

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

DESARROLLO DE UN MODELO PARA DESCRIBIR LA VELOCIDAD
DE FLUJO DE DIFERENTES POLVOS Y SUS MEZCLAS, A TRAVES
DE ORIFICIOS DE DIAMETROS CONOCIDOS

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA

POR

FRANCISCO EDUARDO SOLARES MONTERROSO
AL CONFERIRLE EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 1,996



98
(3763)
3.4

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 :

DESARROLLO DE UN MODELO PARA DESCRIBIR LA VELOCIDAD DE FLUJO DE DIFERENTES POLVOS Y SUS MEZCLAS, A TRAVES DE ORIFICIOS DE DIAMETROS CONOCIDOS

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química



Francisco Eduardo Solares Monterroso

Guatemala, agosto de 1,996

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO : ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK
VOCAL 1o : ING. MIGUEL ANGEL SANCHEZ GUERRA
VOCAL 2o : ING. JACK DOUGLAS IBARRA SOLORZANO
VOCAL 3o : ING. JUAN ADOLFO ECHEVERRIA MENDEZ
VOCAL 4o : BR. FERNANDO WALDEMAR DE LEON CONTRERAS
VOCAL 5o : BR. PEDRO IGNACIO ESCALANTE PASTOR
SECRETARIO : ING. FRANCISCO JAVIER GONZALEZ LOPEZ

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

DECANO : ING. JORGE MARIO MORALES GONZALEZ
EXAMINADOR : ING. CESAR ALFONSO GARCIA
EXAMINADOR : ING. ALBERTO RODAS MALTEZ
EXAMINADOR : ING. ROSA MARIA GIRON
SECRETARIO : ING. EDGAR JOSE A. BRAVATTI CASTRO

ACTO QUE DEDICO A

MIS PADRES

† FRANCISCO EDUARDO SOLARES GALINDO
NORA DEL CARMEN MONTERROSO VDA. DE SOLARES
Por su esfuerzo y ser lo más
importante en mi vida

MIS HERMANOS

JOSE EDUARDO
OSCAR AUGUSTO
EDGAR ROLANDO
ROBERTO
Por su apoyo y cariño

MIS SOBRINOS

FAMILIA VALLE DOMINGUEZ
Por ser tan especiales

Guatemala, 8 de julio de 1,996

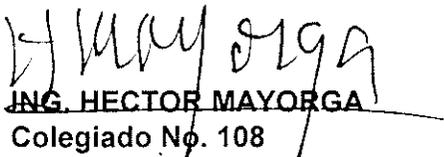
Señor Director
Escuela de Ingeniería Química
Dr. Adolfo Gramajo
Facultad de Ingeniería

Señor Director:

Por medio de la presente informo a usted que he revisado el trabajo de tesis del estudiante **FRANCISCO EDUARDO SOLARES MONTERROSO**, titulado **DESARROLLO DE UN MODELO PARA DESCRIBIR LA VELOCIDAD DE FLUJO DE DIFERENTES POLVOS Y SUS MEZCLAS, A TRAVES DE ORIFICIOS DE DIAMETROS CONOCIDOS**, el cual considero cumple con los objetivos propuestos.

Sin otro particular por el momento, me despido de usted

Atentamente,


ING. HECTOR MAYORGA
Colegiado No. 108

Guatemala, 10 de Julio de 1996.

DR. ADOLFO GRAMAJO A.
DIRECTOR DE ESCUELA DE ING. QUIMICA.
FACULTAD DE INGENIERIA. U.S.A.C.

Estimado Sr. Director, después de saludarlo deseo hacer de su conocimiento que he procedido a revisar el Protocolo de Tesis del Sr. FRANCISCO EDUARDO SOLARES MONTERROSO, de titulo: "DESARROLLO DE UN MODELO PARA DESCRIBIR LA VELOCIDAD DE FLUJO DE DIFERENTES POLVOS Y SUS MEZCLAS, A TRAVES DE ORIFICIOS DE DIAMETROS CONOCIDOS".

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:



Ing. Otto Raul de León de Paz.
Revisor del Informe Final de Tesis.



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 Química, Dr. Adolfo Gramajo, después de conocer el dictamen del asesor con el visto bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de tesis del estudiante, Francisco Eduardo Solares Monterroso, titulado: **DESARROLLO DE UN MODELO PARA DESCRIBIR LA VELOCIDAD DE FLUJO DE DIFERENTES POLVOS Y SUS MEZCLAS, A TRAVES DE ORIFICIOS DE DIAMETROS CONOCIDOS**, procede a la autorización del mismo.

Dr. Adolfo Gramajo
DIRECTOR

ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, 7 de agosto de 1,996.



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 Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis del estudiante, **Francisco Eduardo Solares Monterroso**, titulado: **DESARROLLO DE UN MODELO PARA DESCRIBIR LA VELOCIDAD DE FLUJO DE DIFERENTES POLVOS Y SUS MEZCLAS, A TRAVES DE ORIFICIOS DE DIAMETROS CONOCIDOS**, procede a la autorización del mismo.

IMPRIMASE:

Ing. Julio Ismael González Podszueck
DECANO



Guatemala, 7 de agosto de 1,996.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA

INDICE

GLOSARIO	2
RESUMEN	3
INTRODUCCION	5
ANTECEDENTES	8
JUSTIFICACION	12
OBJETIVOS	13
VARIABLES DE ESTUDIO	14
HIPOTESIS	14
MATERIALES Y METODOS	15
RESULTADOS	18
DISCUSION DE RESULTADOS	31
CONCLUSIONES	36
RECOMENDACIONES	38
ANEXO	39
REFERENCIAS	54

GLOSARIO

Abrasividad: capacidad de los materiales para producir cierta fricción de corte en las paredes de un contenedor o tolva.

Agente fluidizante: componente en una mezcla de polvos, con la capacidad de poder hacerla fluir de un contenedor a través de un orificio de diámetro conocido.

Agujero de ratón: cavidad vertical estable en forma de cilindro, que descarga sobre la boca del recipiente y que está libre de material (hueca).

Angulo de reposo: es el ángulo ideal de la salida de un contenedor, tolva o recipiente para que una mezcla de polvos pueda ser descargada de él, sin que se dé formación de arco.

Arco: obstrucción estable que se forma sobre el punto de menor área transversal del recipiente de almacenamiento, generalmente la boca de descarga.

Compresibilidad: capacidad de un polvo a ser comprimido y poder mantener la forma adquirida en el espacio ocupado, después de que es retirada dicha presión.

Excipientes: ingredientes complementarios, cuyas propiedades son proveer vehículo de dosificación a un producto.

Friabilidad: propiedad de los polvos, que hace que sean fácilmente desmenuzables.

Fuerza de cohesividad: capacidad de un polvo a mantener una forma estable cuando recibe una fuerza de compresión sobre él.

Granulado: proceso realizado a un polvo fino, con la presencia de otro polvo, almidón de maíz y agua. Luego se da un proceso de secado, con lo que se logra aumentar el diámetro medio de partícula.

Ingrediente activo: sustancia dentro de un medicamento que actúa directamente dentro del cuerpo humano.

Perfil de partícula: función que indica la cantidad proporcional de cada tamaño de partículas, determinado por el porcentaje de polvo retenido en cada una de las mallas utilizadas.

Polvo: material de forma sólida, con la característica de poder soportar alguna deformación. poder fluir y poder ser comprimido.

RESUMEN

Se efectuaron mediciones de la velocidad de flujo de mezclas de polvos, a través de orificios de diámetro conocido, para desarrollar un modelo que describa las condiciones de flujo de los diferentes materiales y sus mezclas. Se utilizó bicarbonato de sodio granular y ácido cítrico anhidro y mezclas de ambos.

Para determinar este modelo, se hicieron ensayos con los polvos en forma individual y en mezclas, utilizando una modificación del método FLODEX. Se midió la velocidad de flujo para los dos materiales y para cada mezcla a través de orificios de diferente diámetro.

Los resultados fueron utilizados para desarrollar una expresión que relaciona la velocidad de flujo y el diámetro de orificio, a una concentración dada de mezcla. Finalmente, se determinó una expresión que relaciona las velocidades de flujo con la concentración de uno de los componentes de la mezcla (bicarbonato de sodio granular). Durante los ensayos, se identificaron los diámetros de orificio a través de los cuales no fluyen los componentes individuales o sus mezclas, ya sea por la formación de arcos o agujeros de ratón.

La expresión que relaciona la velocidad de flujo en función del diámetro del orificio y de la concentración de un componente en la mezcla, dentro de los límites de diámetro de orificio y concentración para los cuales existe flujo, tiene la siguiente forma:

$$V = (C_1 \cdot X + C_2) \cdot \emptyset^{(C_3 - C_4 \cdot X)}$$

Donde.

V	= Velocidad de flujo (gramos/segundo)
X	= Concentración de bicarbonato de sodio (por ciento, en peso)
∅	= Diámetro del orificio (milímetros)
C₁, C₂, C₃ y C₄	= Constantes

Este modelo es capaz de predecir la velocidad de flujo para cualquier mezcla, cuyas concentraciones y diámetros de orificio se encuentren entre los límites experimentales determinados.

El modelo para las mezclas de bicarbonato de sodio y ácido cítrico que describe la velocidad de flujo en función de la concentración de bicarbonato de sodio y del diámetro de orificio es:

$$V = (0.0196 \cdot X + 0.0141) \cdot \emptyset^{(2.8525 - 0.1845 \cdot X)}$$

con los siguientes límites:

Concentración de Bicarbonato de Sodio (%)	Concentración de Acido Cítrico (%)	Diámetro de Orificio (mm)	Fenómeno Limitante
100	0	10	Agujero de ratón
40	60	5	Arco

Estos límites definen el intervalo en el cual los resultados del modelo son confiables, por lo cual la mezcla de los dos materiales fluye sin problemas de formación de arco o de agujero de ratón.

INTRODUCCION

El procesamiento y manejo de sólidos compuestos de partículas (polvos, granulados, etc.), juega un rol principal en la producción de materiales y productos demandados por las sociedades actuales. Algunas de las operaciones unitarias de proceso que están relacionados con polvos o granulados incluyen, entre otras (5):

- Almacenamiento en silos, recipientes, tanques, tolvas, etc.
- Flujo de descarga de silos, tolvas, etc.
- Transporte por medios mecánicos
- Transporte en fase densa
- Transporte neumático
- Molienda
- Tamizaje
- Mezcla
- Secado
- Operaciones en cama fluida
- Separación aire / sólidos
- Filtración
- Granulación seca y húmeda
- Compresión

Los polvos difieren de los sólidos masivos, los líquidos y los gases en que:

- No son sólidos, aunque pueden soportar alguna deformación.
- No son líquidos, aunque pueden fluir.
- No son gases, aunque pueden ser comprimidos.

El espacio entre las partículas está lleno de un fluido (aire, en el caso de interés) y, por lo tanto, existen interacciones sólido/fluido, áreas de contacto inter-partículas y fuerzas de adhesión (cohesión) entre partículas. Estas características están fuertemente influenciadas por la forma y tamaño de las partículas, las cuales no son fáciles de definir; y por la adsorción del fluido sobre la superficie de las partículas, lo cual a su vez, está influenciado por las propiedades moleculares de la superficie de las partículas y del fluido. El contenido de otros componentes, especialmente humedad, tienen una influencia considerable. Esta y otras propiedades a nivel micro, a su vez, influyen las propiedades a granel de los polvos (7).

Los polvos son procesados por, virtualmente, todo tipo de industria (química, farmacéutica, alimentos, minería, construcción, etc.). Sin embargo, la operación de los equipos utilizados en su procesamiento no es siempre la más adecuada. De hecho, cuando se comparan estos procesos con los procesos que involucran sólidos masivos, líquidos y gases, se ha encontrado que los procesos que involucran polvos son considerablemente menos eficientes (5). Parte de los problemas que provoca esta situación están relacionados a que los polvos no son fácilmente definidos matemáticamente o en términos de sus propiedades físicas, y a que son difíciles de manejar y almacenar.

Los procesos de mejora deben ser logrados, muchas veces, a través de experimentación, lo que no deja de ser costoso. (7).

Una de las características que más impacto tiene sobre la eficiencia de los procesos relacionados con polvos a granel es el flujo no uniforme, especialmente en lo que se refiere al flujo de descarga de silos, recipientes, tanques y tolvas de almacenamiento. La formación de arcos, agujeros de ratón, o el flujo incontrolable de los polvos finos, son las causas más comunes de los problemas de proceso.

En la industria farmacéutica, en la cual polvos o granulados deben ser descargados desde silos, tolvas o recipientes de almacenamiento hacia máquinas de alta velocidad para la producción de tabletas; los inconvenientes de flujo pueden ocasionar serios problemas de producción, afectando el peso de las tabletas, ocasionando problemas de segregación de las mezclas de los diferentes componentes de la formulación, pérdida de materiales, etc. (5).

El conocimiento de las propiedades de flujo de un polvo dado o de una mezcla de diferentes componentes en polvo, puede permitir optimizar la selección del equipo de almacenamiento y transporte, y permitir predecir las condiciones de operación que aseguren un proceso continuo, sin dificultades. El problema es complejo, especialmente en mezclas de diferentes componentes en polvo, dado que las propiedades de cada uno contribuyen a las de la mezcla, que depende de la concentración de cada uno de los componentes. El conocimiento, como se mencionó anteriormente, en la mayoría de los casos, debe ser obtenido experimentalmente (4).

Este proyecto de investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento de la velocidad de flujo de dos distintos materiales en polvo y de diferentes mezclas de ellos, a través de una serie de orificios de dimensiones conocidas. Y, a partir de los resultados experimentales, desarrollar un modelo que describa la velocidad de flujo de los materiales individuales y de sus mezclas, expresada como una función del diámetro del orificio. El modelo se utilizará para predecir la velocidad de flujo de mezclas de concentraciones conocidas de dos componentes.

Como se mencionó anteriormente, la velocidad de flujo de mezclas de polvos o gránulos puede afectar significativamente los procesos de producción en la industria en general. En la industria farmacéutica, el impacto de esta propiedad de las mezclas de polvos puede afectar, por ejemplo, la dosificación de los ingredientes activos, entre otras. Cualquier efecto sobre la dosificación de activos en la producción de tabletas es sumamente peligroso, dado que la tableta que se produzca con concentraciones menores o mayores que las especificadas puede resultar en un medicamento ineficaz, en el primer caso o peligroso, en casos extremos, por sobre-dosis de activos.

En la producción de tabletas, la mezcla de componentes (activos y excipientes), fluye desde un recipiente o una tolva hacia la estación de llenado de la máquina de compresión de tabletas. Desde esta estación, la mezcla fluye hacia la cavidad de la matriz, en donde se forma la tableta a través de un proceso de compresión realizado por dos punzones (superior e inferior), que son presionados uno hacia el otro para comprimir la mezcla de polvo y así formar la tableta. (4).

La tableta es diseñada para que tenga un cierto peso y una cierta concentración de activos. El peso de la tableta es determinado a través de la dosificación de un determinado volumen de polvo hacia la cavidad de la matriz donde se forma la tableta. Es decir, la dosificación es esencialmente volumétrica.

Si la mezcla de ingredientes no fluye adecuadamente, aunque la mezcla contenga los ingredientes en las cantidades exactas y sea perfectamente homogénea, la cantidad de polvo que entra a la cavidad de la matriz podría ser diferente de la especificada. Este problema puede ser muy agudo en las máquinas de alta velocidad para la producción de tabletas, que son la norma en la industria farmacéutica actual. (4).

En otras palabras, la velocidad de flujo de una mezcla de componentes dada, puede afectar la calidad de los productos farmacéuticos que son producidos como formas sólidas o tabletas. De ahí la importancia de tener la capacidad de medir (y predecir) esta propiedad de las mezclas de ingredientes en polvo, como una rutina del control en proceso de la producción de tabletas, y así poder comparar esta propiedad con los parámetros de control.

En este proceso, un modelo capaz de predecir el comportamiento de flujo de una mezcla ante pequeñas variaciones en las concentraciones de los componentes, sería un instrumento invaluable. Su utilidad en el proceso de diseño de una fórmula para un medicamento cualquiera sería aún mayor.

En la fase de diseño, un modelo que prediga cómo fluirá la mezcla durante el proceso de producción de tabletas sería un elemento discriminante para evaluar la viabilidad de la fórmula, en relación con su potencial para ser producida fácil y económicamente. Si las predicciones del modelo indican un flujo deficiente, la fórmula puede ser mejorada, por ejemplo, a través de la adición de agentes fluidizantes (7), antes de llegar a la etapa de ensayar las producciones experimentales. El uso de este instrumento tendría un efecto directo en reducir los costos de desarrollo de nuevos productos, ya que reduciría el tiempo invertido en el desarrollo y la pérdida de valiosos materiales en ensayos de producción.

Además de la utilización directa en la industria farmacéutica, la metodología experimental investigada en este proyecto podrá ser utilizada en la investigación y solución de problemas semejantes, en cualquier tipo de industria. Adicionalmente, aumentará la capacidad de diseño local de productos nuevos, con el consecuente beneficio para la industria local.

ANTECEDENTES

De acuerdo con la literatura (4,5,6,7), tradicionalmente se ha dependido de los siguientes cuatro atributos para predecir la conducta de los polvos a granel. La interpretación tradicional ha sido la siguiente:

- *Angulo de reposo:* en general, este atributo representa una medida exacta de la fluidez de un polvo.
- *Distribución de los tamaños de partícula y el contenido de humedad:* Típicamente, que los polvos más finos fluyen menos que los gruesos. Por otro lado, que los polvos más secos fluyen más fácilmente que los más húmedos. Sin embargo, se ha encontrado que la fluidez de un polvo no puede ser calculada o inferida a partir de la distribución de los tamaños de partícula, ni del contenido de humedad.
- *Flujo libre versus flujo no libre:* que el flujo de un polvo a granel sea considerado como libre o no libre, depende considerablemente del contenedor en el cual está almacenado.
Que un material forme, por ejemplo, un arco estable –lo cual previene el flujo del material– depende del diámetro de la descarga del recipiente: entre menor sea éste, mayor es la probabilidad de que se forme un arco; y, por lo tanto, que el material no fluya (el concepto de arco se describe más adelante). Estos términos son relativos y no son indicadores absolutos de la fluidez de un polvo.
- *Viscosidad:* los polvos que fluyen generan esfuerzos de corte y son capaces de mantener estos esfuerzos, aun cuando la velocidad de flujo cambie drásticamente. Los polvos a granel en reposo también pueden mantener esfuerzos de corte. Ambos fenómenos contrastan marcadamente con los fluidos (gases o líquidos), los cuales requieren estar en movimiento para generar y mantener esfuerzos de corte. Por lo tanto, a los polvos a granel no se les puede atribuir que tienen viscosidad, tal como la tienen los fluidos.

De acuerdo con lo descrito anteriormente, se ha encontrado que estos atributos rara vez proveen elementos directos de apoyo durante el diseño y especificaciones de los equipos de proceso. Por otro lado, se ha encontrado que las propiedades que se describen a continuación son más relevantes para predecir la conducta de flujo de los polvos a granel (5,7):

- Fuerza de cohesividad
- Propiedades de fricción
- Corrimiento en puntos de impacto
- Compresibilidad
- Permeabilidad
- Tendencia a la segregación
- Friabilidad
- Abrasividad
- Características de transporte neumático.

En relación con el objetivo de este trabajo experimental, son de interés las propiedades friccionales. Sin embargo, dado que tiene impacto sobre la fluidez de polvos a granel a través de orificios, también es necesario describir la fuerza de cohesividad.

- Muchos polvos a granel, cuando son descargados desde una bolsa, fluyen como un líquido. Bajo estas condiciones, tal material no tiene fuerza de cohesividad. Sin embargo, cuando son apretados en la palma de la mano, pueden ganar suficiente fuerza cohesiva para retener su forma, una vez se abre la mano.
- Un intervalo de condiciones similar ocurre dentro de los silos, tanques, tolvas, etc., donde se almacenen polvos. Las presiones de consolidación (cohesión) van desde cero, en la superficie, hasta valores relativamente grandes, a diferentes profundidades dentro del recipiente. Si un polvo gana fuerza cohesiva por razón de la presión que se le aplique, se pueden formar arcos o agujeros de ratón.

Un arco (que también es llamado puente o domo) es una obstrucción estable que se forma sobre el punto de menor área transversal del recipiente de almacenamiento, generalmente la boca de descarga. El arco es capaz de soportar el resto del contenido del recipiente, previniendo la descarga o sea, el flujo del material.

Un agujero de ratón es una cavidad vertical estable (en forma de cilindro), que descarga sobre la boca del recipiente y que está libre de material (hueca). Cuando se forma, la parte del material que no fluyó queda anclado en zonas estancadas, aledañas a la paredes del recipiente, que generalmente permanecen estables hasta que una fuerza externa se aplicada para destruirlas. La otra parte del material, la que se encontraba dentro de la cavidad formada, fluyó hacia la boca del recipiente.

Ambos fenómenos pueden ocurrir cuando se hace fluir un polvo desde un recipiente, a través de orificios de diferente diámetro. Su formación es dependiente del material y del diámetro del orificio a través del cual debe fluir.

La ocurrencia de estos dos tipos de fenómeno durante la ejecución de los experimentos planeados en este trabajo, limitarán las evaluaciones a *sólo aquellos diámetros de orificio en los cuales no se presente ninguno de los fenómenos descritos*. En otras palabras, establecerán límites, los cuales una vez sean sobrepasados, no existirá flujo de los materiales o de sus mezclas. Estos límites o fronteras establecerán un intervalo cerrado, fuera del cual el modelo que se desarrolle no tendrá ninguna validez. Sin embargo, el conocimiento de los diámetros en los cuales ocurre este tipo de fenómenos es de gran interés.

Propiedades friccionales

Los valores de fricción interna y externa son importantes cuando se caracterizan las propiedades de fluidez de un polvo a granel.

La fricción interna es causada cuando las partículas sólidas fluyen una contra la otra. Es expresada por el ángulo de fricción interna y el ángulo efectivo de fricción interna (5). Ambas pueden ser determinadas utilizando un medidor directo de esfuerzos.

La fricción externa es expresada como el ángulo de la fricción de la pared o el coeficiente de la fricción de deslizamiento. Puede ser medido cuando se desliza una muestra a lo largo de una superficie estacionaria. Es la relación entre la fuerza de corte requerida para causar el deslizamiento a lo largo de la superficie de una placa y la carga aplicada perpendicularmente a la superficie de la placa. El arco tangente de este valor es el ángulo de la fricción de la pared.

Las siguientes variables pueden afectar los valores de la fricción interna y externa (y son similares a las que afectan la cohesividad):

- *Presión*: típicamente, así como la presión de consolidación se incrementa, así disminuye el ángulo efectivo de fricción interna. En forma similar, muchas veces el coeficiente de la fricción de deslizamiento disminuye cuando aumenta la presión, actuando en forma normal a la placa. Sin embargo, el ángulo efectivo de fricción interna es una propiedad intrínseca del material, el cual puede aumentar, disminuir o permanecer en el mismo valor, cuando aumenta la presión actuando sobre el material.
- *Contenido de humedad*: cuando el contenido de humedad aumenta, la fricción de muchos materiales aumenta.
- *Tamaño de partícula y forma de la partícula*: en forma típica, los materiales finos muestran mayor fricción que los gruesos, de tal manera que su flujo es más problemático. La forma de las partículas juega un papel importante, debido al hecho de que las partículas angulares tienden a encadenarse una con otra, creando más fricción.
- *Temperatura*: para muchos materiales, una mayor temperatura significa mayor fricción.
- *Tiempo de almacenamiento en reposo*: si se permite que se adhieran a la superficie de las paredes, muchos materiales muestran un incremento en la fricción entre las partículas y la superficie.
- *Superficie de las paredes*: la condición inicial de la superficie puede jugar un rol principal en cómo los materiales se deslizarán a lo largo de ella. Superficies más lisas son menos friccionales, aunque esto no es siempre cierto. La corrosión puede aumentar la fricción.

El coeficiente de la fricción de deslizamiento puede ser medido cuando se permite que un polvo caiga libremente a través de un orificio (9). Un núcleo de polvo (en la forma de un cilindro del mismo diámetro que el del orificio), rodeado por una pared de polvo, caerá libremente a través del orificio cuando el peso del cilindro de polvo es mayor que la fricción en su superficie interna.

En otras palabras:

$$\frac{\pi r^2 h d g}{\text{(Peso del Núcleo de Polvo)}} \geq \frac{2 \pi r h K}{\text{(Fricción en la Superficie del Núcleo)}} \quad (1)$$

Donde:

- h** = Altura del núcleo de polvo.
- $\pi r^2 h$** = Volumen del núcleo de polvo.
- g** = Aceleración de la gravedad (980 cm./seg²).
- d** = Densidad aparente del polvo.
- r** = Radio del orificio (igual al radio del núcleo de polvo).
- $2 \pi r h$** = Área superficial del núcleo de polvo.
- K** = Coeficiente de la fricción de deslizamiento.

La expresión (1) se puede escribir como sigue:

$$490 r d \geq K \quad (2)$$

De la expresión (2), si el radio del orificio (**r**) es de una magnitud suficiente para permitir que el polvo fluya libre, se puede afirmar que:

$$490 r d \leq K \quad (3)$$

Por lo tanto, el radio (**r**) de un orificio a través del cual el polvo fluirá libremente se puede definir como:

$$r \geq K / (490 d) \quad (4)$$

En la práctica, cuando el peso del núcleo de polvo sobrepasa la fricción interna, el núcleo de polvo se moverá; y si el polvo tiene una fluidez aceptable, continuará moviéndose a velocidad constante, hasta que se agote la carga de material dentro del medidor. A esto se le conoce como método FLODEX.

JUSTIFICACION

Como se mencionó anteriormente, la velocidad de flujo de mezclas de polvos o gránulos puede afectar significativamente los procesos de producción en la industria en general.

En la industria farmacéutica, el impacto de esta propiedad de las mezclas de polvos puede afectar, por ejemplo, la dosificación de los ingredientes activos, entre otras. Cualquier efecto sobre la dosificación de activos en la producción de tabletas es sumamente peligroso, dado que la tableta que se produzca con concentraciones menores o mayores que las especificadas puede resultar en un medicamento ineficaz, en el primer caso o peligroso, en casos extremos, por sobre-dosis de activos.

En la producción de tabletas, la mezcla de componentes (activos y excipientes), fluye desde un recipiente o una tolva hacia la estación de llenado de la máquina de compresión de tabletas. Desde esta estación, la mezcla fluye hacia la cavidad de la matriz, en donde se forma la tableta a través de un proceso de compresión realizado por dos punzones (superior e inferior), que son presionados uno hacia el otro para comprimir la mezcla de polvo y así formar la tableta.

La tableta es diseñada para que tenga un cierto peso y una cierta concentración de activos. El peso de la tableta es determinado a través de la dosificación de un determinado volumen de polvo hacia la cavidad de la matriz donde se forma la tableta. Es decir, la dosificación es esencialmente volumétrica.

Si la mezcla de ingredientes no fluye adecuadamente, aunque la mezcla contenga las cantidades correctas de ingredientes y sea perfectamente homogénea, la cantidad de polvo que entra a la cavidad de la matriz puede ser diferente de la especificada. Este problema puede ser muy agudo en las máquinas de alta velocidad de tabletas, que son la norma actual en la industria farmacéutica.

En otras palabras, la velocidad de flujo de una mezcla de componentes dada, puede afectar la calidad de los productos farmacéuticos que son producidos como formas sólidas o tabletas. De ahí la importancia de tener la capacidad de medir esta propiedad de las mezclas de ingredientes en polvo, como una rutina del control en proceso de la producción de tabletas; y poder comparar esta propiedad con parámetros de control. En este proceso, un modelo capaz de predecir el comportamiento ante pequeñas variaciones en las concentraciones de los componentes, es un instrumento invaluable. Su utilidad en el proceso de diseño de una fórmula para un medicamento cualquiera es aún mayor. En la fase de diseño, un modelo que prediga su comportamiento durante el proceso de producción de tabletas es invaluable. Si las predicciones del modelo indican un flujo deficiente, la fórmula puede ser mejorada a través de la adición de agentes fluidizantes (7). El uso de este instrumento tendrá un efecto directo en los costos de desarrollo de nuevos productos.

Además de la utilización directa en la industria farmacéutica, la metodología experimental del proyecto podrá ser utilizadas en la investigación y solución de problemas semejantes en cualquier tipo de industria. Adicionalmente, aumentará la capacidad de diseño local de productos nuevos, con el consecuente beneficio para la industria local.

OBJETIVOS

Generales:

1. Desarrollar un modelo que describa la velocidad de flujo de diferentes materiales en polvo y sus mezclas a través de orificios de dimensiones conocidas.
2. Evaluar la efectividad del modelo desarrollado en la predicción de las velocidades de flujo de mezclas de polvos.

Específicos:

1. Medir la velocidad de flujo a través de orificios de dimensiones conocidas de los siguientes materiales:
 - Bicarbonato de sodio granular
 - Acido cítrico anhidro.
2. Medir la velocidad de flujo a través de orificios de dimensiones conocidas de mezclas definidas de los materiales arriba descritos.
3. Desarrollar un modelo que describa la velocidad de flujo de los materiales en función del diámetro de los orificios.
4. Evaluar la efectividad del modelo en la predicción de la velocidad de flujo de mezclas de los materiales a través de orificios de dimensiones conocidas.

VARIABLES DE ESTUDIO

Independientes:

Para materiales de propiedades conocidas (identidad, densidad aparente, distribución de tamaños de partícula, contenido de humedad), las variables independientes en esta investigación son:

- Material
- Diámetro de los orificios.

En las mezclas de los materiales, las variables independientes son:

- Concentración de los materiales en la mezcla
- Diámetro de los orificios.

Dependientes:

Las variables dependientes son:

- La velocidad de flujo en función del diámetro del orificio para cada material.
- La velocidad de flujo en función de la concentración de los materiales y el diámetro del orificio para cada mezcla.

HIPOTESIS

Bajo las condiciones experimentales, los materiales fluyen homogéneamente a una cierta velocidad, que depende del diámetro del orificio y de las propiedades del material. Asimismo, que las mezclas de estos materiales también fluyen homogéneamente, lo cual depende de la concentración de los materiales y del diámetro del orificio. Es decir, que las propiedades de los materiales individuales se reflejan en sus mezclas, y que éstas pueden ser evaluadas a través de un modelo que describa las propiedades de los materiales individuales.

MATERIALES Y METODOS

Materiales

Los materiales utilizados son **bicarbonato de sodio** (NaHCO_3) refinado granular, de origen Británico, obtenido de Bruner Mond & Company y **ácido cítrico anhidro** ($(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_5)$ (COOH)₃), obtenido de MEXAMA, S.A. de C.V., ambos de grado USP.

Con el objeto de mantener constantes, las propiedades de estos materiales a lo largo de todos los experimentos, se separó una cantidad suficiente de cada uno de ellos.

Para prevenir que captarán humedad, cada material se almacenó en recipientes herméticos de acero inoxidable. Los recipientes fueron almacenados en un área de humedad y temperatura controlada menores que 20% y 25° C., respectivamente, hasta que fueron utilizados. A muestras representativas se les midió la densidad aparente, y la distribución de los tamaños de partícula, utilizando el equipo de ATM Corporation, Sonic Sifter Division, model LP3 (8). De acuerdo con el procedimiento de cálculo descrito en la literatura (8), los tamaños promedio de partícula para estos materiales es 173 μ y 156 μ , respectivamente.

Las mezclas de los materiales fueron preparadas de la siguiente manera: las cantidades necesarias para formular una mezcla de 200 gramos, fueron pesadas en una balanza marca METTLER PM 480, Delta Range. Los materiales fueron vertidos en bolsas plásticas para efectuar su mezcla, por unos 10 minutos. Estas mezclas fueron utilizadas de inmediato. Las mezclas se expresarán porcentualmente, con incrementos de 10% en concentración entre cada una.

Los perfiles granulométricos de las mezclas de bicarbonato de sodio y ácido cítrico, no se evaluaron porque se formaron grumos durante el proceso de medición, los cuales impiden que los resultados sean precisos.

Equipo y Método para medir la Velocidad de Flujo

Para medir la velocidad de flujo de los materiales, se utilizó un medidor de fluidez para polvos marca FLODEX, de la empresa Hanson Research Corporation (9). Además, se utilizó una balanza marca Mettler PM 480 Delta Range, de la empresa Mettler; y un reloj marca Casio con cronómetro de 10 lapsos.

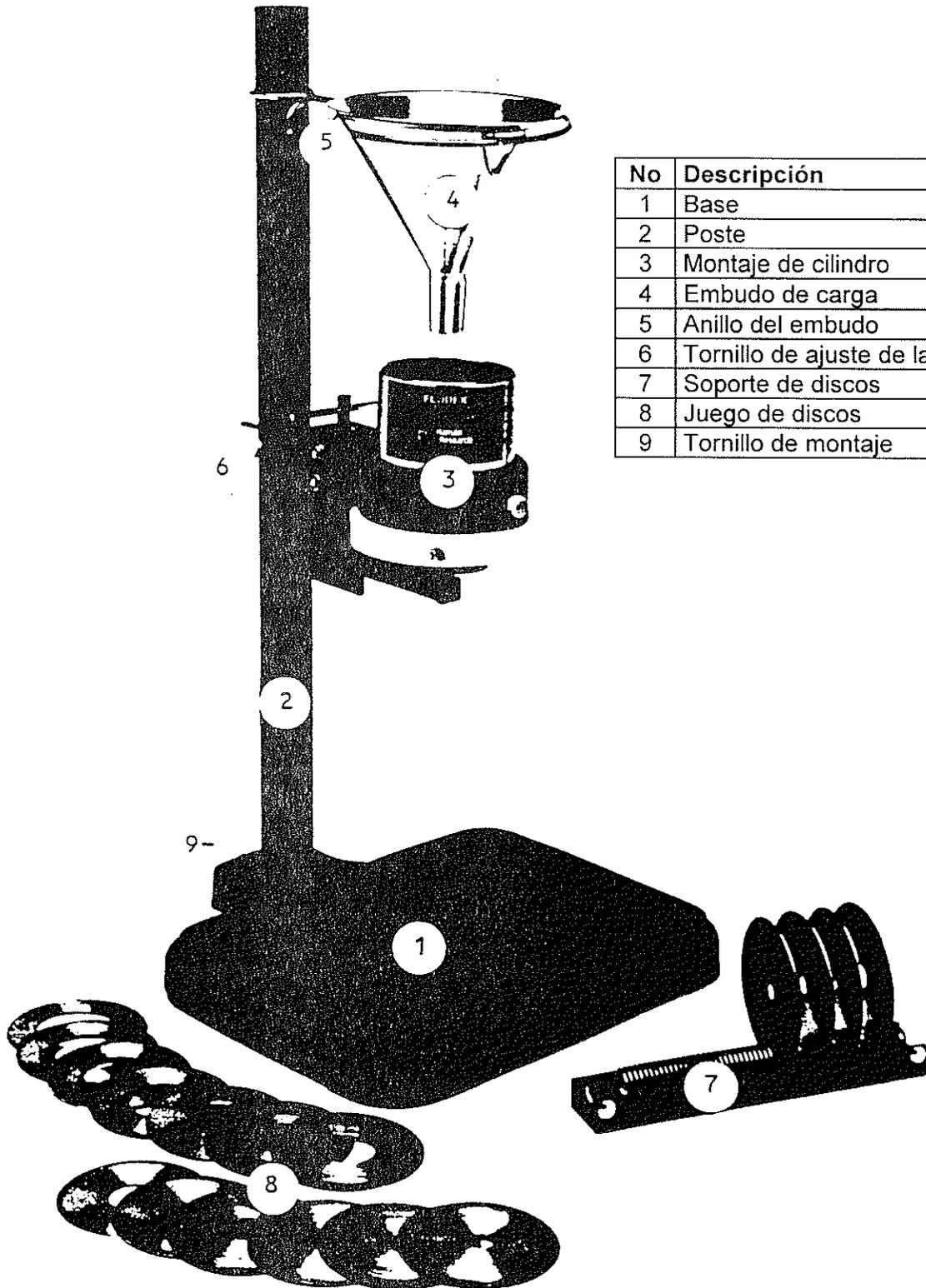
El equipo consiste de un soporte, un embudo metálico, un cilindro metálico con capacidad de aproximadamente 50 gramos de material, un soporte para el orificio y un conjunto de orificios de diferente diámetro (Ilustración 1.).

Para efectuar un ensayo, se instala el orificio con un diámetro específico en el soporte, el cual está localizado en el fondo del cilindro metálico. Se deposita aproximadamente 50 gramos de material en el cilindro, sin comprimirlo.

Sobre la base del FLODEX se instala la balanza. Un recipiente adecuado es colocado sobre la balanza, directamente debajo del orificio, y se tara.

ILUSTRACION 1

MEDIDOR DE FLUIDEZ PARA POLVOS, FLODEX



No	Descripción
1	Base
2	Poste
3	Montaje de cilindro
4	Embudo de carga
5	Anillo del embudo
6	Tornillo de ajuste de la cápsula
7	Soporte de discos
8	Juego de discos
9	Tornillo de montaje

Por último, se gira suavemente la palanca que libera la tapadera del orificio. Se registra el peso del material que ha caído en el recipiente sobre la balanza a diferentes intervalos de tiempo.

Para cada material, se efectuaron, por lo menos, tres ensayos para un mismo diámetro de orificio. El material ensayado fue descartado. Se principió con el orificio de mayor diámetro que permita efectuar entre 5 y 7 mediciones de peso; es decir, que el flujo del material a través del orificio sea de tal velocidad que se pudieran efectuar, al menos, 5 mediciones de peso distintas, conforme transcurría el tiempo. Se finalizó con el orificio de menor diámetro, por el cual aún fluyera el material sin formar arcos ni agujeros de ratón.

Los ensayos fueron efectuados, primero con los dos materiales y todos los posibles orificios que permitieron flujo. Luego, se pesaron las cantidades específicas de cada una de las dos materias primas, las cuales fueron mezcladas cuidadosamente para formar las mezclas de diferente composición. Estas mezclas fueron ensayadas con el FLODEX, según se describió anteriormente.

Elaboración del modelo

Los resultados de los tres ensayos para cada material y orificio fueron tabulados y se calculó el peso promedio para cada intervalo de tiempo. Los resultados fueron graficados en una escala normal (el peso en la abscisa y el tiempo en la ordenada). Los datos fueron encajados a través del método de cuadrados mínimos (1.2). La pendiente de la recta resultante es el inverso de la velocidad de flujo, expresado en segundos/gramos. El intercepto es cero.

Según los datos obtenidos de experiencias preliminares, el inverso de la velocidad se relaciona con el diámetro de los orificios a través de una expresión de la forma:

$$v = a \varnothing^n \quad (5)$$

donde.

- v = velocidad de flujo
- a y n = constantes
- \varnothing = diámetro del orificio

Para obtener la constante de flujo de cada material o mezcla, se graficó el logaritmo de la velocidad de flujo (en la ordenada) y el logaritmo del diámetro (en la abscisa). Si el diámetro se expresa en milímetros, las dimensiones de la Constante de Flujo (n) son gr./mm • segundo.

Conociendo la Constante de Flujo (n), para cada concentración; se graficó n (en la ordenada) y la concentración de la mezcla (en la abscisa). Se procedió de la misma forma para la constante a, con lo que se obtuvieron las ecuaciones para substituir en la ecuación (5), la cual será el modelo para el flujo. Con esta ecuación, se determinará si la mezcla de estos dos polvos, a una concentración deseada puede o no fluir, a través de un orificio de diámetro calculado por la ecuación (4) (anteriores). Con esto, se tendrá determinado un modelo matemático para el cálculo de la capacidad de fluidez y la velocidad de flujo de una mezcla de polvos.

RESULTADOS

Granulometría de los Materiales

En el Cuadro No. 1 de la sección de Anexo, está descrito el perfil granulométrico para el bicarbonato de sodio. Se determinó que su tamaño medio de partícula es de 173 micrones. De acuerdo con los datos mostrados en el Cuadro No. 1, el 77% del bicarbonato de sodio es retenido en la malla 80 (177 μ), y 95% es retenido en la malla 100 (149 μ). Este perfil se puede observar en la Gráfica No. 1.

En el Cuadro No. 2 de la sección de Anexo, se describe el perfil granulométrico para el ácido cítrico. El tamaño medio de partícula es de 156 micrones. Los resultados de la medición indican que 92% del ácido cítrico es retenido por la malla 100 (149 μ); entre esta malla y la 80 (177 μ) se retiene alrededor del 60 % del material. Su perfil granulométrico se muestra en la Gráfica No. 2.

Los perfiles granulométricos de las mezclas de bicarbonato de sodio y ácido cítrico, no se evaluaron porque durante el proceso de medición se observó la formación de grumos, los cuales impiden que los resultados sean confiables; por este motivo no son considerados en la elaboración del modelo matemático.

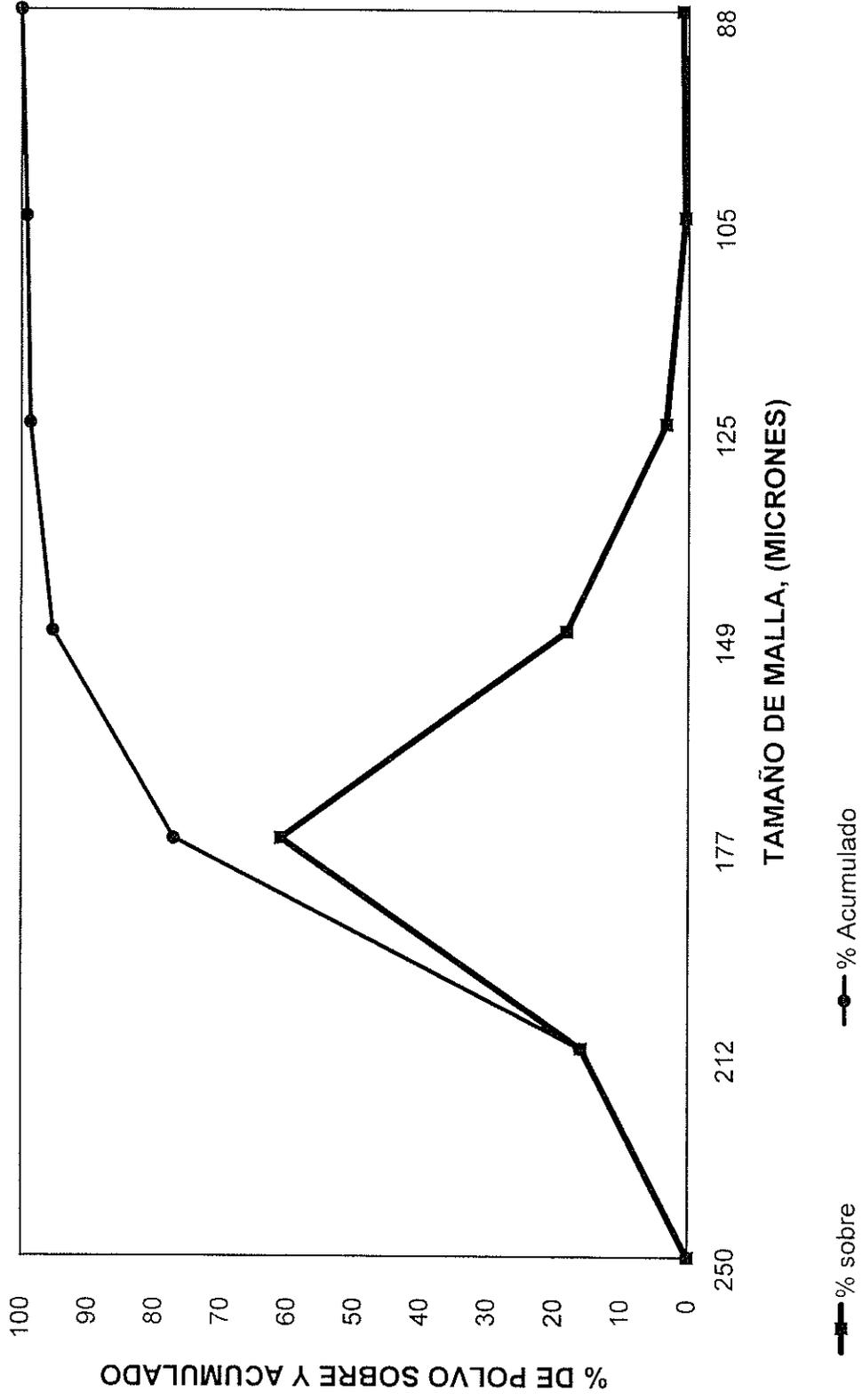
Velocidad de flujo de las mezclas

En los Cuadros No. 3 a 9 de la sección de Anexo, se pueden observar los resultados de los experimentos realizados para determinar la velocidad de flujo de las diferentes mezclas ensayadas, a través de orificios de diámetro conocido.

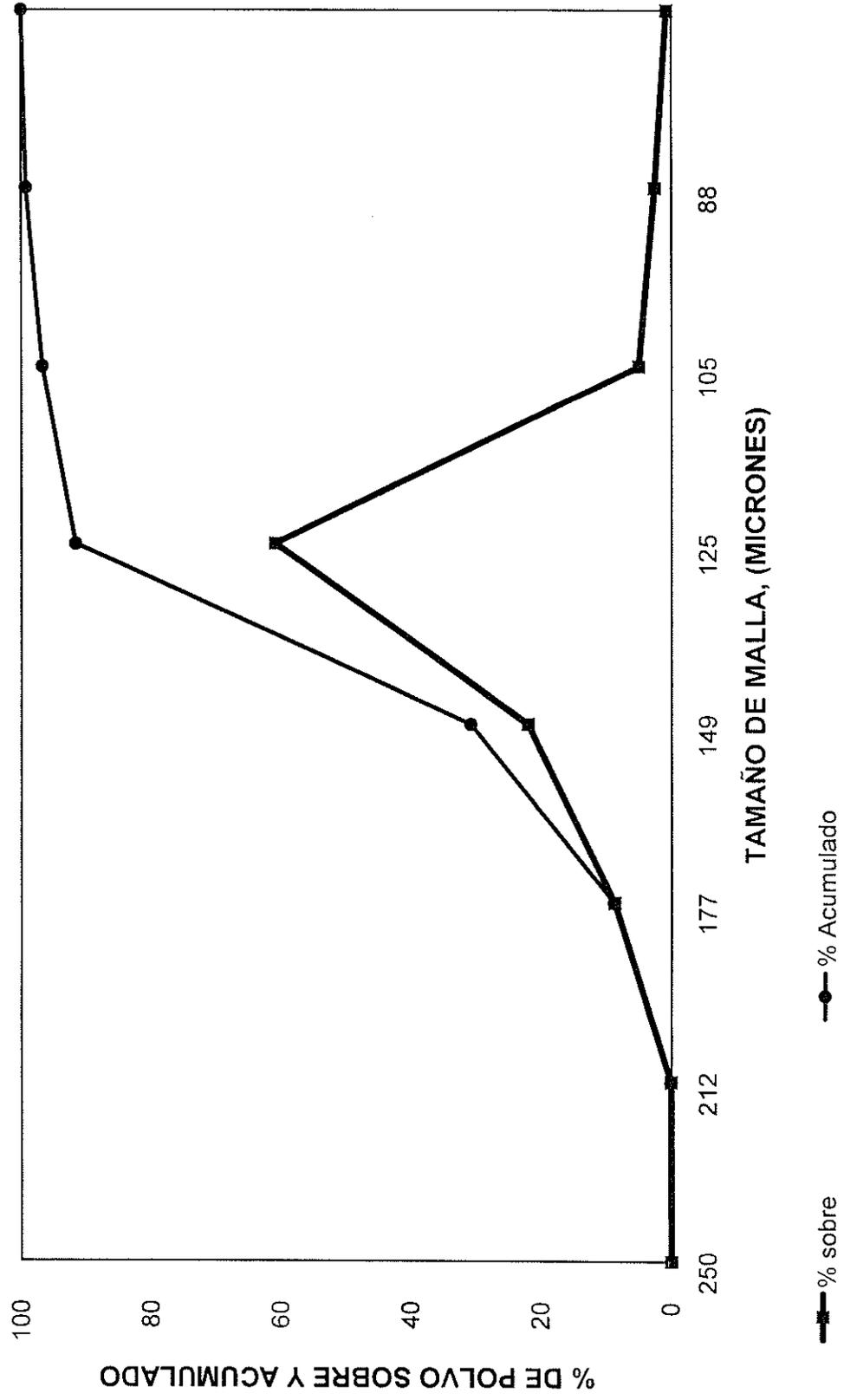
Tal como se puede observar en la Gráfica No. 3, que muestra el comportamiento típico, para una mezcla compuesta de 90% de bicarbonato de sodio y 10% de ácido cítrico, la relación entre el peso de mezcla que ha fluido y el tiempo de flujo transcurrido, es lineal. En todos los casos, el coeficiente de regresión fue muy cercano a 1.0. Por esta razón, la velocidad de flujo (la pendiente de la recta) se determinó utilizando el método de mínimos cuadrados (x , y , z , etc.) (1).

El resultando del inverso de la pendiente, de cada una de las curvas de peso contra tiempo, es la velocidad de flujo másico para cada concentración de mezcla de polvos, a través de cada orificio, expresada como gramos de material por unidad de tiempo. Estos valores de velocidad se encuentran descritos en los Cuadros No. 10 a 16 de la sección de Anexo, para cada mezcla y un diámetro de orificio especificado.

GRAFICA No. 1
PERFIL GRANULOMETRICO DEL BICARBONATO DE SODIO, EN FUNCION DEL
% DE POLVO SOBRE Y ACUMULADO EN DISTINTOS TAMAÑOS DE MALLA



GRAFICA No. 2
PERFIL GRANULOMETRICO DEL ACIDO CITRICO, EN FUNCION DEL % DE
POLVO SOBRE Y ACUMULADO EN DISTINTOS TAMAÑOS DE MALLA



Las mezclas que se determinó que podían fluir sin que se presentaran problemas de formación de agujero de ratón o formación de arco, están incluidas dentro de los intervalos de concentración y diámetros de orificio siguientes:

Concentración de bicarbonato de sodio (%)	Concentración de ácido cítrico (%)	Diámetro de orificio (mm)	Fenómeno limitante
100	0	10	Agujero de ratón
40	60	5	Arco

Con bicarbonato de sodio al 100%, se observó la formación de agujero de ratón con diámetros de orificio mayores de 10 mm. Este material no forma arcos. El ácido cítrico, en contraposición, no forma agujeros de ratón, pero si forma arcos, en todos los orificios comprendidos en el intervalo de diámetro entre 5 y 10 mm. El ácido cítrico utilizado es cristalino y se supone que es ésta la característica que influye sobre la formación de arcos. En mezclas de los dos materiales, la concentración más alta de ácido cítrico que se puede utilizar antes de que formen arcos, es del 60%.

A la luz de los resultados mostrados en la Gráfica No. 4, que muestra la velocidad de flujo en función del diámetro de orificio, para las distintas concentraciones de bicarbonato de sodio ensayadas, la velocidad de flujo aumenta significativamente cuando el tamaño del orificio es mayor. Además, entre mayor es la concentración de ácido cítrico, menor es la velocidad de flujo de la mezcla. Esto, otra vez, se asocia con la naturaleza cristalina del ácido cítrico, que incrementa la resistencia al flujo.

Por otro lado la relación entre la velocidad de flujo y el diámetro de orificio, denota un comportamiento potencial ($u, v, w, etc.$), (1,2), tal como puede observarse en la Gráfica No. 4, con la siguiente forma:

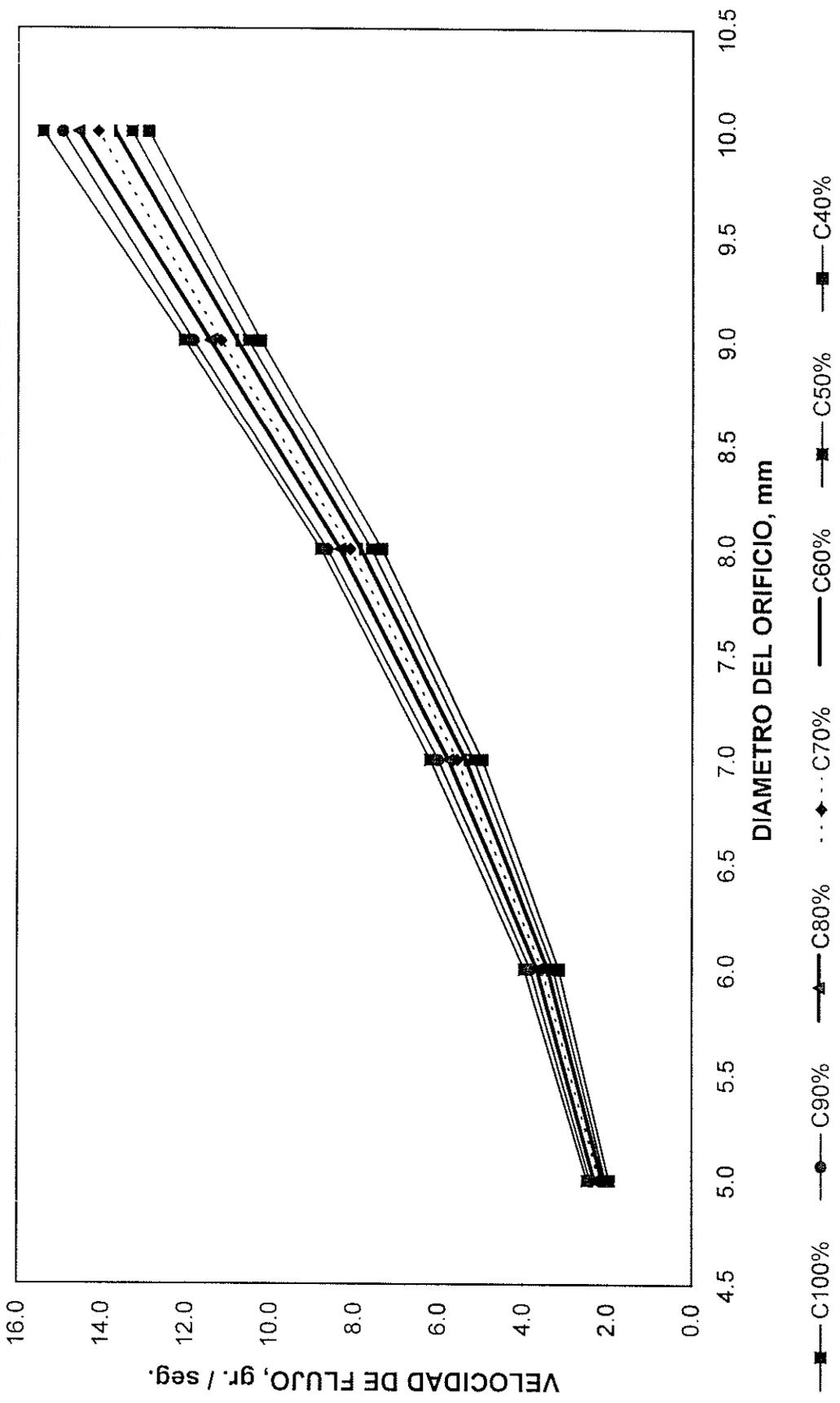
$$y = n_1 x^{n_2}$$

Donde n_1 y n_2 son constantes.

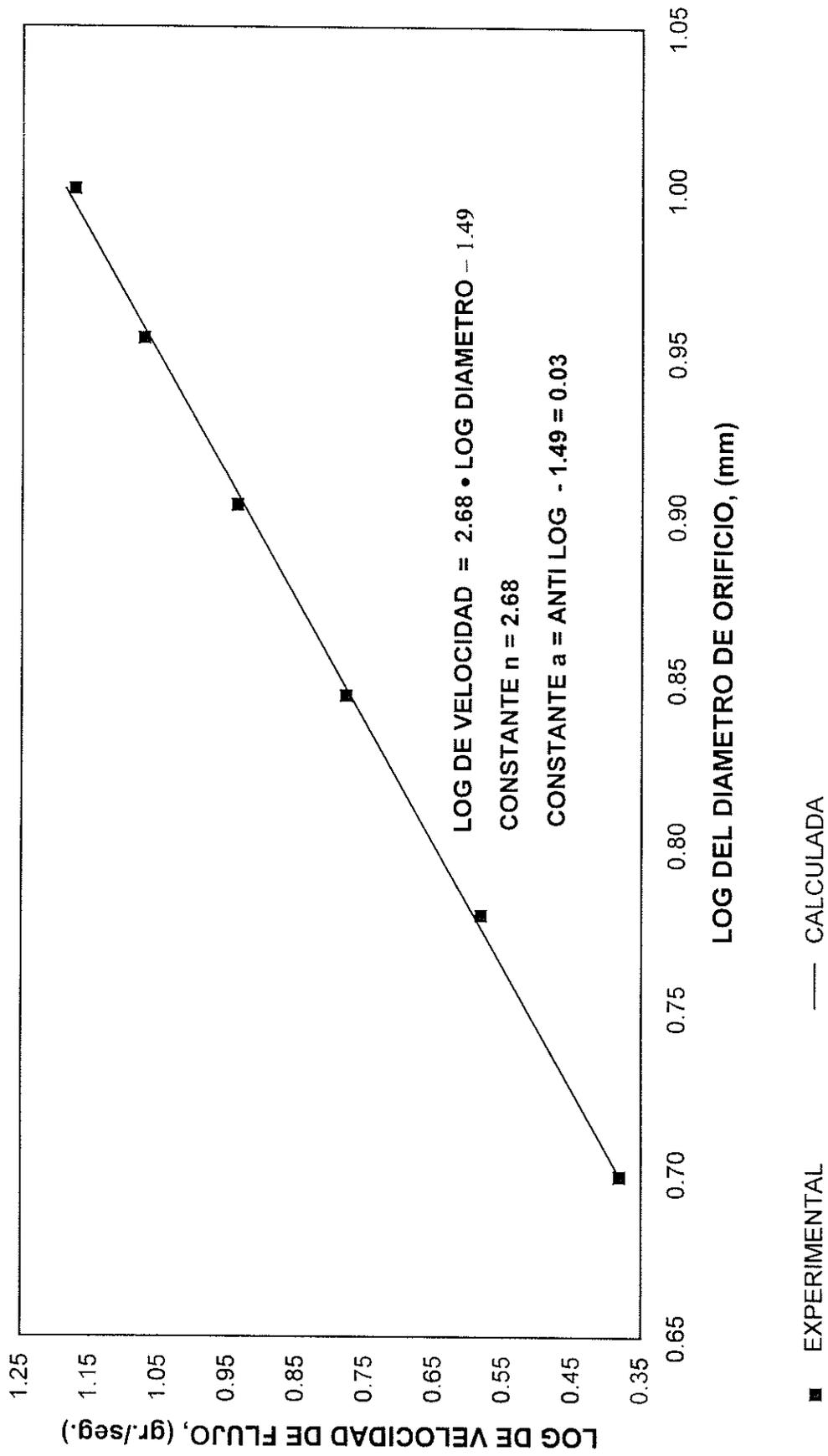
Cuando los logaritmos de las variables independiente (diámetro del orificio) y dependiente (velocidad de flujo) son graficados, se obtiene una línea recta ($u, v, w, etc.$), como lo muestra la Gráfica No. 5, por ejemplo. Como se puede observar en los Cuadros No. 10 al 16 de la sección de Anexo, todas las rectas mostraron un coeficiente de regresión igual a 1.0. Los resultados para todas las mezclas se pueden observar en la Gráfica No. 6.

Utilizando el método de mínimos cuadrados ($x, y, z, etc.$), se determinó una expresión para cada una de las mezclas, en las cuales la pendiente es una constante n , y el antilogaritmo del intercepto es la constante a . Los valores de las constantes para cada mezcla, se encuentran resumidos en el Cuadro No. 17 de la sección de Anexo.

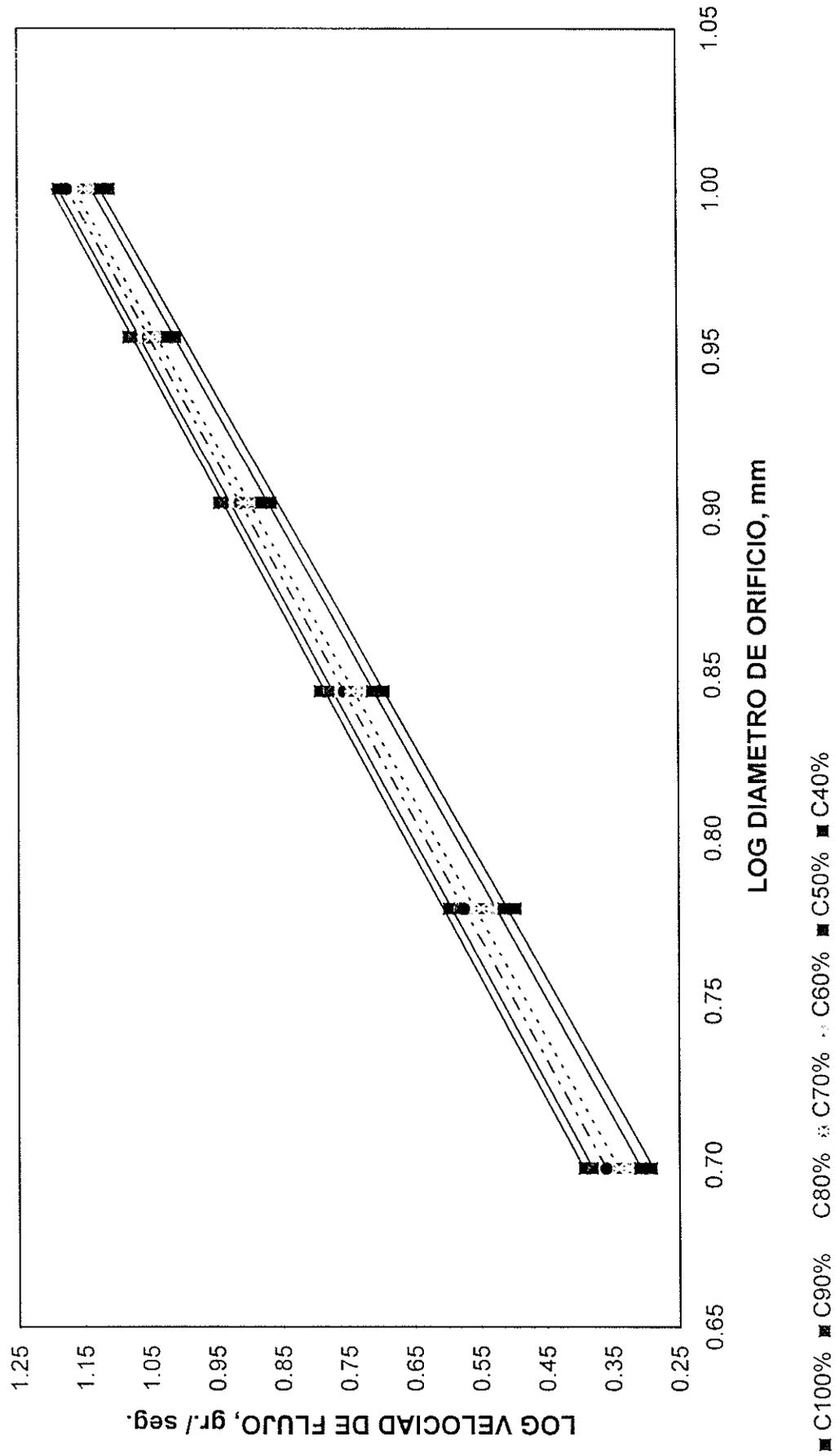
GRAFICA No. 4
VELOCIDAD DE FLUJO EN FUNCION DEL DIAMETRO DEL ORIFICIO Y LA
CONCENTRACION DE BICARBONATO DE SODIO
MEZCLAS BICARBONATO DE SODIO / ACIDO CITRICO



GRAFICA No. 5
DETERMINACION DE LAS CONSTANTES n Y a, PARA LA MEZCLA DE 90% DE BICARBONATO DE SODIO Y 10% DE ACIDO CITRICO, EN FUNCION DE LOS LOGARITMOS DE LA VELOCIDAD DE FLUJO Y EL DIAMETRO DE ORIFICIO



GRAFICA No. 6
LOG DE LA VELOCIDAD DE FLUJO EN FUNCION DEL LOG DEL DIAMETRO DE
ORIFICIO Y LA CONCENTRACION DE BICARBONATO DE SODIO, MEZCLAS
BICARBONATO DE SODIO / ACIDO CITRICO



La relación de las constantes **a** y **n** en función de la concentración de bicarbonato de sodio es lineal, tal como se puede observar en las Gráficas Nos. 7 y 8. Esta se calculó por medio del método de mínimos cuadrados (*x, y, z, etc.*). En este caso, se utilizó la concentración de bicarbonato de sodio, **X** (la concentración de ácido cítrico será 1.0 - concentración de bicarbonato de sodio). La ecuación que se obtuvo para la constante **n** es la siguiente (Cuadro No. 17):

$$\mathbf{n = - 0.1845X + 2.8525} \quad (6)$$

Donde.

n = constante de flujo
X = concentración de bicarbonato de sodio

El comportamiento lineal de la relación entre la constante **n** y la concentración de bicarbonato de sodio, **X**, se puede observar en la Gráfica No. 7.

La ecuación que se obtuvo para la constante **a** es la siguiente (Cuadro No. 17):

$$\mathbf{a = 0.0196X + 0.0141} \quad (7)$$

Donde.

a = constante
X = concentración de bicarbonato de sodio

El comportamiento lineal de la relación entre la constante **a** y la concentración de bicarbonato de sodio, **X**, se puede observar en la Gráfica No. 8.

Sustituyendo las ecuaciones de **a** y de **n** en la ecuación

$$\mathbf{v = a \varnothing^n}, \quad (8)$$

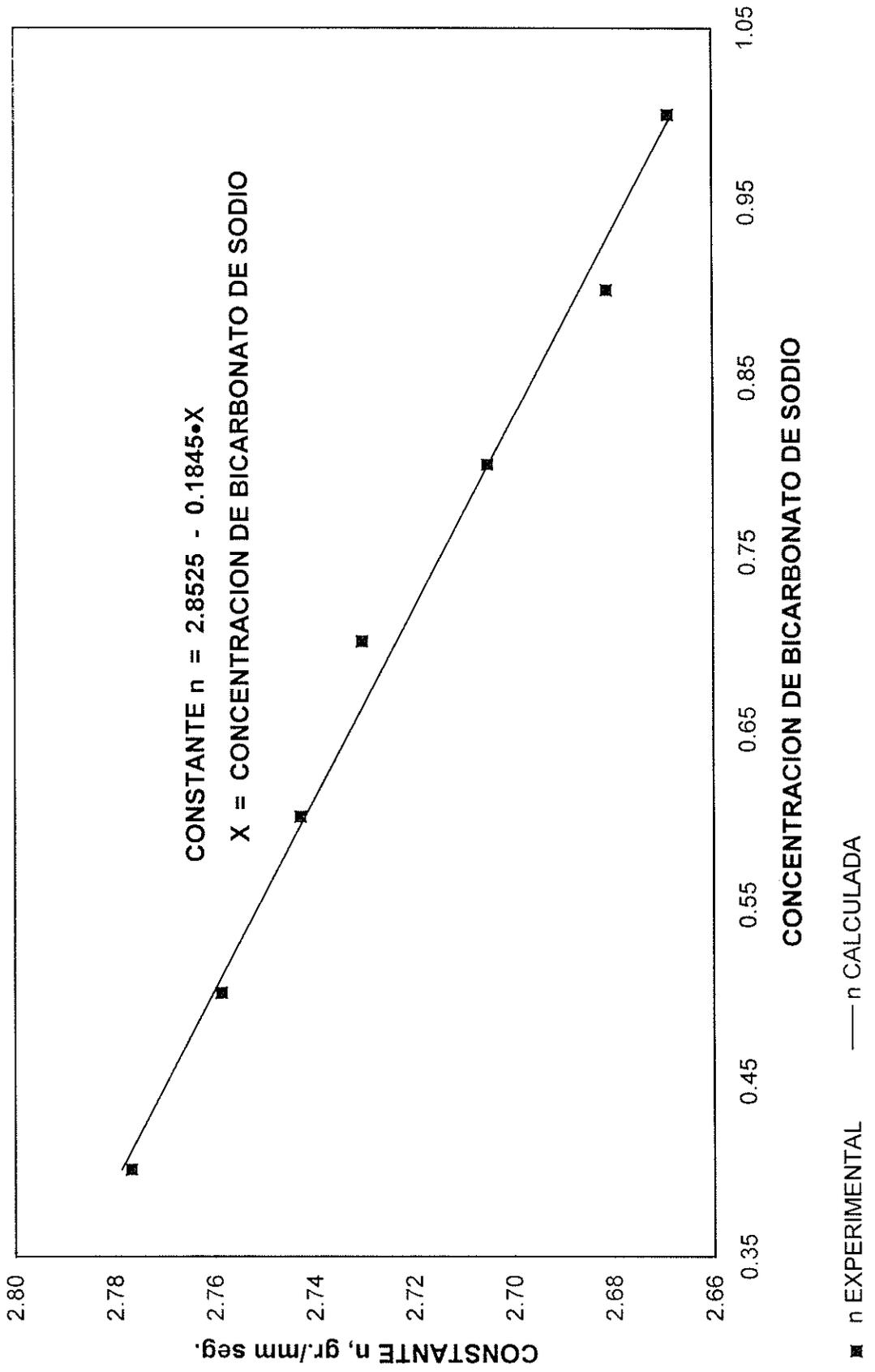
se deriva la ecuación general en función de los parámetros conocidos, concentración de bicarbonato de sodio y diámetro de orificio. Esta se define como:

$$\mathbf{v = (0.0196X + 0.0141) \varnothing^{(2.8525 - 0.1845 X)}} \quad (9)$$

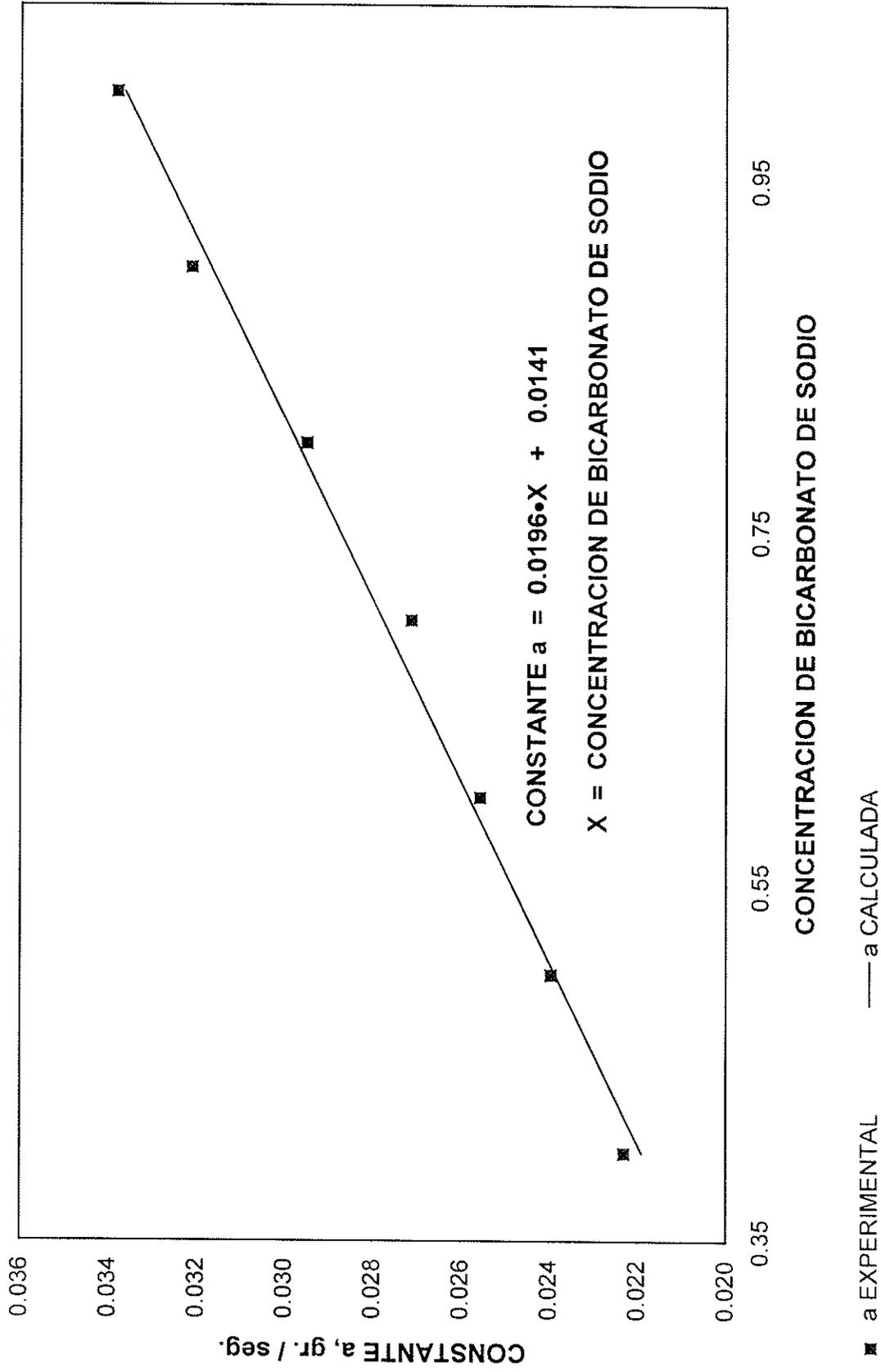
Donde.

v = velocidad de flujo, gr./seg.
X = concentración de bicarbonato de sodio
∅ = diámetro de orificio, mm.

GRAFICA No. 7
 CONSTANTE n EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE BICARBONATO DE SODIO



GRAFICA No. 8
CONSTANTE a EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE BICARBONATO DE SODIO



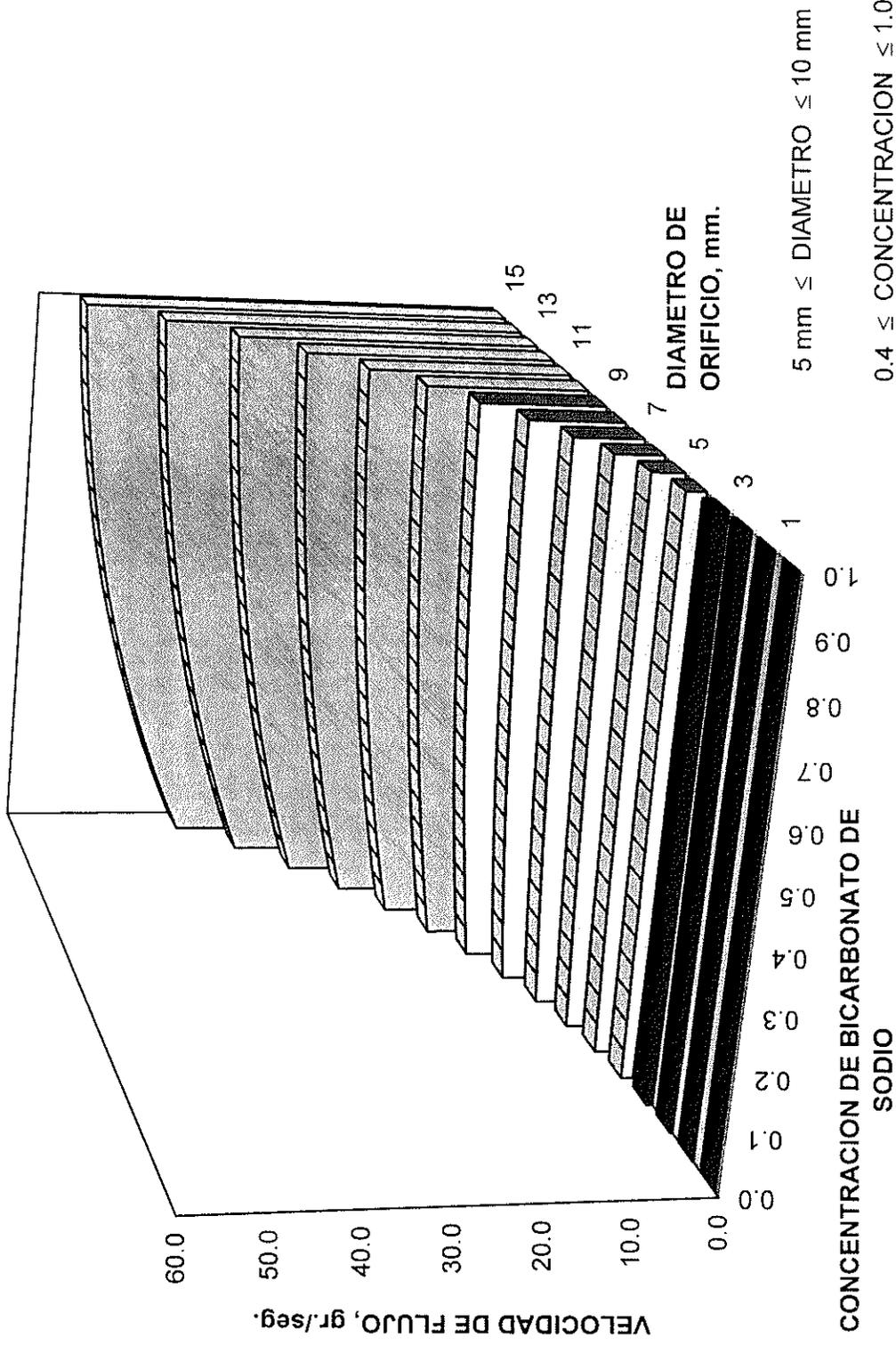
La ecuación (9) sólo puede ser utilizada en el intervalo abierto, definido de la siguiente forma:

Concentración de bicarbonato de sodio (%)	Concentración de ácido cítrico (%)	Diámetro de orificio (mm)
100	0	10
40	60	5

La Gráfica No. 9 muestra el modelo matemático en un sistema de 3 dimensiones, en la cual se muestra la relación entre la concentración de bicarbonato de sodio, el diámetro de orificio y la velocidad de flujo.

En el Cuadro No. 18 de la sección de Anexo, se muestran los valores de evaluación del modelo, para distintas concentraciones de bicarbonato de sodio, a través de distintos diámetros de orificio.

GRAFICA No. 9
VELOCIDAD DE FLUJO EN FUNCION DEL DIAMETRO DE ORIFICIO, PARA LA
CONCENTRACION DE BICARBONATO DE SODIO EN MEZCLAS CON ACIDO
CITRICO



DISCUSION DE RESULTADOS

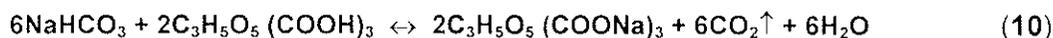
Propiedades de los materiales

De acuerdo con los resultados experimentales, la naturaleza y las propiedades de los dos componentes de las mezclas de polvos ensayadas, bicarbonato de sodio granular y ácido cítrico anhidro, que parecen tener más influencia sobre el comportamiento y velocidad de flujo a través de orificios, son (5):

1. La fuerza de cohesividad, y
2. las propiedades friccionales.

Los dos materiales son utilizados en mezclas para la producción de productos efervescentes –sales y tabletas– (7). Normalmente son utilizados en mezclas idealmente cercanas a las cantidades estequiométricas ($\pm 57\%$ de bicarbonato de sodio) necesarias para que la reacción efervescente (de neutralización) se lleve a cabo casi completamente en presencia de agua, formando una solución tampón con un valor de pH ligeramente ácido (4). Por ello, participan de las siguientes características:

- Están prácticamente libres de humedad, dado que la presencia de agua provocaría que los materiales reaccionen rápidamente (7). Dado que agua es un producto de la reacción, según la siguiente ecuación, una vez iniciada la reacción, continuará hasta que se agoten los reaccionantes o se acumule suficiente cantidad de productos para invertir el equilibrio.



Por lo tanto, se puede suponer que el contenido de humedad no es un factor que afecte el flujo de las mezclas, aumentando la fricción.

- Los experimentos fueron realizados dentro de un local en el cual el aire está acondicionado a una humedad relativa menor que 20% y una temperatura menor que 25° C. Bajo estas condiciones, se supone que la temperatura no es un factor importante que afecte la fricción.
- El tiempo de almacenamiento en reposo dentro del cilindro del medidor fue prácticamente despreciable, y la superficie del recipiente es de acero inoxidable totalmente lisa. Por ello, se puede concluir que estos factores no tienen influencia significativa sobre la fricción.
- La presión de consolidación que opera en el medidor es la fuerza de gravedad y, por lo tanto, el peso del material dentro del cilindro del medidor. Dadas las dimensiones del equipo, ya que, para minimizar su influencia, se mantuvo constante la altura del material dentro del cilindro del medidor; el efecto de la presión de consolidación sobre la fricción es prácticamente despreciable.

- Por último, la influencia del tamaño y forma de las partículas de los materiales sí es un factor que afecta la fricción y por lo tanto, el flujo de los materiales ensayados.

En relación con estas propiedades de los materiales, el ácido cítrico es el que muestra un efecto mayor. Este material es cristalino. Por lo tanto, las partículas tienen a ser angulares (7), con la posibilidad de que sufran encadenamiento, y aumentan la fricción. También, se supone, que esta característica aumenta la cohesividad del material. Además, de acuerdo con los resultados mostrados en los Cuadros 1 y 2; y en las Gráficas 1 y 2, el ácido cítrico es un polvo más fino que el bicarbonato de sodio. De acuerdo con los resultados, el ácido cítrico solo no fluyó a través de los orificios utilizados en los ensayos y fue el principal factor limitante para determinar la velocidad de flujo de las mezclas con bicarbonato de sodio. La principal causa fue la formación de arcos o domos, cuando se utilizaron diámetros de orificio pequeños, especialmente ante concentraciones crecientes de ácido cítrico. Este material tiende a retener la forma cuando es apretado en la mano.

- El bicarbonato de sodio utilizado es granular, no cristalino (7). La forma de las partículas tiende a ser esférica. Este material fluye a través de todos los orificios ensayados. El factor limitante que se observó, con diámetros muy grandes de orificio, fue la formación de agujeros de ratón, dado que se observó una pequeña cantidad de material adherido a la superficie del cilindro del medidor de flujo. Sin embargo, el bicarbonato de sodio ensayado no retiene la forma cuando es apretado por la mano, lo cual significa que no tiene cohesividad.

En conclusión, el estudio del comportamiento de flujo de mezclas de bicarbonato de sodio y ácido cítrico por el método FLODEX, determinó que el bicarbonato de sodio es capaz de fluir por sí solo, no así el ácido cítrico. Este material necesitó de un agente fluidizante, el bicarbonato de sodio granular, para fluir dentro del intervalo de concentración, hasta un máximo del 60% (40% de bicarbonato de sodio). Esto significa que, con las características que poseen los materiales ensayados, sí es posible preparar mezclas efervescentes en las cantidades estequiométricas.

Comportamiento de la velocidad de flujo

El comportamiento típico del flujo de una mezcla de bicarbonato de sodio granular y ácido cítrico en función del tiempo es una línea recta, tal como lo muestra la Gráfica No. 3, independientemente del diámetro del orificio dentro de los intervalos de concentración de los materiales, que ya fueron discutidos. En otras palabras, esto significa que la masa de polvo fluyó en forma constante, hasta que todo el material contenido en el recipiente del medidor de flujo se agotó.

El modelo FLODEX, basado en la expresión (1), se puede escribir de la siguiente forma:

$$\Pi \frac{D^3}{4} h d g \geq \Pi D h K \quad (11)$$

Donde.

h	= Altura del núcleo de polvo.
$\Pi \frac{D^3}{4} h$	= Volumen del núcleo de polvo.
d	= Densidad aparente del polvo.
g	= Aceleración de la gravedad (980 cm / seg ²).
D	= Diámetro del orificio (igual al diámetro del núcleo de polvo).
ΠDh	= Area superficial del núcleo de polvo.
K	= Coeficiente de la fricción de deslizamiento.

La expresión **11** significa que, cuando el peso del núcleo de polvo sobrepasa la fricción interna, el núcleo de polvo fluirá. Si el polvo tiene una fluidez aceptable, continuará moviéndose a velocidad constante, hasta que se agote la carga de material dentro del medidor. Este método sólo determina la capacidad de fluir que tiene el material, a través de un orificio de un diámetro dado. Si las características del material son tales que, por ejemplo, tiende a formar arcos o agujeros de ratón, el material no fluirá. Por otro lado, si el material posee una alta fricción interna, tampoco fluirá. El método FLODEX, en cierto sentido, es un método que permite determinar si un polvo fluirá a través de un orificio diámetro definido. Su utilidad es de gran interés en comparar, por ejemplo, si las propiedades de un material varían entre tanda y tanda, o con el tiempo.

El método FLODEX no permite medir la velocidad de flujo, tal como está definido. Por esta razón, aunque se utilizó el equipo FLODEX, se midió la velocidad de flujo, pesando la cantidad de material que fluyó a través de un orificio en función del tiempo.

De acuerdo con los resultados experimentales, el método de medición de la velocidad es reproducible y permitió diferenciar claramente el efecto de las distintas variables ensayadas. En los casos en los que no fue posible medir el flujo, fue posible identificar las causas atribuibles. En todos los casos la incapacidad de fluir se pudo atribuir a la formación de arcos o agujeros de ratón. Es decir, a causas relacionadas con las propiedades friccionales de los materiales. Dado que estas no fueron medidas, el modelo desarrollado es de carácter limitado. Sólo tiene validez dentro de los límites determinados experimentalmente.

El resultado lineal del flujo, medido por la cantidad que fluyó en determinado intervalo de tiempo a través de un orificio de diámetro conocido, indica que el flujo de material estaba influido únicamente por la presión de la gravedad, es decir el peso del material, tal como lo indica la expresión **11**.

Por otro lado, las propiedades friccionales de los materiales utilizados en las mezclas, especialmente las del ácido cítrico, que demostró mayor fricción, tienen una influencia considerable sobre la velocidad de flujo: a mayor concentración de ácido cítrico, menor fue la velocidad de flujo de la mezcla, a través de un orificio de un mismo diámetro. En otras palabras, la velocidad de flujo fue mayor cuando la concentración de bicarbonato se incrementó.

A la luz de los resultados mostrados en la Gráfica No. 4, la velocidad de flujo en función del diámetro del orificio, a concentración constante de los componentes, tiene una conducta potencial. El valor del exponente fue alrededor de 2.7. De acuerdo con la expresión 11, el flujo de polvo es una función cuadrática del diámetro del orificio.

Debido a este comportamiento potencial, al graficar el logaritmo de la velocidad de flujo en función del logaritmo del diámetro de orificio, se obtiene una recta, tal como se puede observar en la Gráfica No. 5, por ejemplo. La Gráfica No. 6 resume los datos para todas las mezclas. Dado que todas las mezclas mostraron el mismo comportamiento, se puede suponer que existe una ecuación lineal que relaciona la velocidad de flujo con el diámetro del orificio y la concentración de los componentes de las mezclas.

Para determinar una ecuación que defina a la constante n , se graficó los valores calculados para n , en función de la concentración de bicarbonato de sodio. El comportamiento que se puede observar en la Gráfica No. 7, es lineal. La expresión resultante es:

$$n = - 0.1845X + 2.8525, \quad (6)$$

donde X es la concentración de bicarbonato de sodio.

En la Gráfica No. 7, se puede observar que a medida que la concentración de bicarbonato de sodio disminuye, aumenta el valor de la constante n . Si estudiamos este comportamiento y sabiendo que a mayor concentración de bicarbonato de sodio la velocidad de flujo es mayor, la constante n es una constante de freno al flujo, equivalente, de alguna manera, a un coeficiente que expresa el valor de la fricción.

Para determinar una expresión que defina a la constante a , se graficó ésta en función de la concentración de bicarbonato de sodio. El comportamiento que se puede observar en la Gráfica No. 8 es lineal. La expresión resultante es:

$$a = 0.0196X + 0.0141, \quad (7)$$

donde X es la concentración de bicarbonato de sodio.

De la ecuación de la forma general siguiente:

$$v = a \varnothing^n, \quad (8)$$

se substituyó las expresiones para a y n , resultando en la expresión:

$$v = (0.0196X + 0.0141) \varnothing^{(2.8525 - 0.1845 X)} \quad (9)$$

Esta expresión, que relaciona la velocidad de flujo en función del diámetro de los orificios y la concentración de los componentes en una mezcla binaria bicarbonato de sodio - ácido cítrico, dentro de los límites antes descritos, define el modelo.

La Gráfica No. 9 describe los resultados de aplicar el modelo a los valores de las variables experimentales, mostrando el comportamiento en un plano de tres dimensiones.

Esta curva es de gran importancia en el desarrollo de nuevas fórmulas de producción, así como en el control en proceso de la producción, ya que facilita la determinación de las cantidades de ingredientes activos que pueden ser dosificados en la mezcla, sin afectar al flujo de esta.

El modelo que describe la expresión 9, para las mezclas de bicarbonato de sodio y ácido cítrico, con sus límites en concentración y diámetro de orificio, facilita la formulación de productos efervescentes que contengan estos dos materiales, ya que determinan las condiciones de flujo que presentará esta.

En el Cuadro No. 18, se encuentran los valores calculados a partir del modelo, para distintas concentraciones de bicarbonato de sodio, a través de cada orificio.

El procedimiento para la determinación de este modelo puede ser usado para otros polvos y sus mezclas, lo que es de gran importancia para la industria en general, ya que este modelo, puede predecir las condiciones necesarias para la formulación de una mezcla de polvos. Además de presentar la ventaja de ser un método de control en proceso, sirve para evitar problemas con el flujo de mezclas de polvos.

CONCLUSIONES

1. El modelo que describe la velocidad de flujo de diferentes materiales en polvo y sus mezclas a través de orificios de dimensiones conocidas es:

$$V = (C_1 \cdot X + C_2) \cdot \emptyset^{(C_3 - C_4 \cdot X)}$$

donde.

V = velocidad de flujo en (gr./seg.)
 X = concentración de bicarbonato de sodio
 \emptyset = diámetro de orificio (mm)
 C₁, C₂, C₃ y C₄ = constantes

2. El modelo es preciso y efectivo para determinar velocidades de flujo de mezclas de polvos, por lo que se puede predecir el comportamiento de los materiales en forma individual y sus mezclas, a través de orificios de diámetro conocido.
3. El modelo que define la velocidad de flujo a través de orificios de dimensiones conocidas para los materiales, bicarbonato de sodio granular, ácido cítrico anhidro y sus mezclas es:

$$v = (0.0196X + 0.0141) \emptyset^{(2.8525 - 0.1845 X)} \quad (9)$$

4. El modelo para su evaluación presenta los siguientes *límites* de operación:

Concentración de bicarbonato de sodio (%)	Concentración de ácido cítrico (%)	Diámetro de orificio (mm)	Fenómeno limitante
100	0	10	Agujero de ratón
40	60	5	Arco

Límites en los cuales no se presenta ningún problema de dosificación, por lo que pueden ser utilizadas las formulaciones de éstos, desde contenedores a máquinas de alta velocidad.

5. El bicarbonato de sodio es un polvo, que por su tamaño y forma de partícula, puede fluir fácilmente, no así el ácido cítrico, el cual necesita la presencia de un agente fluidizante (en este caso el bicarbonato de sodio), para poder fluir; en vista de que en el ácido cítrico la fuerza de cohesividad y el valor de la fricción es muy elevado, se necesita un mínimo de 40 % de bicarbonato de sodio en la mezcla para que ésta fluya.
6. La efectividad del modelo en la predicción de la velocidad de flujo de mezclas de bicarbonato de sodio y ácido cítrico a través de orificios de dimensiones conocidas, es adecuada, además es preciso para determinar las condiciones de flujo de una mezcla de estos dos materiales con algún ingrediente activo en la fórmula.

RECOMENDACIONES

1. Para las mezclas de bicarbonato de sodio, ácido cítrico y algún ingrediente activo, es recomendable determinar el modelo para estos tres polvos en mezclas, con el fin de tener un mejor control en la dosificación en las tabletas que se están produciendo. Ya que un mal flujo provoca problemas de productividad, así como problemas de contenido.
2. En la determinación del modelo, se recomienda tener el equipo FLODEX, con una balanza que pueda dar una gráfica de valores de tiempo en función del peso de polvo que está midiendo. Esto es con el fin de poder determinar velocidades exactas de flujo para una mezcla de polvos.
3. Para desarrollar un modelo que describa la capacidad y velocidad de flujo de la mezcla de ciertos polvos, es necesario conocer las características de fluidez de los polvos en forma individual, para poder determinar sus características en mezclas.
4. Es importante trabajar en condiciones de temperatura y humedad controladas, para no tener factores adicionales en el modelo, los cuales puedan dar un giro en el comportamiento del flujo.
5. Para las industrias que tienen procesos de manejo de materiales en polvo, específicamente descargas de tolvas o contenedores, y que necesitan mantener una dosificación adecuada de éstos, es recomendable establecer sus modelos para cada mezcla de polvos que trabajen, y así poder tener un control en proceso que les permita evitar problemas con mezclas de estos polvos que no fluyan.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

ANEXO

CUADRO No. 1

Perfil granulométrico del bicarbonato de sodio
Determinación del tamaño promedio de partícula

Tamaño No.	Maila (TM)		Log TM Micrones	Sobre la maila		z para % Acumulado		ni (Log di)
	Micrones	(gr.)		% sobre	% Acumulado	Experimental	Calculado	
60	250	0.01	2.40	0.08	-3.00	-1.93	0.02	
70	212	1.61	2.33	15.99	-1.00	-1.04	3.75	
80	177	6.14	2.25	61.03	0.74	-0.07	13.81	
100	149	1.83	2.17	18.18	1.67	0.86	3.98	
120	125	0.34	2.10	3.39	2.22	1.80	0.72	
140	105	0.05	2.02	0.53	2.41	2.74	0.11	
170	88	0.08	1.94	0.80	3.00	3.69	0.16	
Total :			10.07				22.53	

Resultado de la regresión	
Constante	27.75
Error típico de est Y	0.80
R cuadrado	0.88
Nº de observaciones	7
Grados de libertad	5
Coefficiente(s) X	-12.38
Error típico del coef	2.00

$$dg = \text{antiLog} (\text{SUM} (ni \text{ Log di})) / (\text{SUM}(ni))$$

donde:

dg = diámetro medio de partícula

di = diámetros de las mallas usadas

ni = pesos de partícula sobre la maila

diámetro medio de partícula, (dg) = 173 micrones

CUADRO No. 2

Perfil granulométrico del ácido cítrico
Determinación del tamaño promedio de partícula

Tamaño Malla (TM)	Log TM	Sobre la malla		z para % Acumulado		ni (Log di)		
		Micrones	(gr.)	% sobre	% Acumulado		Experimental	Calculado
60	2.40	250	0.01	0.08	0.08	-3.00	-2.46	0.02
70	2.33	212	0.87	8.71	8.79	-1.48	-1.52	2.02
80	2.25	177	2.20	22.01	30.80	-0.51	-0.49	4.95
100	2.17	149	6.09	60.88	91.68	1.37	0.50	13.22
120	2.10	125	0.51	5.06	96.75	1.82	1.50	1.06
140	2.02	105	0.25	2.54	99.29	2.35	2.50	0.51
170	1.94	88	0.07	0.71	100.00	3.00	3.51	0.14
Total :			10.00					21.93

Resultado de la regresión	
Constante	29.14
Error típico de est Y	0.54
R cuadrado	0.95
Nº de observaciones	7
Grados de libertad	5
Coficiente(s) X	-13.18
Error típico del coef	1.34

$$dg = \text{antiLog} (\text{SUM} (ni \text{ Log di})) / (\text{SUM}(ni))$$

donde:

dg = diámetro medio de partícula

di = diámetros de las mallas usadas

ni = pesos de partícula sobre la malla

diámetro medio de partícula, (dg) = 156 micrones

CUADRO No. 3

Concentración 100% de bicarbonato de sodio granular y 0% de ácido cítrico anhidro
Medidas de peso en función del tiempo, para los orificios de 5 a 10 mm de diámetro

Orificio de 5 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
10	4.23	4.32	4.01	4.19
20	8.15	8.26	8.08	8.16
30	12.02	12.41	12.10	12.18
40	16.30	16.60	16.03	16.31
50	20.11	20.62	20.28	20.34
60	23.90	24.48	24.18	24.19
70	27.88	28.37	27.91	28.06

Orificio de 6 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	5.22	5.33	5.21	5.25
40	10.10	10.31	10.33	10.25
60	15.16	15.16	15.21	15.18
80	19.77	20.24	20.72	20.24
100	24.49	25.43	25.51	25.14
120	29.67	30.54	30.34	30.18
140	35.16	35.66	35.47	35.43

Orificio de 7 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	3.47	3.64	3.55	3.55
40	6.37	6.61	6.44	6.47
60	9.70	9.78	9.87	9.79
80	12.91	13.02	12.88	12.94
100	15.97	16.24	16.35	16.19
120	18.81	19.08	19.52	19.14
140	22.53	22.55	22.63	22.57

Orificio de 8 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
30	3.71	3.68	3.68	3.69
60	6.69	7.19	7.08	6.98
90	9.92	10.57	10.18	10.22
120	13.42	13.85	13.68	13.65
150	16.97	17.41	17.29	17.23
180	20.15	20.90	20.43	20.49
210	23.24	24.06	23.28	23.53

Orificio de 9 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	3.53	3.48	3.55	3.52
80	6.53	6.70	6.67	6.63
120	10.08	9.96	9.82	9.95
160	13.57	13.44	13.26	13.42
200	16.66	16.61	16.68	16.65
240	20.21	19.67	19.55	19.81
280	23.37	23.26	22.84	23.16

Orificio de 10 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	2.83	2.80	2.89	2.84
80	5.30	5.31	5.42	5.34
120	7.74	7.83	7.74	7.77
160	10.06	10.28	10.12	10.16
200	12.91	12.90	12.92	12.91
240	15.54	15.70	15.59	15.61
280	18.15	18.35	18.26	18.26

CUADRO No. 4

Concentración 90% de bicarbonato de sodio granular y 10% de ácido cítrico anhídrido
 Medidas de peso en función del tiempo, para los orificios de 5 a 10 mm de diámetro

Orificio de 5 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
10	4.30	4.53	4.40	4.41
20	8.36	8.23	8.63	8.41
30	12.60	12.53	12.69	12.61
40	16.60	16.68	16.64	16.64
50	20.67	20.76	20.86	20.76
60	24.69	24.91	25.06	24.89
70	28.66	29.05	29.34	29.02

Orificio de 6 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	5.42	5.51	5.59	5.51
40	10.51	10.57	10.46	10.51
60	15.25	15.64	15.94	15.61
80	21.05	21.06	20.86	20.99
100	26.16	26.43	26.17	26.25
120	31.49	31.37	31.26	31.37
140	36.50	36.60	36.55	36.55

Orificio de 7 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	3.56	3.46	3.53	3.52
40	6.68	6.66	6.91	6.75
60	10.25	10.18	10.20	10.21
80	13.42	13.29	13.51	13.41
100	16.48	16.82	16.79	16.70
120	19.56	19.87	20.02	19.82
140	22.99	23.05	23.41	23.15

Orificio de 8 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
30	3.73	3.57	3.73	3.68
60	7.25	6.91	7.10	7.09
90	10.40	10.29	10.71	10.47
120	13.51	13.93	14.15	13.86
150	17.20	17.11	17.31	17.21
180	20.85	20.51	20.79	20.72
210	24.45	24.14	24.39	24.33

Orificio de 9 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	3.65	3.63	3.39	3.55
80	7.00	6.99	6.99	6.99
120	10.12	10.12	10.02	10.09
160	13.50	13.51	13.40	13.47
200	17.02	16.93	16.91	16.95
240	20.25	20.18	20.34	20.25
280	23.47	23.42	23.76	23.55

Orificio de 10 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	2.95	2.90	2.75	2.87
80	5.48	5.64	5.48	5.53
120	8.11	8.15	7.98	8.08
160	10.58	10.65	10.62	10.62
200	13.19	13.31	13.24	13.25
240	15.90	16.12	16.06	16.03
280	18.61	18.94	18.89	18.81

CUADRO No. 5

Concentración 80% de bicarbonato de sodio granular y 20% de ácido cítrico anhidro
Medidas de peso en función del tiempo, para los orificios de 5 a 10 mm de diámetro

Orificio de 5 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
10	4.48	4.56	4.65	4.56
20	8.76	9.07	8.89	8.91
30	13.03	13.20	13.17	13.13
40	17.24	17.47	17.65	17.46
50	21.51	21.74	21.73	21.66
60	25.79	26.11	26.02	25.97
70	30.09	30.43	30.28	30.26

Orificio de 6 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	5.77	5.73	5.76	5.75
40	10.92	11.26	11.12	11.10
60	16.59	16.50	16.58	16.56
80	21.85	22.00	21.82	21.89
100	27.18	27.52	27.09	27.26
120	32.65	32.84	32.81	32.76
140	37.89	38.25	38.13	38.09

Orificio de 7 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	3.83	3.70	3.87	3.80
40	7.08	7.19	7.20	7.16
60	10.60	10.57	10.47	10.55
80	14.16	13.79	14.03	13.99
100	17.47	17.11	17.34	17.31
120	20.80	20.53	20.64	20.66
140	24.11	24.19	24.19	24.16

Orificio de 8 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
30	3.71	3.85	3.95	3.84
60	7.23	7.40	7.10	7.24
90	10.94	11.24	10.78	10.98
120	14.43	14.54	14.49	14.49
150	17.96	18.30	17.73	17.99
180	21.21	21.54	21.42	21.39
210	24.91	25.17	25.17	25.08

Orificio de 9 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	3.77	3.78	3.71	3.75
80	7.16	7.09	7.25	7.17
120	10.62	10.49	10.82	10.64
160	14.27	14.05	13.96	14.09
200	17.51	17.50	17.29	17.43
240	21.11	20.94	20.84	20.96
280	24.35	24.22	24.28	24.28

Orificio de 10 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	2.98	2.91	2.99	2.96
80	5.69	5.65	5.73	5.69
120	8.33	8.16	8.28	8.26
160	11.03	10.95	10.95	10.98
200	13.78	13.74	13.67	13.73
240	16.49	16.39	16.43	16.44
280	19.23	19.03	19.21	19.15

CUADRO No. 6

Concentración 70% de bicarbonato de sodio granular y 30% de ácido cítrico anhídrido
Medidas de peso en función del tiempo, para los orificios de 5 a 10 mm de diámetro

Orificio de 5 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
10	4.72	4.82	4.83	4.79
20	9.11	9.11	9.28	9.17
30	13.70	13.65	13.81	13.72
40	18.18	18.31	18.32	18.27
50	22.65	22.78	22.89	22.77
60	27.21	27.19	27.29	27.23
70	31.98	31.70	31.73	31.80

Orificio de 6 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	5.85	5.92	5.89	5.89
40	11.39	11.25	11.53	11.39
60	16.85	16.90	16.82	16.86
80	22.55	22.62	22.72	22.63
100	28.27	28.33	28.24	28.28
120	33.80	34.00	33.88	33.89
140	39.56	39.56	39.44	39.52

Orificio de 7 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	3.90	3.99	3.91	3.93
40	7.32	7.44	7.36	7.37
60	10.82	10.87	11.00	10.90
80	14.37	14.39	14.67	14.48
100	17.95	17.85	18.09	17.96
120	21.23	21.60	21.55	21.46
140	25.09	25.15	25.02	25.08

Orificio de 8 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
30	3.69	3.97	3.92	3.86
60	7.41	7.85	7.67	7.64
90	10.89	11.26	11.26	11.14
120	14.70	14.99	14.69	14.79
150	18.34	18.53	18.47	18.45
180	22.03	22.39	22.07	22.17
210	25.74	25.96	25.88	25.86

Orificio de 9 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	3.79	3.96	3.80	3.85
80	7.29	7.41	7.33	7.34
120	10.87	10.91	10.89	10.89
160	14.21	14.44	14.58	14.41
200	17.93	17.87	17.82	17.88
240	21.33	21.43	21.38	21.38
280	24.78	24.95	24.89	24.87

Orificio de 10 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	3.09	3.03	3.30	3.14
80	5.77	5.82	6.13	5.91
120	8.57	8.60	8.79	8.66
160	11.19	11.35	11.57	11.37
200	13.91	14.24	14.31	14.15
240	16.73	16.91	17.17	16.93
280	19.62	19.80	19.88	19.77

CUADRO No. 7

Concentración 60% de bicarbonato de sodio granular y 40% de ácido cítrico anhidro
Medidas de peso en función del tiempo, para los orificios de 5 a 10 mm de diámetro

Orificio de 5 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
10	4.92	4.88	4.97	4.93
20	9.76	9.36	9.73	9.62
30	14.14	14.13	14.37	14.21
40	18.99	18.98	18.92	18.96
50	23.95	23.57	23.86	23.79
60	28.32	28.09	28.15	28.19
70	32.91	32.92	32.95	32.93

Orificio de 6 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	6.07	6.28	6.11	6.15
40	11.96	12.13	12.03	12.04
60	17.68	17.54	17.85	17.69
80	23.59	23.71	23.71	23.67
100	29.52	29.39	29.54	29.48
120	35.02	34.97	35.27	35.09
140	41.15	40.98	41.02	41.05

Orificio de 7 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	3.85	3.97	4.08	3.97
40	7.54	7.82	7.48	7.61
60	11.16	11.47	11.33	11.32
80	14.77	15.19	15.22	15.06
100	18.55	18.70	18.75	18.67
120	22.03	22.54	22.19	22.25
140	25.67	26.13	26.28	26.03

Orificio de 8 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
30	4.27	4.05	4.10	4.14
60	7.65	7.89	7.90	7.81
90	11.46	11.64	11.65	11.58
120	15.20	15.38	15.33	15.30
150	18.83	19.20	19.04	19.02
180	22.73	22.97	22.81	22.84
210	26.76	26.68	26.65	26.69

Orificio de 9 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	3.94	3.96	3.90	3.93
80	7.50	7.64	7.55	7.56
120	11.20	11.31	11.32	11.28
160	14.77	15.07	14.98	14.94
200	18.39	18.65	18.64	18.56
240	21.95	22.10	22.19	22.08
280	25.68	25.85	25.76	25.76

Orificio de 10 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	3.16	3.08	3.44	3.22
80	6.11	5.92	6.41	6.15
120	8.94	8.74	9.18	8.96
160	11.74	11.75	11.92	11.80
200	14.46	14.48	14.72	14.55
240	17.41	17.24	17.58	17.41
280	20.29	20.13	20.39	20.27

CUADRO No. 8

Concentración 50% de bicarbonato de sodio granular y 50% de ácido cítrico anhídrido
Medidas de peso en función del tiempo, para los orificios de 5 a 10 mm de diámetro

Orificio de 5 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
10	5.03	5.15	5.22	5.13
20	9.64	9.88	10.12	9.88
30	14.52	14.87	14.91	14.77
40	19.36	19.73	19.83	19.64
50	24.23	24.57	24.75	24.52
60	29.07	29.43	29.62	29.37
70	33.88	34.23	34.48	34.20

Orificio de 6 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	6.28	6.49	6.33	6.36
40	12.54	12.47	12.43	12.48
60	18.19	18.42	18.48	18.36
80	24.51	24.52	24.49	24.51
100	30.41	30.47	30.60	30.49
120	36.61	36.56	36.68	36.62
140	42.61	42.59	42.77	42.66

Orificio de 7 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	4.05	4.08	4.11	4.08
40	7.87	7.84	7.88	7.86
60	11.81	11.70	11.76	11.76
80	15.29	15.66	15.68	15.54
100	19.33	19.43	19.36	19.37
120	23.10	23.20	23.15	23.15
140	26.88	27.12	27.08	27.03

Orificio de 8 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
30	3.83	4.19	4.29	4.11
60	7.88	8.03	7.84	7.92
90	11.71	12.00	12.10	11.93
120	15.81	15.99	15.89	15.90
150	19.69	19.83	19.76	19.76
180	23.75	23.62	23.63	23.67
210	27.64	27.48	27.37	27.50

Orificio de 9 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	4.13	4.04	3.95	4.04
80	7.80	7.79	7.71	7.76
120	11.56	11.59	11.39	11.51
160	15.31	15.44	15.09	15.28
200	18.98	19.08	18.95	19.00
240	22.69	22.75	22.54	22.66
280	26.47	26.43	26.43	26.44

Orificio de 10 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	3.27	3.29	3.09	3.22
80	6.23	6.30	6.21	6.25
120	9.27	9.32	9.16	9.25
160	12.16	12.11	12.00	12.09
200	15.03	15.04	14.98	15.02
240	17.93	17.99	17.96	17.96
280	20.92	20.91	20.88	20.90

CUADRO No. 9

Concentración 40% de bicarbonato de sodio granular y 60% de ácido cítrico anhidro
Medidas de peso en función del tiempo, para los orificios de 5 a 10 mm de diámetro

Orificio de 5 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
10	5.38	5.40	5.25	5.34
20	10.31	10.32	10.38	10.34
30	15.35	15.41	15.44	15.40
40	20.40	20.38	20.62	20.47
50	25.39	25.33	25.63	25.45
60	30.46	30.34	30.75	30.52
70	35.55	35.47	35.81	35.61

Orificio de 6 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	6.69	6.79	6.80	6.76
40	12.93	12.92	12.99	12.95
60	19.05	19.19	19.18	19.14
80	25.45	25.53	25.95	25.65
100	31.77	31.56	32.22	31.85
120	37.86	37.93	38.51	38.10
140	44.23	44.24	44.81	44.42

Orificio de 7 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
20	4.23	4.27	4.26	4.26
40	8.21	8.33	8.13	8.22
60	11.94	12.32	12.19	12.15
80	16.06	16.36	16.01	16.14
100	19.94	20.30	19.98	20.07
120	23.82	24.30	24.27	24.13
140	28.17	28.26	28.11	28.18

Orificio de 8 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
30	4.11	4.40	4.22	4.24
60	8.21	8.40	8.36	8.32
90	12.06	12.36	12.52	12.31
120	16.24	16.35	16.58	16.39
150	20.23	20.42	20.54	20.40
180	24.20	24.49	24.49	24.39
210	28.34	28.49	28.76	28.53

Orificio de 9 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	4.13	4.19	4.28	4.20
80	8.01	8.09	7.95	8.02
120	12.02	11.74	11.87	11.87
160	15.56	15.73	15.57	15.62
200	19.49	19.39	19.57	19.48
240	23.53	23.29	23.47	23.43
280	27.21	27.21	27.18	27.20

Orificio de 10 mm de diámetro

Peso (gr.)	Tiempo 1 (seg.)	Tiempo 2 (seg.)	Tiempo 3 (seg.)	T Promedio (seg.)
40	3.31	3.37	3.41	3.36
80	6.39	6.44	6.42	6.41
120	9.42	9.50	9.53	9.49
160	12.47	12.53	12.51	12.50
200	15.57	15.61	15.57	15.58
240	18.56	18.54	18.48	18.53
280	21.47	21.54	21.43	21.48

CUADRO No. 10

Cálculo de velocidad de flujo para concentración 100 % bicarbonato de sodio granular y 0% de ácido cítrico anhidro, así como la constante de flujo K y la constante a

Diámetro de Orificio (mm)	Velocidad de Flujo (gr./seg.)	Coefficiente Correlación R	Log d	Log V Experimental	Log V Calculada
5	2.48	1.00	0.70	0.39	0.39
6	3.96	1.00	0.78	0.60	0.61
7	6.20	1.00	0.85	0.79	0.78
8	8.81	1.00	0.90	0.95	0.94
9	12.05	1.00	0.95	1.08	1.08
10	15.41	1.00	1.00	1.19	1.20

CUADRO No. 11

Cálculo de velocidad de flujo para concentración 90 % bicarbonato de sodio granular y 10% de ácido cítrico anhidro, así como la constante de flujo K y la constante a

Diámetro de Orificio (mm)	Velocidad de Flujo (gr./seg.)	Coefficiente Correlación R	Log d	Log V Experimental	Log V Calculada
5	2.41	1.00	0.70	0.38	0.38
6	3.82	1.00	0.78	0.58	0.59
7	6.01	1.00	0.85	0.78	0.77
8	8.65	1.00	0.90	0.94	0.93
9	11.84	1.00	0.95	1.07	1.07
10	14.94	1.00	1.00	1.17	1.19

CUADRO No.12

Cálculo de velocidad de flujo para concentración 80 % bicarbonato de sodio granular y 20% de ácido cítrico anhidro, así como la constante de flujo K y la constante a

Diámetro de Orificio (mm)	Velocidad de Flujo (gr./seg.)	Coefficiente Correlación R	Log d	Log V Experimental	Log V Calculada
5	2.30	1.00	0.70	0.36	0.36
6	3.66	1.00	0.78	0.56	0.57
7	5.77	1.00	0.85	0.76	0.76
8	8.35	1.00	0.90	0.92	0.91
9	11.44	1.00	0.95	1.06	1.05
10	14.57	1.00	1.00	1.16	1.18

CUADRO No.13

Cálculo de velocidad de flujo para concentración 70 % bicarbonato de sodio granular y 30% de ácido cítrico anhidro, así como la constante de flujo K y la constante a

Diámetro de Orificio (mm)	Velocidad de Flujo (gr./seg.)	Coefficiente Correlación R	Log d	Log V Experimental	Log V Calculada
5	2.20	1.00	0.70	0.34	0.34
6	3.54	1.00	0.78	0.55	0.56
7	5.56	1.00	0.85	0.75	0.74
8	8.11	1.00	0.90	0.91	0.90
9	11.19	1.00	0.95	1.05	1.04
10	14.10	1.00	1.00	1.15	1.16

CUADRO No.14

Cálculo de velocidad de flujo para concentración 60 % bicarbonato de sodio granular y 40% de ácido cítrico anhidro, así como la constante de flujo K y la constante a

Diámetro de Orificio (mm)	Velocidad de Flujo (gr./seg.)	Coefficiente Correlación R	Log d	Log V Experimental	Log V Calculada
5	2.12	1.00	0.70	0.33	0.32
6	3.40	1.00	0.78	0.53	0.54
7	5.36	1.00	0.85	0.73	0.73
8	7.86	1.00	0.90	0.90	0.88
9	10.81	1.00	0.95	1.03	1.02
10	13.70	1.00	1.00	1.14	1.15

CUADRO No.15

Cálculo de velocidad de flujo para concentración 50 % bicarbonato de sodio granular y 50% de ácido cítrico anhidro, así como la constante de flujo K y la constante a

Diámetro de Orificio (mm)	Velocidad de Flujo (gr./seg.)	Coefficiente Correlación R	Log d	Log V Experimental	Log V Calculada
5	2.04	1.00	0.70	0.31	0.31
6	3.27	1.00	0.78	0.52	0.53
7	5.16	1.00	0.85	0.71	0.71
8	7.60	1.00	0.90	0.88	0.87
9	10.54	1.00	0.95	1.02	1.01
10	13.30	1.00	1.00	1.12	1.14

CUADRO No.16

Cálculo de velocidad de flujo para concentración 40 % bicarbonato de sodio granular y 60% de ácido cítrico anhidro, así como la constante de flujo K y la constante a

Diámetro de Orificio (mm)	Velocidad de Flujo (gr./seg.)	Coficiente Correlación R	Log d	Log V Experimental	Log V Calculada
5	1.96	1.00	0.70	0.29	0.29
6	3.14	1.00	0.78	0.50	0.51
7	4.96	1.00	0.85	0.70	0.70
8	7.35	1.00	0.90	0.87	0.86
9	10.24	1.00	0.95	1.01	1.00
10	12.90	1.00	1.00	1.11	1.13

CUADRO No. 17

Determinación del modelo matemático, a partir de la constante n y la constante a en función de la concentración de bicarbonato de sodio

Concentración gr. Bic. / gr. Mezcla	Constante de flujo n (gr./mm seg.)		Constante a (gr. / seg.)	
	n experimental	n calculada	a experimental	a calculada
0.40	2.78	2.78	0.022	0.022
0.50	2.76	2.76	0.024	0.024
0.60	2.74	2.74	0.026	0.026
0.70	2.73	2.72	0.027	0.028
0.80	2.71	2.70	0.030	0.030
0.90	2.68	2.69	0.032	0.032
1.00	2.67	2.67	0.034	0.034

Resultado de la regresión, Constante n	
Constant	2.8525
Std Err of Y Est	0.00
R Squared	0.99
No. of Observations	7
Degrees of Freedom	5
X Coefficient(s)	-0.1845
Std Err of Coef.	0.01

Resultado de la regresión, Constante a	
Constante	0.0141
Error típico de est Y	0.00
R cuadrado	0.99
Nº de observaciones	7
Grados de libertad	5
Coeficiente(s) X	0.0196
Error típico del coef	0.00

CUADRO No. 18

Evaluación del modelo matemático, para las distintas concentraciones de Bicarbonato de sodio, a través de los distintos diámetros de orificio

Concentración de Bicarbonato	Velocidad de Flujo (gr./seg.) para cada diámetro de orificio (mm)					
	5	6	7	8	9	10
0.40	1.92	3.19	4.89	7.09	9.84	13.18
0.42	1.94	3.22	4.94	7.16	9.93	13.30
0.44	1.97	3.26	4.99	7.23	10.02	13.42
0.46	1.99	3.29	5.04	7.30	10.11	13.54
0.48	2.01	3.33	5.09	7.37	10.20	13.65
0.50	2.03	3.36	5.14	7.43	10.29	13.76
0.52	2.05	3.39	5.19	7.50	10.37	13.87
0.54	2.07	3.42	5.23	7.56	10.45	13.97
0.56	2.09	3.46	5.28	7.62	10.54	14.07
0.58	2.11	3.49	5.32	7.68	10.61	14.17
0.60	2.13	3.52	5.37	7.74	10.69	14.27
0.62	2.15	3.55	5.41	7.80	10.76	14.36
0.64	2.17	3.58	5.45	7.85	10.84	14.46
0.66	2.19	3.60	5.49	7.91	10.91	14.54
0.68	2.21	3.63	5.53	7.96	10.98	14.63
0.70	2.23	3.66	5.57	8.01	11.04	14.71
0.72	2.25	3.69	5.61	8.06	11.11	14.79
0.74	2.26	3.71	5.65	8.11	11.17	14.87
0.76	2.28	3.74	5.68	8.16	11.23	14.95
0.78	2.30	3.77	5.72	8.21	11.29	15.02
0.80	2.32	3.79	5.75	8.25	11.35	15.09
0.82	2.33	3.82	5.79	8.30	11.41	15.16
0.84	2.35	3.84	5.82	8.34	11.46	15.23
0.86	2.36	3.86	5.85	8.39	11.52	15.30
0.88	2.38	3.89	5.88	8.43	11.57	15.36
0.90	2.40	3.91	5.91	8.47	11.62	15.42
0.92	2.41	3.93	5.94	8.51	11.67	15.48
0.94	2.43	3.95	5.97	8.54	11.71	15.53
0.96	2.44	3.97	6.00	8.58	11.76	15.59
0.98	2.45	4.00	6.03	8.62	11.80	15.64
1.00	2.47	4.02	6.06	8.65	11.85	15.69

COPIA DE LA UNIVERSIDAD
 DE QUILIMES
 15/01/2011

REFERENCIAS

1. GUTTMAN, I.; Wilks, S. S.; and Hunter, J. S. "Introductory Engineering Statistics", 3ra. Ed., John Wiley & Sons, s.p.i., 1982.
2. HITOSHI Kume. "Herramientas Estadísticas Básicas Para el Mejoramiento de la Calidad". 3ra. edición, Grupo Editorial Norma, Colombia 1994.
3. KAYE, Brian H. and Rémi Trottier. "The Many Measures of Fine Particles". Chemical Engineering. pp 78-86, s.l.i., s.p.i., abril 1995.
4. LIEBERMAN, Herbert, Leon Lachman, and Joseph Schwartz. "Pharmaceutical Dosage Forms: Tablets". 2da. Ed., Marcel Dekker, Inc., New York, 1990.
5. MARINELLI, J. and Carson, J. W., "Characterize Bulk Solids to Ensure Smooth Flow". Chem. Eng. pp 78-90. s.l.i., s.p.i., abril 1994.
6. PERRY, Robert y Cecil Chilton. "Perry's Chemical Engineers' Handbook". 6a. edición, sección 6-7. Estados Unidos: Mc Graw Hill, 1986.
7. WILLIAMS, J. C. "Principles of Powder Technology". Cap. 4 - 5, 71-118 pp. Mixing and Segregation in Powders. The Storage and Flow of Powders. John Wiley & Sons, United States, 1990.
8. "ATM Sonic Sifter Model L3P, Operating Instructions Manual and Accessory Guide", ATM CORPORATION, Milwaukee, s.p.i., s.f.
9. "Powder Flow Ability Index Test Instrument". HANSON Research Corporation. Operation Manual, Model 21-101-050. Chatsworth, CA., s.p.i., 1992.
10. "The United States Pharmacopeia". USP, 23 edición. Estados Unidos: Rand McNally, 1994.