de sales despliegan menos de ésta tendencia bajo condiciones comparables. Sin embargo, la naturaleza de las partículas y mezcla de las mismas es tal que la completa neutralidad electrostática raramente se logra en la práctica. Así que las diminutas cargas pueden influenciar muy profundamente el móvil de las muy pequeñas masas involucradas. Por tanto las variables se mantienen como un problema potencial a ser combatido.

#### **Fase de flujo: lubricidad**

La lubricidad de partículas no puede definirse en términos precisos, ya que algunos tipos de ellas pueden fluir más fácilmente que otros bajo las mismas condiciones, sobre todo por su forma, densidad y uniformidad en área aparente, si éstas son casi iguales. Esta cualidad de fluidez en una masa de partículas sólidas corresponderá rigurosamente a la viscosidad del fluido.

Algunos materiales tienen más lubricidad y fluidez como aglomerado en la mezcla de partículas. Esto puede afectar y hacer muy dificultoso contactarlo mecánicamente, porque encuentran su camino rápidamente en el fondo del contenedor, eludiendo el contacto con otros tipos de partículas y dispositivos diseñados para romperlos.

Materiales que no despliegan la cualidad de lubricidad pero, que poseen formas irregulares pueden ser adecuados para fluir, porque existe un grado de compensación en estas formas irregulares de partículas finas las cuales muy frecuentemente son susceptibles a la aireación y suspensión, siendo en este estado, fácilmente móviles.

Diferencias en la naturaleza de partículas cuando dos o más materiales están presentes, pueden llegar a tener un mayor efecto en su comportamiento.

La tendencia de los finos para salir como polvos de una suspensión aireada, debe considerarse. Cuando los dos tipos de flujo ocurren simultáneamente (fluidez flotando a lo largo con volteo mecánico) podría ser necesario ajustar las condiciones para correlacionarlos. Esto se logra manteniendo la velocidad de flujo en un rango donde suficiente aireación se introduzca para mover las partículas que no ruedan o se voltean, pero no tanto como para separarlas del resto de la mezcla, (ref. No.3).

### 1.1.3 Objetivos contacto sólido-sólido

#### Fundamentos.

Los equipos en que se mezclan materiales sólidos se pueden utilizar para muchas operaciones. La combinación de ingredientes puede ser el objetivo principal como, por ejemplo, en la preparación de alimentos, insecticidas, fertilizantes, lotes de vidrios, alimentos empaquetados y cosméticos. Otros objetivos pueden incluir el enfriamiento o el calentamiento, como en el enfriamiento de la cal, el azúcar o el precalentamiento del material plástico antes del calandrado. A veces se desea lograr la desecación o el tostado de los sólidos. En algunas aplicaciones, como la polimerización de plásticos, la fabricación de catalizadores o la preparación de productos cereales, se puede hacer reaccionar la mezcla de sólidos. En algunos casos se desea lograr un recubrimiento, como en la fabricación de pigmentos, tintes, minerales, dulces y otros productos alimenticios. En algunos de esos casos, se pueden agregar pequeñas cantidades de líquido; pero el producto final es una mezcla sólida. En algunas ocasiones se desea obtener aglomerados, como en la preparación de productos alimenticios, artículos farmacéuticos, detergentes y

fertilizantes. Con frecuencia, se desea una reducción del tamaño, mientras se mezclan los sólidos. En todos los casos se lleva a cabo la mezcla de sólidos. No obstante, en algunas de esas operaciones, los detalles de los equipos para efectuar operaciones distintas de la combinación pura pueden convertirse en un problema importante.

#### 1.1.4 Homogeneidad.

##### Medición de la uniformidad.

Con excepción de los casos en que se produce el recubrimiento de un ingrediente con otro, el resultado final teórico del mezclado no será una disposición en la cual un tipo de partículas está directamente junto a otra partícula de tipo diferente. En lugar de ello el resultado teórico final, cuando se produzca un volteo aleatorio, es una mezcla aleatoria. La variación entre muestras locales de un tamaño dado (o sea, número de partículas) se puede predecir teóricamente para una mezcla aleatoria y utilizarse como guía para determinar hasta qué punto se produce el mezclado aleatorio de los ingredientes. Cuando las partículas individuales no se puedan distinguir con facilidad y no resulte práctico el conteo, se pueden realizar varios tipos de análisis de muestras locales para determinar la uniformidad de los lotes. Debido a los avances recientes en el análisis instrumental, resulta mucho más fácil aplicar análisis rápidos muy convenientes para los procedimientos estadísticos. Algunos de esos métodos son la fluorescencia de rayos X, la espectrometría de llama, la polarografía y la emisión espectroscópica. Asimismo, se han usado métodos de trazadores radiactivos. Sea cual fuere el método analítico que se escoja, ya sea gravimétrico, volumétrico, electrométrico, de conteos de partículas, óptico o de otros tipos, es muy importante que se analicen objetivamente los datos por métodos estadísticos, cuando haya alguna duda sobre la mezcla

apropiada. El error analítico debe ser muy pequeño en comparación con la variación en la composición, u otra propiedad entre muestras locales.

### **Evaluación.**

El hecho de que el producto final deseado sea o no satisfactorio, puede utilizarse como criterio práctico para determinar si una mezcla de sólidos es adecuada o no. Otra consideración importante, es el efecto de la mezcla de sólidos sobre la economía general del proceso de fabricación. Los estudios del tipo mencionado en el párrafo anterior pueden formar parte de esa evaluación. Cuando la mezcla de sólidos se transforma directamente en un producto, como en el caso de las píldoras alimenticias o las tabletas farmacéuticas, las pruebas de uniformidad de esos artículos hablarán por sí mismas. En los casos en que la mezcla de sólidos se deba procesar más, como en la fabricación de vidrio y plástico, la eficiencia y los costos de las operaciones subsiguientes se pueden relacionar, con frecuencia, con la mezcla inicial de sólidos. En tales casos, es preciso conocer la homogeneidad de la mezcla de sólidos para determinar sus efectos sobre el proceso de fabricación.

Sea cual fuere el método de evaluación de la mezcla de sólidos, el procedimiento de muestreo es vital. A menudo se utiliza un muestreador o algún otro dispositivo especial para retirar muestras de la mezcla, sin trastornar en exceso el lote. Si resulta evidente un método de muestreo más sencillo y produce una menor contaminación del lote, será conveniente aplicarlo.

El método de muestreo, la ubicación, el tamaño y el número de muestras, el método de análisis de muestras y la fracción del lote que se retira, contribuyen hasta el punto en que el estudio de muestreo refleje bien, o no, las condiciones reales.

Aun cuando lo anterior se aplica a la operación real de mezcla de sólidos, es preciso pensar también en las etapas

subsiguientes de procesamiento. Por tanto, la operación de mezclado de sólidos se debe verificar desde el punto de vista de la entrega de un lote bien mezclado en determinado punto. Se debe observar el sistema para ver si no hay sitios de segregación, como puntos de transferencia, caídas largas, flujo a través de silos y equipos vibratorios. Cuando se usa un líquido, es preciso determinar la cantidad que se puede agregar sin crear problemas de formación de tortas que puedan obstruir el procesamiento subsecuente de la mezcla de sólidos, (ref. No.10).

## **1.2 Características de funcionamiento de los mezcladores.**

### **1.2.1 Uniformidad de la mezcla.**

La uniformidad de la mezcla depende principalmente del tipo de mezclador utilizado, de los mecanismos de mezcla, del grado de mezclado y del tiempo.

#### **Mecanismos mezcladores.**

Hay varios mecanismos básicos mediante los cuales se mezclan partículas sólidas. Entre ellos se incluyen el movimiento aleatorio en pequeña escala (difusión), el movimiento aleatorio en gran escala (convección) y el cizallamiento o corte.

Si bien hay tres mecanismos que se dan en alguna medida en los mezcladores de volteo, estos varían en importancia de acuerdo al tipo de mezclador y a la forma en que éste sea cargado. En mezcladores de tambor cargados de extremo a extremo predomina la difusión (fig.1,1,a.). Convección y corte, predominan en mezcladores de tambor cargados capa por capa (fig.1,1,b.) y lado por lado (fig.1,1,c.).

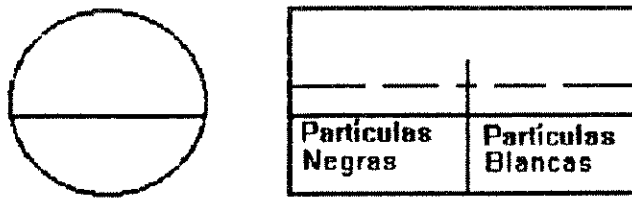


Fig. 1.1.a Mezclador de tambor cargado de extremo a extremo.

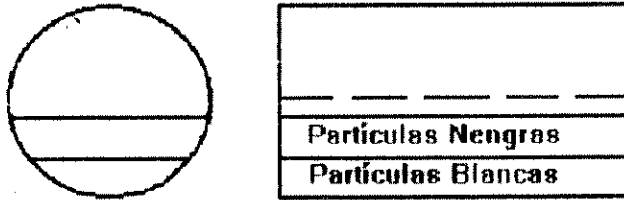


Fig. 1.1.b Mezclador de tambor cargado capa por capa.

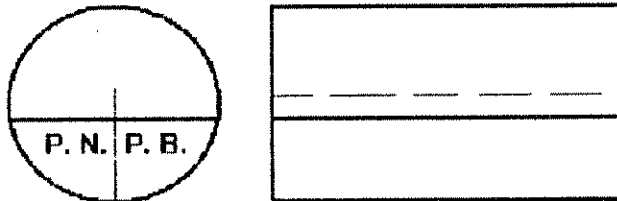


Fig. 1.1.c Mezclador de tambor cargado lado por lado.

Fig. 1.1-Aquí se muestran 3 formas diferentes de como se puede cargar un mezclador de tambor.

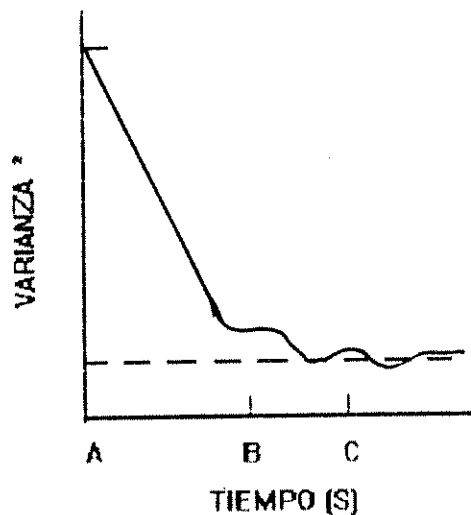
Al iniciarse la operación de mezcla, hay un número relativamente pequeño de zonas de diferentes concentraciones claramente separadas por una apreciable distancia, en la cual la convección tiende a predominar. Después, el número de zonas de diferente concentración se incrementa; consecuentemente, las distancias de separación se hacen relativamente pequeñas y suficiente mezcla al azar es producida a través del aumento del mecanismo de difusión.

El cambio en el mecanismo predominante puede ser observado en la gráfica varianza versus tiempo, para un mezclador de volteo en general (gráfica 1.1). En la región AB, la varianza decrece

rápidamente, exhibiendo la característica de mezcla convectiva. En la región BC, y más allá, el cambio en la varianza es pequeño, exhibiendo las características de mezcla difusiva.

Generalmente, el tiempo para completar la etapa de difusividad es mucho más largo que para completar la etapa de convectividad.

Un mezclador de volteo debe ser diseñado de tal forma que a través de una combinación opcional de ambos mecanismos, en un proceso de mezcla, se pueda reducir el tiempo en el que la difusión toma lugar y, como consecuencia, disminuya el tiempo de mezcla, (ref. No. 9).



Gráfica 1.1

Varianza vs. tiempo para un mezclador de volteo.

Criterios de masa de un mezclador; índice de mezcla.

El funcionamiento de un mezclador industrial se evalúa de acuerdo al tiempo de mezclado que se requiere, la carga de

energía y las propiedades del producto final. La relación entre el dispositivo de mezcla y las propiedades deseadas para el material mezclado varía ampliamente de un caso a otro. A veces se requiere un grado de uniformidad muy alto, otras una rápida acción de mezclado o, incluso, un consumo mínimo de energía.

El grado de uniformidad de un producto mezclado, medido por el análisis de un número de muestras puntuales, es una medida válida de la eficacia del mezclado. Los mezcladores actúan sobre dos o más materiales separados para interponerlos, casi siempre, en una distribución al azar. Una vez que uno de los materiales está distribuido al azar en el otro, se puede considerar que la mezcla es completa. Tomando como base estos conceptos, para medir el mezclado de sólidos se ha desarrollado un procedimiento estadístico en la forma que se indica a continuación.

Considérese un sólido al que se ha añadido algún tipo de material trazador fácilmente analizable, siendo  $\mu$  la fracción media global de trazador en la mezcla. Tómese un pequeño número de pequeñas muestras al azar en varios puntos de la mezcla y determínese la fracción de trazador  $x_i$  en cada una de ellas. Sea  $N$  el número de muestras puntuales y  $\bar{x}$  el valor medio de las concentraciones medidas. Cuando  $N$  es muy grande,  $\bar{x}$  será igual que  $\mu$ , mientras que cuando  $N$  es pequeño ambas magnitudes pueden ser apreciablemente diferentes. Si el sólido estuviese perfectamente mezclado (y cada uno de los análisis fuese muy exacto), cada valor medido de  $x_i$  sería igual a  $\bar{x}$ . Si la mezcla no es completa, los valores medidos de  $x_i$  difieren de  $\bar{x}$  y su desviación estándar con respecto al valor medio de  $\bar{x}$  es una medida de la calidad de la mezcla. Esta desviación estándar se estima a partir de los resultados analíticos por medio de la ecuación (1.1)



$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2 - \bar{X} \sum_{i=1}^N X_i}{N - 1}} \quad (1.1)$$

El valor de la desviación estándar  $s$  es una medida relativa del mezclado, válida solamente para ensayos de un material específico en un mezclador dado. Su significado varía con la cantidad de trazador en la mezcla; una desviación estándar de 0.001 será mucho más significativa si  $\mu$  es 0,01 que cuando  $\mu = 0.5$ . Además,  $s$  tiende hacia cero a medida que avanza la mezcla, de manera que un valor bajo indica una buena mezcla. Una medida más general, que es independiente de la cantidad de trazador y que aumenta cuando mejora el proceso de mezclado, es la inversa de la relación entre  $s$  y la desviación estándar para mezclado cero,  $\sigma_0$ . Antes de que haya comenzado el mezclado, el material a tratar se encuentra como en dos capas, una de las cuales no contiene material trazador y otra formada por sólo el trazador.

El análisis de las muestras de la primera capa conduciría a  $x_1 = 0$ , mientras que en la otra capa  $x_1 = 1$ . En estas condiciones la desviación estándar viene dada por

$$\sigma_0 = \sqrt{\mu(1 - \mu)} \quad (1.2)$$

donde  $\mu$  es la fracción global de trazador en la mezcla. El índice de mezcla para sólidos,  $I_s$  de acuerdo con las ecuaciones (1.1) y (1.2), viene dado por

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

$$I_s = \frac{\sigma_0}{s} = \sqrt{\frac{(N-1)\mu(1-\mu)}{\sum_{i=1}^N X_i^2 - \bar{X} \sum_{i=1}^N X_i}} \quad (1.3)$$

donde

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N} \quad (1.4)$$

En cualquier proceso discontinuo de mezclado  $I_s$  vale la unidad al comienzo, para ir aumentado a medida que progresa la mezcla. En teoría  $I_s$  debería tender hacia infinito a medida que transcurre el tiempo de mezclado, pero en realidad no ocurre así por dos razones: (1) el mezclado nunca es totalmente completo; (2) salvo que los métodos analíticos sean extraordinariamente precisos, los valores medidos de  $x_i$  nunca concuerdan exactamente entre sí o con  $x$ , e  $I_s$  adquiere un valor finito aun para materiales perfectamente mezclados. Para el caso de partículas más finas y materiales con plasticidad creciente, el modelo es el mismo pero, dado que el mezclado es más lento, el valor límite de  $I_s$  es más pequeño. Este valor límite máximo de  $I_s$  para materiales «completamente mezclados» varía con la consistencia de los materiales que se someten a proceso con la eficiencia del mezclador y con la precisión de los métodos analíticos. Su valor típico está comprendido entre 10 y 150.

La velocidad de mezclado, medida por la velocidad de variación de  $I_s$  con el tiempo, varía sensiblemente con el tipo de mezclado y con la naturaleza del material a tratar. Por ejemplo, en un mezclador de dos brazos, la arcilla pulverulenta se mezcla mucho más rápidamente seca, que cuando está muy húmeda, casi como arcilla líquida. La arcilla con una humedad intermedia y una consistencia plástica dura se mezcla rápidamente pero requiere un

consumo de energía mucho mayor que cuando está muy seca o muy húmeda.

La eficiencia de un determinado tipo de mezclador depende también de la naturaleza y consistencia del material que se ha de mezclar. Por ejemplo, los mezcladores de moletas conducen a; un mezclado rápido y a elevados valores límite de  $I_m$  cuando operan con sólidos arenoso granulares pero, por el contrario, el mezclado es lento y deficiente con pastas plásticas o pegajosas. Aun así, algunos mezcladores continuos, mezclan materiales plásticos más eficazmente que sólidos granulares que fluyen libremente.

El índice de mezcla está relacionado, por lo menos en algunos casos, con las propiedades físicas del material objeto de mezclado. Por ejemplo, la resistencia a la compresión de muestras de arcilla estabilizadas con cemento portland se ha relacionado con los valores de  $I_p$ . Se encontraron bajas resistencias para valores pequeños de  $I_p$ , mientras que los valores altos de  $I_p$  correspondían a resistencias extraordinariamente elevadas de las muestras estabilizadas.

### Índice de mezcla para sólidos granulares.

La eficiencia de un mezclador de sólidos granulares se mide por un procedimiento estadístico muy parecido al descrito anteriormente. Se toman al azar muestras puntuales de la mezcla y se analizan. La desviación estándar de los análisis  $s$  con respecto a su valor medio  $\bar{X}$  se estima, como en el caso de sólidos finos, a partir de la ecuación (1.1).

En el caso de los sólidos granulares el índice de mezcla se basa, no en las condiciones para mezclado cero, sino sobre la desviación estándar que se observaría con una mezcla perfecta al azar. Para sólidos muy finos, suponiendo que los análisis sean muy precisos, este valor es cero, pero para sólidos granulares es distinto de cero.

Considérese, por ejemplo, una mezcla perfecta de sal y

granos de arena, de la que se toman  $N$  muestras puntuales conteniendo cada una  $n$  partículas. Suponiendo que la fracción de arena en cada muestra puntual se determina por conteo de las partículas de cada clase. Sea  $\mu_p$  la fracción global, en número de partículas de arena en la mezcla total. Si  $n$  es pequeño (tal como 100), la fracción medida  $x_1$  de arena en cada muestra no será siempre la misma aunque el mezclado se haya completado y sea perfecto, ya que existe siempre alguna oportunidad de que una muestra retirada de una mezcla al azar contenga una mayor (o menor) proporción de una clase de partículas que la de la población de la que se ha tomado. Por tanto, para cualquier tamaño dado de la muestra puntual existe una desviación estándar respecto a la mezcla de origen. Esta desviación estándar  $\sigma_e$  viene dada por

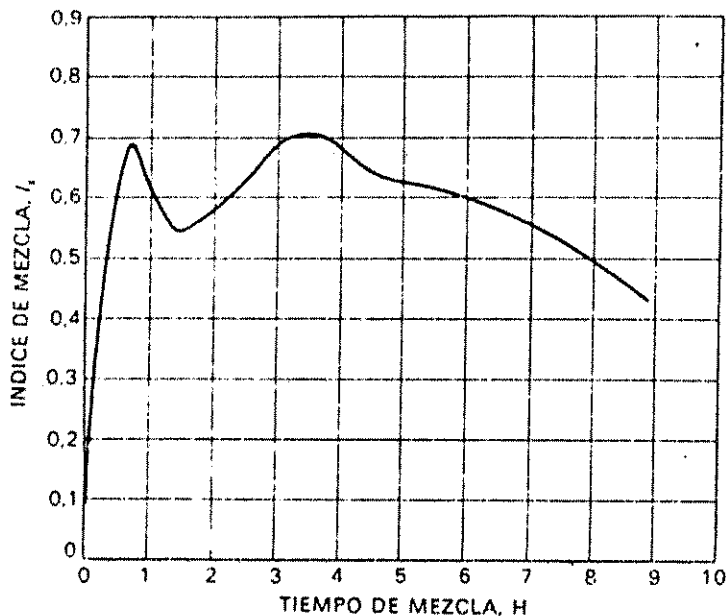
$$\sigma_e = \sqrt{\frac{\mu_p(1 - \mu_p)}{n}} \quad (1.5)$$

Para sólidos granulares el índice de mezcla  $I_m$  se define como  $\sigma_e/S$ . A partir de las Ecuaciones (1.1) y (1.5),  $I_m$  resulta ser:

$$I_m = \frac{\sigma_e}{S} = \frac{\sqrt{\mu_p(1 - \mu_p)(N - 1)}}{\sqrt{n \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}} \quad (1.6)$$

En la gráfica 1.2 se muestran los resultados típicos de la mezcla de cristales de sal (NaCl) con arena de Ottawa en un pequeño mezclador de volteo. Durante los 40 primeros minutos el índice de mezcla  $I_m$  aumenta desde un valor muy bajo hasta aproximadamente 0,7, fluctúa durante algún tiempo entre 0.55 y 0,7 y, después, para tiempos de mezclado muy largos, comienza a

decaer estacionariamente. El mezclado es inicialmente rápido, pero en este tipo de mezclador nunca es perfecto. Los ingredientes del mezclador nunca se mezclan en una forma completamente al azar. Siempre existen fuerzas, generalmente electrostáticas, que se oponen a la acción de mezclado de sólidos secos, y sus efectos son especialmente apreciables en este caso. Estas fuerzas evitan con frecuencia que se alcance un mezclado perfecto y, cuando el tiempo de mezclado es grande, pueden oponerse a la mezcla dando lugar a una segregación, tal como se muestra en la gráfica 1.2.



Gráfica 1.2 Mezclado de sal y arena en un tambor de volteo.

Índice de mezcla para tiempo cero.

La desviación estándar de equilibrio para mezclado completo  $\sigma_e$  se utiliza como referencia en el caso de sólidos granulares. Para el caso de pastas y sólidos muy finos, la referencia es la desviación estándar para tiempo cero  $\sigma_0$ . Estas dos referencias están estrechamente relacionadas, tal como muestra la semejanza

de las ecuaciones (1.2) y (1.5). De hecho, si  $n$  se toma igual a 1 en la ecuación (1.5) las dos ecuaciones se hacen idénticas. Esto tiene que ser así, ya que si se toman muestras de cada una de las partículas de una mezcla granular de sólidos, los análisis conducirán a  $x_1 = 1$  o  $x_1 = 0$ , sin ningún otro valor intermedio. Lo mismo ocurrirá con material mezclado no completamente y con cualquier tamaño de muestra. La ecuación (1.2) puede, por tanto, aplicarse a sólidos granulares antes de que comience el mezclado y el índice de mezcla para mezclado cero se transforma en

$$I_{e,0} = \frac{\sigma_e}{\sigma_0} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (1.7)$$

### 1.2.2 Tiempo de mezclado.

El tiempo real durante el cual el lote se está mezclando suele ser de menos de 15 minutos, si se escogen el tipo adecuado de máquina y la capacidad de trabajo apropiada. En algunos casos, se toleran tiempos de mezclado mucho más eficientes. Sin embargo, por lo común hay una máquina que puede homogenizar adecuadamente casi cualquier tipo de mezcla en menos de 15 minutos, a condición de que se acepte pagar el precio necesario.

De hecho, en la mayoría de los casos, el diseño apropiado de la mezcladora producirá la combinación que se desea en unos cuantos minutos.

No obstante, además del tiempo real de mezclado, es preciso optimizar el tiempo del ciclo total, (ref. No. 12).

### 1.2.3 Carga y descarga.

Es preciso tomar en cuenta todo el sistema de manejo, para obtener condiciones óptimas de carga y descarga. Esto incluye el

uso eficiente de tolvas pesadoras y de almacenamiento, el premezclado de los ingredientes menores, la buena ubicación de las compuertas de descarga, etc.

#### 1.2.4 Potencia.

En general, los requisitos de potencia no constituyen una consideración primordial al escoger una mezcladora de sólidos, puesto que, por lo común, predominan otros requisitos; sin embargo, es preciso proporcionar una potencia suficiente para cubrir las necesidades máximas, en el caso de que se produzcan cambios durante las operaciones de mezclado. Así mismo, cuando se necesiten diversas mezclas, la potencia tiene que ser suficiente para arrancar a partir del reposo, por tanto se debe contar con una potencia suficiente para lograrlo. Cuando sea conveniente una variación de las velocidades, es preciso tomar en cuenta esta característica, al hacer planes para los requisitos de potencia.

En la tabla 1.1 se dan requisitos de caballos de potencia para diversos tipos de mezcladoras.

Tabla 1.1

Necesidades de caballos de fuerza y velocidades de rotación para algunas mezcladoras comerciales de sólidos (de aproximadamente, 50 pies<sup>3</sup> de capacidad de trabajo).

Tipo de máquina mezcladora de sólidos	Cap. aprox. de trabajo, pies <sup>3</sup>	Caballos de potencia		Velocidad de rotación, rpm		Observaciones
		Casco	Dispositivo interno	Casco	Velocidad del eje del dispositivo interno	
<b>1. Volteador</b>						
Sin desviadores						
Cono doble	54	734		18		Basado en materiales de 100 lb/pie <sup>3</sup> . Densidad máxima de masa del material = 55 lb/pie <sup>3</sup> .
Cascos gemelos	50	5		13.7		
Con desviadores						
Tambor horizontal						
Fabricante F	50	20		11.1		De servicio pesado (material de 100 lb/pie <sup>3</sup> ). Para servicios extremadamente pesados (material de 150-200 lb/pie <sup>3</sup> ), la capacidad máxima de trabajo, con 20 hp, es de 35 pies <sup>3</sup> . Para materiales de densidad volumétrica máxima de 40 lb/pie <sup>3</sup> .
Fabricante F	50	10		14		La mezcladora se puede inclinar. Cargador en el extremo posterior. Capacidad basada en concreto mezclado.
Cono doble que gira en torno al eje horizontal	56	25		11.5		
<b>2. Volteador con compedor de aglomerados:</b>						
<b>Cono doble</b>						
	54	734	Véanse las observaciones	18	Véanse las observaciones	Las necesidades de hp para el dispositivo interno dependen de la naturaleza del material, el tipo y la velocidad del agitador. Se deben determinar mediante las pruebas apropiadas.
Cascos gemelos	50	5	5 (barras intensificadoras del tipo de pasador)	13.7	945 (velocidad de punta de 1 730 pies/min)	Densidad volumétrica máxima del material = 55 lb/pie <sup>3</sup> .
			7 1/2 (barras intensificadoras de líquido-sólidos)		1055 (velocidad de punta de 3 120 pies/min)	
<b>3. Artisa o casco estacionario</b>						
<b>Cinta:</b>						
Fabricante C	50		12		28	Hp necesarios sobre la base de material de 50-60 lb/pie <sup>3</sup> de densidad volumétrica, de flujo semibloque, utilizando 10 hp/ton para ciclo promedio de mezclado de 3-10 min (según el material, la gama puede ser de 3-18 hp/ton).
Fabricante A	46		10		37	Basado en materiales de 30 lb/pie <sup>3</sup> de densidad volumétrica.
Fabricante D	50		15		45	Basado en materiales de 40-50 lb/pie <sup>3</sup> de densidad volumétrica.
Cinta de trece ejes	50		Eje mezclador 20 Eje alimentador 7 1/2 (total)		Transmisiones de velocidad variable en todos los ejes	Esta mezcladora tiene un valor nominal de 300 pies <sup>3</sup> /h sobre la base del mezclado por lotes, 900 pies <sup>3</sup> /h sobre la base de mezcla continua. Materiales clasificados a 70 lb/pie <sup>3</sup> de densidad volumétrica.
Gusano vertical	52.9		5		Gusano, 64.4 Orbita, 2.2	Hp basados en 37 lb/pie <sup>3</sup> de densidad volumétrica. Esto puede variar para materiales distintos. Hp máx. = 10, peso máximo = 4410 lb.
Maza trituradora:						
Por lotes; plataforma estacionaria, torreta giratoria	40		60		24 (velocidad de la torreta)	Basado en materiales de 60.75 lb/pie <sup>3</sup> de densidad volumétrica.
Continua; plataforma estacionaria, torreta giratoria						Básicamente, las mazas trituradoras continuas son simplemente dos mazas por lotes unidas en los encuadrados, de modo que forman una figura en forma de 8. Así, la maza trituradora por lotes de 40 pies <sup>3</sup> de capacidad nominal de 60 hp, se convierte en maza trituradora continua de 80 pies <sup>3</sup> de capacidad de trabajo, que requiere 120 hp. Esto daría 125 ton/h, con un tiempo de residencia de 2 1/2 min (véase la tabla 21-1, donde aparece una información más amplia sobre las capacidades continuas). Las velocidades de la torreta son de 24 rpm.
Rotor simple			Véanse las observaciones			En esta unidad continua, la producción puede ir de 25 a 600 lb/min, con de 5 a 100 hp y 500 a 1000 rpm, según los materiales mezclados.
Rotor doble			Véanse las observaciones			En esta unidad continua, la producción puede ir de 200-500 lb/min, con de 5 a 40 hp y 200-300 rpm, según los materiales mezclados.
Mezcladora intercambiable de calor de dos rotors	49.2		5-15		20-100	
Turbina	50		50		Velocidad periférica de 600 pies/min	La magnitud de la acción de transporte y mezcla es afectada por la cantidad de paso y el tipo de cintas montadas al exterior de los gusanos huecos.
<b>4. Tanto el casco como el dispositivo interno giran</b>						
Maza trituradora u contracorriente	45 60-90*	20	25	6.75-8.75 5.65	28-35 20	

\* El motor de 25 hp impulsa tanto el casco (plataforma mezcladora) como el dispositivo interno (estrella mezcladora).  
 † La gama de capacidades por lotes depende de la naturaleza de los materiales que se van a mezclar.



### 1.2.5 Limpieza.

La facilidad, la frecuencia y la intensidad de la limpieza pueden ser consideraciones cruciales, cuando se tengan que mezclar en momentos distintos y en la misma máquina lotes incompatibles. Los recipientes de volteo simples son fáciles de limpiar a condición de que tengan aberturas adecuadas. Las zonas que pueden presentar problemas de limpieza son: 1) los sellos o las cajas prensaestopas, 2) las grietas en los soportes de los desviadores, 3) los rincones y 4) los dispositivos de descarga. Cuando la limpieza entre lotes diferentes exija mucho tiempo, se deben tomar en consideración varias mezcladoras pequeñas. Por lo común, se puede proporcionar con un costo extra una construcción sanitaria especial.

### 1.2.6 Carga electrostática.

Cargas electrostáticas en el área de las partículas constituyen la mayor fuerza poder -y quizás el menos reconocido o entendido- de todos los mecanismos que se trabajen en contra de la distribución al azar de las partículas en un mezclado sólido-sólido.

Muchas de las ciencias tradicionales del mezclado son derivadas de la experiencia con líquidos y pastas. La conductividad eléctrica de tales mezclas son relativamente altas, y así son las fuerzas necesarias para introducir un movimiento al azar.

En un marcado contraste, las partículas sólidas en contacto con otra -o más marcadamente cuando ellas están suspendidas como polvos- exhiben una muy baja conductividad eléctrica en sus superficies. Las fuerzas que pueden causar el movimiento de tales partículas sólidas son extremadamente diminutas.

La relativa pequeña carga electrostática que puede existir en partículas sólidas, puede producir efectos drásticos. Siendo estas el principal agente responsable para el fenómeno conocido

como "no mezclado".

En un mezclado binario, por ejemplo si todas las partículas A se atraen una con otra y repelen a todas las partículas B, es posible obtener casi una separación perfecta de las partículas A y B en la completación de la operación del mezclado. Cada extremo del tanque puede contener casi 100% de partículas A o B como se de el caso.

Esto es un ejemplo extremo. Aunque la separación debida a las cargas nunca es completa, este efecto es encontrado con más frecuencia que generalmente reconocido. Esto puede prolongar el tiempo de mezclado y ser un factor en la producción de un mezclado insatisfactorio.

Otro camino o vía en la cual las cargas electrostáticas pueden identificarse es examinar a lo largo de varias caras de una partícula individual. No es raro, por ejemplo, ver pigmentos adheriéndose a ciertas caras de bolitas de plásticos, pero rechazando a otras caras cubiertas adyacentes.

El movimiento al azar que un mezclador imparte a su contenido de partículas, irónicamente cuando es demasiado, sirve para hacer posible el no mezclado. Llevándose esto a cabo en dos pasos:

1. La superficie o área del estado del electrón está desbalanceada por los efectos de fricción de partículas que frotan contra otras. Este movimiento constante induce las cargas electrostáticas.
2. Este mismo movimiento muestra que muchas partículas moviéndose así, quedan libres para segregarse. Las fuerzas electrostáticas pueden ser débiles para afectar el movimiento en mayor escala, pero en alguna medida estas fuerzas sí se superimponen a las fuerzas dinámicas al azar.

La combinación como fuerzas estáticas aumenta más y más, haciendo efectivo en gran escala el mecanismo de segregación.

### 1.2.7 Desgaste del equipo.

Las mezcladoras de volteo simple son las que tienen menos desgaste. Los dispositivos de atrición en los volteadores pueden presentar problemas graves de abrasión con ciertos materiales, como la arena y los granos abrasivos de las ruedas de molinos. Para estos casos se deben tomar en cuenta los recubrimientos resistentes a la abrasión, como los de caucho, aleaciones especiales o electrodeposiciones. Un dispositivo agitador interno se puede desgastar, incluso cuando su velocidad sea baja. Sobre todo cuando se tengan que mezclar materiales muy abrasivos, se tendrán que sopesar los beneficios de un dispositivo divisor de aglomerados en función de la contaminación potencial y los costos de reemplazamiento y mantenimiento.

### 1.2.8 Flexibilidad.

Cuando se deben mezclar lotes de tamaños muy distintos, la flexibilidad de la capacidad operacional puede permitir la utilización de menos mezcladoras. Ciertas características pueden requerir una capacidad no flexible, por ejemplo, un dispositivo de agitación interna en una mezcladora de volteo por lo común no funcionará eficientemente, a menos que el lote se cargue hasta cierto nivel. La necesidad de esas características se debe sopesar con las limitaciones por una gama estrecha de capacidades de operación, al escoger equipos para una operación en la cual los tamaños de los lotes pueden variar considerablemente.

En general, el efecto del porcentaje de volumen de la mezcladora que ocupa el lote sobre lo adecuado del mezclado se deberá tomar en cuenta, sobre todo cuando se considera algún cambio del porcentaje de volumen recomendado.

### 1.2.9 Mezclado continuo.

Aunque el mezclado por lotes ha sido el método predominante de mezcla de sólidos, se está tomando en cuenta la utilización de las mezclas continuas en muchas industrias. Hay dos tipos de operaciones de mezclado continuo. El primero tiene un bajo volumen de retención y proporciona una combinación a escala fina de las partículas, por medio de elementos de corte e impacto, como los que se usan en las máquinas de molienda. Algunas máquinas de este tipo son los molinos de martillos, impacto, jaula y chorro. Es esencial que la alimentación a esas máquinas se proporcione adecuadamente y se premezcle para obtener un producto uniforme.

El segundo tipo de mezcladora continua incluye máquinas de retención elevada, que contienen mecanismos de agitación y transporte. Estos rediseñan las partículas individuales y desplazan grandes volúmenes de materiales, haciendo pasar el lote por la máquina. Las mezcladoras de este tipo pueden producir combinaciones en escala fina y gruesa. Con frecuencia se usa la mezcladora del tipo de banda para el mezclado continuo, aunque también se emplea para la mezcla por lotes. También se desarrolló una mezcladora continua de masa trituradora.

La composición promedio de la corriente que sale de una mezcladora continua es la misma que el promedio de las corrientes agregadas que entran. Las variaciones en las porciones de las corrientes de entrada se amortiguarán mediante la acción de mezclado de una máquina continua. Esas variaciones de las corrientes de afluente se harán menores, conforme aumente el tiempo promedio de resistencia de los sólidos y se haga mayor la frecuencia de las variaciones.

Se pueden utilizar ciertos criterios generales para determinar si será conveniente o no el flujo continuo. Este último se deberá tomar en cuenta si:

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

- 1) se puede aplicar una formulación simple durante un período largo.
- 2) las fluctuaciones del producto de salida se encuentran dentro de los requisitos del procesamiento,
- 3) se puede lograr una dosificación suficientemente precisa de los ingredientes,
- 4) el resto del proceso merece una mezcla continua.

**El flujo continuo no es conveniente si:**

- 1) se esperan cambios frecuentes de las formulaciones,
- 2) las fluctuaciones de la composición de los productos están fuera de la gama permitida,
- 3) los ingredientes no se pueden dosificar con el nivel necesario de precisión,
- 4) se incluyen ciclos complejos de temperatura o presión.

A veces, un sistema de mezcla y dispersión se compone de una o más unidades por lotes, que proporcionan alimentación a una unidad continua de dispersión intensa. Otra posibilidad sería una mezcladora por lotes y una tolva de almacenamiento intermedio, que proporcionarán una alimentación continua a una unidad de dispersión final. Se pueden utilizar diversas combinaciones de este tipo con un muestreo adecuado en los puntos apropiados, cuando el flujo continuo sea conveniente, a condición de que se puedan superar ciertas características.

### 1.3 Selección del equipo.

A través de los años ha habido mucha confusión en cuanto al desarrollo de los mezcladores para suplir las demandas de los procesos químicos. Esto se debe a las propiedades y características de flujo de los materiales procesados: composición, tamaño, densidad, forma, cohesión y tendencias de segregación, las que varían grandemente con las diferentes propiedades y aplicaciones.

Como resultado, existe una abundante gama de opciones de mezcladores para un pequeño grupo de consumidores, aparatos como mezcladores silo con capacidades de 1,000 m<sup>3</sup> o más. Esta vasta oferta de opciones hace la tarea de selección de un mezclador compleja y difícil, sumado también a la escasez de información para los muchos diseños de mezcladores y, además, una falta de confianza para el aumento de la escala de los mismos.

En realidad, la selección de mezcladores y su diseño se ha logrado en gran parte por procesos empíricos.

Antes de 1,970, por ejemplo, mucha de la información publicada en el campo fue limitada a una comparación de resultados de mezcla de distintos tipos de mezcladores.

Sólo recientemente hubo un aumento interesante en las propiedades de los materiales, mecanismos de mezclado, cualidades de mezcla y diseño de mezcladores. Resultando de esto un claro criterio para la selección correcta de equipo de mezcla para aplicaciones específicas, (tabla 2.1).

La mezcla de volúmenes de sólidos incluye dos mecanismos principales: convección y difusión de partículas.

Convección es el movimiento fortuito de elementos macroscópicos de un material dentro de un mezclador. La difusión, en contraste, es una redistribución de movimiento relativo de unas partículas respecto a las otras.

Existen tres formas de llevar a cabo la mezcla por convección y difusión:

- 1) Agitación mecánica
- 2) Fuerza neumática
- 3) Acción gravitacional

La selección correcta depende de las propiedades de los materiales, capacidades requeridas y de cómo se necesite manejar el proceso (Lotes o continuo), (ref. No. 13).





## 2. TIPOS DE MEZCLADORES UTILIZADOS EN LA MEZCLA DE SÓLIDO-SÓLIDO.

### 2.1 Mezcladores de volteo.

Los mezcladores de volteo son, por lo general, mezcladores por lote. En un mezclador de este tipo la mezcla se lleva a cabo colocando el material en un recipiente el cual gira haciendo que el material se derrumbe sobre si mismo.

Las formas de los recipientes se han desarrollado con los años, los más comúnmente usados hoy día tienen forma de cubos, doble cono, conos V y cilindros, (fig, 2.1).

La rotación del mezclador es lo más sencillo del diseño, el proceso de mezclado se logra a través de la fricción entre el material y las paredes del recipiente y entre las mismas partículas.

Este movimiento ocasiona que el material corra y caiga dentro del recipiente resultando de esto una mezcla de acción difusiva.

Los efectos resultantes del contacto entre partículas en una mezcla difusiva corresponden en gran parte a la velocidad angular crítica.

Cuando la velocidad angular de los recipientes excede el valor crítico, grupos de partículas son lanzadas lejos de la pared, dando como resultado un movimiento convectivo centrífugo. Tal mezcla convectiva no dejará que se produzca del todo una mezcla difusiva. De cualquier modo la mezcla difusiva, la cual predomina en la superficie del material, puede mejorarse colocando deflectores apropiados para proporcionar a la mezcla una acción convectiva axial.

En el caso de los mezcladores de tambor puede hacerse una modificación para una operación continua debido a que el material fluye en una dirección, y la sencillez de los recipientes facilita la limpieza de los mismos. Además, ya que los materiales en proceso no tienen ningún contacto con los cojinetes o con el

sistema de lubricación, no existe ninguna contaminación. Esto hace posible que en los procesos se tenga una alta pureza del producto.

Estos mezcladores, por su misma acción de derrumbe, no se recomiendan para polvos muy finos.

Los mezcladores de volteo están disponibles en capacidades arriba de 5.5 m<sup>3</sup>, y su carga máxima está cerca de un 60% de su volumen. Para grandes capacidades, los costos de estos mezcladores comienzan a hacerse prohibitivos ya que se requerirán de grandes soportes para manejar los desbalances causados por la exentricidad de la carga.

En general, los mezcladores de volteo son relativamente baratos, porque su diseño es simple. Por lo tanto, como el mezclador es movido completamente, su consumo de energía estará alrededor de 5 kW/1000 kg. de carga lo cual es relativamente alto. Esto se debe a que la acción difusiva de la mezcla toma un gran tiempo para completarse y porque los recipientes rotativos deben diseñarse con grandes precauciones de seguridad, comparados con otro tipo de mezcladores.

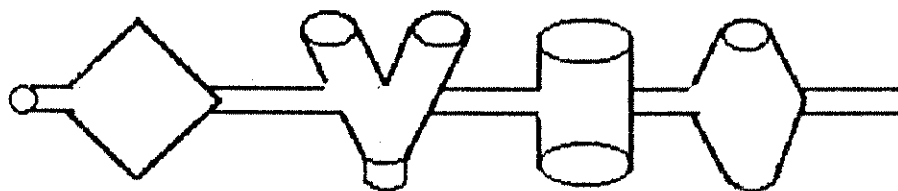


Fig. 2.1

La fig. 2.1 muestra algunos diseños de mezcladores de volteo.

Diseños más complejos, tales como el mezclador de doble cono, y cascos gemelos (fig. 2.2), incrementan la intensidad de la mezcla intercambiando el material en ambos sentidos vertical y horizontalmente, la eficiencia también puede mejorarse por medio de deflectores.

Alternativamente el mezclador de cascos gemelos podrá tener flechas rotatorias en forma de canaletas. De esta manera, el giro y la acción de dispersión de las canaletas intensifican la mezcla introduciendo un estado de fluidez mecánica, y por lo mismo este tipo de mezclador no está diseñado para romper aglomerados.

El mezclador de cascos gemelos también puede utilizarse para aglomeración de polvos secos. El tamaño de los mismos puede controlarse variando el tamaño de las canaletas, (ref.5 y 13).

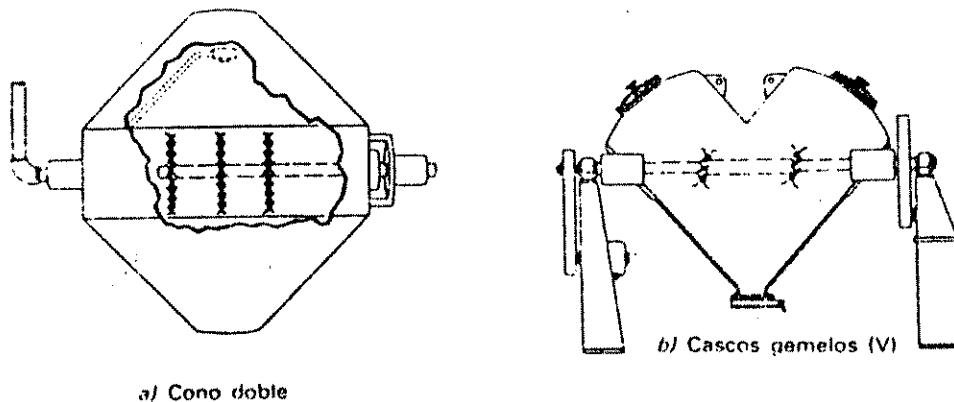


Fig. 2.2

La fig. muestra dos diseños de mezcladores de volteo

## 2.2 Artesa o casco estacionario.

Hay ciertos tipos de mezcladoras en los cuales el recipiente es estacionario y el desplazamiento de los materiales se logra mediante la rotación simple o múltiple de dispositivos mezcladores internos.

Entre los más comunes se encuentran los siguientes:

-Mezclador de banda

- Mezclador de gusano vertical
- Mezclador de masa trituradora
- Mezclador de rotores gemelos
- Mezclador de rotor simple
- Mezclador de turbina

### 2.2.1 Mezclador de banda.

Un mezclador de cintas es de tipo convectivo y está provisto de un eje central y un agitador de cintas helicoidales. incorporado sobre un mismo eje (fig.2.3). Dos cintas que actúan en sentidos contrarios, una de ellas desplazando lentamente el sólido en una dirección, mientras que la otra se mueve rápidamente en sentido contrario. Las cintas pueden ser continuas o no. El mezclado resulta como consecuencia de la «turbulencia» inducida por los agitadores de sentido contrario y no del movimiento de los sólidos a través del recipiente que los contiene. Algunos mezcladores de cintas operan por cargas, mientras que otros trabajan en continuo, introduciendo la alimentación de sólidos por un extremo y descargándolos por el otro. La carcasa está abierta o ligeramente tapada en el caso de servicio suave y, cerrada, con paredes gruesas, en el caso de operación a presión o vacío. Los mezcladores de cintas resultan eficaces para pastas poco espesas o para polvos que no fluyen fácilmente. Algunas unidades discontinuas son muy grandes, pudiendo cargarse hasta 30 000 litros de material.

Estos mezcladores resultan sensibles al nivel de carga el cual debe estar entre el 50% de la capacidad total, ya que con menos material existe la posibilidad de que la calidad de la mezcla disminuya.

Las tendencias de segregación son compensadas por la acción convectiva de la mezcla. En algunos casos, la segregación puede ocurrir en la parte baja del mezclador en tales situaciones se colocan cintas removedoras que limpian los depósitos de material.

Los mezcladores de cinta no son fáciles de limpiar y por lo tanto no se recomiendan para materiales muy pegajosos. El consumo de potencia es relativamente alto con un promedio de 13kW/1000 kg de carga, esto se debe a que el agitador gira alrededor de la masa total, así como por la fricción generada entre la cinta el material y la pared del mezclador. La máxima capacidad de estos mezcladores está alrededor de 15m<sup>3</sup>.

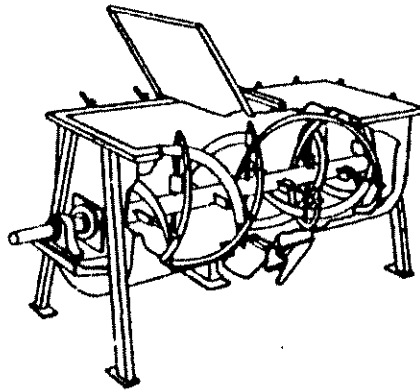


Fig. 2.3

La fig. muestra un mezclador de banda

### 2.2.2 Mezclador de gusano vertical.

Los granos que fluyen libremente y otros sólidos ligeros se suelen mezclar en un recipiente vertical provisto de un transportador helicoidal que eleva y conduce el material (fig.2.4). La hélice de doble movimiento se desplaza formando una órbita alrededor del eje central de un recipiente cónico, que recorre todas las partes del mezclador.

El gusano puede ser cilíndrico, cónico o en forma de cinta espiral. Este último puede utilizarse para el mezclado de pastas. El movimiento de órbita del gusano crea tanto un desplazamiento axial como transversal recirculando nuevamente el material por gravedad. El resultado es convección tridimensional

combinado con la acción de mezcla. La acción dominante de la mezcla convectiva compensa bastante bien la segregación interna y superficial.

Como resultado el mezclador puede utilizarse para materiales que presentan, problemas leves de segregación, alguna cohesión y que fluyan libremente.

Para evitar, aglomeraciones excesivas entre el gusano y la pared el espacio debe estar cerrado por lo menos seis veces el diámetro promedio de partícula.

La potencia consumida y el calor generado son relativamente bajos, siendo el promedio requerido para estas unidades de 3.5 kW/1000kg de carga, y se fabrican en numerosos diseños comerciales, con capacidades arriba de 60m<sup>3</sup>, obteniéndose así bajo costo de mezcla.

El tiempo de mezcla puede reducirse a la mitad con un mezclador de gusanos gemelos y en un 30 a 40% con una unidad con gusano de forma cónica siendo este tipo de mezclador muy útil cuando un componente del material tiende a flotar, o si, su fricción interna es muy baja, y cuando hay una considerable diferencia entre las densidades volumetricas, esto se debe a que las amplias espiras en la parte superior del gusano están cerradas hacia el centro del mezclador y, de este modo las partículas flotantes son atraídas hacia adentro del movimiento de la mezcla.

Para aglomeración de materiales, el mezclador de gusano vertical puede proveerse de un sistema de atomización para líquidos. Esta aglomeración está restringida a materiales que fluyen limitadamente.

Si hay líquidos grasosos o pegajosos que dispersan las partículas, entonces un mezclador de gusanos gemelos provisto de un eje rotatorio de alta velocidad colocado en la parte baja del recipiente, puede ser la solución.

En este tipo de diseños, mezcla y formación de aglomerados se efectúan simultáneamente.

En estas unidades la mezcla generalmente es más lenta que en

los mezcladores de cintas pero, el consumo de energía también es menor.

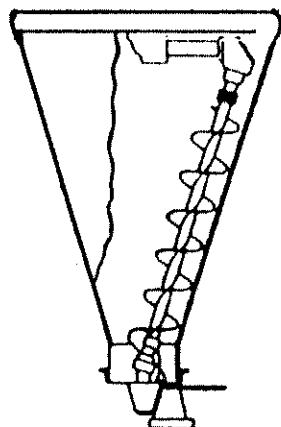


Fig. 2.4

Aquí se muestra un mezclador de gusano vertical (tipo de órbita)

### 2.2.3 Mezclador de maza trituradora.

Una mezcladora de moletas produce una acción de mezclado diferente a la de los demás aparatos. El moleteado es una acción de frotamiento similar a la que tiene lugar en un mortero. En el tratamiento a gran escala esta acción es efectuada por los anchos y pesados volantes que contiene (fig. 2.5). En este particular diseño de moleteadora el recipiente es estacionario y el eje vertical central es móvil, dando lugar a que los volantes de la moleteadora rueden en un recorrido circular sobre una capa de sólidos situados en el fondo del recipiente. La acción de frotamiento se produce como consecuencia del deslizamiento de los volantes sobre los sólidos. Unas rosquetas llevan los sólidos debajo de los volantes de la moleteadora, o hasta una abertura situada en el fondo del recipiente, al final del ciclo, para descargarlo. En otro tipo de diseño el eje de los volantes se mantiene estacionario mientras que el recipiente gira, en tanto

que en otros los volantes no están centrados en el recipiente sino ladeados, y tanto los volantes como el recipiente son móviles. Las rosquetas de mezclado pueden sustituirse por volantes de moleta para dar lugar al llamado mezclador de cubeta. Las moleteadoras son buenos mezcladores para cargas de sólidos duros y pastas; y especialmente eficaces para recubrir uniformemente las partículas de sólidos granulares con una pequeña cantidad de líquido. También existen mezcladores de moletas continuos con dos cubetas de mezclado dispuestas en serie.

Estas unidades son idealmente convenientes para esas aplicaciones donde la generación de aglomerados es totalmente indeseable.

Los mezcladores de este tipo son fabricados de acuerdo a la capacidad en pies cúbicos, gravedad específica y plasticidad de los materiales a mezclarse que son los factores más críticos para determinar la potencia en aplicaciones dadas. Pequeñas unidades de (5-7 p<sup>3</sup>) requieren potencias de 7, 1/2 hp, mientras máquinas de 60p<sup>3</sup> requieren potencias arriba de 60hp.

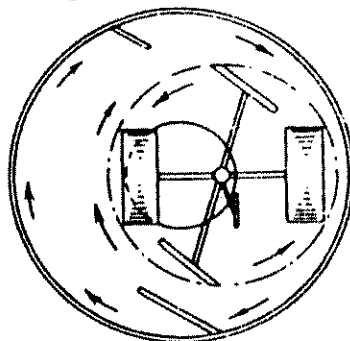


Fig. 2.5

Mezclador de maza trituradora por lotes, existen 3 tipos:

1-La plataforma es estacionaria y la torreta de la maza trituradora gira. 2-La torreta de la maza trituradora es estacionaria y la plataforma gira. 3-La plataforma gira en un sentido mientras que la torreta de la maza trituradora gira en sentido contrario. el tipo 3 es el que se ilustra arriba.



#### 2.2.4 Mezclador de rotores gemelos.

Consiste en dos ejes con paletas o gusanos alojados en un recipiente cilíndrico (fig.2.6). Existen varios tipos con velocidades del eje, que van desde moderadamente bajas hasta relativamente elevadas. Es útil para la mezcla continua de sólidos que no fluyen con libertad; pudiéndose agregar líquidos, y además añadir materiales más allá de la entrada. Es de fácil adaptación para el calentamiento o el enfriamiento. Algunas máquinas están diseñadas específicamente para la transferencia de calor durante el mezclado.

El mezclador de doble rotor ha sido usado durante mucho tiempo para mezclas muy generalizadas en la industria plástica.

Este equipo lleva a cabo las tareas listadas abajo y, en muchos casos, combinaciones de varias de estas funciones.

- 1) Mezcla de corte intensivo, tal como requiere la degradación de pastas.
- 2) Obtiene productos homogéneos de alimentaciones húmedas e irregulares.
- 3) Mezclado profundo de diferentes constituyentes.
- 4) Superficie expuesta para remoción de un componente.
- 5) Escala de mezcla molecular para obtener reacciones.

Los mezcladores de rotores gemelos se diseñan en dos formas;

- a)-Mezcladores de paletas
- b)-Mezcladores de gusano

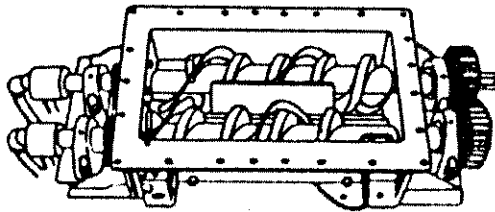


Fig. 2.6

Mezclador de rotores gemelos (adaptado para calentar el cuerpo con cubierta de transferencia y los gusanos huecos.

### Mezcladores de paletas

Estos mezcladores se distinguen por las puntas arqueadas en los extremos de las paletas. Estas puntas arqueadas y el ángulo delantero proporcionan una acción de frotado contra la pared y contra el rotor opuesto. El ángulo de dispersión de la punta de la cuchilla controla la cantidad forzada de material por debajo de la misma.

Las cuchillas controlan sólo parcialmente la profundidad de limpieza de la película en el extremo del canal, ya que las propiedades viscoelásticas de los materiales en proceso pueden hacer que los mismos se regresen un instante después que la cuchilla ha pasado. La gran área en la punta de la cuchilla ejerce el control final en la profundidad de la película de material dejada en la pared del mezclador. Cuando entre la longitud de las paletas se mantiene una relación de  $90^\circ$  la parte baja de éstas se combinan para obtener efectos de mezclado axial, generando un avance o retroceso del producto en forma continua o segmentada en el canal, la punta de cada canal limpia la pared del mezclador así como otro canal que se encuentra posicionado en el segundo eje.

Cuando la carcasa está llena la punta del canal frota y amasa el material contra la pared por medio de la ocurrencia de

desplazamientos volumétricos alternativos entre las dos secciones de la carcaza. Esta acción puede imaginarse observando la (fig.2.7). Durante cada dos revoluciones, el canal A está completamente de su lado de la división de las dos secciones de la carcaza, mientras la operación inversa del canal B esta sólo parcialmente funcionando en su sección original. Así, la sección por la cual atraviesa el fluido está constantemente oscilando, causando así alguna mezcla axial por encima de la acción de corte que ocurre en la punta de los canales.

El consumo de potencia es relativamente alto por el tipo de materiales que se manejan, (ref.2).

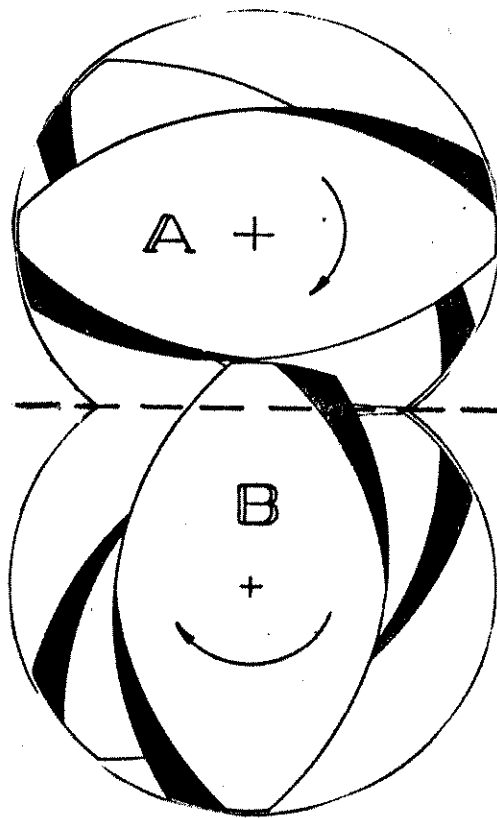


Fig. 2.7 desplazamiento volumétrico entre paletas al girar

## Mezcladores de gusano.

Cuando la tarea de mezcla es principalmente la combinación de diferentes constituyentes con alimentaciones irregulares, y además se requiere de un movimiento axial, esto puede lograrse en un mezclador de gusanos gemelos. Los mezcladores de gusanos gemelos básicamente funcionan bajo los mismos principios que los mezcladores de paletas pero a diferencia de estos los ejes deben rotar a la misma velocidad, además los gusanos pueden ser huecos con el fin de que sirvan como sistema de transferencia de calor.

### 2.2.5 Mezcladores de rotor simple.

El más común es el "ploughshare mixer" (fig.2.8) el cual consta de un tambor mezclador horizontal alimentado por medio de una tolva con una válvula de mariposa, la descarga se hace por la parte de abajo del tambor, además posee una abertura en la parte frontal del tambor para poder limpiarlo. Los elementos de mezcla consisten en un rotor horizontal, en el cual las paletas están de tal manera que funcionen a intervalos.

La forma geométrica, tamaño, número y velocidad de las paletas determinan el grado de movimiento tridimensional axial y radial. Las partículas chocan unas con otras en una acción generada por los elementos de mezcla y la pared del mezclador, las cuales luego vuelven a ser recogidas por las paletas repitiendo el ciclo. La forma especial de las paletas evita la aglomeración de las partículas contenidas entre estas y la pared del mezclador, la simultánea dispersión y acción de volteo constante protegen los materiales sensibles al calor.

Los ploughshare pueden manejarse con flujo libre, segregación sensitiva y polvos ligeramente cohesivos. Los materiales pueden cargarse en un rango desde un 20 a 70% en volumen del tambor y se construyen desde tamaños que están entre 0.13 y 30m<sup>3</sup>.

Como el material contenido en el mezclador es movido casi en su totalidad el consumo de energía es relativamente alto.

Los ploughshare pueden proveerse de aspersores de fluidos para obtener aglomerados. Independientemente de la alta velocidad de conducción pueden colocarse simples o múltiples paletas en el fondo del recipiente y entre las paletas principales para dispersar terrones y aglomerados en la mezcla, los mezcladores continuos de este tipo son por lo regular largos y angostos en comparación a las unidades por lotes. Y se construyen en unidades con volúmenes desde 0.15 hasta 15m<sup>3</sup>, y con un volumen total desde 4.5 a 450m<sup>3</sup> con un tiempo de residencia alrededor de un minuto.

Estos mezcladores se construyen para altas y medianas velocidades. Un rotor de alta velocidad proporciona el impacto máximo que no sería posible obtener de un molino triturador. Regularmente se utiliza para la desintegración y dispersión intensiva; es apropiado para el calentamiento o enfriamiento y para la adición de pequeñas cantidades de líquido.

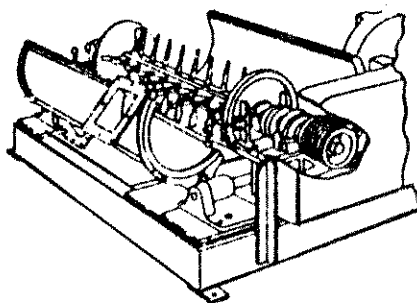


Fig. 2.8

Mezclador de rotor simple.

### 2.2.6 Mezclador de turbina.

Se trata de una artesa circular con un alojamiento en el centro, en torno al cual gira una estrella o una serie de brazos

con rejas o tableros moldeados en cada uno de los brazos. Los tableros moldeados o paletas giran en torno a la artesa circular; es adecuado para materiales secos que fluyen con libertad o materiales semihúmedos que no fluyen bien; también se puede adaptar para los problemas de recubrimiento y mezclado de líquido-sólido.

Existe también el mezclador centrífugo para procesos continuos, en donde el material se mezcla pasándolo por un rotor que está conectado directamente con el motor y consta de dos discos de acero separados 25mm y unidos por barras redondas que actúan como impactores. La fuerza centrífuga lanza el material contra las barras y hacia adentro de las paredes de la caja, desde las cuales cae por gravedad al tubo de descarga. Estas máquinas se construyen para manejar hasta 113kg. por minuto de material, (ref. 6 y 13).

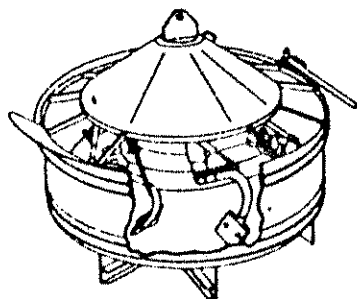


Fig. 2.9

Mezclador de turbina.

### 3. CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

#### 3.1 Dimensionamiento.

Para poder calcular las dimensiones del mezclador se necesita de los siguientes datos.

- 1) Capacidad del mezclador =  $W$  (lb)
- 2) Porcentaje en volumen a que debe llenarse el mezclador. En el caso de un mezclador de cascos gemelos este valor corresponde a un 60% (ver sección 2.1).
- 3) Densidad aparente promedio de los materiales a mezclar =  $\delta$  (lb/plg<sup>3</sup>).

Por lo tanto tenemos que, para las necesidades requeridas  $W = 275$  lb y  $\delta = 0.032183$  lb/plg<sup>3</sup> (obtenida experimentalmente)

$$W_t = \frac{W}{0.6} = \frac{275 \text{ lb}}{0.6} = 458.33 \text{ lb}$$

$$W_t = 458.33 \text{ lb}$$

$$V_t = \frac{W_t}{\delta} = \frac{458.33 \text{ lb}}{0.032183 \text{ lb/plg}^3}$$

$$V_t = 14,241.37 \text{ plg}^3$$

en donde,  $W_t =$  carga total en el mezclador (es decir lleno al 100%),

$V_t =$  volumen total del mezclador.

Dividiendo el mezclador en 3 partes (ver Fig. 3.1) y obteniendo experimentalmente los porcentajes en volumen de cada parte se tiene lo siguiente:

$$V_1 = V_2 = 39\% \quad \text{y} \quad V_3 = 22\%$$

Por lo tanto,  $V_1 = V_2 = V_t * 0.39 = 14,241.37 \text{ plg}^3 * 0.39$

$$V_1 = V_2 = 5,554.13 \text{ plg}^3$$

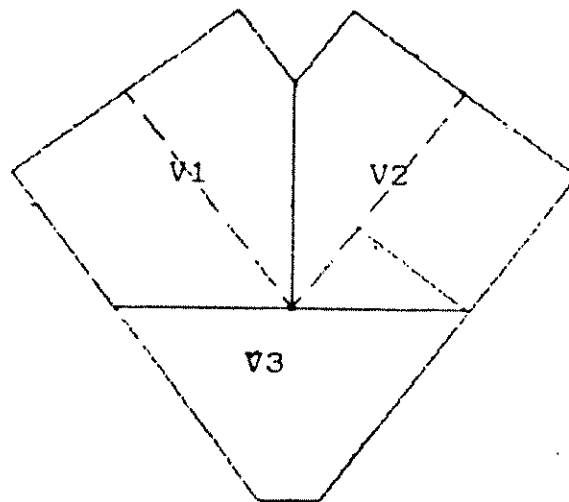


Fig. 3.1

Dimensiones de  $V_1$  y  $V_2$

Al observar las figuras 3.2a y 3.2b se define lo siguiente:

$$V_1 = V_2 = 5,554.13 \text{plg}^3 = V_{1a} - V_{1b} - V_{1c}$$

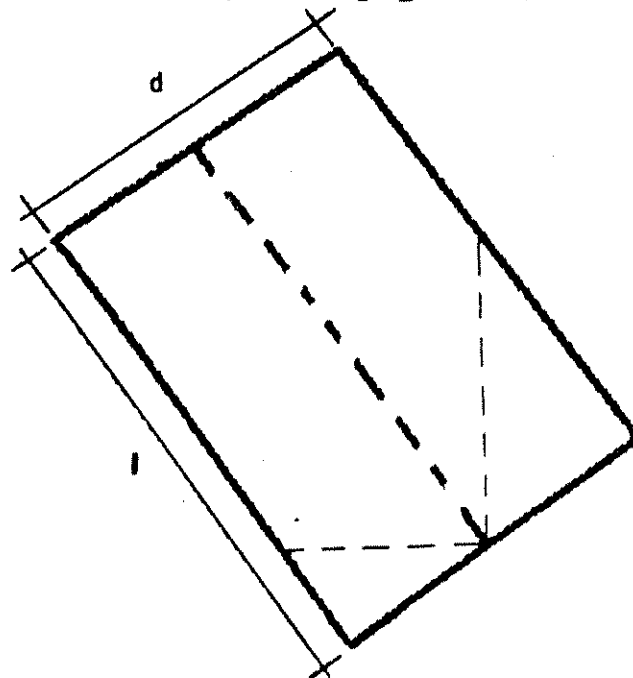


Fig. 3.2a

donde  $V_{1a}$  = al volumen del cilindro marcado con línea continua.



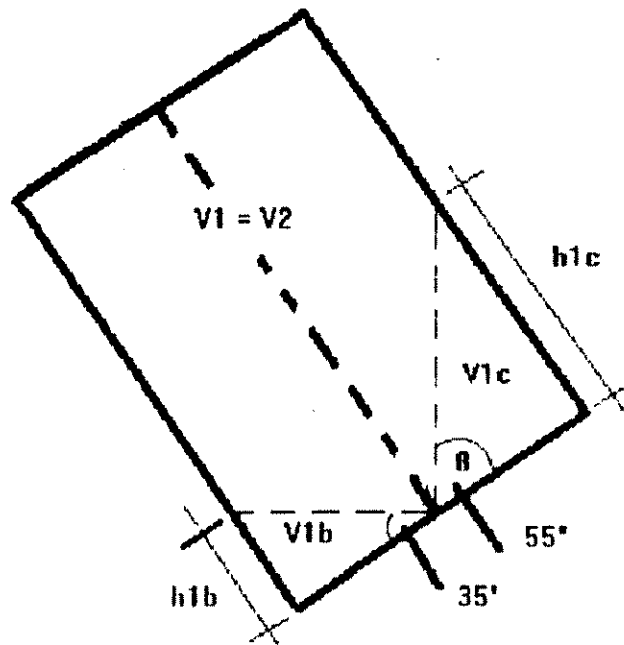


Fig. 3.2b

donde  $V_{1b}$  y  $V_{1c}$  = volúmenes de cuñas cilíndricas.

Si se asume  $d = 20$  plg y  $l = 22.2$  plg  
se tiene que,

$$V_{1a} = \pi * r^2 * l$$

$$V_{1a} = \pi * 10^2 * 22.2$$

$$V_{1a} = 6,974.33 \text{ plg}^3$$

Por simple geometría se puede observar en la fig. 3.2b que:

$$h_{1c} = r * \tan \beta$$

en donde,  $h_{1c}$  = altura cuña cilíndrica 1c,

$r$  = radio de la cuña = radio del mezclador,

$\beta$  = ángulo de la cuña (ver fig. 3.2b).

$$h_{1c} = 10 * \tan 55^\circ$$

$$h_{1c} = 14.28 \text{ plg}$$

Ahora tenemos que,  $V_{1c} = 2/3 * r^2 * h_{1c}$

en donde,  $V_{1c}$  = vol. cuña cilíndrica 1c (fig. 3.2b).

$$V_{1c} = 2/3 * 10^2 * 14.28$$

$$2V_{1c} = 952 \text{ plg}^3$$

de igual forma se obtiene  $V_{1b}$

$$h_{1b} = 10 * \tan 35^\circ$$

$$h_{1b} = 7 \text{ plg}$$

$$V_{1b} = 2/3 * 10^2 * 7$$

$$V_{1b} = 466.67 \text{ plg}^3$$

como  $V_1 = V_2 = V_{1a} - V_{1b} - V_{1c} = 5,554.13 \text{ plg}^3$

sustituyendo valores se tiene,

$$V_1 = V_2 = 6,974.33 \text{ plg}^3 - 466.67 \text{ plg}^3 - 952 \text{ plg}^3$$

$$V_1 = V_2 = 5,555.66 \text{ plg}^3 - 5,554.13 \text{ plg}^3$$

De acuerdo a lo anterior se concluye que las dimensiones obtenidas son las correctas.

#### Dimensiones de $V_3$

$$V_3 = V_t * 22\%$$

$$V_3 = 14,241.37 * 0.22$$

$$V_3 = 3,133.1 \text{ plg}^3$$

Aproximando el volumen de la sección  $V_3$  al volumen de un tronco de cono (ver fig. 3.3), se tiene lo siguiente;

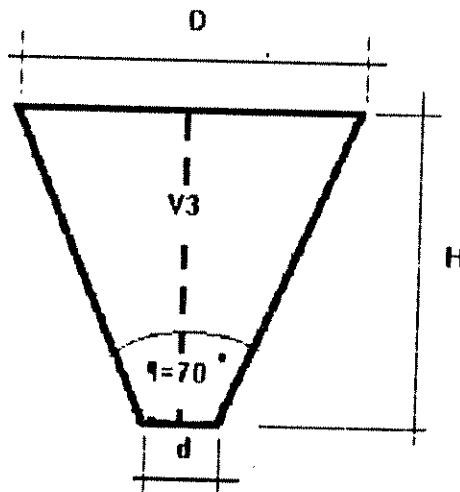


Fig. 3.3

$$V_3 = \pi / 12 \{ D^2 + D * d + d^2 \} * H$$

en donde  $D = a$  la hipotenusa de la cuña cilíndrica  $1b = 12.2\text{plg} * 2 = 24.41\text{plg}$ . Y si se asume  $d = 7\text{plg}$ , se obtiene  $H$ ,

entonces 
$$H = \frac{12 * V_3}{\pi \{D^2 + Dd + d^2\}}$$

sustituyendo valores 
$$H = \frac{12 * 3,133.1}{\pi \{(24.41)^2 + (24.41)(7) + (7)^2\}}$$

$$H = 14.67 \text{ plg}$$

De donde las dimensiones finales se muestran en la fig. 3.4

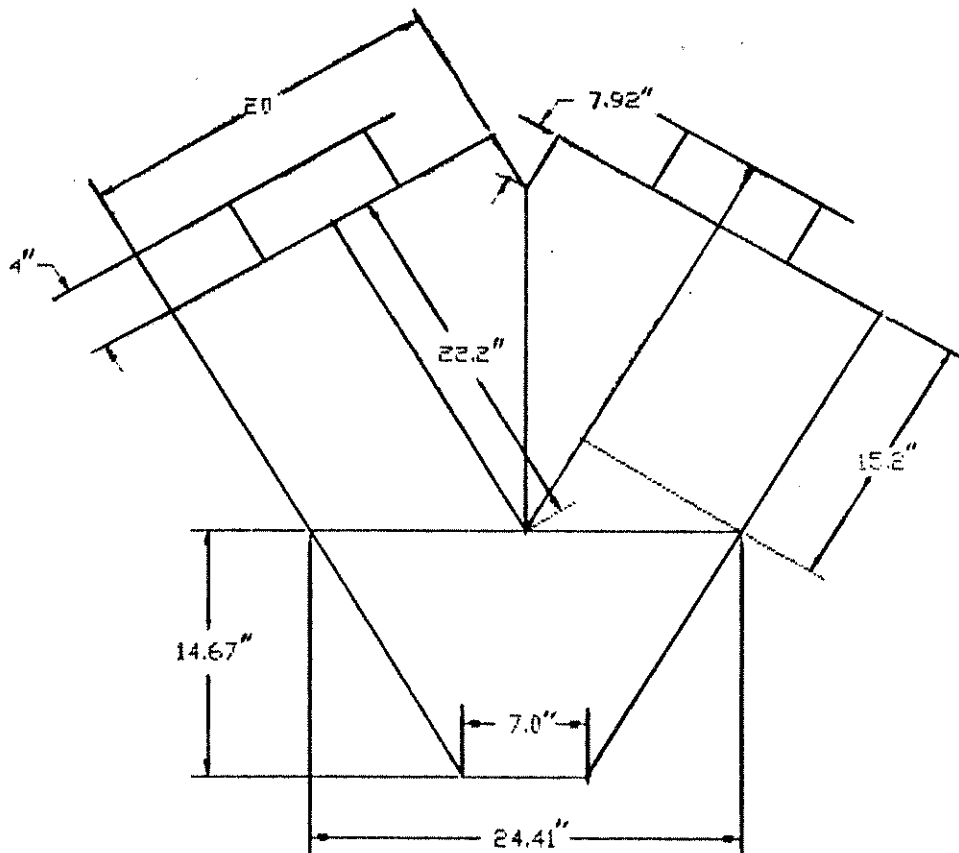


Fig. 3.4

Dimensiones finales del mezclador.

En las figuras 3.5a, 3.5b y 3.5c se muestra la forma para trazar el mezclador.

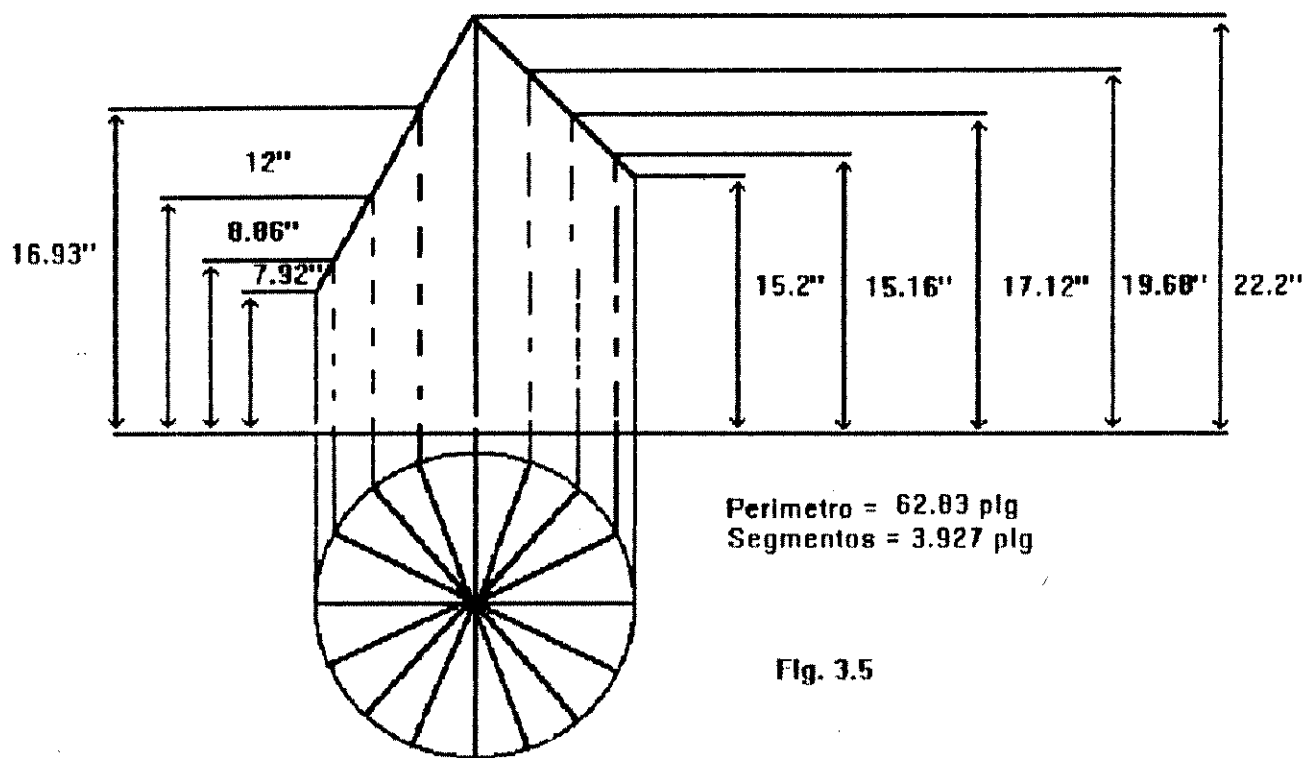


Fig. 3.5

Fig. 3.5a

El trazo se basa en una proyección del perímetro circular de la parte cilíndrica, la cual se divide en tantas partes como se desee para después proyectarlas sobre una vista lateral de la misma sección y, así obtener las medidas directamente del dibujo que deberá hacerse a escala natural.

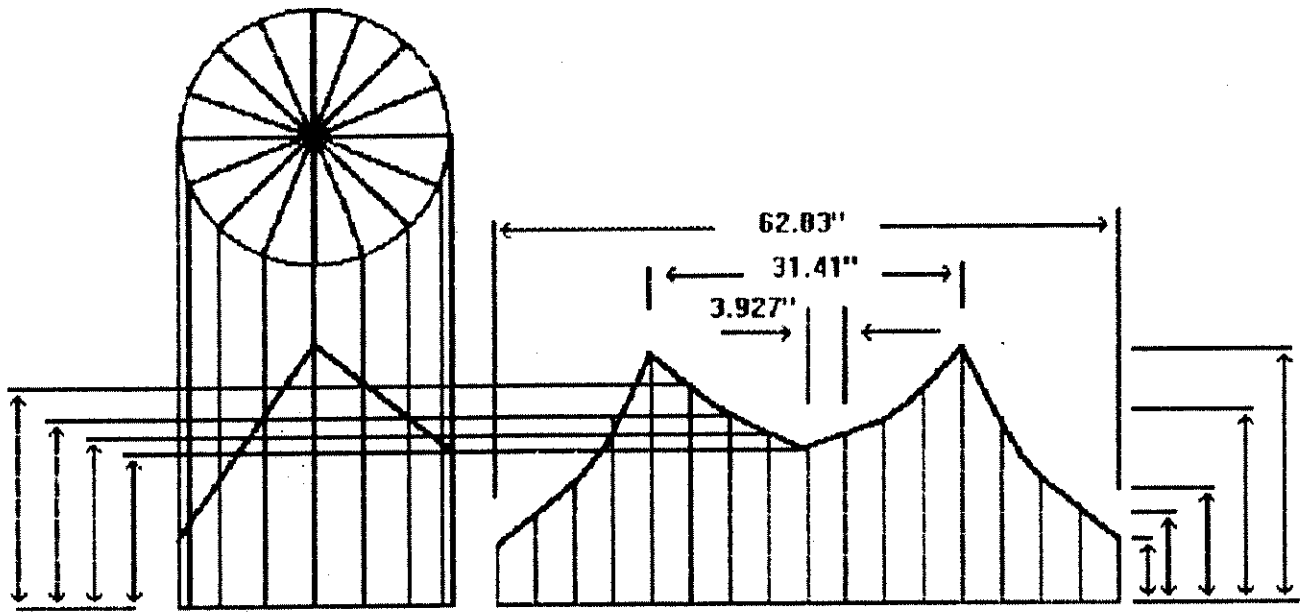


Fig. 3.5b

Forma de trazar la parte cilíndrica del mezclador (segunda parte).

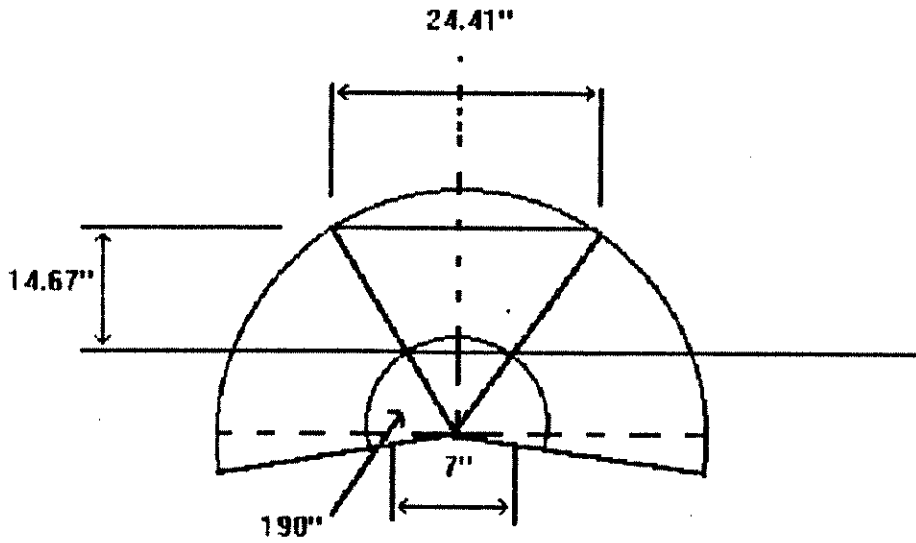


Fig. 3.5c

Aquí se muestra la forma de trazar la parte cónica del mezclador.

### 3.2 Centro de gravedad.

Para poder calcular el centro de gravedad se necesita primero definir los ejes de coordenadas, si tomamos el eje Z perpendicular a la hoja el eje Y como ordenada y el eje X como abscisa, es fácil darse cuenta al observar la fig. 3.6 que este es simétrico respecto al eje X y Z, por lo tanto los cálculos del mismo se harán respecto al eje Y.

Para propósitos de cálculo se dividió en segmentos la fig. 3.6, numerandolos del 1 al 5.

Segmento No. 1 ver fig. 3.6

$$a_1 = 7\text{plg. } y_1 = 6.66\text{plg. } b_1 = 10\text{plg. } \theta = 35^\circ$$

por triángulos semejantes tenemos

$$\frac{a_1}{x_1} = \frac{b_1}{y_1} \quad \text{entonces} \quad x_1 = \frac{a_1 * y_1}{b_1}$$

sustituyendo valores,  $7 * 10 * 6.66$

$$x_1 = \frac{\quad}{10} = 4.66\text{plg.}$$

entonces;

$$x_1/2 = 2.33\text{plg.}$$

y

$$z_1 = (x_1/2)\cos \theta$$

sustituyendo

$$z_1 = 2.33 * \cos 35^\circ$$

$$z_1 = 1.91\text{plg.}$$

de donde,

$$Y_{CG1} = 12.45 + z$$

$$Y_{CG1} = 12.45 + 1.91 = 14.36\text{plg.}$$

$$Y_{CG1} = -14.36\text{plg.}$$

donde  $Y_{CG1}$  = distancia desde el centro de gravedad del segmento No. 1 hasta el eje x.

Segmento No. 2

$$a_2 = 10\text{plg. } b_2 = 14.28\text{plg. } y_2 = 9.52\text{plg.}$$

por triángulos semejantes

$$\frac{a_2}{x_2} = \frac{b_2}{y_2} \quad \text{entonces} \quad x_2 = \frac{a_2 * y_2}{b_2}$$

$$x_2 = \frac{10 * 9.52}{14.28} = 6.67 \text{plg.}$$

$$x_2/2 = 3.335 \text{plg.}$$

$$d = x_2/2 \text{ Sin } \theta$$

$$d = 3.335 \text{ Sin } 35^\circ$$

$$d = 1.9129 \text{plg}$$

$$\text{Cos } \theta = \frac{(b_2 - y_2)}{c}$$

$$c = \frac{b_2 - y_2}{\text{Cos } \theta}$$

$$c = \frac{14.28 - 9.52}{\text{Cos } 35^\circ} = 5.81 \text{plg.}$$

sustituyendo,

de donde,

$$y_{CG2} = 12.45 - c - d$$

$$y_{CG2} = 12.45 - 5.81 - 1.9129$$

$$y_{CG2} = -4.7271 \text{plg}$$

Segmento No. 3

$$b_3 = 10 \text{plg.}$$

$$a_3$$

$$\tan \theta = \frac{a_3}{b_3} \text{ entonces } a_3 = b_3 * \tan \theta$$

$$a_3 = 10 * \tan 35^\circ$$

$$a_3 = 7 \text{plg.}$$

Por lo tanto

$$c_3 = \frac{22.2}{2} - a_3$$

$$c_3 = \frac{22.2}{2} - 7$$

$$c_3 = 4.1 \text{plg}$$

de donde,

$$y_{CG3} = c_3 \text{ Cos } \theta$$

$$y_{CG3} = 4.1 \cos 35^\circ$$

$$y_{CG3} = -3.36 \text{ plg}$$

**Segmento No. 4**

$$l_{CG} = 14.67 \text{ plg. } l_{CP} = 5 \text{ plg.}$$

$$y_{CG4} = 12.45 + \frac{l_{CG} + l_{CP}}{4}$$

donde  $l_{CG}$  = altura del cono grande y  $l_{CP}$  = altura cono pequeño.

$$y_{CG4} = 12.45 + \frac{14.67 + 5}{4}$$

$$y_{CG4} = -17.37 \text{ plg.}$$

**Segmento No 5**

$$a_5 = 3.5 \text{ plg}$$

$$\tan \theta = \frac{a_5}{b_5}$$

$$b_5 = \frac{a_5}{\tan \theta} = \frac{3.5}{\tan 35^\circ}$$

$$b_5 = 5 \text{ plg}$$

$$y_{CG5} = 12.45 + l_{CG} + \frac{l_{CP}}{4}$$

$$y_{CG5} = 12.45 + 14.67 + \frac{5}{4}$$

$$y_{CG5} = 28.37 \text{ plg.}$$

En la tabla 3.1 se tabularon los datos requeridos para obtener el centro de gravedad.



TABLA 3.1

COMPONENTES	VOLUMEN (plg <sup>3</sup> )	y (plg)	yV (plg <sup>4</sup> )
Cilindro	14,241.37 * 2	-3.36	-95,702.00
Cuña cil. grande	-952.00 * 2	-4.727	9,000.40
Cuña cil. pequeña	-466.67 * 2	-14.36	13,402.76
Cono Grande	3133.10	-17.37	-54,421.95
Cono Pequeño	64.00	-28.37	1,815.68
sumatorias	28,714.50	-68.19	-125,905.11

$$Y \Sigma V = \Sigma yV$$

$$Y = \frac{\Sigma yV}{\Sigma V}$$

sustituyendo datos

$$Y = \frac{-125,905.11}{28,714.50}$$

$$Y = -4.385 \text{ plg.}$$

donde Y = distancia a la que se localiza el centro de gravedad del mezclador.

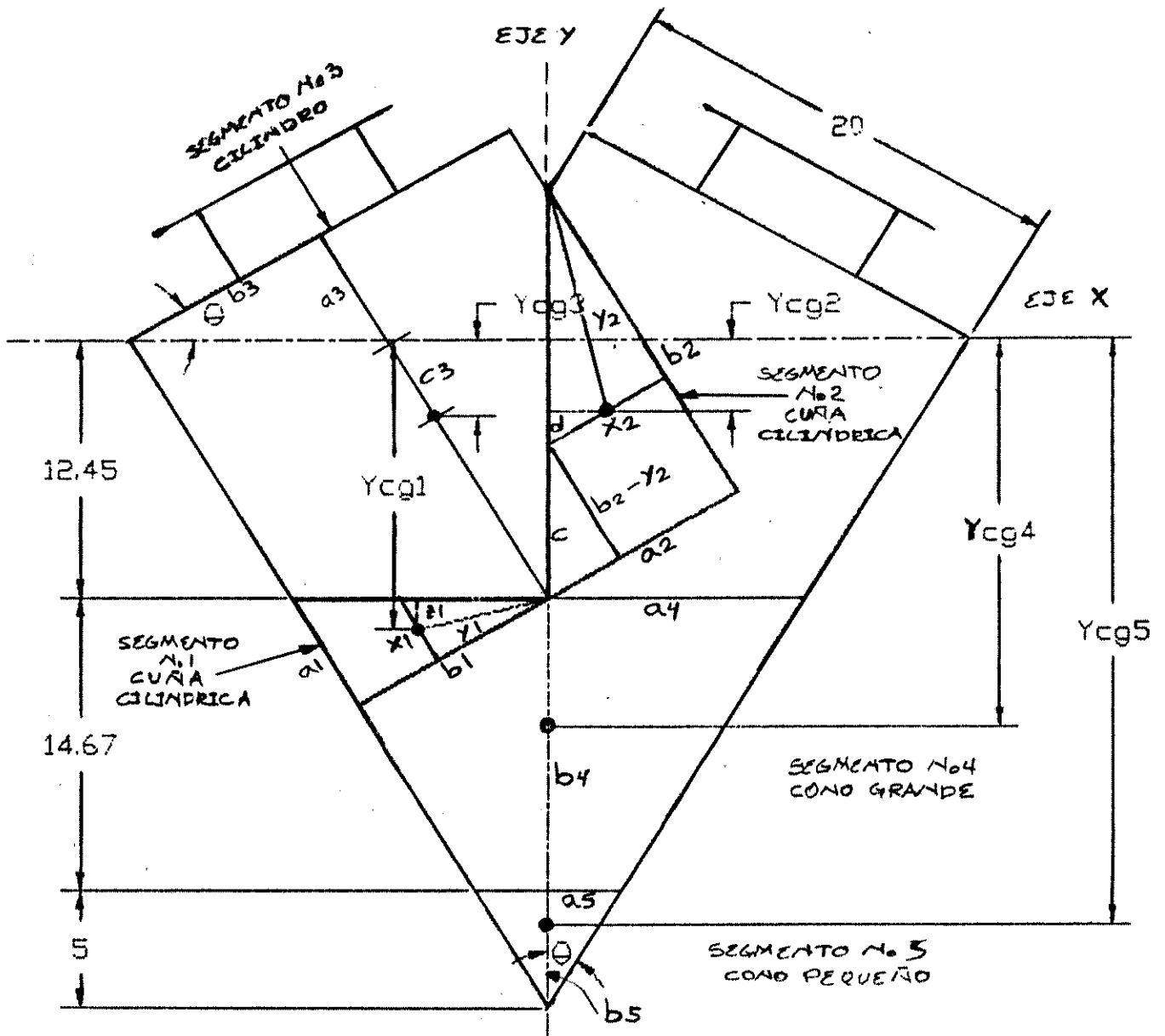


Fig. 3.6

En esta fig. se muestra como se dividió el mezclador en segmentos para encontrar su centro de gravedad.

### 3.3 Potencia necesaria.

La potencia absorbida por un mezclador de este tipo se basa principalmente en dos factores:

- 1)-El par torsor ocasionado por la carga contenida en este;
- 2)-La velocidad de rotación.

Par torsor.

Este será máximo cuando el centro de gravedad de la carga contenida en el mezclador se encuentre más alejada del eje de giro.

Sabiendo que el volumen total del mezclador es de 28,714.50plg<sup>3</sup>. (ver tabla 3.1), pero también que su capacidad máxima es de 60%,

tenemos,

$$V_{\text{sex}} = 28,714.50 * 0.6$$

$$V_{\text{sex}} = 17,228.7\text{plg}^3.$$

En la fig. 3.7 se puede observar que cuando la carga esté del lado cónico el torque será máximo. Por lo tanto se necesita saber la localización del centro de gravedad de la carga.

Si se asume que la parte inferior del mezclador es un cono hasta donde está situado el eje X, no se incurrirá en un error apreciable.

Así, el volumen de un cono está dado por la siguiente ecuación:

$$V_{\text{cono}} = (1/3) * \pi * a^2 * h$$

donde a = radio de la base del cono = 22.5 plg.

h = altura cono = 32.12plg.

sustituyendo valores,  $V_{\text{cono}} = (1/3) * \pi * (22.5)^2 * 32.12$

$$V_{\text{cono}} = 17,028.22\text{plg}^3.$$

restandole el cono pequeño (ver tabla 3.1), tenemos

$$V_{\text{cono}} = 17,028.22 - 64 = 16,964.22\text{plg}^3.$$

de donde

$$V_{\text{sex}} - V_{\text{cono}}$$

sustituyendo  $17,228.17\text{plg}^3. - 16,964.22\text{plg}^3.$

por lo tanto se puede suponer que el material contenido en el mezclador solamente llegará hasta donde está situado el eje X.



Ahora se tiene que el par torsor está dado por la siguiente ecuación;

$$\tau = D * F \quad (3.1)$$

donde,  $\tau$  = torque aplicado

F = fuerza ocasionada por el peso de la carga = 275lb

sustituyendo valores  $\tau = 3.645\text{plg} * 275 \text{ lb}$

$$\tau = 1,002.381\text{b-plg}$$

### Velocidad de giro.

Para que haya efecto de mezclado de partículas en los componentes, se requiere de un movimiento relativo tal, con respecto a este que permita que la operación se efectúe eficientemente.

Recurriendo un tanto al absurdo y si se considera que la velocidad del mezclador es igual a cero, no habrá movimiento alguno de los ingredientes y consecuentemente no se obtendrá ningún grado de mezcla. si por el contrario, se supone que la velocidad del mezclador es tal que permita que por efecto centrífugo la carga del material se adhiera a las paredes del mismo tampoco se verificará la operación de mezclado.

Consecuentemente, las partículas deberán tener con respecto al mezclador un movimiento relativo para poder llegar a determinada posición para que en su caída se lleve a cabo el efecto de mezclado.

A la velocidad necesaria para satisfacer tal condición se le denomina velocidad de trabajo ( $V_t$ ) que corresponde, dependiendo del tipo de mezclador, y se encuentra entre el 70 y 80% de la velocidad crítica ( $V_c$ ), siendo esta, aquella a la cual el material a mezclar queda libre de la fuerza centrífuga, teniendo así, un libre movimiento convectivo.

Los cálculos siguientes permiten llegar finalmente a determinar la fórmula de la velocidad crítica, y deducir de ésta la velocidad de trabajo.

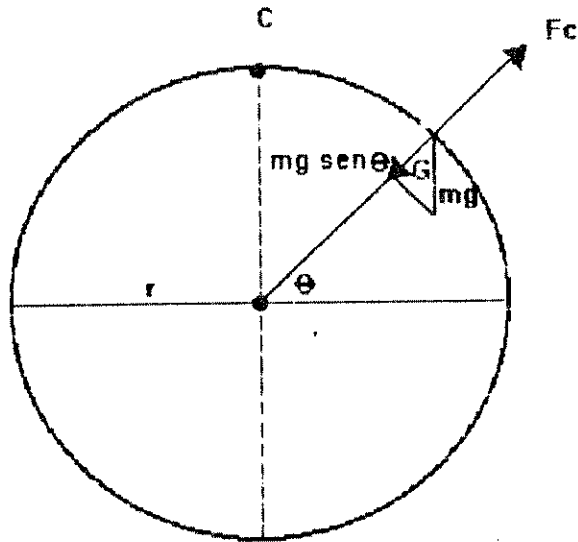


Fig. 3.8

Aquí se muestran las fuerzas actuantes sobre una partícula de material contenida en el mezclador.

$$F_c = \frac{mv^2}{r} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \sum F_r &= ma \\ F_c - mg * \text{Sin}\theta &= ma \end{aligned} \quad (3.3)$$

donde:  $F_c$  = fuerza centrífuga

Si analizamos el movimiento en el punto "C" (ver fig.3.8) se puede decir que en ese instante  $a = 0$  y  $F_c = mg$ , cuando se opera a la velocidad crítica.

entonces:  $\text{Sin}\theta = \text{Sin } 90^\circ = 1$

Por lo tanto,

$$\frac{mv^2}{r} = mg \quad (3.4)$$

$$v^2 = gr \quad (3.5)$$

La velocidad tangencial será:

$$v = n * \pi * d \quad (3.6)$$

en donde:  $n$  = velocidad angular (rps),

$d$  = diámetro interior (el máximo que describe el mezclador al girar) (pies).

sustituyendo 5 en 6

$$gr = n^2 * \pi^2 * d^2 \quad (3.7)$$

$$n = \sqrt{\frac{g * r}{\pi^2 * d^2}} \quad (\text{en rps}) \quad (3.8)$$

$$n = \sqrt{\frac{g}{4 * \pi^2}} * \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (3.9)$$

sustituyendo valores,

$$V_c = \frac{54.19}{r} \quad (\text{rpm}) \quad (3.10)$$

Por lo tanto en base a lo expuesto anteriormente la velocidad de trabajo será:

$$V_t = 0.75 * V_c \quad (3.11)$$

sustituyendo datos en 10 y, si  $r = 1.956p$  (ver fig. 3.7)

$$V_c = \frac{54.19}{\sqrt{1.956}}$$

$$V_c = 38.74 \text{ rpm}$$

sustituyendo en 11 tenemos:

$$V_t = 0.75 * 38.74$$

$$V_t = 29.06 \text{ rpm}$$

De donde la potencia está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\tau * w}{63,000} \quad (\text{hp}) \quad (3.12)$$

sustituyendo,  
en 12

$$P = \frac{1002.38 \text{ lb-plg} * 29.06 \text{ rpm}}{63,000}$$

$$P = 0.4624 \text{ hp}$$

Ahora para obtener la potencia de diseño  $P_d$  se escoge un factor de servicio  $F_s$  que se adapte a las condiciones de funcionamiento del equipo.

de donde  $F_s = 1.3$  para choque ligero (ref. No. 4)  
entonces,

$$P = 0.4624 * 1.3 = 0.6 \text{ hp}$$

**En conclusión se utilizará un motor de 0.75 hp.**

### 3.4 Eje de giro.

Para poder calcular el diámetro del eje de rotación es necesario conocer la magnitud de las siguientes cargas:

- 1)-Peso del mezclador
- 2)-peso propio del eje
- 3)-peso de la carga a mezclar

- 1)-Peso del mezclador.

Puesto que para nuestros propósitos es suficiente se utilizará lámina de acero al carbón ASTM A-36 de espesor = 1/8plg.

En la tabla 3.2 se muestran los datos tabulados de las áreas correspondientes a las diferentes secciones en las que se dividió el mezclador, para así también obtener el área total.



TABLA 3.2

Area total del mezclador

Componente	Area (plg <sup>2</sup> )
2 Cilindros	2,789.73
2 Cuñas cil. grandes	-571.20
2 Cuñas cil. Pequeñas	-280.00
1 Cono grande	754.38
1 Cono pequeño	-6.10
2 Tapaderas de carga con sus bases	948.76
1 Tapadera de descarga	182.21
Area total.	3,817.78

De donde el peso del mezclador está dado por la siguiente ecuación:

$$W_m = \delta * A * t \quad (3.13)$$

donde,  $W_m$  = peso del mezclador

$\delta$  = densidad del acero = 0.2829lb/plg<sup>3</sup>

$A$  = área total del mezclador = 3,817.78plg<sup>2</sup>

$t$  = espesor de la lámina de acero. = 0.125plg

sustituyendo datos en la ecc. # 13

$$W_m = 0.2829 * 3,817.78 * 0.125$$

$$W_m = 1351b$$

**Peso propio del eje.**

Para el eje se usará un acero rolado en frío (cold rolled)

AISI = 1018.

de donde el volumen está dado por la siguiente ecuación:

$$V_{eje} = (\pi * l * D^2)/4 \quad (3.14)$$

donde  $V_{eje}$  = volumen del eje

$l$  = largo = 63plg

$D$  = diámetro = 2 plg (asumido)

sustituyendo datos,

$$V_{eje} = (\pi * 63 * 2^2)/4$$

en la ecc. # 14

$$V_{eje} = 197.92\text{plg}^3$$

por lo tanto el peso está dado por la siguiente ecuación:

$$W_{eje} = \delta * V \quad (3.15)$$

sustituyendo

$$W_{eje} = 0.2829 * 197.92$$

en la ecc. # 15

$$W_{eje} = 56 \text{ lb}$$

de donde la carga total aplicada sobre el eje estará dada por la siguiente sumatoria

$$W_{total} = W_{mezclador} + W_{eje} + W_{producto}$$

sustituyendo

$$W_{total} = 135 + 56 + 275$$

$$W_{total} = 466\text{lb}$$

de lo anterior se puede obtener el diagrama de fuerzas que actúa sobre el eje, que a continuación se muestra:

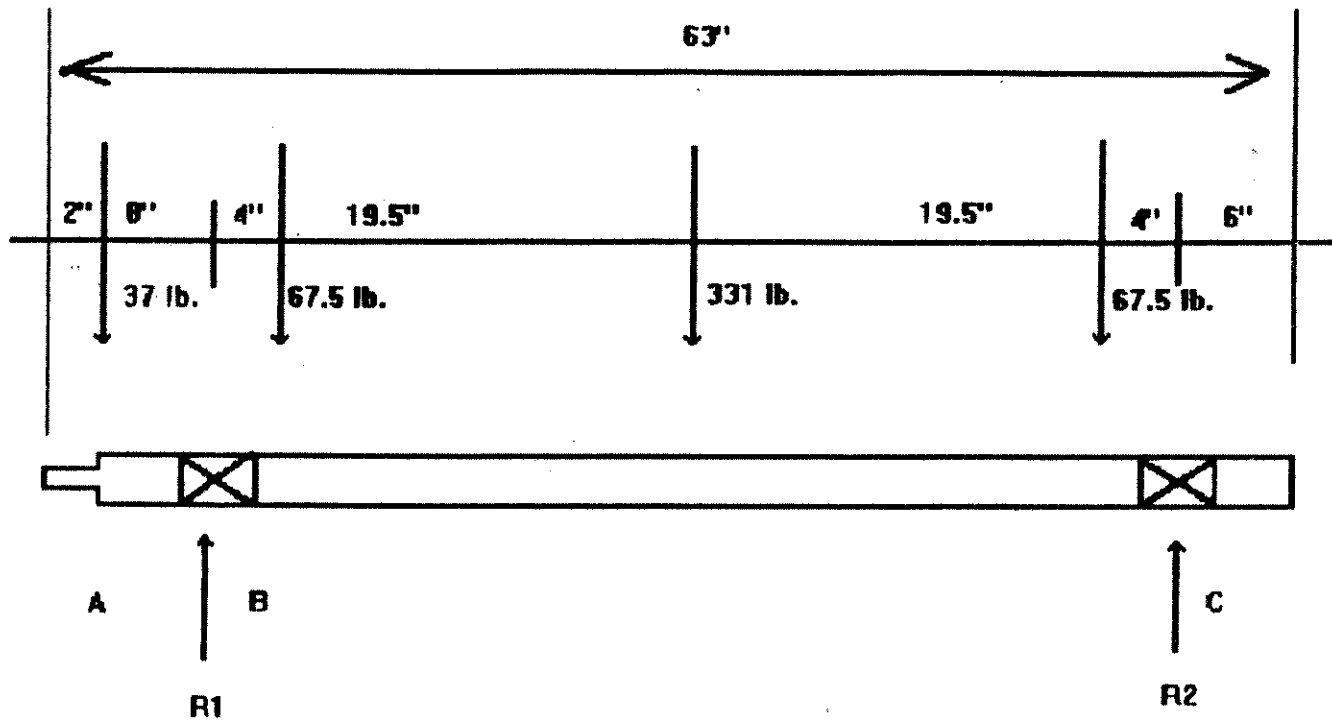


Fig. 3.9

En esta fig. se muestran las fuerzas actuantes sobre el eje.

Por lo tanto,  
entonces

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F_y &= 0 \\
 F_y &= -37 + R_1 - 67.5 - 331 - 67.5 + R_2 = 0 \\
 R_1 &= 503 - R_2 \qquad (3.16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 + \sum M_{R_1} &= 0 \\
 M_{R_1} &= -8 * 37 + 4 * 67.5 + 23.5 * 331 + 43 * 67.5 - 47 * R_2
 \end{aligned}$$

despejando

$$R_2 = 226.71b$$

sustituyendo este valor en la ecuación 3.16,

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 503 - 226.7 \\
 R_1 &= 276.31b
 \end{aligned}$$

Ahora se pueden trazar los diagramas de corte y momentos flexionantes,

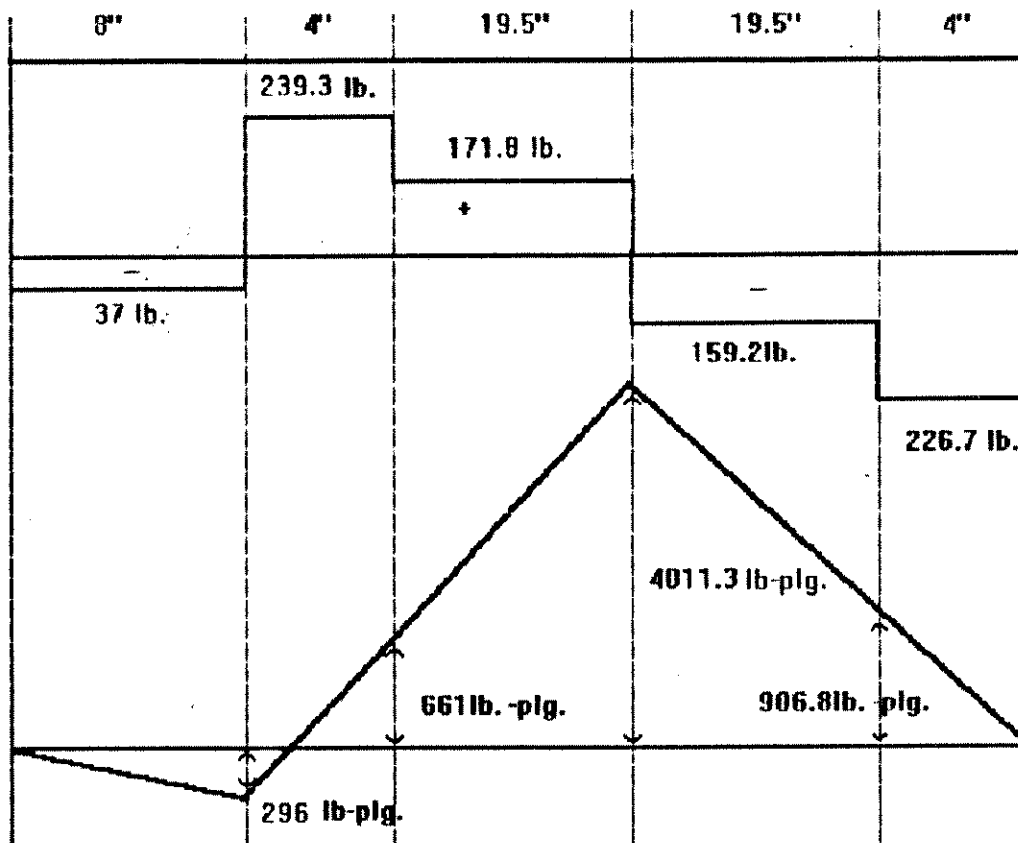


Fig.3.10

La fig. muestra los diagramas de corte y momentos flexionantes que actúan sobre el eje.

Puesto que el par torsor en el mezclador va de un valor máximo a cero tenemos,

$$\text{Par torsor promedio, } T_m = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (3.17)$$

$$\text{sust. en 17} \quad T_m = \frac{1,002.38 + 0}{2} = 501.19 \text{ lb-plg}$$

el par torsor variable está dado por la siguiente ecuación:

$$T_r = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \quad (3.18)$$

sustituyendo valores en la ecc. # 18

$$T_r = \frac{1002.38 - 0}{2}$$

de donde

$$T_r = 501.19 \text{ lb-plg}$$

De manera análoga se tiene para el momento flexionante, y puesto que la carga es repetitiva,

$$M_m = \frac{M_{\max} + (-M_{\min})}{2} = 0$$

Y para el momento flexionante variable se tiene,

$$M_r = \frac{M_{\max} - (-M_{\min})}{2}$$

$$M_r = M = 4,011.3 \text{ lb-plg. (ver diagrama de momentos)}$$

Para encontrar el diámetro de la flecha se utilizará la siguiente ecuación, obtenida de la ref. # 1

$$\frac{S_{yp}}{N} = \frac{32}{\pi D_o^3 \{1 - (D_i/D_o)^4\}} \sqrt{K_{ab} \left( \frac{M_m + S_{yp} M_r}{S_e} \right)^2 + (3/4) K_{at} \left( \frac{T_m + S_{ayp} T_r}{S_{es}} \right)^2}$$

ecc. (3.19)

donde,  $S_{yp}$  = esfuerzo de cedencia a tensión, lb/plg<sup>2</sup>

N = factor de seguridad

D = diámetro de la flecha, plg

$S_e$  = esfuerzo límite de fatiga corregido, lb/plg<sup>2</sup>

$M_r$  = momento flexionante variable, lb-plg

$K_{ab}$  = factor de choque por flexión, tensión o compresión

$M_m$  = momento flexionante medio, lb-plg

$K_{at}$  = factor de choque por torsión

$T_m$  = par de torsión medio, lb-plg

$T_r$  = par de torsión variable, lb-plg

$S_{eyp}$  = esfuerzo de cedencia a corte, lb/plg<sup>2</sup>

$S_{ee}$  = esfuerzo límite de fatiga a corte corregido, lb/plg<sup>2</sup>

Las variables que hacen falta para resolver la ecc. No. 1 se irán encontrando a continuación:

De la referencia # 1 se encuentran los siguientes datos,

$S_u = 75,000 \text{ lb/plg}^2$       y       $S_{yp} = 63,700 \text{ lb/plg}^2$

de donde, para acero se tiene que  $S_{eyp} = 0.58 * S_{yp}$       sustituyendo

$$S_{eyp} = 0.58 * 63,700$$

$$S_{eyp} = 36,946 \text{ lb/plg}^2$$

Por otro lado tenemos que:

$$S'_n = 0.5 * S_u \quad (\text{para acero forjado})$$

sustituyendo

$$S'_n = 0.5 * 75,000$$

$$S'_n = 37,500 \text{ lb/plg}^2$$

donde  $S_u$  = resistencia a la tensión, lb/plg<sup>2</sup>

$S_{yp}$  = resistencia a la cedencia en tensión, lb/plg<sup>2</sup>

$S_{eyp}$  = resistencia a la cedencia a corte, lb/plg<sup>2</sup>

$S'_n$  = esfuerzo límite de fatiga, lb/plg<sup>2</sup>

Ahora se debe obtener el factor de reducción de la resistencia a la fatiga, que está dado por la siguiente ecuación:

$$C_r = 1 - 0.08 * DMF \quad (3.20)$$

donde  $C_r$  = Reducción de resistencia de fatiga (factor basado en la confiabilidad),

D.M.F = Factor de desviación de la multiplicación (basado en la supervivencia del elemento mecánico).

Se escoge de la tabla 3.2 del libro de Deutschman diseño de máquinas, el valor del factor DMF = 1.64 correspondiente a una razón de supervivencia del 95%.

sustituyendo datos en la ecc. # 20,

$$C_r = 1 - 0.08 * 1.64$$

$$C_r = 0.869$$

El límite de la resistencia de trabajo, está dado por la siguiente ecuación:

$$S_e = (1/K_f)C_rC_aC_fC_wS'_n \quad (3.21)$$

donde,

$K_f$  = factor de concentración de esfuerzo de fatiga

$C_f$  = reducción de resistencia de fatiga, factor debido al acabado de la superficie

$C_a$  = reducción de resistencia de fatiga, factor debido al tamaño

$C_w$  = reducción de resistencia de fatiga factor debido a la soldadura

del apéndice B - 1 se tiene que para un cuñero de perfil

$K_f = 1.6$  en flexión y  $K_{fa} = 1.3$  a torsión

$C_a = 0.85$  (para especímenes sujetos a torsión y flexión desde 1/2" hasta 2" de diámetro)

del apéndice B - 3 con BHN = 156 y tomando la curva de acero estirado en frío se tiene  $C_f = 0.78$

sustituyendo en la ecc. No. 21

$$S_e = (1/1.6)(0.869)(0.85)(0.78)(1)(37,500)$$

$$S_e = 13,504 \text{ lb/plg}^2$$

$K_{eb} = 1$  y  $K_{et} = 1.2$  (ya que el eje estará sometido a choques ligeros en el arranque)

Para encontrar  $S_{es}$  tenemos la siguiente ecuación:

$$S_{es} = (1/K_{fa})C_rC_aC_fC_wS'_{ne} \quad (3.22)$$

donde  $S'_{ne}$  = esfuerzo límite de fatiga a corte, lb/plg<sup>2</sup>, el cual está dado por la siguiente relación:

$S'_{ne} = 0.32S_u$  (para acero)

sustituyendo valores  $S'_{ne} = 0.32(75,000)$

$S'_{ne} = 24,000 \text{ lb/plg}^2$

sustituyendo valores en la ecc. No. 22

$$S_{ee} = (1/1.3)(0.869)(0.85)(0.78)(1)(24,000)$$

$$S_{ee} = 10,637 \text{ lb/plg}^2$$

sustituyendo en la ecc. No. 19

$$\frac{63700}{N} = \frac{32}{\pi(2)^3} \sqrt{\left(\frac{63,700 \cdot 4.646}{13,504}\right)^2 + \frac{3}{4} * 1.2 \left(501 + \frac{36,946 \cdot 1,002.38}{10,637}\right)^2}$$

de donde,

$$N = 2.26$$

El valor de N resultante es adecuado para materiales promedio que trabajen en condiciones de medio ambiente ordinarias y sujetos a carga y esfuerzos que puedan calcularse (ref. #1).

### 3.5 Rodamientos.

Debido a que la carga sobre los rodamientos es puramente radial y, la velocidad de giro es baja se usarán rodamientos de bolas tipo rígido de una hilera según ref. # 11.

La siguiente ecuación proporciona la vida nominal de un rodamiento en horas de funcionamiento.

$$L_{10h} = \frac{10^{6Cb}}{60nP} \quad (3.23)$$

donde,  $L_{10h}$  = vida nominal, horas



$n$  = vel. angular, rev/min  
 $C$  = capacidad de carga dinámica, lb  
 $P$  = carga equivalente, lb  
 $b$  = 3 para baleros de bolas

Para encontrar la carga equivalente se tiene la siguiente ecuación:

$$P = XVF_r + YF_a \quad (3.24)$$

donde,  $P$  = carga equivalente, lb  
 $X$  = factor de carga radial  
 $Y$  = factor de carga axial  
 $V$  = factor de rotación = 1 para anillo interior girando  
 $F_r$  = carga radial, lb  
 $F_a$  = carga axial, lb

de la ref. # 11 obtenemos los siguientes datos:

designación del rodamiento = 61910

$d$  = 1.89plg. ( diámetro del eje con ajuste para los rodamientos)

$D$  = 2.83plg

$C$  = 3,271.85lb

De la ecuación 3.24 se puede observar que en este caso en particular la carga axial es nula por lo tanto  $X = 1$  y  $Y = 0$  (ref.# 1)

por lo tanto la ec. 3.24 se reduce como sigue,

$$P = F_r V X$$

recordando que  $F_r = 466$  lb ( carga que soportan los rodamientos)

sustituyendo valores  $P = 466 * 1 * 1$

$$P = 466 \text{ lb}$$

sustituyendo valores en la ec. 3.23

$$L_{10h} = \frac{10^6 * (3271.85)^3}{30 * 60 (466)^3}$$

$$L_{10h} = 192,286 \text{ hr}$$

mínimo una vida nominal de 30,000 hr, por lo tanto se concluye que el rodamiento que se calculó es adecuado y, como la vel. angular es baja se lubricará con aceite (ref. #11).

### 3.6 Volantes de inercia.

Observando el movimiento de rotación del mezclador a lo largo de medio ciclo y, en el sentido de las agujas del reloj. Se puede asumir que el centro de gravedad permanecerá constante al recorrer los primeros 90° (ver fig. 3.11).

Fraccionando este cuarto de ciclo de 15° en 15° se obtendrán los pares torsores generados por el peso del producto contenido en este.

Por lo tanto se tiene que,  $\tau = X * F$  (3.25)

donde  $\tau$  = par torsor generado por la carga contenida en el mezclador, lb-plg

R = distancia desde el centro de gravedad de la carga hasta el eje de giro, plg

F = peso de la carga, lb

Así; se tiene que  $F = 275\text{lb}$  y  $R = 3.645\text{plg}$  observando la fig 3.11 es claro que.

$$X = R * \text{Cos}\theta$$

En la tabla 3.3 están tabulados los distintos pares torsores correspondientes a sus ángulos de rotación;

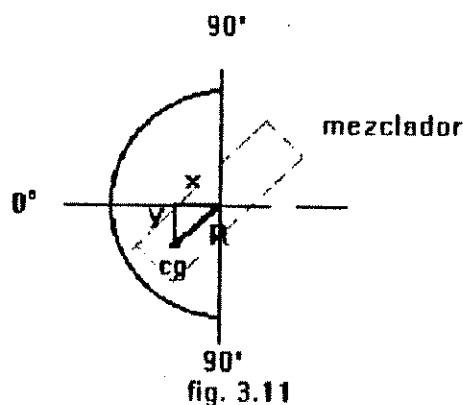


TABLA 3.3

$\theta$ (grados)	X (plg)	$\tau$ (lb-plg)
90	0.00000	0.000
75	0.94339	259.432
60	1.82250	501.187
45	2.57740	708.785
30	3.15666	868.081
15	3.52079	968.220
0	3.64500	1002.375

Para el siguiente cuarto de ciclo cuando la parte cargada del mezclador cambia de una posición horizontal a una posición vertical, el análisis es un poco más complicado ya que el par torsor es variable debido al desplazamiento del producto al extremo contrario a causa de la acción de la gravedad.

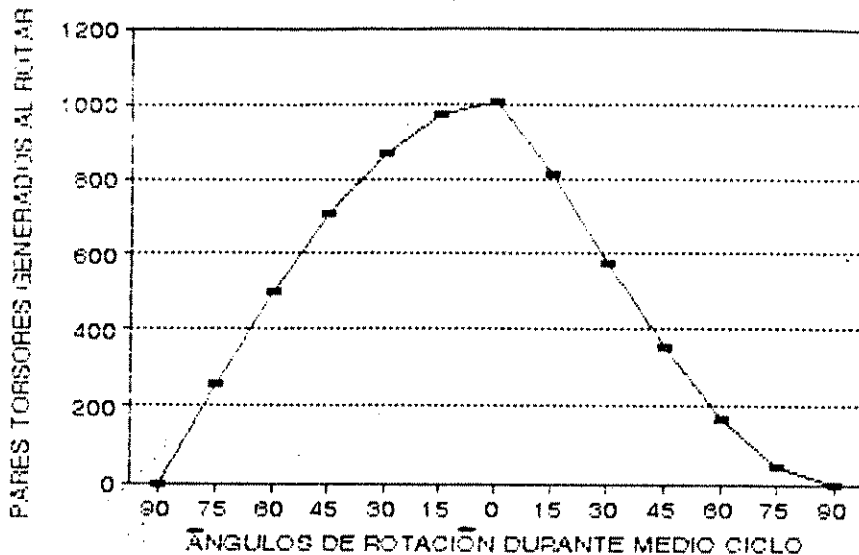
Por medio de pruebas se determinó que el desplazamiento de la masa hacia el extremo inferior está en un promedio de 0.1666 plg por cada 15° de rotación. De donde los datos obtenidos se tabulan a continuación.

TABLA 3.4

$\theta$ (grados)	X (plg)	W (lb)	$\tau$ (lb-plg)
0	3.64500	275.000	1002.375
15	3.52079	229.170	806.859
30	3.15666	183.330	578.710
45	2.57740	137.500	354.392
60	1.82250	91.670	167.068
75	0.94339	45.830	43.235
90	0.00000	0.000	0.000

Con los datos de las dos tablas anteriores se procede a graficar par torsor vrs. ángulo de rotación (ver gráfica 3.1).

**GRÁFICA 3.1**  
PARES TORSORES VRS. ÁNGULOS DE GIRO



El área bajo la curva es la variación de la energía cinética en el sistema. (ref. #4).

Integrando por la regla de Simpson encontramos el área bajo la curva.

$$\int_0^{x_n} f(x)dx = h/3 (f_0 + 4f_1 + 2f_2 + 4f_3 + 2f_4 + \dots + 2f_{n-2} + 4f_{n-1} + f_n) \quad (3.26)$$

donde, n = número de subintervalos usados = 12

$$h = \pi/12$$

f = pares torsores tabulados,

sustituyendo datos en la ecuación 3.26 se tiene que:

$$E_2 - E_1 = 4,542,871b-plg$$

siendo ésta la energía que se puede suministrar a la carga.

Para encontrar una inercia de volante adecuada correspondiente al cambio de energía cinética se tiene la siguiente ecuación:

$$I = \frac{E_2 - E_1}{W^2 * C_e} \quad (3.27)$$

donde,  $W = 30 \text{ rev/min} = \pi \text{ rad/seg}$

$C_e = 1$  (ya que no hay variación de velocidad)

sustituyendo datos en la ecuación 3.27 se tiene,

$$I = \frac{4,542.87}{\pi^2 * 1}$$

$$I = 460.59 \text{ lb-plg-s}$$

De la mecánica analítica se tiene que el momento de inercia de un círculo es igual a:

$$I = \frac{m * d^2}{8} \quad (3.28)$$

por otro lado se tiene que  $m = \delta * V$  (3.29)

y que el volumen de un círculo es

$$V = \pi * t * d^2 / 4 \quad (3.30)$$

sustituyendo las ecuaciones 29 y 30 en la ecuación 28 y despejando en función de "d" se tiene:

$$d = \left( \frac{32 * I}{\delta * \pi * t} \right)^{1/4} \quad (3.31)$$

donde  $I =$  momento de inercia de el volante, lb-plg-s

$\delta =$  densidad del acero = 0.283 lb/plg<sup>3</sup>

$t =$  espesor del volante, = 0.5 plg (asumido)

sustituyendo datos en la ecuación # 31,

$$d = 13.5 \text{ plg}$$

con este diámetro provisional se calcula el volumen, de la ecc. 30 de donde se tiene que,  $V = 71.57\text{plg}^3$  por lo tanto el radio final del volante será obtenido de la siguiente ecuación:

$$R = \left( \frac{r^2 + \frac{V}{\pi * t}}{\pi * t} \right)^{1/2} \quad (3.32)$$

donde  $r =$  radio interior del volante = radio del eje =  $2\text{plg}$  sustituyendo datos en 32,

$$R = 6.83\text{plg}$$

por lo tanto se usará un  $R = 7\text{plg}$

### 3.7 Transmisión.

Según el inciso 3.3 se tienen los siguientes datos:

$$P = 0.75\text{hp}$$

$$W_{\text{motor}} = 1750\text{rpm}$$

$$W_{\text{mezclador}} = 30\text{rpm}$$

por lo tanto la relación de velocidades será la siguiente:

$$R = \frac{W_{\text{motor}}}{W_{\text{mezclador}}}$$

sustituyendo,

$$R = \frac{1750}{30} = 58.33$$

Observando que la relación de velocidades es muy grande y que por lo tanto los elementos mecánicos serán demasiado grandes y costosos, se opta por hacer tres reducciones, por lo tanto el valor de la relación encontrado se dividirá en tres factores como sigue

$$R = R_1 * R_2 * R_3$$

$$R = 3 * 3.5 * 5.555 = 58.33$$

**Primera reducción.**

De la ref. # 4 el diámetro mínimo de la polea motriz deberá ser de 3plg

de donde,

$$\text{polea \# 1 } D = 3\text{plg}$$

$$\text{polea \# 2 } D = 3 * R_1 = 3 * 3 = 9\text{plg}$$

donde la distancia entre centros estará dada por el valor más alto de las dos ecuaciones siguientes:

$$C = 3r_1 + R_2 \quad (3.33)$$

$$C = 2r_2 \quad (3.34)$$

sustituyendo valores

$$C = 2 * 4.5 = 9\text{plg}$$

El ángulo de contacto ( $\theta$ ) se obtiene de la siguiente ecc. que según la ref. #4 no debe ser menor de  $120^\circ$ .

$$\text{Sen } \alpha = \frac{d_2 - d_1}{2C} \quad (3.35)$$

sustituyendo datos en 3.35,

$$\alpha = 0.1942\text{rad}$$

entonces

$$\theta = \pi - 2\alpha$$

$$\theta = 157^\circ \text{ por lo tanto es correcto}$$

La longitud de la faja es la siguiente:

$$L = 2a + r_1(\pi - 2\alpha) + r_2(\pi + 2\alpha) \quad (3.36)$$

donde  $a$  = longitud de la parte recta de la faja, plg

$$a = \{ C^2 - (r_2 - r_1)^2 \}^{1/2} \quad (3.37)$$

sustituyendo valores

$$a = 9.487\text{plg.}$$

en 36 y 37

$$L = 39\text{plg.}$$

Para obtener la potencia que se puede transmitir con ésta faja se tiene la siguiente ecuación:

$$H_r = \{ c_1 - c_2/d - c_3(nd)^2 - c_4 \log(nd) \} (nd) + c_5 n (1 - 1/k_a) \quad (3.38)$$

de la ref. #4 se tiene para una faja tipo A:

$$C_1 = 0.8542 \quad C_2 = 1.342 \quad C_3 = 2.436 \times 10^{-4} \quad C_4 = 0.1703$$

con  $D/d = 9/3 = 3$  se tiene que  $K_a = 1.1106$

sustituyendo datos en la ecuación # 38

$$H_r = \left( 0.8542 - \frac{1.342}{3} \right) - 2.436 \times 10^{-4} \left( \frac{1750 * 3}{1000} \right)^2 - \frac{0.1703 \text{Log}(1750*3)}{1000}$$

$$* \left( \frac{1750 * 3}{1000} \right) + 1.342 \left( \frac{1750}{1000} \right) * \left( 1 - \frac{1}{1.1106} \right)$$

$$H_r = 1.69 \text{ hp}$$

Puesto que esta longitud está basada en un ángulo de contacto de  $180^\circ$  y una longitud media de banda, debe corregirse con la siguiente ecuación:

$$H_r' = K_1 * K_2 * H_r \quad (3.39)$$

donde,  $K_1$  = factor de corrección = 0.95 (fig. 17.4 ref. #4)

$K_2$  = factor de corrección de longitud = 0.88 (tab.17.7)

$$H_r = \text{potencia nominal} = 1.69$$

sustituyendo datos en la ecc. # 39

$$H_r' = 0.95 * 0.88 * 1.69$$

$$H_r' = 1.41 \text{ hp}$$

Se sabe que la potencia de diseño es de 0.75hp y como se puede ver la potencia que la banda puede transmitir es mayor, por lo que se concluye que es adecuado utilizar una faja en V tipo A - 39.

### Segunda reducción.

La segunda y tercera reducción se harán con cadena ya que los pares torsores aumentan en forma considerable.

De la referencia #8 se tiene que la rueda dentada motriz debe tener un tamaño mínimo de 12 dientes



así, que la segunda rueda tendrá el siguiente tamaño,

$$\text{rueda \#2} = 12 * R_2$$

$$\text{rueda \#2} = 12 * 3.5 = 42 \text{ dientes}$$

por lo tanto la vel. de giro de la rueda motriz será

$$W_2 = 1750/3 = 583.33\text{rpm}$$

de la ref. #8 en la tabla para cadena 35 con  $w = 583.33\text{rpm}$  se tiene que la potencia que se puede transmitir es de  $0.95\text{hp}$ , con lubricación manual.

La distancia entre centros está dada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{(N - Ct - DT)P}{B} \quad (3.40)$$

En donde: E = distancia exacta entre centros, en plg

N = longitud de la cadena en pasos

B, C y D = factores de corrección

t = número de dientes de la rueda dent. menor

T = número de dientes de la rueda dent. mayor

P = paso de la cadena en pulg.

Para encontrar el número de pasos se tiene la siguiente ecuación:

$$N = Be/P + Ct + DT \quad (3.41)$$

en donde e = distancia entre centros deseada.

Para obtener el factor A se tiene que:

$$A = (G-g)/2e \quad (3.42)$$

donde, A = factor de corrección

G = paso diametral de la rueda dent. mayor

g = paso diametral de la rueda dent. menor

de la ref. #8 se tiene:

$$G = 5.018 \text{ plg} \quad g = 1.449 \text{ plg} \quad e = 6 \text{ plg}$$

sust. datos en la ecuación # 42

$$A = (5.018 - 1.449)/2 * 6$$

$$A = 0.2974 \text{ plg}$$

de la tabla #4 ref. #8 con el valor de A se encuentran los

valores de B,C y D

por lo tanto  $B = 1.91$   $C = 0.4042$   $D = 0.5958$

sustituyendo valores en la ecuación # 41 se encuentra N

de donde  $N = 60.434$  pasos

se toma un número de pasos = 62 (según ref. # 4)

sustituyendo datos en la ecc. # 40 se tiene que:

$$E = 6.3075 \text{ plg} = \text{dist. entre centros corregida}$$

### Tercera reducción.

Con  $R_3 = 5.555$  y 13 dientes en la rueda dentada # 3 se tiene el tamaño de la rueda # 4,

entonces  $\text{rueda \#4} = R_3 * 13 = 5.555 * 13 = 72$  dientes

verificando en la ref. #8 para  $w = 166.67$  rpm  $p = 0.75$ hp

se encuentra que debe utilizarse cadena # 40

repitiendo el procedimiento de la reducción # 2 se tiene que

$$N = 96 \text{ pasos}$$

$$E = 12.48 \text{ plg}$$

En la fig. 3.13 se pueden observar los ejes A y B los cuales se diseñan a continuación:

#### EJE A

En la fig. 3.13 se pueden observar las fuerzas actuantes sobre este eje. Las fuerzas F y G están dadas por los pares torsores ejercidos por la polea y la rueda dentada, por lo tanto:

$$F = T/r_p \quad G = T/r_r$$

por otro lado se sabe que  $T = (63,000 * \text{hp})/w$  (3.43)

donde  $w = \text{vel a la que gira el eje} = 583.33$ rpm

$\text{hp} = \text{potencia proporcionada por el motor} = 0.75$ hp

sustituyendo valores en la ecc. # 43 se tiene;

$$T = (63,000 * 0.75) / 583.33$$

$$T = 81 \text{ lb-plg}$$

de los cálculos anteriores se sabe que  $r_p$  y  $r_r = \text{radio de la polea y de la rueda dentada respectivamente} = 4.5$ plg y  $0.7245$ plg sustituyendo valores para encontrar F y G,

$$F = 81/4.5 = 18 \text{ lb} \quad G = 81/0.7242 = 111.8 \text{ lb}$$

Ahora se procede a encontrar las reacciones  $R_1$  y  $R_2$  (ver fig. 3.13)

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \Sigma F &= 0 & R_1 - F - R_2 + G &= 0 \\
 & & R_1 - R_2 + 93.8 &= 0 \\
 +\curvearrowright \Sigma M_{R_1} &= 0 & 2.25F + 4.5R_2 - 6.75G &= 0 \\
 \text{de donde} & & R_2 &= 158.71\text{b} \\
 & & R_1 &= 64.91\text{b}
 \end{aligned}$$

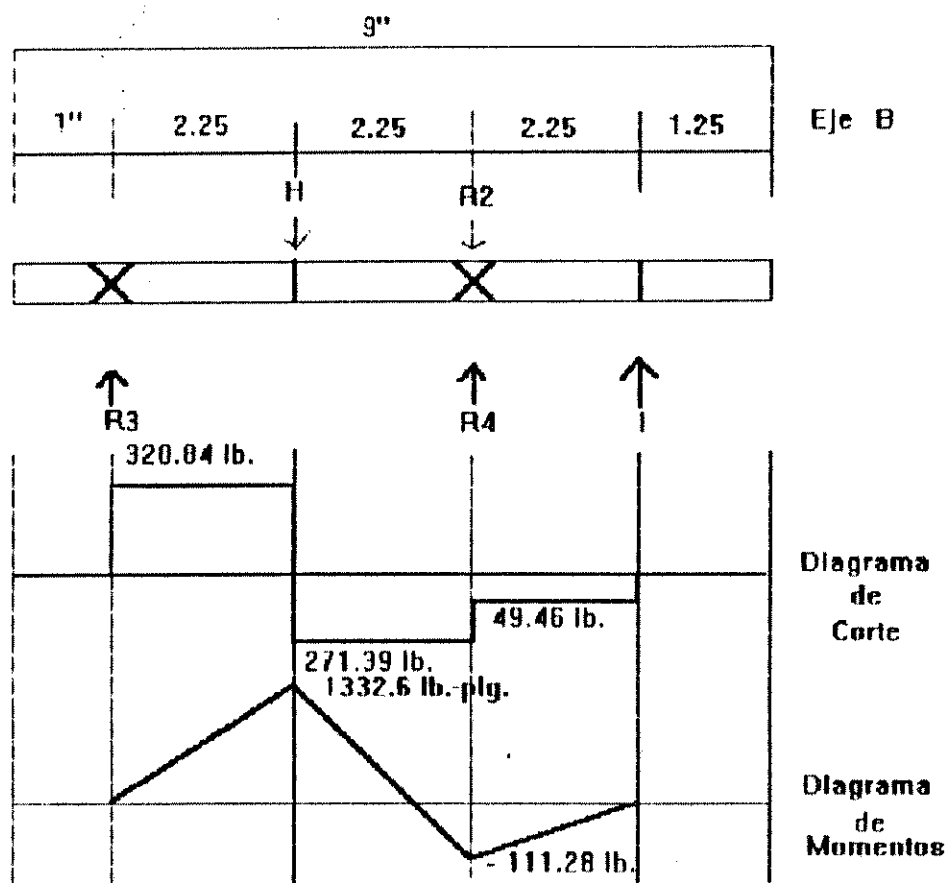


FIG. 3.12

En esta fig. se muestran los diagramas de corte y momentos así como las fuerzas actuantes sobre el eje A.

Puesto que las cargas sobre los ejes A y B son constantes se utilizará la siguiente ecuación: (ref. #1).

$$\frac{0.5 * S_{yp}}{N} = \frac{16}{\pi * D^3} \sqrt{M^2 + T^2} \quad (3.45)$$

Utilizando el mismo material que para el eje principal se tiene:

$$S_{yp} = 63,700 \text{ psi}$$

$$M = 146 \text{ lb-plg}$$

$$T = 81 \text{ lb-plg}$$

$$N = 2 \text{ (ref. \# 1)}$$

sustituyendo datos en la ecuación # 45, y despejando D se obtiene

$$D = 0.474 \text{ plg}$$

Puesto que deben hacerse ajustes para colocar los rodamientos, el eje se dejará con un diámetro de 0.75 plg

#### EJE B

Los cálculos para el eje B son similares que para el eje A por lo tanto sólo se presentan los resultados,

$$D = 0.755 \text{ plg}$$

$$D = 1 \text{ plg (por ajustes rodamientos).}$$

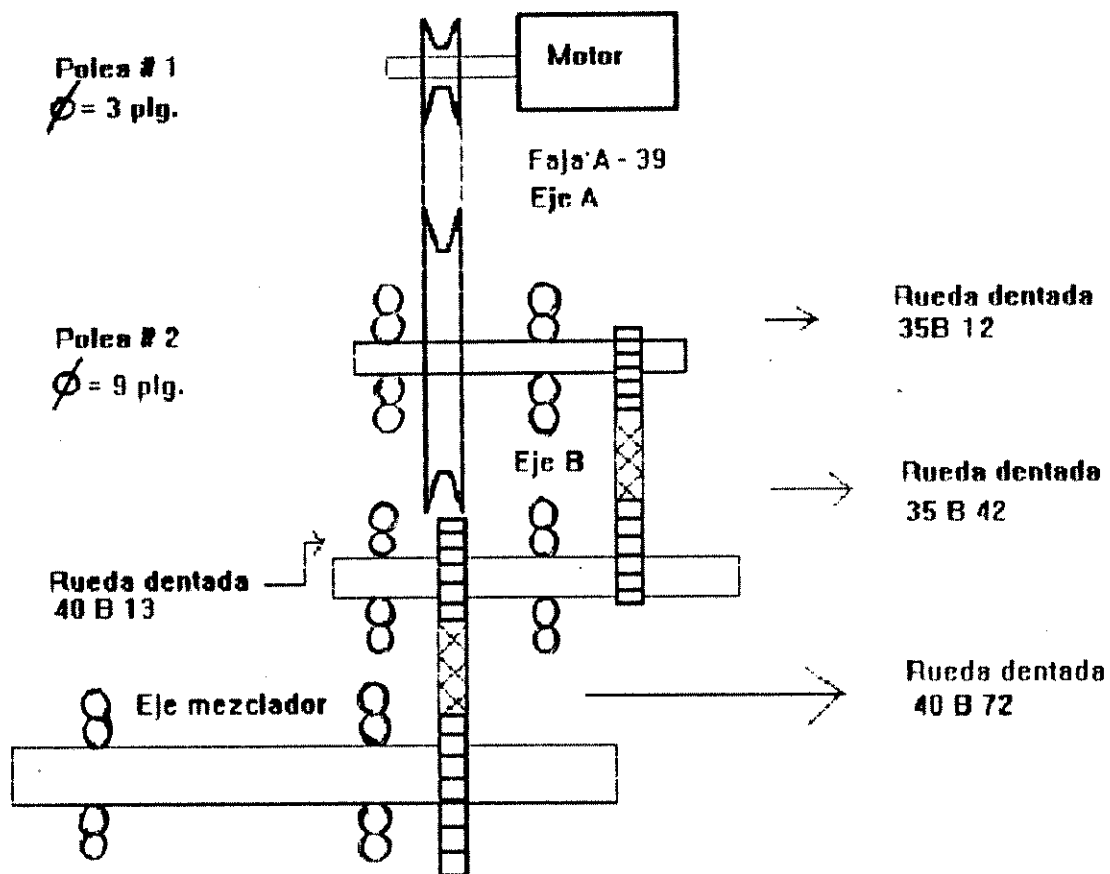


FIG. 3.13

En esta fig. se muestra cómo quedó ensamblada la transmisión finalmente.

### 3.8 Tiempo de mezcla.

#### Velocidad de mezclado.

En el mezclado, como en otros procesos de índole cinética, la velocidad es proporcional a la fuerza impulsora. El índice de mezcla  $I_m$  es una medida de cuanto ha avanzado la mezcla hacia el equilibrio.

Se ha encontrado que para tiempos de mezclado cortos la velocidad de variación de  $I_e$  es directamente proporcional a  $1 - I_e$ ,

$$\frac{dI_e}{dt} = k(1 - I_e) \quad (3.46)$$

siendo  $k$  una constante. El valor de equilibrio de  $I_e$  es 1; por tanto, la fuerza impulsora para el mezclado en cualquier instante puede considerarse que viene dada por  $1 - I_e$ . Reordenando e integrado entre límites, la ecuación (3.46) se transforma en

$$\int_0^t dt = \frac{1}{k} \int_{I_{e,0}}^{I_e} \frac{dI_e}{1 - I_e} \quad (3.47)$$

de donde

$$t = \frac{1}{k} \ln \frac{1 - I_{e,0}}{1 - I_e} \quad (3.48)$$

Sustituyendo en la ecuación # 48 se obtiene

$$t = \frac{1}{k} \ln \frac{1 - 1/\sqrt{n}}{1 - I_e} \quad (3.49)$$

La ecuación (3.49) se puede utilizar para calcular el tiempo que se requiere para alcanzar el grado de mezcla deseado, siempre que se conozca el valor de  $k$  y no actúen fuerzas antimezclado.

## 4. ANÁLISIS DE PRUEBAS DE ENSAYO

### 4.1 Pruebas realizadas

#### Procedimiento:

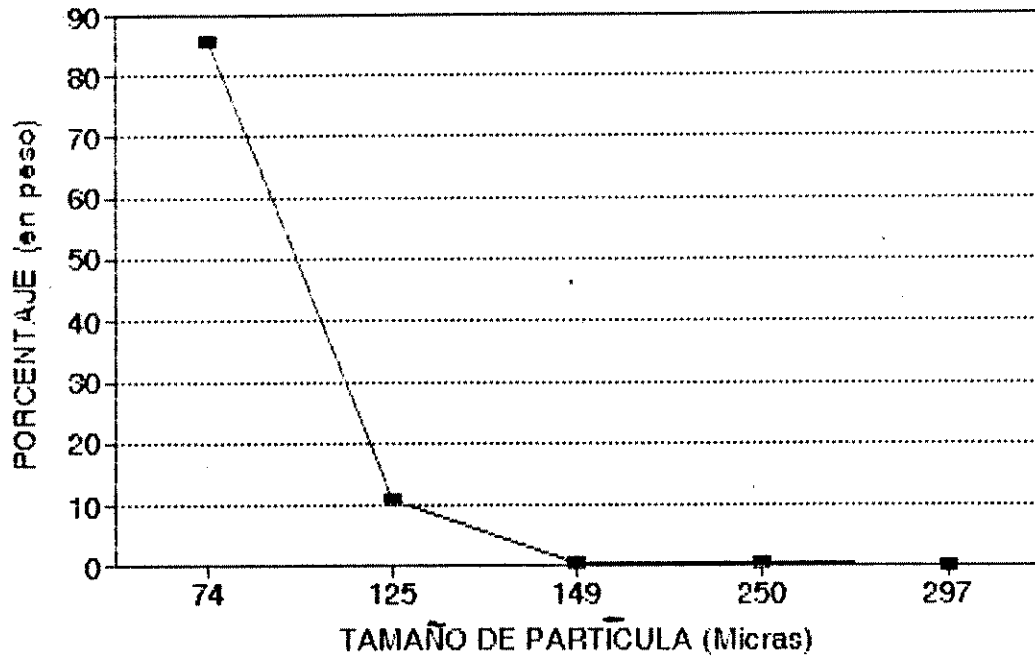
Para determinar el tiempo necesario de mezcla se llevaron a cabo 3 ensayos en distintas condiciones de humedad y granulometría. Para esto se utilizaron 2 tipos de materiales, los cuales se nombrarán de ahora en adelante como material A y B estos se mezclaron en un 48 y 52% respectivamente en todos los casos, tomándose muestras a intervalos de 5 minutos obteniéndose los resultados que a continuación se describen.

#### 4.1.1 Pruebas de granulometría

Los resultados de las pruebas de granulometría practicados a los materiales A y B, se presentan a continuación en forma gráfica.

# GRÁFICA 4.1

## CURVA GRANULOMÉTRICA MATERIAL A

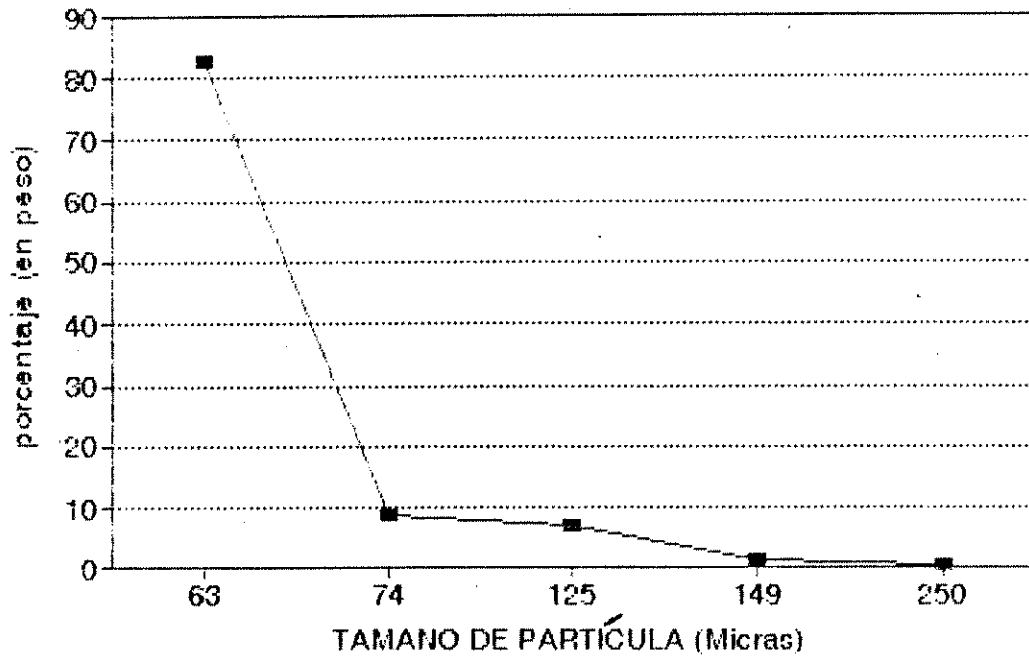


### GRÁFICA 4.1

En esta gráfica se presenta la curva de granulometría descrita por el material A



GRÁFICA 4.3  
CURVA GRANULOMÉTRICA MATERIAL B

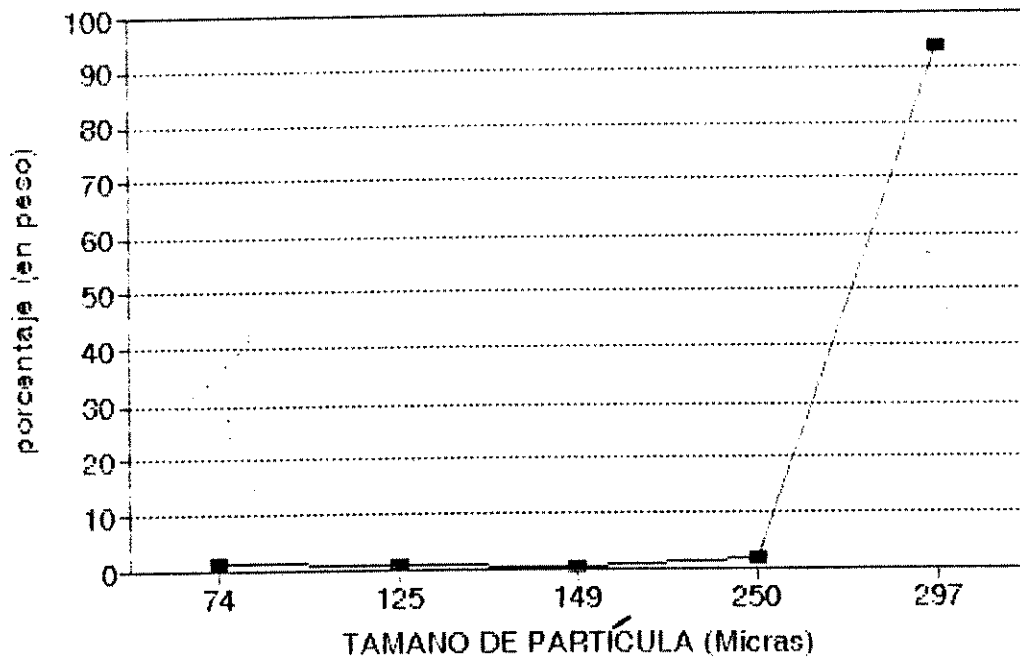


GRAFICA 4.2

En esta gráfica se presenta la curva de granulometría descrita por el material B

Con el objeto de poder comparar los resultados de una mezcla hecha con elementos de similar granulometría y, otra con elementos de diferente granulometría, se obtuvo una muestra del material B (con diferente granulometría) la cual será identificada como B'.

**GRÁFICA 4.2**  
**CURVA GRANULOMÉTRICA MATERIAL B'**



**GRAFICA 4.3**

Esta gráfica muestra la curva granulométrica del material B'

#### 4.1.2 Pruebas de humedad

Las pruebas de humedad practicadas a los materiales A, B y B' mostraron los siguientes resultados:

material A humedad = 6%

material B humedad = 1.3%

material B' humedad = 3%

Adicionalmente se le agregó al material A un 20% de humedad con el objeto de obtener una mezcla, entre materiales con diferente porcentaje de humedad, a dicho material húmedo se le denominó A'.

### 4.1.3 Pruebas respecto a tiempo de mezclado.

#### Prueba No. 1

se mezclaron los materiales A y B tomándose 12 muestras a intervalos de 5 min, a dichas muestras se les midió el porcentaje contenido del elemento A. Los resultados se tabulan en la tabla 4.1

TABLA 4.1

tiempo min	muestra no. (%)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	43.2	44.0	45.2	47.1	47.9	49.3	51.2	53.3	50.2	52.7	49.1	48.6
10	48.7	47.6	46.2	46.8	49.3	50.0	50.4	49.0	48.5	47.9	47.7	47.2
15	48.2	48.9	49.0	47.3	47.2	47.7	48.1	48.4	48.1	47.0	47.6	47.8
20	48.1	48.2	48.2	48.3	48.3	48.2	47.9	47.8	47.8	47.9	47.8	47.7
25	48.1	48.2	48.2	48.1	48.1	47.9	47.9	47.8	47.8	47.8	47.9	48.1
30	48.1	48.2	48.1	48.1	48.1	47.9	47.9	47.8	47.8	47.8	47.9	48.1

El tiempo de mezcla óptimo se puede obtener directamente de la gráfica tiempo vrs índice de mezcla (sección 1.2.2), obteniéndose éste de la ecuación 1.3

$$I_{\alpha} = \sqrt{\frac{(N - 1) \mu (1 - \mu)}{\sum_{i=1}^N X_i^2 - \bar{X} \sum_{i=1}^N X_i}} \quad (4.1)$$

donde N = número de muestras = 12

$\mu$  = porcentaje del material A contenido en la mezcla = 48%  
 $X_1$  = porcentaje del material A contenido en c/muestra (ver  
 tabla 4.1)

$\bar{X}$  = al valor medio de las concentraciones

de donde 
$$\bar{X} = \Sigma X_1 / N \quad (4.2)$$

sustituyendo datos en la ec. 2 para  $t = 5$  min

$$\bar{X} = 5.8244 / 12 = 0.485366666$$

sustituyendo datos en la ecuación # 1,

$$I_a = \sqrt{\frac{(12 - 1) * 0.48 * (1 - 0.48)}{2.8382 - (0.485366666 * 5.8244)}}$$

$$I_a = 15.6$$

Los índices de mezcla para los tiempos restantes se presentan tabulados en la tabla 4.2.

TABLA 4.2

Tiempo (min)	Indice de mezcla
5	15.6
10	39.17
15	80.19
20	242.55
25	338.31
30	351.60

### Prueba No. 2

Se mezclaron los materiales A' y B y se tomaron muestras a cada 5 minutos pero, un poco después de transcurridos los primeros 10 minutos, el material comenzó a aglomerarse y como consecuencia de esto la mezcla no pudo quedar uniforme, teniéndose que interrumpir el proceso.

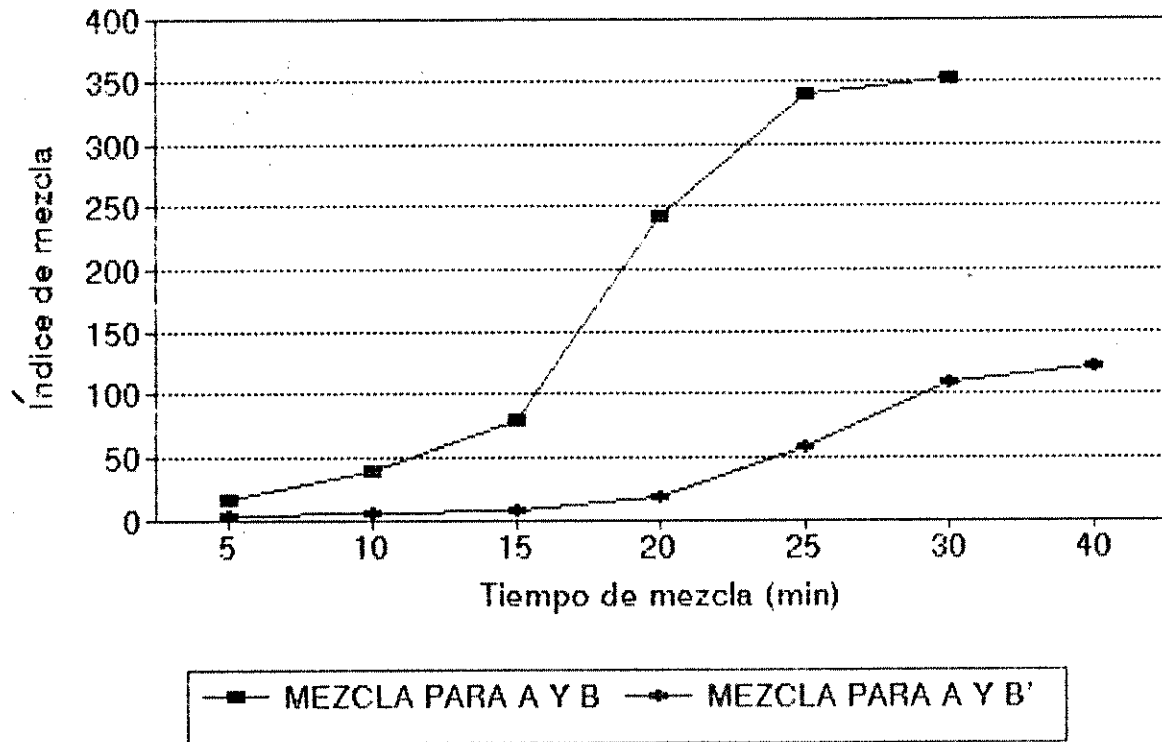
Esta prueba se realizó de nuevo con un 15% de humedad obteniéndose un resultado similar al anterior, por lo que se puede concluir que la mezcla únicamente es posible cuando se tenga un contenido de humedad menor al 20%.

### Prueba No.3

Se mezclaron los materiales A y B' siguiendo el procedimiento anterior.

Los resultados de las pruebas anteriores se presentan a continuación en forma gráfica.

**GRÁFICA 4.4**  
Índice de mezcla vrs. tiempo



**GRAFICA 4.4**

En la curva de mezcla para los materiales A y B se puede observar que en el intervalo entre 15 y 20 min se lleva a cabo el mayor efecto de mezclado, luego en el intervalo entre 20 y 25 comienza a disminuir haciéndose casi constante después de los 30 min. En la curva de los materiales A y B' el efecto de mezclado no es tan marcado como en la otra, observándose también que el avance de la mezcla se da en intervalos posteriores de tiempo.

## CONCLUSIONES

1. Al mezclar materiales con un contenido de humedad mayor a un 20% hay una tendencia a formar aglomerados, por lo tanto es posible utilizar este tipo de mezclador para formar los mismos.
2. Cuando se mezclan dos materiales con una marcada diferencia en tamaño de partícula, la mezcla se lleva a cabo muy lentamente.
3. El proceso de mezcla más eficiente y económico se obtiene al mezclar dos materiales con granulometría, humedad y cantidades porcentuales muy parecidas.
4. El cambio de escala de un mezclador de volteo, debe fundamentarse en el principio de similaridad en lo referente a:
  - a. Geometría
  - b. Cinemática
  - c. Dinámica.

## RECOMENDACIONES

1. Es importante encontrar la relación cuntitativa entre el tiempo de mezcla y las cantidades porcentuales de materiales, puesto que al incrementarse la diferencia de uno respecto al otro, el mecanismo de difusividad se va haciendo ineficiente, debido a que la redistribución de las partículas adyacentes se llevará a cabo, en su mayoría, entre sí mismas. Esto podría minimizar las pruebas y obtenerse, una mezcla uniforme y eficiente, sin tener que hacer demasiadas pruebas para encontrar el tiempo óptimo de mezcla.
2. De ser posible, deben realizarse pruebas colocando deflectores al mezclador, para poder comparar qué tanto beneficio se obtiene en el proceso de mezcla, en relación con otras que se hagan en un mezclador que no posea estos aditamentos.
3. Hacer pruebas variando el tamaño de partícula de los ingredientes, pero manteniendo una similitud entre la granulometría de uno respecto al otro.



## REFERENCIAS

1. Aaron O. Deutschman, Walter J. Michels, Charles E. Wilson, **Diseño de Máquinas** (3a. Impresión; México: Ed. Continental S.A. de C. V., 1989), pp. 351-355.
2. D. B. Todd, y H. F. Irving, "Axial Mixing in a Self-Wiping Reactor", **Chemical Engineering Prog.**, 65 (9) (1969), p. 84.
3. John J. Fisher, "Solid-Solid Blending", **Chemical Engineering**, 67(16) (1960), pp. 107-127.
4. Joseph E. Shigley, Larry D. Mitchell, **Diseño en Ingeniería Mecánica** (3a. Edición en español; Ed. McGraw - Hill, 1983), pp. 797-823.
5. Julius T. Banchemo, Walter L. Balger, **Introducción a la Ing. Química** (1ra. Edición reimpresión; México: Ed. McGraw - Hill, 1985), pp. 631-633
6. Kirk y Othmer, "Mezcladores en seco" (eds) **Encyclopedia of Chemical technology**, Vol. 9 ; Reinhold, Nueva York, (1952), p. 251.
7. Marks, **Manual del Ingeniero Mecánico** (2a. Edición en español, Vol. I; México: Ed. McGraw - Hill, 1984), p. 6-36
8. P.T. Components, Inc., **Link-Belt and Sterns Power Transmission Product** (Impresión; USA, 1982), pp. C-1 - C-22.
9. R. H. Wang y L. T. Fan, "Methods for Scaling-Up", **Chemical Engineering**, 81 (11) (1974), P. 88.

10. Robert Perry, **Manual del Ingeniero Químico** (2a. Edición en español; Impreso en México: Ed. McGraw - Hill, 1973), pp. 21-23 - 21-42.
11. S.K.F., **Catálogo General** (Impreso en Italia: Stamperia Artistica Nazionale, Corso Ciracusa, 37 Torino, 1989), pp. 185-205.
12. Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriott, **Operaciones Básicas de Ing. Química** (4a. Edición; México: Editorial McGraw - Hill, 1992), pp. 968-986.
13. Wim van den Berg, "Solids Mixer Selection", **Chemical Engineering**, Vol. 101 No, 12 (1994), pp. 71-77.

## BIBLIOGRAFIA

1. Bullok, "Re-examine Solids Preparation", **Chemical Engineering**, 66, (1957), pp. 177-198.
2. Quillen, "Solids Mixing", **Chemical Engineering**, 61, (1954), pp. 212-217.
3. Reid W. Ronald, "Solids Separation and Mixing", **Process Equipment Series**, vol. 1, (1951), pp. 267-277.
4. Scott, Cremer and Davies, "Mixing and Solids", **Chemical Engineering Practice**, Vol. 3 ; Butterworth, Londres, (1957), pp. 362-379.
5. Vance, "Statistical Properties of Dry Blends" **Ind. Engineering Chemical**, Vol 58 No. 6 (1966), pp. 37-44.
6. Weidenbaum S. S. y Bonilla C. F., "a fundamental study of the MIXING of particulate solids", **Chemical Engineering Prog.**, 51(27-J), (1955), pp. 27-36.
7. Work, Lincoln T., "Dry mixing of solids", **Chemical Engineering Prog.**, 50(9). (1954), pp. 476-479.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central