

78  
Zej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**LA INGENIERIA INDUSTRIAL COMO UNA  
HERRAMIENTA EN EL DISEÑO  
Y OPERACION DE SILOS**

**TESIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO  
ELECTRICISTA  
(AREA INDUSTRIAL)**

**P R E S E N T A :  
MARTHA OLIVIA HUERGO AGUIRRE**

MEXICO, D. F.

**FALLA DE ORIGEN**

1991



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## INDICE

<b>RESUMEN</b> . . . . .	1
<b>PRIMERA PARTE</b>	
<b>1.1 INTRODUCCION</b> . . . . .	2
Problemas en el manejo, almacenamiento y conservación de los granos y semillas . . . . .	3
El grano y sus propiedades . . . . .	6
Pérdidas . . . . .	8
Desperdicios . . . . .	8
Antecedentes de silos . . . . .	9
Clasificación de silos . . . . .	10
Red nacional de silos . . . . .	11
Agricultura en México . . . . .	13
Normas para el almacenamiento de granos . . . . .	16
<b>1.2 DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN MODELO DE SILO</b> . . . . .	20
Consideraciones . . . . .	21
Operación del silo . . . . .	22
<b>1.3 DATOS EXPERIMENTALES</b> . . . . .	27
Calibración del equipo . . . . .	28
Obtención de datos . . . . .	29
Comparación con un silo vertical . . . . .	33
<b>1.4 RESULTADOS</b> . . . . .	35
Comparación con un silo vertical . . . . .	49
<b>1.5 CONCLUSIONES</b> . . . . .	55
<b>SEGUNDA PARTE</b>	
<b>2.1 INTRODUCCION</b> . . . . .	56
Lenguajes de simulación . . . . .	61
Lenguaje GPSS . . . . .	62
<b>2.2 IDENTIFICACION DEL SISTEMA</b> . . . . .	65
<b>2.3 ANALISIS DEL SISTEMA</b> . . . . .	70
Simulación con GPSS . . . . .	72
<b>2.4 RESULTADOS</b> . . . . .	74
<b>2.5 CONCLUSIONES</b> . . . . .	80
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b> . . . . .	81
<b>ANEXO</b> . . . . .	82
Publicaciones . . . . .	82
Reportes . . . . .	83

**PRIMERA PARTE**

Se realiza un estudio reológico experimental de un nuevo diseño de silo de forma hexagonal. Esta forma elimina esfuerzos dinámicos secundarios, mismos que aparecen en los silos convencionales y que son responsables de fracturas en las paredes. El flujo obtenido es homogéneo y de baja fricción, con lo que se logra una distribución de esfuerzos predecible durante las operaciones de llenado y vaciado. El grano adopta su ángulo natural de reposo, reduciendo los esfuerzos y pérdidas por fricción, compactación y pulverización.

**SEGUNDA PARTE**

Se analiza el sistema silo. Se pueden presentar las mismas condiciones de congestión y tiempo de permanencia en el sistema que en un silo cilíndrico; sin embargo, éste diseño ofrece mayor facilidad en el manejo de materiales, capacidad y versatilidad de servicio. Es posible la optimización del sistema, recabando información precisa de un silo hexagonal piloto (no del modelo), y desarrollando el diseño del sistema.

## 1.1 INTRODUCCION

Los granos y sus productos, constituyen una fuente de nutrición para el hombre y para muchos otros organismos, y su disponibilidad en un momento dado significa la satisfacción de una necesidad primaria.

La irregularidad del rendimiento de las cosechas y de su distribución en el mundo, ha provocado un consumo desigual de cereales y, en consecuencia, ciertas alteraciones en su precio. Por ello ha sido preciso diseñar y construir estaciones de almacenaje que permitan asegurar un consumo más uniforme de los productos y mayor regularidad en su cotización.

En la actualidad tiende a generalizarse este almacenaje que se efectúa preferentemente en silos, suprimiendo el costoso empleo de sacos y reduciendo los costos de mano de obra.

Las estructuras de almacenamiento, se destinan a almacenar y conservar toda clase de productos y materiales que el hombre explota o produce, entendiéndose que la forma y dimensión de éstos es muy variada, dependiendo básicamente del uso a que se destine la estructura.

Aunque en muchos lugares existen almacenes y lugares donde el manejo de granos se realiza con toda propiedad, en general puede afirmarse que muchos granos y semillas no se almacenan en bodegas apropiadas. El secado y la limpieza de los granos o semillas se practica en muy baja escala y no se tienen normas de clasificación para la mayoría de ellos.

Hasta ahora, no existen en México (ni en muchos países del mundo) cifras estadísticas confiables que indiquen la cuantía de pérdidas anuales en lo que se refiere a granos almacenados. Sin embargo, se puede aceptar que se tienen pérdidas globales, debidos a diversos factores, de volúmenes que van desde un 5 hasta un 30% de la producción total de maíz, frijol y trigo.

En casi todas las regiones del país, las condiciones ecológicas propician la reproducción de plagas de insectos, hongos, roedores y pájaros. Las pérdidas por éstas causas se acentúan en áreas bajas, cálidas y húmedas del país, donde además, el manejo y almacenamiento de los granos es más problemático.

## **Problemas en el manejo, almacenamiento y conservación de los granos y semillas**

Todos los esfuerzos realizados por el hombre para incrementar la producción de granos alimenticios, pierden virtualmente su valor si no se dispone de sistemas apropiados para conservarlos durante la época crítica de almacenamiento.

El incremento de la producción y, sobre todo, el de la población, plantean un problema bastante serio, por un lado los volúmenes de semillas y granos que deben almacenarse y conservarse van en aumento; por otro lado, estos productos demandan un manejo adecuado para conservar la calidad y el valor económico, agrícola e industrial hasta el momento de ser consumidos por la población en constante aumento, o por la demanda de semillas mejoradas de alta calidad y rendimiento.

Los principales factores, en orden de importancia, que determinan y acentúan las pérdidas de los granos que se almacenan en la mayoría de las áreas del mundo, son las siguientes:

1. Carencia de almacenes adecuados para el manejo y facilidad de mantenimiento
2. Alto contenido de humedad e impurezas del grano en el momento de almacenarlo
3. Presencia de plagas
4. Manejo deficiente de granos y semillas
5. Desconocimiento de los principios de conservación de granos

A continuación se analiza brevemente cada factor:

### **1. Carencia de almacenes adecuados**

El almacén es el lugar que determina, en gran parte, con qué seguridad se conservarán los granos y productos allí depositados. Este tipo de construcción, su localización y funcionamiento, deben ser planeados específicamente para éste servicio, atendiendo a las necesidades regionales o nacionales con respecto a volumen e importancia de acuerdo con las condiciones climáticas del área en que se construyan.

La función primordial de un almacén, es la de proporcionar a los granos y a sus productos toda la protección posible contra los factores adversos del medio ambiente para garantizar su conservación adecuada a corto o largo plazo.

Para satisfacer estas necesidades, el manejo de los granos y sus productos deben ser óptimos, para ello cuando así se requiera, debe contarse con el equipo indispensable para el movimiento del grano, su limpieza, la clasificación y el secado, además del equipo adecuado para el combate de plagas.

Aquellos almacenes o bodegas que no reúnan cuando menos los requisitos mencionados, seguramente no podrán proporcionar a las semillas, a los granos y a sus productos, las condiciones mínimas necesarias para su adecuada conservación.

## 2. Alto contenido de humedad e impurezas del grano en el momento de almacenarlo

El origen de la humedad de los granos y semillas es muy variado en lo que respecta a su alto contenido de humedad en el momento de almacenarlos, este factor constituye uno de los de mayor influencia en la conservación de estos materiales durante su almacenamiento; cuando el grano es almacenado con exceso de humedad, automáticamente se predispone a un calentamiento excesivo o espontáneo, debido a su alto rango respiratorio y simultánea o subsecuentemente, a la descomposición y pérdida de éste grano por el ataque de hongos, bacterias e insectos. Entre más seco se encuentre el grano almacenado, y más baja sea la temperatura en el almacén, la conservación de éste es mucho mejor.

La humedad inicial de seguridad de almacenamiento, es muy variable y depende principalmente de factores como el tipo de grano, el área ecológica en que se opere, las condiciones del almacén disponible y el tiempo de almacenamiento.

La presencia de grano roto almacenado, o de impurezas en el mismo, es un factor negativo para que la semilla se almacene con propiedad y, sobre todo, se conserve en buenas condiciones por un tiempo determinado, bajo cualquier condición ecológica prevalente.

Los granos rotos y las impurezas que se encuentren presentes en aquellos volúmenes de granos que se van a almacenar, representan, aparte de la contaminación en sí, una amenaza para la buena conservación de estos productos, ya que volúmenes de grano en estas condiciones son muy favorables para el desarrollo de insectos y microorganismos que perjudican y demeritan la calidad de los granos y de las semillas.

Asimismo está comprobado, que el grano roto y dañado respira mucho más rápidamente que los granos completos o enteros bajo las mismas condiciones ambientales. Por otro lado, los granos dañados tienen mayores superficies de acceso para los hongos y bacterias y son una fuente de nutrientes mucho más accesible para los insectos.

Para considerar que el grano está en buenas condiciones de almacenamiento, se admite un máximo permisible del 5% de impurezas.



### 3. Presencia de plagas

Son cuatro los tipos de plagas que, individualmente o en conjunto, pueden causar pérdidas, en muchos casos considerables, a los granos tanto en el campo como en el almacén. Estas plagas son: insectos; microorganismos (hongos y bacterias); roedores (ratas y ratones) y los pájaros, en el campo antes de la cosecha, aunque también pueden ocasionar daño en almacenes donde tienen libre acceso.

**Insectos:** existen en México más de 25 especies de insectos de importancia económica que atacan a los granos almacenados y a sus productos.

Los insectos causan dos tipos de daños a los granos y a las semillas en el almacén. Un daño consiste en la destrucción y en el consumo del grano por los adultos y los estados larvarios de los insectos, con fines alimenticios y de oviposición, además de la contaminación que ocasionan sus excrementos y cuerpos muertos. El otro daño es el deterioro producido por la condición anormal del grano mismo y por el metabolismo de los insectos que los infestan. Ambos tipos de daños demeritan considerablemente la calidad alimenticia, el valor económico y el poder germinativo de los granos y semillas.

**Microorganismos:** los granos o semillas tienen, en el momento de almacenarse cantidades variables de esporas de hongos y otros microorganismos que adquieren naturalmente en el campo donde se cosecharon.

El desarrollo de los hongos contribuye al calentamiento y descomposición de los granos debido al metabolismo de los microorganismos. Las enzimas producidas por los hongos atacan a los carbohidratos, a las grasas y a las proteínas del grano o semilla y deterioran su calidad. La acidez de los granos, en éstas condiciones, se incrementa y la aptitud para germinar decrece lenta o rápidamente hasta desaparecer.

El grupo de hongos que daña a los granos almacenados pertenece a las formas más simples. Su tamaño es microscópico, pero debido a las grandes colonias que forman es posible observarlos a simple vista.

Los hongos más comunes que se encuentran atacando al grano son los mohos. Los hongos crecen y se reproducen cuando los factores ambientales les son favorables. Entre los factores que tienen mayor influencia sobre la actividad de los hongos, se encuentran la temperatura y la humedad.

**Roedores:** Las ratas y los ratones representan un problema muy serio en el proceso de manejo y conservación de granos y productos alimenticios y se agudiza más en los casos de almacenes sin protección contra estas plagas, o en los casos en que, por causas de emergencia, se tiene que almacenar el grano en el campo o en

lugares no adaptados para ello, causando pérdidas cuantiosas. Las ratas y los ratones destruyen productos en cantidades diez veces mayores que lo que realmente pueden consumir como alimento, y producen dos tipos de daño, el consumo por alimentación directa y la contaminación de granos; lo que coloca a ésta plaga en un nivel de gran importancia económica.

#### 4. Manejo deficiente y desconocimiento de los principios de conservación de granos

El manejo deficiente y el desconocimiento de los problemas involucrados en el proceso de la conservación y almacenamiento de granos, contribuyen a las pérdidas generales que sistemáticamente se registran. Por lo general se acepta que un grano almacenado esté seguro del deterioro por diversos agentes una vez que se encuentra en la bodega, descuidando así pequeños detalles, aún más importantes, como la limpieza, la selección y el muestreo de los granos.

Por lo anterior se hace necesaria la ayuda técnica planeada y la debida divulgación sobre los problemas y las soluciones que deben aplicarse al manejo y cuidado de los granos y semillas almacenados.

Los programas bien planeados y ejecutados a través del servicio de extensión, con literatura comprensiva, atractiva y sobre todo, ilustrativa del problema, y complementada con demostraciones periódicas, serían un buen enfoque para la solución al problema y darían resultados muy satisfactorios entre los interesados, y lo más valioso sería que contribuirían al conocimiento, comprensión y efectividad en el manejo y conservación de granos, semillas y productos alimenticios en escalas local y nacional.

#### *El grano y sus propiedades*

Los granos son frutos de plantas destinadas a la alimentación o a la industrialización, son también partes constitutivas de organismos vivientes que respiran y utilizan el oxígeno del aire, producen bióxido de carbono, agua y energía que se traduce en calor.

Son órganos cuyas actividades vitales están muy reducidas lo que les permite permanecer en reposo aparente, y presentar cierta resistencia a la descomposición por microorganismos, permitiendo que se les almacene en grandes volúmenes, por tiempos variables sin deterioro o descomposición, siempre que las condiciones ambientales sean favorables para su conservación.

El grano una vez recolectado, continúa vivo, respira absorbiendo oxígeno y expeliendo gas carbónico procedente de sus glucosas y otras materias nutritivas que es preciso conservar para la alimentación humana.

En condiciones normales de almacenaje (humedad media de 14 a 15% en peso, y temperatura menor a los 20 °C), un quintal de trigo, aproximadamente 46 kg, respira muy poco y expela menos de 150 mg de bióxido de carbono al día, pero en presencia de oxígeno, si la humedad aumenta en un 4 o 5%, el desprendimiento de gas puede hacerse cien veces más elevado.

Por el contrario, la presencia de gas carbónico disminuye la respiración del grano cuando el porcentaje alcanza el 7%, y puede incluso detenerla si alcanza el 12%.

La respiración produce calor y humedad, acarreado la destrucción rápida de las glucosas y otros elementos nutritivos del grano.

Asimismo, mientras el grano está almacenado, el agua de cada semilla tiende a liberarse lentamente, propagándose desde el interior hacia la capa envolvente y de ésta al aire que le rodea.

Esta agua escapa difícilmente de la atmósfera inmóvil, se acumula entre los granos y cuando el grado higrométrico alcanza el de saturación, comienza la condensación seguida de fermentaciones y de la elevación de la temperatura, que acelera aún más, el proceso de liberación del agua del grano.

Otro problema es la producción de mohos, levaduras y bacterias; los mohos son hongos microscópicos que aparecen en la superficie de los granos y se desarrollan en presencia del aire expeliendo gas carbónico, pero en ausencia del aire, el gas carbónico dificulta y por último detiene el desarrollo de los mohos; las levaduras son hongos aún más pequeños que los mohos, se desarrollan en medios ligeramente ácidos y obtienen del grano la energía que precisan para vivir, provocando fermentaciones; en tanto que las bacterias son elementos microbianos aún más pequeños que las levaduras, se desarrollan entre 20 y 40 °C y su reproducción es favorecida por el aumento de la humedad del medio.

Los mohos, levaduras y bacterias tienen necesidad de humedad para desarrollarse y en ciertos casos de aire y calor.

Los factores químicos, como el oxígeno y el bióxido de carbono influyen poderosamente sobre la condición de los granos y semillas almacenados. Esta influencia está relacionada con la porosidad individual, volumen de los granos, así como también con su respiración y aereación. La influencia que los factores bióticos, como los insectos y los microorganismos, tienen sobre los volúmenes de granos almacenados, es de mucha importancia. La presencia de poblaciones de dichos organismos causa perjuicios considerables a

los granos y a sus productos almacenados, originando su demérito y hasta la pérdida total, desde el punto de vista agrícola, económico, industrial y nutritivo.

Las medidas que se pueden tomar para evitar la aceleración de la descomposición orgánica del grano es: detener su respiración manteniéndolo en una atmósfera que contenga del 7 al 12% de bióxido de carbono; para combatir la humedad, es necesario renovar el aire, ventilando el grano por soplado, dirigiendo una corriente de aire a través de su masa; contra el desarrollo de microorganismos, basta con secar el grano y mantenerlo en un medio seco.

### **Pérdidas**

Cuando una cosecha se ensila, ciertas pérdidas en su valor nutritivo son inevitables, no importa lo buena que pueda ser la preservación. Estas pérdidas caen en tres categorías:

- a) desperdicios debidos a la carbonización o al desarrollo de mohos
- b) pérdida de los constituyentes en los efluentes del silo
- c) conversión de los compuestos de carbono en anhídrido carbónico y agua, durante la respiración y fermentación

Es sumamente difícil efectuar mediciones precisas de las pérdidas totales que experimenta una cosecha a consecuencia del proceso de ensilaje. La comparación de la composición química del cultivo original y la del cultivo ensilado no ayuda mucho, porque la totalidad de constituyentes de la cosecha experimenta algunos cambios, responsables de ciertas pérdidas de cada uno de ellos.

### **Desperdicios**

El monto de los desperdicios no debe ser cuantioso si el silo se carga cuidadosamente, sobre todo a los lados, y la parte superior queda correctamente sellada.

## **Antecedentes de silos**

El proceso de la conservación de productos naturales, tales como cereales, es un problema muy antiguo al que se le dieron soluciones muy elementales con el fin de protegerlo de agentes naturales tales como la lluvia, el calor y el viento. Esto se logró con el uso de la fosa, impidiendo que los productos sufrieran ataques en la misma forma que si se hallaran en el suelo.

La fosa como lugar destinado a contener el ensilado, fue utilizado en Europa hacia 1850, y su uso fue extendiéndose durante el último cuarto del siglo XIX; posteriormente, la necesidad de contar con almacenes más funcionales, ha creado una amplia gama de instalaciones de todo tipo.

La necesidad de contar con estructuras almacenadoras de productos naturales o elaborados, estriba en el control del consumo y la producción, así como proteger a éstos productos de agentes externos.

Este tipo de estructuras, específicamente silos, deben proteger al producto de temperaturas desfavorables, excesiva humedad, presencia y desarrollo de microorganismos, insectos, roedores, erosión y contaminación con el medio ambiente.

También cumplen con una razón social, como es la de regular y estabilizar el mercado, la ley de la oferta y la demanda de éstos productos.

Los silos confinan materiales fluidos, semi-fluidos y sólidos granulares, como por ejemplo trigo, maíz, frijol, cebada, arroz, arena, cemento, carbón, coque, yeso, pólvora, productos químicos, y otros.

Actualmente, los silos son considerados como equipo industrial indispensables en factorías de cualquier tipo.

En el aspecto agrícola, se tienen factores de carácter físico, químico, biológico y económico que hacen que el almacenamiento sea más problemático.

El almacenamiento a granel de cosechas de cereales, tales como: trigo, sorgo, cebada, frijol, soya, etc, requiere de maquinaria y equipo que facilite el manejo, acondicionamiento y disponibilidad del grano.

Los principales peligros a los que se enfrenta el almacenamiento de semillas son los roedores, pájaros, parásitos y alteraciones que sufren los granos cuando su propia vida está sobreactivada y cuando el desarrollo de elementos perjudiciales, como mohos, levaduras y bacterias, se facilita y a veces se acelera.

## **Clasificación de silos**

Los silos se clasifican dentro de éstas dos categorías:

1. Silos agrícolas: destinados al almacenamiento de granos, y se sub-clasifican en

- 1.1 Silos de granjas o ranchos

Actualmente, muchas granjas cuentan con pequeños silos para almacenar los granos y semillas que producen; éstos silos cuentan con equipos para su operación y mantenimiento muy caros.

Pueden ser de varios tipos:

Silo externo: consta de uno o varios elementos, de 100 a 500 quintales de capacidad, cada uno con su propio techo, usualmente se ubican en el granero o almacén, y se construyen de concreto reforzado o de hojas de acero.

Silo interno: se arman en el interior de los almacenes, tienen una capacidad de 150 a 500 quintales, se construyen de madera o de hojas de acero.

Estos silos se construyen a base de unidades prefabricadas, por lo que son muy fáciles para ensamblar o desmantelar.

- 1.2 Silos de cooperativas

Su capacidad varía desde 10,000 hasta 100,000 quintales, se construyen a base de concreto reforzado o de hojas de acero sólido, el material dependerá de las semillas o granos a almacenar; algunas semillas que no necesitan de un cuidado mayor, se almacenan en silos de concreto reforzado y se le acondiciona equipo para ventilación del mismo. Los silos contruidos con placas de acero, necesitan de un mantenimiento externo mayor que los de concreto, y son utilizados cuando se requiere mantener la masa ensilada en una atmósfera confinada.

Algunos usuarios prefieren almacenar los cereales en silos de madera.

### 1.3 Silos portuarios

Su capacidad varía de 50,000 a 500,000 quintales, se construyen de concreto reforzado, pocas veces de hojas de acero debido a la agresión del ambiente marino, donde se requiere de un mayor mantenimiento para las mismas.

Las celdas o elementos de estos silos son de una capacidad de 4,000 a 10,000 quintales cada una, con la finalidad de guardar diversas semillas ya sean de importación o de exportación.

2. Silos industriales: destinados a almacenar materiales como coque, carbón, fosfatos, cemento, azúcar, etc.

Se construyen de concreto reforzado y de acero. Son construcciones muy sólidas, porque suponen los esfuerzos y presiones que pueden darse durante el llenado y el vaciado del mismo.

### *Red nacional de silos*

Actualmente se cuenta con una red nacional de silos, creada por Almacenes Nacionales de Depósito S.A., ésta red tiene 956 silos, con una capacidad de almacenamiento de 6'391,068 ton.

La distribución está hecha en base a gerencias regionales, clasificando a los silos en dos tipos: bodegas (techos) o patios; siendo de la siguiente forma

Gerencia	Estados	Bodega	Patio
Occidente	Nayarit Jalisco Michoacán Colima	83	17
Norte Centro	Durango Coahuila Chihuahua Zacatecas	66	15
Noreste	Tamaulipas Nuevo León	70	20

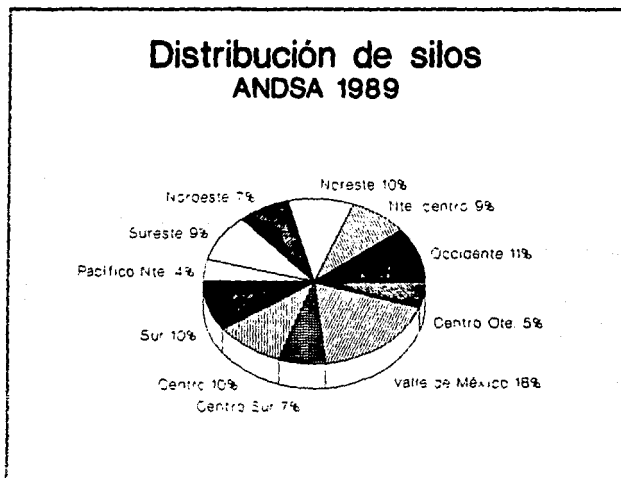
Noroeste	B. Calif. Nte. Sonora	49	21
Sureste	Yucatán Quintana Roo Chiapas Campeche	50	37
Centro	Tlaxcala Guanajuato Querétaro Hidalgo	60	35
Sur	Puebla Veracruz Tabasco Oaxaca Aguascalientes	64	27
Centro Norte	San Luis Potosí Tampico	36	10
Centro Sur	Estado de México Morelos Guerrero	42	22
Pacífico Nte.	Sinaloa B. Calif. Sur	40	10
Valle de México	D.F.	119	53
TOTAL		689	267

La capacidad total de los silos es de

	bodega	patio
ton	4'528,339	1'862,729
m <sup>2</sup>	1'235,056	730,724



Gráficamente se tiene la siguiente distribución por gerencia regional



#### **Agricultura en México**

Los granos básicos para la alimentación del pueblo mexicano son: maíz, frijol, trigo y arroz. Su industrialización está adquiriendo cada vez mayor importancia en México.

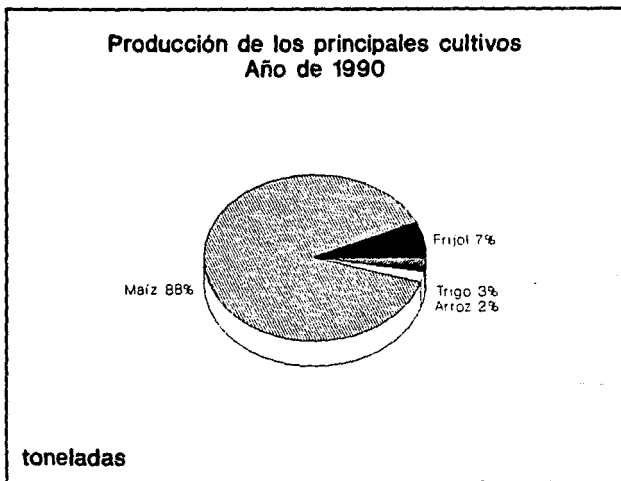
El maíz, sin duda alguna, es el grano que ocupa el primer lugar en cultivo y consumo en México, cubre una superficie de casi 7 millones de hectáreas, en la cual se obtiene una cosecha anual poco mayor de 12.5 toneladas.

De los cuatro granos básicos alimenticios mencionados, México produce arroz en cantidades suficientes para satisfacer sus necesidades y en cuanto a los granos restantes, es necesario importar un promedio del 32% del total de consumo para satisfacer la demanda, es decir, tendríamos que duplicar la producción de esos granos para ser un país autosuficiente en ese renglón de la economía.

La siguiente tabla presenta la producción de los granos básicos, con respecto a la superficie cosechada en hectáreas y a la producción en toneladas, durante el año de 1990

Tipo de grano	Precio (\$/ton)	Cosechado (hectáreas)	Producido (toneladas)	Rend. (ton/ha)
maíz	640 000	6 634 766	12 651 364	1.91
frijol	1650 000	1 846 616	961 810	0.52
trigo	550 000	192 914	390 837	2.03
arroz	550 000	84 209	321 698	3.82

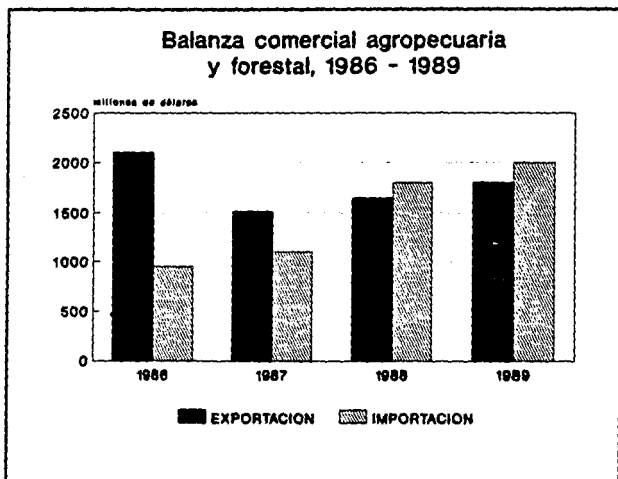
Gráficamente, la producción en toneladas es



En lo que respecta a las importaciones y exportaciones realizadas en 1990

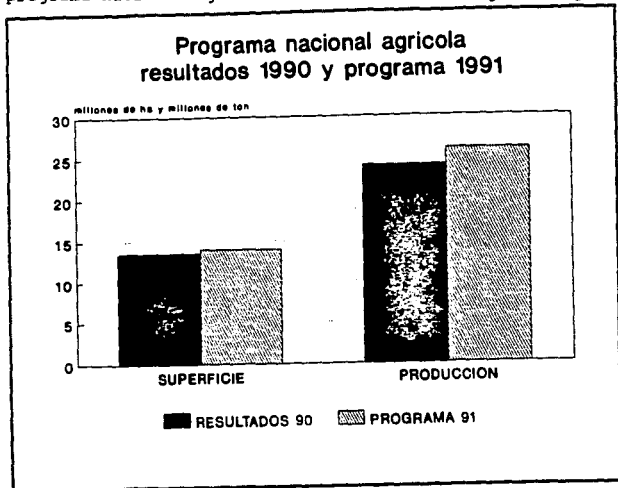
Tipo de grano	Exportación		Importación	
	ton.	USD/ton	ton.	USD/ton
maíz	753	143.4	4 102 443	106.1
frijol	80	1075.0	330 181	766.4
trigo	2 297	143.2	338 699	136.7

Siendo la balanza comercial agropecuaria la siguiente



Entonces, considerando los volúmenes que se producen y se importan, es necesario contar con almacenes adecuados para guardarlos después de la cosecha y tan pronto como se reciban en puerto.

El programa nacional agrícola se muestra en la siguiente gráfica.



#### **Normas para el almacenamiento de granos**

La condición y calidad de los granos y semillas, en el momento de su utilización final, es un motivo de controversia en lo referente a su clasificación para designarles un valor monetario por unidad de peso o de volúmen. De allí ha surgido la necesidad de crear normas convencionales para cada tipo de grano, de acuerdo con su calidad.

Las normas para granos son especificaciones establecidas por los gobiernos o por las empresas que los manejan, con el propósito de fijar un medio para determinar la calidad de cualquier grano en forma útil y simple, y usarla como estándar en sus operaciones mercantiles. Estas normas son diferentes para cada tipo de grano y aún variables, de acuerdo con las condiciones del grano producido en años determinados, es decir, pueden tener cierta flexibilidad para poderse adaptar a las condiciones de la cosecha obtenida anualmente en cierta región o país.

Para las operaciones comerciales, la calidad de un grano debe establecerse por la inspección minuciosa de ese grano, analizando muestras obtenidas por personas entrenadas, que puedan aplicar un

criterio razonable en la determinación de la calidad. Para juzgar la calidad de un grano, las muestras son sometidas a pruebas para determinar su peso, contenido de humedad, contenido de material extraño, contenido de otros tipos de grano, poder germinativo, grano dañado por insectos, hongos o calentamiento. Estos se expresan en porcentajes en relación con la cantidad total de grano almacenado. El olor y sabor de los granos es también tomado en cuenta.

Las siguientes tablas son una sugerencia para normas de calidad del maíz, frijol y trigo, tomando en cuenta las condiciones de nuestro país y el manejo de éstos granos.

NORMAS DE CALIDAD SUGERIDAS PARA MAIZ

Clasif.	% de humedad	Infestación de insectos	Grano dañado	Grano quebrado y basuras	TOTAL
1a	12-14	ninguna	2%	1%	3%
2a	14-18	ligera	3	3	6
3a	18-24	regular	4	5	9
Indus.	más de 24	fuerte	más de 4	más de 5	más de 9

NORMAS DE CALIDAD SUGERIDAS PARA FRIJOL

Clasif.	% de humedad	Infestación de insectos	Grano dañado	Grano quebrado y basuras	TOTAL
1a	13-14	ninguna	2%	1%	3%
2a	14-18	ligera	3	3	6
3a	18-25	regular	4	5	9
Indus.	más de 25	fuerte	más de 4	más de 5	más de 9

NORMAS DE CALIDAD SUGERIDAS PARA TRIGO

Clasif.	% de humedad	Infestación de insectos	Grano dañado	Grano quebrado y basuras	TOTAL
1a	13-14	ninguna	2%	1%	3%
2a	14-18	ligera	3	3	6
3a	18-25	regular	4	5	9
Indus.	más de 25	fuerte	más de 4	más de 5	más de 9

Se considera infestación ligera por insectos cuando el máximo de insectos de cualquier especie es de dos por kilogramo; infestación regular si hay hasta cuatro insectos por kilogramo; infestación fuerte o severa, si el número de insectos de cualquier especie sobrepasa de cuatro por kilogramo de grano muestreado.

Cuando se tienen establecidas normas de calidad, el agricultor y el comerciante en granos se ven obligados por las circunstancias a mantener un adecuado manejo y conservación de su grano antes de venderlo; asimismo se verán interesados automáticamente en lo referente a buen almacenamiento, manejo y conservación, dando por resultado que la calidad del grano disponible en el mercado sea muy superior al que se tenga sin normas. Por otro lado, las entidades oficiales y privadas que manejen grandes volúmenes de granos, tenderán a mejorar el manejo, vigilancia y conservación del grano almacenado para conservar e incrementar su calidad durante el periodo de almacenamiento. El precio más alto fijado para grano de mejor calidad en cada tipo, constituye un estímulo de superación por producir, comprar y vender el mejor producto.

Cualquiera que sea la causa y el monto de las pérdidas que sufren los granos y sus productos almacenados, recaen principalmente sobre el agricultor.

La necesidad imperiosa y cada día mayor de disponer de alimentos de calidad para el consumo humano de una población en constante incremento, obliga al hombre a buscar medios idóneos para conservar sus granos y semillas con el mínimo de pérdida para un mayor tiempo de almacenamiento.

Sólo el interés de disponer de productos de mejor calidad en todos los aspectos, lleva a la obtención de datos prácticos y experimentales que permitan conocer con certidumbre los montos, causas más severas y la forma de reducir las pérdidas que se presentan actualmente en lo que se refiere al almacenamiento de granos.

Esta información básica para la resolución del problema de almacenamiento y conservación de granos, disminuirá las grandes mermas, incrementará la disponibilidad de mejores alimentos y mejorará la economía de la población, principalmente rural, del país.

Asimismo, el problema de la conservación de los granos y de las semillas en México, reviste una mayor importancia, cuando se analiza desde el punto de vista mecánico, debido a la carencia de buenos almacenes. De allí la necesidad de estudiar y diseñar una nueva forma para un silo, que en términos de diseño, operación, mantenimiento y costo sean mejores, y por mucho, que los ya existentes.

**Bibliografía**  
**Capítulo 1.1**

**ALMACENAMIENTO Y CONSERVACION DE GRANOS Y SEMILLAS**

**RAMIREZ, Genel**  
México 1966. Edit. CECSA  
p.p. 13 - 100, 275 - 289

**BOLETIN MENSUAL DE INFORMACION BASICA DEL SECTOR  
AGROPECUARIO Y FORESTAL**

Avance al mes de febrero de 1991  
México, abril de 1991. SARH

**CUADERNO DE INFORMACION OPORTUNA REGIONAL # 25**

Tercer trimestre de 1990  
México, abril de 1991. INEGI

**EL ENSILAJE**

**WATSON, Stephen J.**  
México 1963. Edit. CECSA  
p.p. 22 - 49

**PROBLEMAS GENERALES QUE AFECTAN LA EXPLOTACION DE  
SILOS DE ANDSA**

**LEMUS, Raúl Sánchez.**  
México 1971. Tesis IPN  
p.p. 2 - 12

**SILOS, THEORY AND PRACTICE**

**REIMBERT, André M.**  
Germany 1976. Trans Tech Publications  
p.p. 147 - 148

**SISTEMA EJECUTIVO DE DATOS BASICOS**

Avance al mes de febrero de 1991  
México, marzo de 1991. SARH

## 1.2 DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN MODELO DE SILO

México es un país fundamentalmente importador de granos alimenticios, la infraestructura existente en lo que se refiere a el almacenamiento y el servicio de distribución de dichos granos es insuficiente para las necesidades básicas del país; se tiene una necesidad imperiosa de construir un gran número de silos de alta capacidad de almacenamiento y rapidez de distribución, dichos silos se localizarían en puntos y puertos de importancia.

Actualmente los silos más utilizados son del tipo vertical (figura 1.2.1), sin embargo, éstos presentan enormes desventajas operativas, entre ellas:

- enormes pérdidas por pulverización, particularmente en la parte inferior del silo
- dificultades en el manejo del grano, tanto en el llenado como en el vaciado
- descarga deficiente, ya sea subterránea con acceso muy limitado, o bien descarga lateral con la aparición de esfuerzos adicionales los cuales, en la mayoría de los casos, ocasionan ruptura y daños irreparables a las paredes laterales y a la tobera de descarga
- costo de construcción, operativo y de mantenimiento muy elevado
- tecnología utilizada importada

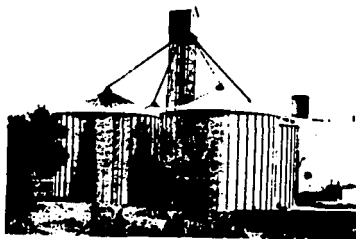


FIGURA 1.2.1



Con base en lo anterior, se ha diseñado un nuevo tipo de silo de gran capacidad (figura 1.2.2). La forma de éste silo es hexagonal y puede constar de una o varias celdas de idéntica forma alineadas horizontalmente. La estructura se encuentra soportada a varios metros sobre el nivel de suelo, permitiendo el paso de vehículos por la parte inferior para una descarga eficaz.

Para el diseño de éste silo se tomaron en cuenta las consideraciones que a continuación se describen.

### **Consideraciones**

Para el equilibrio de una masa ensilada, el factor tiempo, velocidad de llenado, forma del grano, forma de acomodo del grano, altura de caída de éste durante el llenado y compresibilidad de la materia, tienen gran importancia, pues influyen sobre las características principales del medio, como son su densidad aparente, la fricción interna entre granos, la fricción entre granos y paredes del silo y el ángulo natural de reposo, todo ésto bajo diversas condiciones de humedad relativa.

Asimismo, se deben tener muy presentes los esfuerzos principales en el silo, como son los producidos durante el proceso de vaciado (sobre-esfuerzos).

El llenado y vaciado de un silo produce esfuerzos sobre las paredes de diferentes magnitudes. La considerable diferencia entre ambos, siendo el del vaciado mucho mayor que el de llenado, es la causa de numerosos accidentes. Estos esfuerzos son difíciles de predecir y calcular. Cuando un silo está lleno, basta con una abertura extremadamente pequeña de la boca de vaciado, que produzca la salida de una cantidad insignificante de grano para producir inmediatamente, en la casi totalidad de la masa ensilada, un movimiento descendente que rompe su equilibrio y provoca un aumento importante de los empujes sobre las paredes.

Otra consideración importante es que el silo, al ser vaciado, debe proporcionar una mezcla homogénea del material, con un flujo uniforme y suave, y la posible eliminación de sobre-esfuerzos en el mismo.

Este nuevo tipo de silo, por su forma evitará casi en su totalidad las pérdidas por pulverización del material, ya que el material a ensilar se desliza sobre los canales de distribución y cae suavemente sobre las placas transversales.

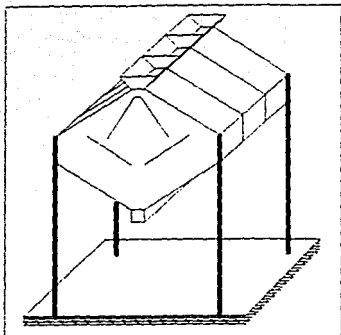


FIGURA 1.2.2

Al estar distribuida la carga sobre varias placas, los esfuerzos de vaciado, disminuirán considerablemente, por lo que se excluyen accidentes de fractura en las paredes del silo.

El silo se construirá unos metros sobre el nivel de piso, por lo que el manejo del grano se facilitará, tanto para introducirlo al silo, como para extraerlo de él

El ángulo con respecto a la horizontal de las paredes y de las placas transversales, se eligió mayor que el ángulo promedio de reposo de los granos y semillas a ensilar, consideración que provocará un vaciado suave y homogéneo.

La construcción de éste silo utilizará materiales y tecnología cien por ciento nacional, lo mismo que la operación y mantenimiento del mismo, lo que disminuye grandemente los costos.

### *Operación del silo*

La operación del silo hexagonal se muestra en la figura 1.2.3, y es la siguiente:

El material se alimenta por la parte superior del silo, mediante un sistema de alimentación por banda, y es distribuido por medio de dos canales simétricos a  $45^{\circ}$  con respecto a la horizontal.

Durante el llenado, el material adopta su ángulo natural de reposo, eliminando la compactación y pulverización del mismo.

La primera sección en llenarse, es la situada en la parte inferior del silo, formando una sección transversal cónica.

En seguida se llena la sección superior, comprendida entre las placas transversales, mismas que son paralelas a las paredes inferiores del silo,  $36^{\circ}$  con respecto a la horizontal, y empieza a desbordarse para finalizar el llenado de la parte inferior del silo.

El material continúa fluyendo hasta completar el llenado del silo.

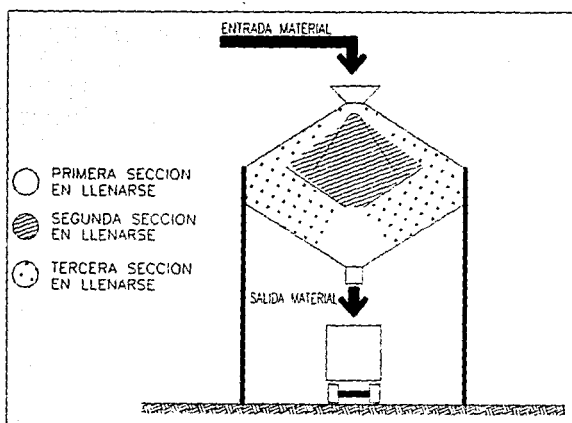


FIGURA 1.2.3

El proceso de vaciado del silo, dependerá del tipo de material almacenado, es decir, de la forma geométrica del grano, del ángulo natural de reposo, de la fricción de las paredes y del acomodo geométrico durante el llenado. Por lo que se pueden presentar tres tipos de vaciado, siendo que:

1. El material de la parte superior descargue verticalmente hasta vaciar la sección superior del silo. Posteriormente, la sección inferior fluya paralelamente a las paredes inferiores del silo. (Figura 1.2.4)

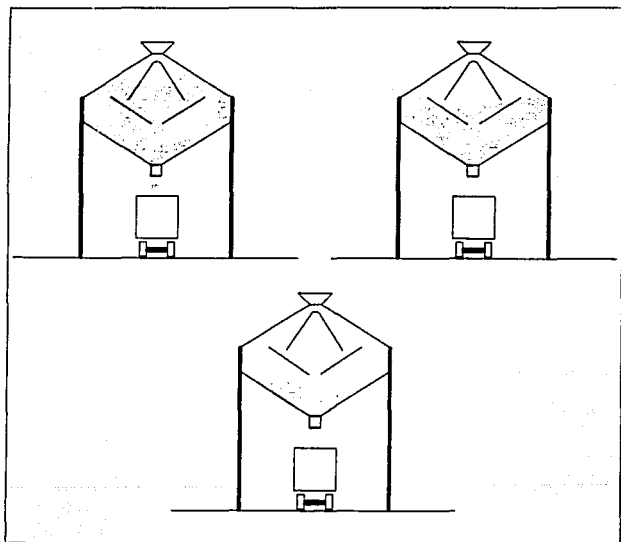


FIGURA 1.2.4

2. La sección superior del silo permanezca estacionaria y la descarga se efectúe únicamente en la sección inferior hasta que ésta última llegue a un equilibrio horizontal. Una vez establecido éste equilibrio, la sección superior y la inferior, respectivamente, descarguen por completo. (Figura 1.2.5)

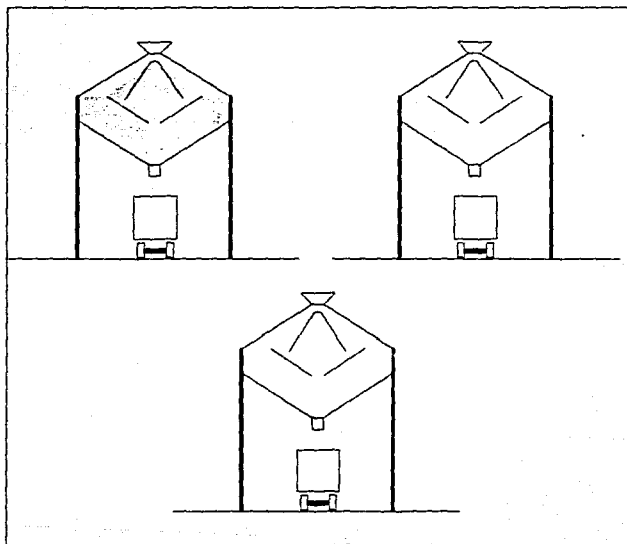


FIGURA 1.2.5

3. La parte superior y la inferior descarguen simétricamente hasta un punto de equilibrio. Posteriormente, descargará el resto de la parte superior y finalmente el resto de la parte inferior. (Figura 1.2.6)

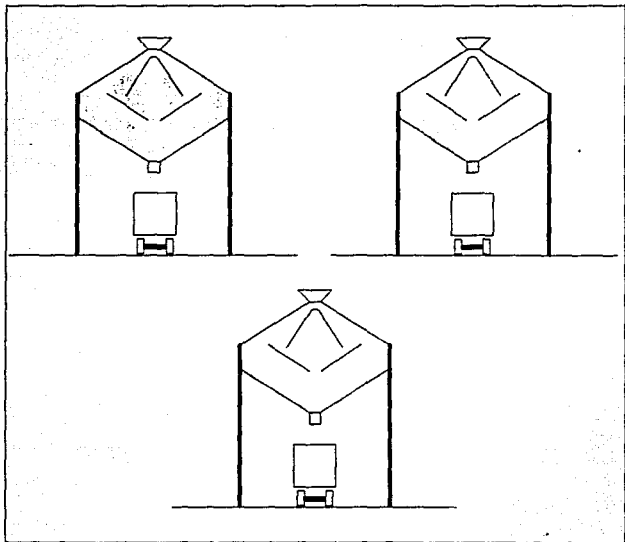


FIGURA 1.2.6

### 1.3 DATOS EXPERIMENTALES

La parte experimental se desarrolló en el Laboratorio de Reología del Instituto de Investigaciones de Materiales.

El material y equipo que se utilizó para el estudio del comportamiento del silo, fué el siguiente:

- modelo del silo, escala 1:50, en acrílico
- materiales para experimentación:

Material	Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]	Tamaño [mm]	Ang. rep. [grados]	Forma
ARENA	1.53	0.2-0.3 d	28 - 35	irregular
AMARANTO	0.86	1.4-1.6 d	29 - 30	esfera aplanada
ESFERAS POLIESTI.	0.60	.05-0.1 d	25 - 27	cuasiesférica
MIJO	0.75	3.0-3.5 l 2.0-2.2 a	28.5- 30	oval
NABO	0.67	1.4-1.7 d	30 -31.5	cuasiesférica

- transductores de presión
- adquisidor de datos
- computadora
- cámara de video

Al modelo se le realizaron perforaciones en puntos estratégicos para poder instrumentarlo con los transductores de presión, con la finalidad de determinar las presiones estáticas y los esfuerzos en las paredes del silo.

Los transductores de presión, constituidos por semiconductores de alta precisión, enviaban su señal a través de un adquisidor de datos a una computadora que almacenaba las lecturas.

Simultáneamente a la toma de datos, se realizaban video-filmaciones con el objeto de posteriormente, analizar el comportamiento del silo durante el llenado y el vaciado.

## Calibración del equipo

Para que los datos arrojados por los transductores no fueran erróneos, se procedió a la calibración de los mismos realizándose de la siguiente forma: un cilindro de acrílico con 50 cm de altura, se perforó en la parte más baja para introducir cada uno de los transductores, mismos que estaban conectados al adquirente de datos y a la computadora. Se fué llenando el cilindro con agua y se registraron los valores para cada cinco centímetros. Los valores obtenidos son los siguientes:

volts						
cm agua	tr 1	tr 2	tr 3	tr 4	tr 5	tr 6
0	1.490	1.215	-0.00102	-0.00052	-0.00024	0.00057
5	1.517	1.242	-0.00026	-0.00026	-0.00114	0.00072
10	1.557	1.283	0.00042	0.00038	-0.00043	0.00138
15	1.599	1.324	0.00117	0.00113	0.00029	0.00208
20	1.639	1.362	0.00183	0.00186	0.00097	0.00281
25	1.679	1.403	0.00253	0.00265	0.00170	0.00353
30	1.719	1.444	0.00325	0.00346	0.00245	0.00430

volts				
cm agua	tr 7	tr 8	tr 9	tr 10
0	0.00211	-0.00024	-0.00016	0.01890
5	0.00301	0.00041	0.00038	0.01930
10	0.00371	0.00113	0.00102	0.02060
15	0.00447	0.00181	0.00171	0.02196
20	0.00513	0.00251	0.00238	0.02318
25	0.00586	0.00329	0.00307	0.02437
30	0.00656	0.00393	0.00380	0.02569

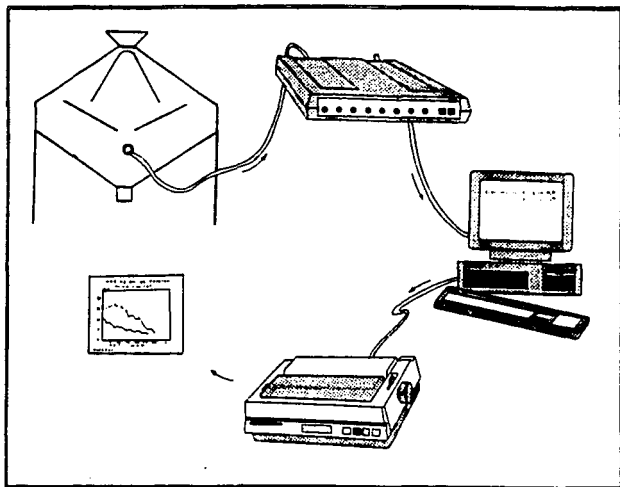
Se obtuvo la ecuación de la recta para cada transductor, con el fin de hacer el programa en la computadora e interpretar los valores obtenidos en unidades de presión (cm de agua).

$$\begin{array}{ll}
 \text{tr 1: } y = 0.00781x + 1.49 & \text{tr 6: } y = 0.00013x + 0.00057 \\
 \text{tr 2: } y = 0.00777x + 1.215 & \text{tr 7: } y = 0.000034x + 0.00211 \\
 \text{tr 3: } y = 0.00014x - 0.00102 & \text{tr 8: } y = 0.00014x - 0.00024 \\
 \text{tr 4: } y = 0.00014x - 0.0005 & \text{tr 9: } y = 0.00013x - 0.00016 \\
 \text{tr 5: } y = 0.00011x - 0.00024 & \text{tr 10: } y = 0.00024x + 0.0189
 \end{array}$$



## Obtención de datos

A continuación se muestra un diagrama que define cómo se manejaron los datos, desde los transductores de presión, en el silo, hasta su interpretación en forma de gráficas.



Los datos obtenidos se presentan a continuación, indicándose la posición que ocupaba cada transductor en el silo, el material estudiado, el tiempo transcurrido desde que está lleno y en estado estático, hasta que se vacía completamente, así como el valor entregado en unidades de presión (cm de H<sub>2</sub>O).

La posición que ocupaba cada transductor (distancias medidas desde la parte superior del silo) se muestra en la figura 1.3.1

TIPO DE SEMILLA: ESFERAS  
 DENSIDAD: 0.6040 gr/cm<sup>3</sup>

tiempo [seg]	Transductores [cm de agua]						
	1	2	3	4	5	8	9
0	1.741	9.514	7.672	7.786	7.432	13.090	10.054
5	1.181	9.324	4.332	6.979	6.863	11.102	9.850
50	1.553	5.800	2.457	6.103	6.342	12.827	9.003
100	-----	-----	2.565	1.674	4.396	6.670	6.216
130	-----	-----	1.633	2.093	3.763	2.296	1.700
170	-----	-----	0.086	-----	0.991	0.005	-----
191	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
218	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

tiempo [seg]	Transductores	
	10	11
0	2.754	1.078
5	2.754	-----
50	-----	-----
100	-----	-----
130	-----	-----
170	-----	-----
191	-----	-----
218	-----	-----

Fin del vaciado: 230 segundos

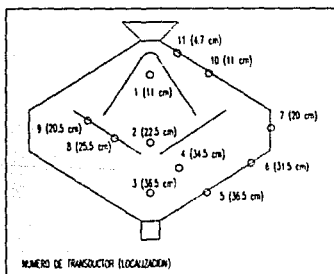


FIGURA 1.3.1

TIPO DE SEMILLA: ARENA  
 DENSIDAD: 1.5297 gr/cm<sup>3</sup>

tiempo [seg]	Transductores (cm de agua)						
	1	2	3	4	5	8	9
0	2.385	15.840	4.627	15.431	12.763	26.865	29.623
5	2.132	4.837	3.767	15.237	4.518	26.651	29.533
54	-----	5.217	4.517	15.086	5.052	26.010	26.098
88	-----	0.029	4.164	3.384	8.088	18.855	25.237
131	-----	-----	0.463	6.030	12.000	16.653	26.623
155	-----	-----	0.022	0.015	9.698	13.935	19.874
170	-----	-----	-----	-----	8.159	12.353	17.795
197	-----	-----	-----	-----	1.390	5.473	12.223
216	-----	-----	-----	-----	-----	1.575	1.087

tiempo [seg]	Transductores	
	10	11
0	3.298	2.893
5	3.188	2.640
54	1.695	0.001
88	1.423	-----
131	-----	-----
155	-----	-----
170	-----	-----
197	-----	-----
216	-----	-----

Fin del vaciado: 300 segundos

TIPO DE SEMILLA: NABO  
 DENSIDAD: 0.67 gr/cm<sup>3</sup>

tiempo [seg]	Transductores [cm de agua]						
	1	2	3	4	5	6	7
0	1.642	3.145	3.723	5.819	5.786	1.029	0.878
5	1.443	2.918	2.203	5.452	5.402	1.080	0.758
63	-----	2.573	1.999	5.683	4.903	-----	0.149
95	-----	2.147	2.225	3.491	4.026	-----	-----
150	-----	1.890	1.983	2.500	3.071	-----	-----
205	-----	-----	1.636	2.443	3.143	-----	-----
235	-----	-----	0.154	-----	3.242	-----	-----
264	-----	-----	-----	-----	3.542	-----	-----
269	-----	-----	-----	-----	0.031	-----	-----

Fin del vaciado: 300 segundos

TIPO DE SEMILLA: AMARANTO  
 DENSIDAD: 0.86 gr/cm<sup>3</sup>

tiempo [seg]	Transductores [cm de agua]						
	1	2	3	4	5	6	7
0	1.871	9.565	7.315	6.702	10.276	7.508	1.584
37	2.211	4.436	2.424	5.948	7.019	7.337	-----
61	-----	4.866	2.401	4.827	1.276	7.225	-----
85	-----	3.421	2.556	2.565	2.993	7.201	-----
110	-----	2.911	2.556	2.241	3.791	6.566	-----
148	-----	-----	2.357	2.284	3.423	5.552	-----
167	-----	-----	1.718	2.780	4.881	5.485	-----
191	-----	-----	-----	0.840	3.663	1.543	-----
218	-----	-----	-----	0.065	2.658	-----	-----

Fin del vaciado: 240 seg

TIPO DE SEMILLA: MIJO  
 DENSIDAD: 0.7511 gr/cm<sup>3</sup>

tiempo [seg]	Transductores [cm de agua]				
	1	2	3	4	5
0	1.303	4.386	4.933	2.551	2.996
5	1.290	4.298	4.561	2.297	2.864
73	1.089	3.965	4.150	1.953	4.276
107	1.981	2.909	3.862	1.318	4.186
152	-----	3.771	2.386	0.677	4.032
187	-----	3.017	4.567	1.050	3.319
232	-----	1.745	4.202	1.824	2.798
269	-----	-----	4.025	2.251	2.908
303	-----	-----	1.651	2.110	2.379
330	-----	-----	0.007	0.014	1.190

Fin del vaciado: 360 seg

*Comparación con un silo vertical*

Con la finalidad de comparar el comportamiento del silo hexagonal, con un silo vertical, se construyó un modelo de silo cilíndrico vertical, de capacidad y dimensiones similares al modelo hexagonal. Los datos obtenidos se presentan a continuación, indicándose el tiempo transcurrido desde que está lleno y en estado estático hasta que se vacía, la posición de los transductores se indica en la figura 1.3.2; los materiales estudiados son las esferas de poliestireno y la arena.

TIPO DE SEMILLA: ESFERAS  
 DENSIDAD: 0.6040 gr/cm<sup>3</sup>

tiempo [seg]	Transductores			
	3	4	12	14
0	15.475	3.217	2.816	1.261
5	12.427	8.559	3.451	1.525
65	11.447	8.803	2.079	0.064
80	10.834	6.103	1.087	0.007
130	8.740	0.242	0.000	-----
133	6.309	0.022	-----	-----
170	1.995	0.000	-----	-----

Fin del vaciado: 187 segundos

TIPO DE SEMILLA: ARENA  
 DENSIDAD: 1.5297 gr/cm<sup>3</sup>

tiempo [seg]	Transductores			
	3	4	5	12
0	23.987	7.513	3.168	2.911
5	25.540	9.342	6.293	-----
32	23.615	8.086	4.483	-----
74	22.211	5.728	0.000	-----
105	20.572	0.158	-----	-----
129	13.919	0.000	-----	-----
152	7.100	-----	-----	-----

Fin del vaciado: 173 segundos

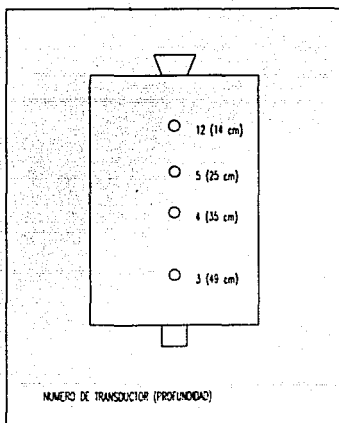


FIGURA 1.3.2

Para propósitos prácticos, los resultados se presentan en forma adimensional; un parámetro adimensional, es la relación entre la presión medida  $P_m$  y la presión  $P_i$  que tendría el material a una profundidad dada y bajo condiciones isotrópicas, entonces:

$$P = \frac{P_m}{P_e \cdot h} \quad (1)$$

donde  $P_m$  es la presión experimental medida a una profundidad  $h$  desde la parte superior del silo y  $p_e$  es el peso específico del material. Este parámetro puede graficarse en función de un tiempo adimensional dado por:

$$t = \frac{t_m}{T} \quad (2)$$

donde  $t_m$  es el tiempo en el que se midió la presión a partir del inicio del vaciado y  $T$  es el tiempo total de vaciado del silo.

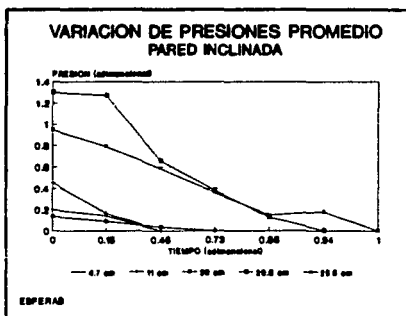
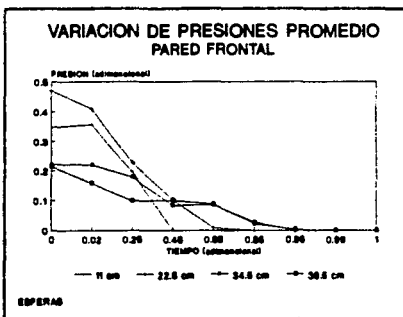
Los resultados de las mediciones realizadas, se procesaron obteniéndose dos tipos de gráficas:

1. Las que representan la VARIACION DE PRESIONES PROMEDIO, que indican el promedio de las presiones de decenas de corridas para cada material y en cada profundidad de las paredes frontal e inclinada del silo.
2. Las que representan la VARIACION DE PRESIONES MAXIMAS, que se obtuvieron considerando únicamente las máximas presiones obtenidas durante la experimentación, en ambas paredes y para cada material.

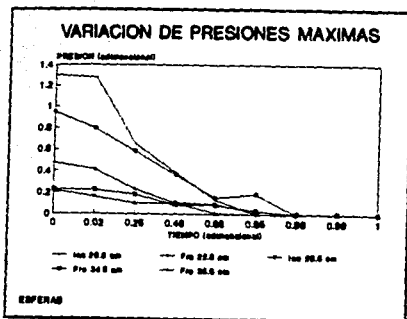
Cada gráfica examina la variación de presión y esfuerzo que se ejerce sobre el silo. El valor inicial de  $P$  en el tiempo cero representa la distribución de presiones estáticas sobre la pared. Los valores subsecuentes representan las presiones dinámicas durante el tiempo que tarda el silo en vaciarse completamente.

La localización de cada transductor para el silo hexagonal y el silo cilíndrico, se muestran en la figura 1.3.1 (página 30) y en la figura 1.3.2 (página 34) respectivamente.

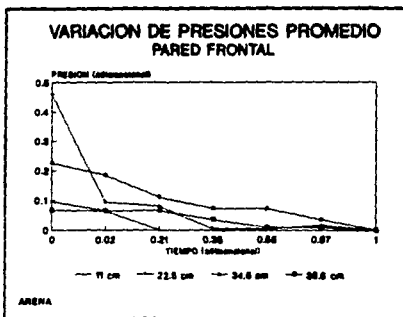
Con esferas:





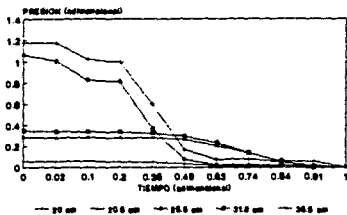


Con arena:



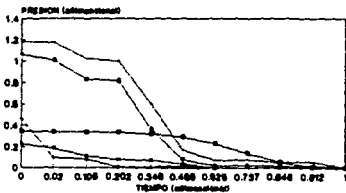
ESTA TESIS NO PUEDE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

### VARIACION DE PRESIONES PROMEDIO PARED INCLINADA



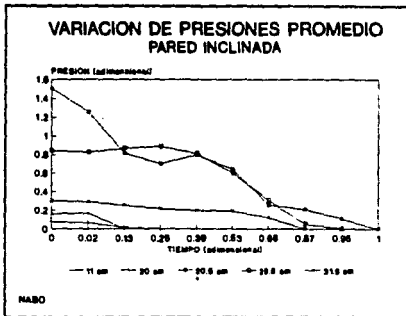
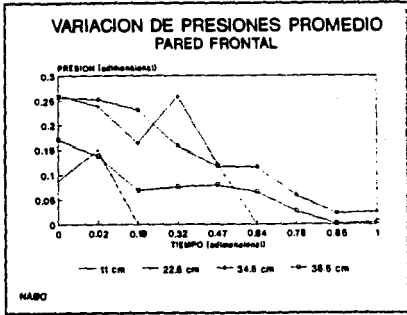
ARENA

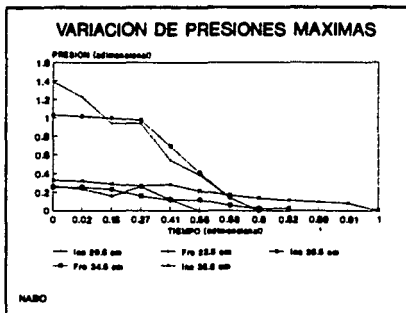
### VARIACION DE PRESIONES MAXIMAS



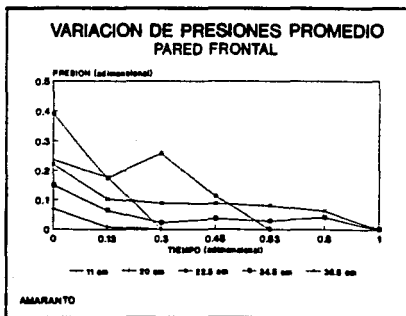
ARENA

Con nabo:

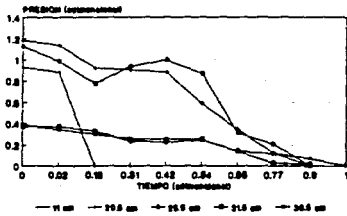




Con amaranto:

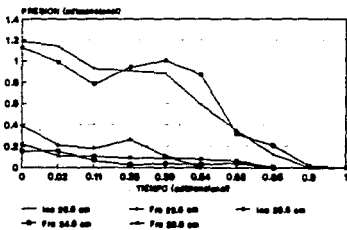


### VARIACION DE PRESIONES PROMEDIO PARED INCLINADA



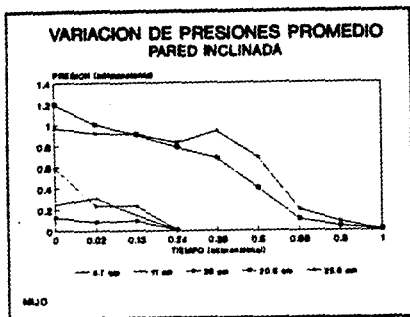
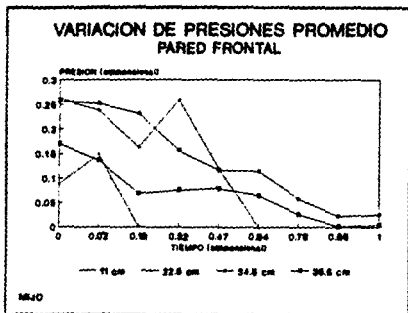
AMARANTO

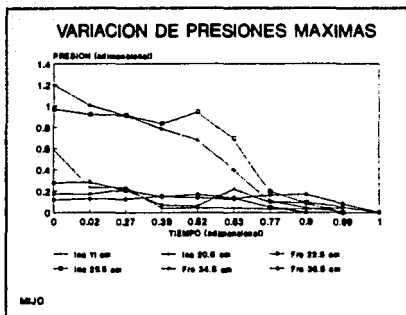
### VARIACION DE PRESIONES MAXIMAS



AMARANTO

Con mijo:

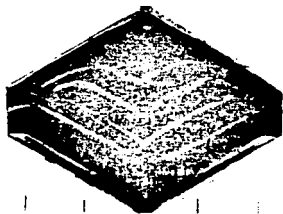
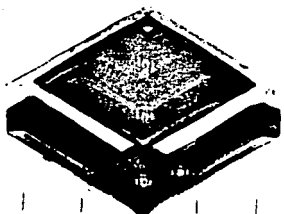
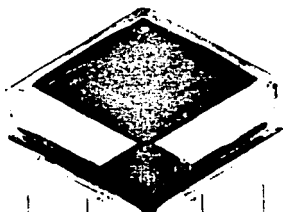
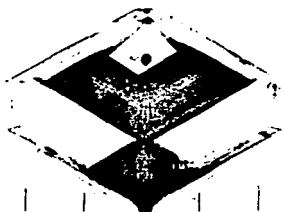
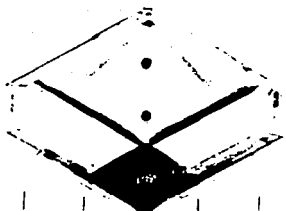
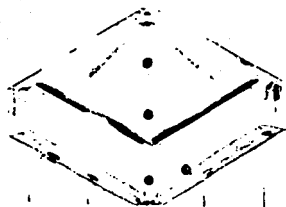




El proceso de llenado del silo se ilustra en la serie 1 de fotografías; inicialmente, los granos forman una sección transversal pseudo-cónica en el fondo del silo, con una inclinación que corresponde al ángulo natural de reposo del material, la segunda sección de llenado es la que se forma entre las dos placas transversales y las paredes superiores del silo, cuando ésta sección está prácticamente llena, el material se desliza suavemente a la parte inferior de la estructura, que está formada por las placas transversales y las paredes inferiores del silo.

De ésta forma se obtiene un llenado suave y simétrico, que provoca una distribución homogénea de esfuerzos, eliminando la compactación debida a los efectos gravitacionales que minimiza el daño al grano y la pulverización del material ensilado.

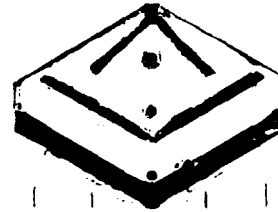
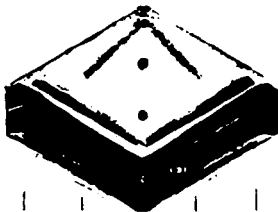
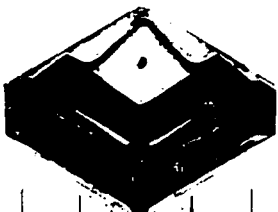
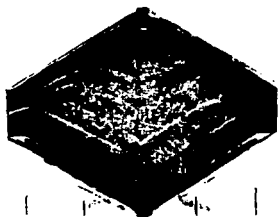
Durante el proceso de vaciado, el grano elige el camino de mínima resistencia, éste dependerá de las características geométricas del grano, de su ángulo natural de reposo, de la fricción con las paredes y del acomodamiento geométrico del grano durante el proceso de llenado.



SERIE 1 (fotografias)

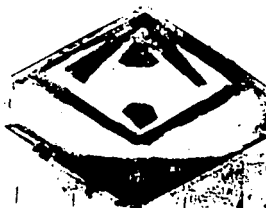
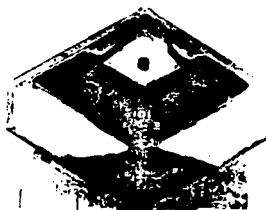
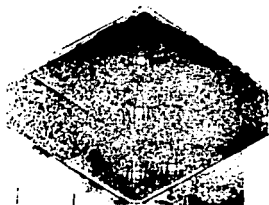


En la experimentación, se observaron tres tipos de formas de vaciado, la primera se muestra en la serie 2 de fotografías, donde observamos que el material localizado en la parte superior de la estructura fluye verticalmente hasta que ésta sección se vacía completamente.



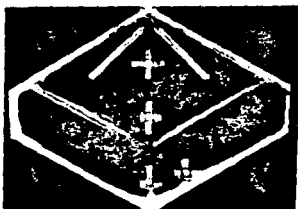
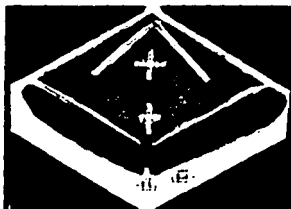
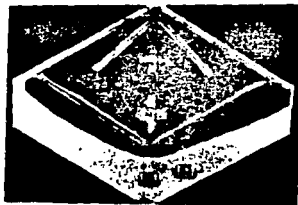
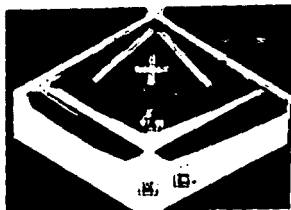
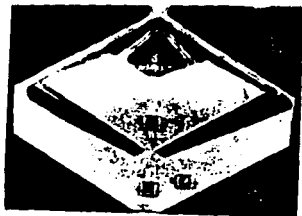
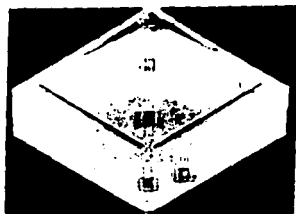
SERIE 2 (fotografías)

Un segundo tipo de vaciado se observa en la serie 3 de fotografías, donde la sección superior permanece inmóvil mientras que la parte inferior descarga hasta que se logra un estado de equilibrio cuasi-horizontal, es en éste punto cuando la parte superior descarga completamente seguida por el material restante de la parte inferior.



SERIE 3 (fotografías)

El tercer sistema de vaciado se muestra en la serie 4 de fotografías; en ésta, las partes superior e inferior del silo descargan simétrica y simultáneamente hasta que se alcanza un equilibrio, entonces la sección superior descarga completamente seguida por la sección inferior.



SERIE 4 (fotografías)

Se puede observar que independientemente del sistema de llenado, las presiones máximas son, en prácticamente la totalidad de los casos, las presiones estáticas; notablemente, en la geometría hexagonal, los esfuerzos dinámicos nunca sobrepasarán los valores estáticos, es decir, con ésta nueva geometría quedan eliminados los esfuerzos secundarios y las sobrepresiones durante el vaciado. Lo que proporciona mayor seguridad para los cálculos estructurales.

Asimismo, la distribución de presiones depende de la geometría de cada material, así como de la forma de llenado del silo (natural o empaquetado). Si el llenado se realiza en forma natural, la presión máxima se localiza alrededor del 60% de la profundidad del silo.

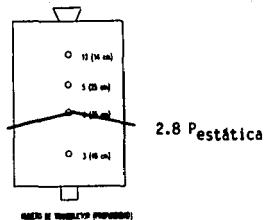
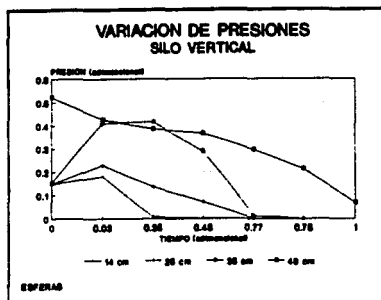
### Comparación con un silo vertical

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la experimentación en un silo cilíndrico vertical; de igual forma que con el silo hexagonal, los resultados de las mediciones realizadas se adimensionalizaron y procesaron, obteniéndose una gráfica que representa un promedio de las presiones de varias corridas para cada material utilizado.

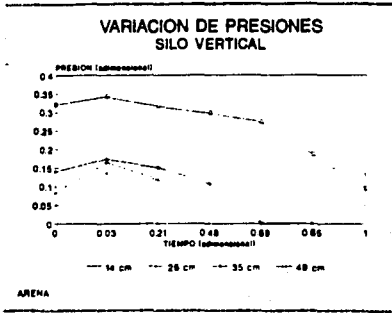
Cada gráfica examina la variación de presión y esfuerzo que se ejerce sobre el silo. El valor inicial de P en el tiempo cero representa la distribución de presiones estáticas sobre la pared. Los valores subsiguientes representan las presiones dinámicas durante el tiempo que tarda el silo en vaciarse completamente.

Se muestra también el dibujo del silo cilíndrico, y la profundidad a la que se localiza la máxima presión, así como el número de veces que representa a su correspondiente presión estática.

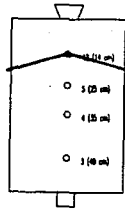
Entonces, con esferas:



Con arena:

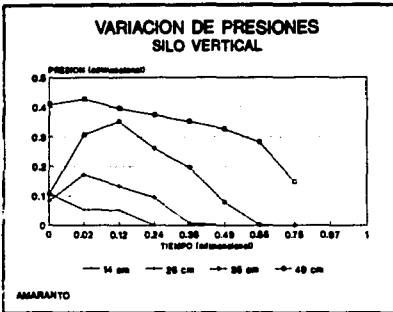


2.6 Pestática

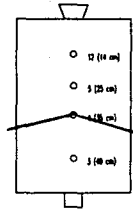


MODELO DE INSERCIÓN (PROFUNDOS)

Con amaranto:

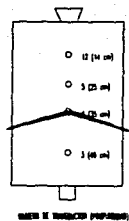
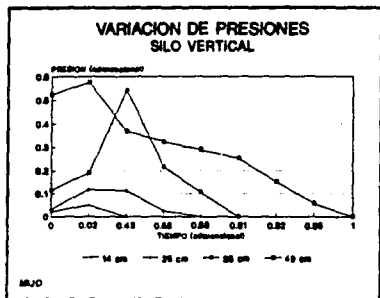


3.5 Pestática



MODELO DE INSERCIÓN (PROFUNDOS)

Con mijo:



5P<sub>estática</sub>

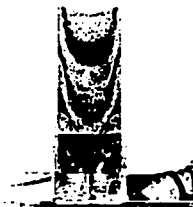
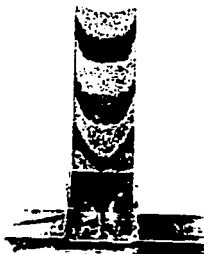
A continuación, se presentan fotografías del proceso de vaciado: (serie 5 y 6 de fotografías)



**SERIE 5 (fotografías)**

La serie 5 representa el vaciado con arena. Para facilitar el análisis se utilizaron arenas de dos colores. Obsérvese que el material empieza a fluir desde el centro de la superficie circular, formando un cono interno sin afectar el perfil exterior. Para éste material la máxima sobrepresión se localizó en la parte superior del silo.





**SERIE 6 (fotografías)**

Para ésta serie se utilizó mijo. Se llenó el silo con dos colores del mismo material. En ésta forma de vaciado sí se modifica el perfil, ejerciéndose en la parte baja del silo las máximas sobrepresiones.

En lo que se refiere al silo cilíndrico, se presentan daños importantes al material tanto en el llenado como en el vaciado del mismo. Al llenarse el silo, por la altura desde la que cae el grano; al vaciarse, por la presión existente.

Los esfuerzos dinámicos en el silo cilíndrico, alcanzan hasta cinco veces el valor del esfuerzo estático, lo que indudablemente causarán fractura, y se presentan en diferentes profundidades dependiendo el material. Esto repercute al momento de realizarse el cálculo estructural, ya que no se tiene la seguridad de cuál será la máxima presión, y de dónde estará localizada.

## 1.5 CONCLUSIONES

Con base en las pruebas realizadas en el silo hexagonal y a los datos arrojados por las mismas, podemos concluir:

1. El grano adopta su ángulo natural de reposo dentro del silo hexagonal, lo que reduce fuerzas de fricción y esfuerzos en las paredes, al mismo tiempo que se minimizan los daños producidos al grano durante el llenado y el vaciado del mismo.
2. Los esfuerzos estáticos en las paredes laterales del silo, son siempre menores a la correspondiente presión hidrostática.
3. Las presiones máximas están localizadas en las placas transversales.
4. La máxima presión tiene un valor, por lo menos 35% menor que la correspondiente a un silo vertical de características similares.
5. No se registran esfuerzos secundarios (sobrepresiones), durante el vaciado.
6. La homogeneidad en la distribución granular durante el proceso de vaciado, es función de cada material y depende de sus características geométricas, de la humedad relativa y la forma de llenado de dicho material.
7. La tobera de descarga, no requiere cálculos especiales, ya que las presiones de vaciado son mínimas.
8. El silo, al estar constituido por celdas, permite la versatilidad en las capacidades de almacenamiento; la elevación sobre el nivel del suelo otorga enormes ventajas de manejo de materiales.
9. La construcción del silo hexagonal es totalmente viable, dada la confiabilidad de los resultados de la experimentación.

**NOTA:** El silo hexagonal está registrado bajo derechos de autor.  
(No. cont. 1297, Reg. 834-90, 10, 17)

## 2.1 INTRODUCCION

La simulación de sistemas se define como la técnica numérica que utiliza modelos matemáticos para resolver problemas, lo que permite deducir los cambios de los atributos del sistema en función del tiempo. La simulación pretende demostrar el comportamiento característico del sistema en vez de predecir eventos específicos. No intenta aislar las relaciones entre determinadas variables; en vez de ello, observa la manera en que éstas cambian; éstas relaciones deben deducirse de esas observaciones, por lo que es necesario llevar registros de todas las actividades que se desarrollan y de las entidades involucradas.

El paso del tiempo se registra mediante un número al que se conoce como *tiempo de reloj*. Generalmente se hace igual a cero al principio de la simulación y posteriormente indica cuántas unidades de tiempo simulado han transcurrido desde el inicio de la misma.

La manera en que se desarrollan los experimentos de simulación depende de la naturaleza del estudio. Por lo general, los estudios de sistemas son de tres tipos principales: análisis de sistemas, diseño de sistemas y postulación de sistemas.

El *análisis de sistemas* pretende comprender la manera en que opera un sistema existente o propuesto. La situación ideal sería que el investigador pudiera experimentar con el propio sistema, pero lo que realmente se hace es construir un modelo, y mediante simulación, se investiga el comportamiento del sistema. Los resultados obtenidos se interpretan en términos del comportamiento del sistema.

En los estudios del *diseño de sistemas*, el propósito es producir un sistema que satisfaga algunas especificaciones. El diseñador puede elegir o planear determinados sistemas de componentes, y conceptualmente eligen una combinación determinada (de componentes) para construir un sistema. El sistema propuesto se modela y se predice su comportamiento a partir del conocimiento real del modelo. Si el comportamiento predicho se compara favorablemente con el deseado, se acepta el diseño. En caso contrario, se rediseña el sistema y se repite el proceso.

En la *postulación del sistema* se establecen hipótesis de un conjunto probable de entidades y actividades que pueden explicar el comportamiento. El estudio compara la respuesta del modelo con base en esas hipótesis contra el comportamiento conocido. Una comparación razonablemente buena conduce en forma natural a la suposición de que la estructura del modelo semeja el sistema real y permite postular una estructura del sistema.

Con el fin de situar al lector, se definen algunos conceptos importantes.

Se llamará *sistema* a todo agregado o conjunto de objetos reunidos en alguna interacción o interdependencia regular.

Al estudiar un sistema, podemos apreciar que hay determinados objetos distintos, cada uno de los cuales tiene prioridades de interés. También ocurren determinadas interacciones en el sistema que producen cambios en el mismo; entonces, se utilizará el término *entidad* para denotar un objeto de interés en un sistema; el término *atributo* denota una propiedad de una entidad; todo proceso que provoque cambios en el sistema, se conocerá como *actividad*; *estado del sistema* se utilizará para indicar una descripción de todas las entidades, atributos y actividades de acuerdo con su existencia en algún punto del tiempo. El progreso del sistema se estudia siguiendo los cambios en el estado del sistema.

Los cambios que ocurren fuera del sistema ocurren en el *medio ambiente* del sistema. Se utiliza el término *endógeno* para describir las actividades que ocurren dentro del sistema, y el término *exógeno* para describir las actividades en el medio ambiente que afectan al sistema.

Otra distinción que debe establecerse entre las actividades depende de la manera en que se pueden describir. Cuando es posible describir completamente el resultado de una actividad en términos de su entrada, se dice que la actividad es *determinista*. Cuando los efectos de la actividad varían aleatoriamente en distintas salidas, se dice que la actividad es *estocástica*.

Al sistema para el que no exista actividad exógena se le conoce como *sistema cerrado* en comparación con un *sistema abierto* que sí tiene actividades exógenas. Cuando los cambios predominantes en el sistema son suaves, se dice que se trata de un sistema *continuo*; a los sistemas en que los cambios predominantes son discontinuos, se les conoce como *sistemas discretos*.

Se utiliza el término *evento* para describir la ocurrencia de un cambio en un punto en el tiempo. Un evento puede provocar un cambio en el valor de algún atributo de alguna entidad, puede crear o destruir una entidad, o puede iniciar o detener una actividad.

Definimos un *modelo*, como el cuerpo de información relativa a un sistema recabado para fines de estudiarlo.

La tarea de obtener el modelo de un sistema, se dividirá en forma genérica en dos subtareas: determinar la estructura del modelo y proporcionar los datos. La determinación de la estructura fija la frontera del sistema e identifica las entidades, atributos y actividades del sistema. Los datos suministran los valores de los atributos que pueden tener y definen las relaciones involucradas en

las actividades.

A continuación se describen los principios utilizados en el modelaje:

- A. Formación de bloques; describir el sistema en bloques
- B. Relevancia; incluir los aspectos relevantes a los objetivos del estudio.
- C. Exactitud; recabar información real y precisa
- D. Agregación; agrupar las distintas entidades individuales en entidades grandes.

En un estudio de simulación, muchos sistemas contienen procesos en que hay demanda por servicio que provoque congestión.

El sistema puede dar servicio a las entidades a un ritmo que en general es mayor que la tasa a la que llegan éstas, aunque hay fluctuaciones aleatorias en la tasa de llegadas, la tasa de servicio o ambas. Como resultado de ello, hay ocasiones en que llegan más entidades de las que pueden atenderse en un momento dado, y algunas deben esperar el servicio. Entonces se dice que las entidades se unen en una línea de espera, o que forman una cola.

Se puede describir la congestión en términos de tres características principales:

1. El patrón de llegadas, que describe las propiedades estadísticas de las llegadas

En los casos en que las propiedades estadísticas de las llegadas y el servicio son independientes del tiempo, se dice que son estacionarias. De lo contrario se consideran variantes en el tiempo.

La manera usual de describir un patrón de llegadas es en términos del tiempo entre llegadas definido como el intervalo entre las llegadas sucesivas. Cuando las llegadas varían estocásticamente, es necesario definir la función de probabilidad de los tiempos entre llegadas.

Algo común es que se dice que las llegadas son completamente aleatorias. Formalmente, se supone que el tiempo de la siguiente llegada es independiente de la llegada anterior, y que la probabilidad de una llegada en un intervalo  $\Delta t$ , es proporcional a éste último. Si en realidad  $\lambda$  es el número medio de llegadas por tiempo unitario, la probabilidad de una llegada en  $\Delta t$  es  $\lambda \Delta t$ . Con éstas suposiciones es posible mostrar que la distribución de los tiempos entre llegadas es exponencial. No formalmente, se

supone que una tasa de llegadas tiene una distribución exponencial, porque la ocurrencia de éxitos no es regular, es decir, tanto puede llegar un cliente en un tiempo determinado, como pueden llegar cinco, ocho o cero clientes en ese mismo intervalo.

El número  $\lambda$  es el número medio de llegadas por tiempo unitario. El número real de llegadas en un intervalo  $t$  es una variable aleatoria. Con una distribución exponencial de tiempos entre llegadas, la probabilidad de que ocurran  $x$  llegadas en un intervalo de longitud  $t$  está dada por:

$$P(x) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!} \quad (x=0,1,2,\dots)$$

donde

- $\lambda$  = intensidad del proceso por unidad de tiempo
- $t$  = periodo bajo estudio ( $t=1$ )
- $x$  = número de éxitos
- $\lambda t$  = producto entre el número de pruebas independientes y la probabilidad de éxito

Esta distribución se conoce como la *distribución de Poisson*, es un caso especial del modelo binomial cuando  $x$  tiende a infinito, la probabilidad de éxito tiende a cero y el producto  $\lambda t$  es una constante.

A un patrón aleatorio de llamadas se le conoce como *patrón de llegadas Poisson*. Cuando se utiliza éste término significa que el tiempo entre llegadas está distribuido exponencialmente.

2. El proceso de servicio, que describe la forma en que se atiende a las entidades.

Los factores principales que describen el proceso son, el tiempo de servicio, la capacidad y la disponibilidad. El tiempo de servicio es el que se requiere para atender a una entidad individual; la capacidad de servicio, es la cantidad de entidades que se pueden atender simultáneamente.

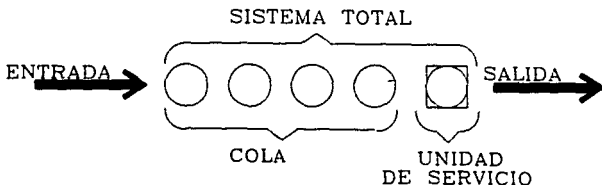
Con frecuencia, el tiempo de servicio es constante; pero en los casos en que varía estocásticamente, se debe describir mediante una función de probabilidad, y se puede representar mediante una distribución exponencial.

3. La disciplina de colas, que describe cómo se elige la siguiente entidad a atenderse.

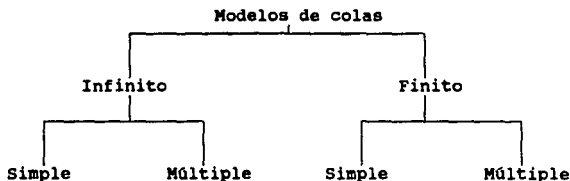
Se define como *cola de espera*, al número de clientes que esperan

ser atendidos. Normalmente, la cola no incluye el cliente que está siendo atendido; un cliente es una unidad que llega requiriendo la realización de un servicio; el canal de servicio es el proceso o sistema que está efectuando el servicio para el cliente, éste puede ser simple o multicanal.

Los elementos principales de un sistema de colas son:



Los diferentes modelos de colas se pueden dividir en clases según los tipos de problemas que se modelan:



A continuación se describen las disciplinas de colas más comunes:

1. Primero entrado, primero salido (PEPS), ocurre cuando las entidades que llegan se reúnen en el orden de tiempo en que llegan. El servicio se ofrece en seguida a la entidad que ha esperado el máximo tiempo.
2. Ultimo entrado, primero salido (UEPS), ocurre cuando las entidades forman una cola en el orden en que llegan, pero se ofrece el servicio primero al que llegó más recientemente.



3. Aleatoria, que significa que se hace una selección entre todas las entidades que esperan en el momento que se ofrece el servicio.

Lo anterior implica que una entidad que se incorpora a una cola permanece en ella hasta que se le sirva. Esto puede no suceder, como por ejemplo cuando un cliente se impacienta y sale de la cola. Se utiliza el término retirarse para indicar que las entidades salen de la cola, y cuando esto ocurre se deben especificar las reglas para retirarse. El retirarse puede depender de la longitud de la cola o del tiempo que ha esperado una entidad. Con frecuencia se da una función de probabilidad para determinar el punto en que se retira.

Las colas tienen dos medidas importantes, que son el número medio de entidades que esperan y el tiempo promedio que pasan en espera. Ambas cantidades pueden referirse al número total de entidades en el sistema, las que están en espera y las que están en servicio, o pueden referirse solamente a las entidades en la cola. Estas cantidades se denotan como sigue:

$L$	Número esperado de entidades en el sistema (cola y servicio)
$L_q$	Número esperado de entidades en la cola
$W$	Tiempo esperado de un cliente en el sistema ( $W_q + 1/\mu$ )
$W_q$	Tiempo promedio de espera de un cliente

### *Lenguajes de simulación*

Puesto que la técnica de simulación consiste en seguir los cambios de un modelo en un sistema, la tarea de simular sistemas discretos requiere construir un programa en el cual sea posible seguir la secuencia de los eventos.

Generalmente, los lenguajes que se han diseñado para la simulación de sistemas, dan al usuario un conjunto de conceptos de modelado que se utilizan para describir el sistema y un sistema de programación que convierte la descripción a programa de computador que ejecute la simulación.

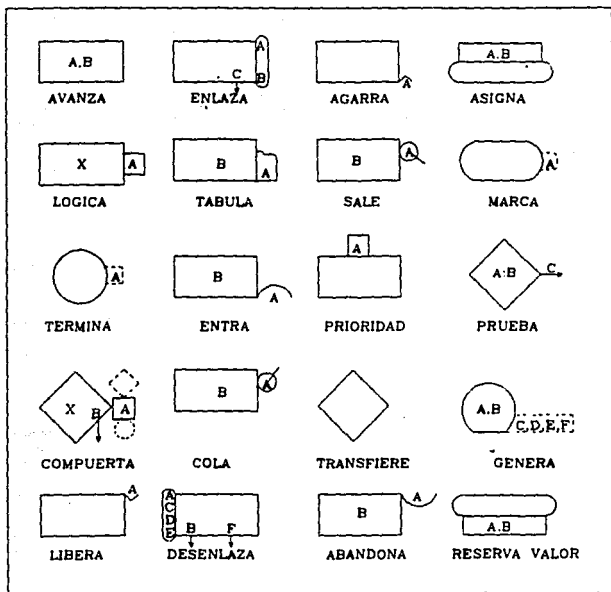
Por lo general los lenguajes de programación se diseñan para sistemas continuos o discretos.

El lenguaje que nosotros emplearemos se llama GPSS (General Purpose Simulation System, o Sistema de Simulación de Propósito General); programa de simulación de sistemas discretos.

## Lenguaje GPSS

El sistema a simular en GPSS se describe como un diagrama de bloques en que éstos representan las actividades, y las líneas que unen los bloques indican la secuencia en que pueden ejecutarse las mismas. Cuando hay selección de actividades, más de una línea sale de un bloque y la condición de la selección se expresa en el bloque.

A cada tipo de bloque se le da un nombre que describe la acción y que se representa mediante un símbolo determinado. El siguiente cuadro muestra los símbolos que se utilizan para los tipos de bloques:



A través del sistema simulado se mueven las entidades que dependen de la naturaleza del sistema. En la simulación se llama *transacción* a estas entidades. La secuencia de eventos en el tiempo real se refleja en el movimiento de las transacciones de bloque a bloque en el tiempo simulado. Pueden haber muchas transacciones moviéndose simultáneamente a través del diagrama de bloques.

A cada bloque se le da un número de identificación llamado *localización*, y por lo general el movimiento de las transacciones va de un bloque al que tiene la siguiente localización más alta.

Determinados tipos de bloques, se construyen para recabar estadísticas relativas al comportamiento del sistema, más que representar las acciones del mismo, como son las *colas* y *tablas*.

Cuando no se satisfacen las condiciones para avanzar una transacción, se puede mantener a varias transacciones esperando en un bloque; el programa las mantiene en orden y cuando las condiciones son favorables se les permite avanzar de acuerdo con la prioridad y generalmente según a la regla de PEPS.

El programa mide las longitudes promedio y máxima de las colas y, de requerirse, la distribución del tiempo transcurrido en la cola.

El programa tiene también la manera de permitir al usuario controlar los conjuntos de manera que se puedan simular disciplinas más complejas de colas.

**Bibliografía**  
**Capítulo 2.1**

**ELEMENTOS DE PROBABILIDAD Y ESTADISTICA**  
MODE, B. Elmer  
México 1980. Edit. Reverté Mexicana S.A.  
p.p 187 - 195

**GPSS/PC General Purpose Simulation REFERENCE MANUAL**  
MINUTEMAN SOFTWARE  
U.S.A. 1988.

**GPSS/PC General Purpose Simulation TUTORIALS**  
MINUTEMAN SOFTWARE  
U.S.A. 1988.

**INVESTIGACION DE OPERACIONES (UN ENFOQUE FUNDAMENTAL)**  
SHAMBLIN, E. James / STEVENS G.T.  
México 1988. Edit. MC GRAW HILL  
p.p. 198 - 234

**SIMULACION DE SISTEMAS**  
GORDON, Geoffrey  
México 1981. Edit. DIANA  
p.p. 15 - 44, 129 - 168, 225 - 248

## 2.2 IDENTIFICACION DEL SISTEMA

En éste capítulo, se procede a la identificación del sistema. El sistema a estudiar es el sistema silo, se realizará un análisis del sistema, es decir, se investigará su comportamiento, éste análisis se llevará a cabo en el modelo del silo diseñado.

Se estudiará un sistema discreto cerrado, ya que no tiene actividades exógenas, y los cambios que predominan son discontinuos.

Describiendo el sistema tenemos que: llega el camión, se forma en cola (si es necesario) para cargar (descargar) el silo, cuando llega su turno se coloca bajo la tolva de carga (descarga), la celda carga (descarga) y el camión sale del sistema (figura 1).

Con base en lo anterior, podemos identificar la estructura del sistema, donde las entidades son, el camión y la celda del silo, sus atributos son: capacidad y, capacidad, disponibilidad y velocidad de carga (descarga) respectivamente.

El camión realiza las siguientes actividades, llega al sistema silo, hace cola, carga (descarga) y sale; la celda del silo únicamente carga o descarga.

Para éste sistema, el servidor es la celda del silo, el tiempo de servicio que ésta tiene es constante siempre y cuando las cajas de los camiones sean de la misma capacidad, para éste caso se considera que tiene una distribución exponencial dado que pueden llegar camiones de diversas capacidades, el tiempo de servicio se obtendrá de los datos recabados en la primera parte de éste trabajo; la capacidad de servicio es unitaria si nuestro silo consta de una sola celda.

La tasa de llegadas se considera que tiene una distribución de Poisson.

El modelo de colas que corresponde a nuestro sistema es el de canal simple con población infinita, se utilizará el principio de colas de PEPS, primero en entrar primero en salir.

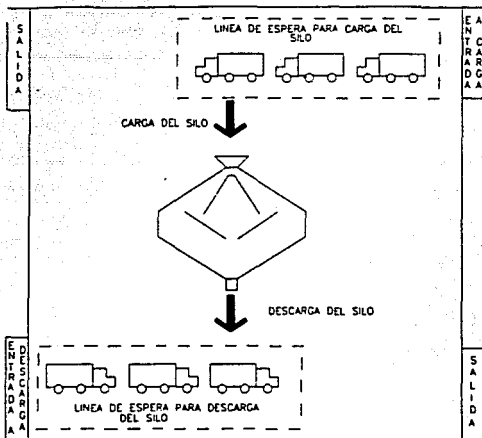


FIGURA 1

Las ecuaciones básicas que se pueden usar para analizar éste sistema analíticamente son:

$$\rho = \lambda / \mu$$

Probabilidad de hallar el sistema ocupado, ó también es la utilización del sistema

donde:

- $\rho$  = utilización del sistema
- $\lambda$  = tasa de llegadas [1/tiempo]
- $\mu$  = tasa de servicio [1/tiempo]

si  $\lambda / \mu < 1$ , es decir,  $\mu > \lambda$  entonces:

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu}$$

Probabilidad de hallar el sistema vacío u ocioso

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$$

Número esperado de clientes que esperan ser atendidos

$$L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

Número esperado de clientes en el sistema (cola y servicio)

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$$

Tiempo estimado que emplea un cliente esperando en la línea

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

Tiempo estimado que emplea un cliente esperando, más el que emplea siendo atendido

$$L_n = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

Número de clientes esperado en la cola, excluyendo los periodos en los cuales la línea está vacía

$$W_n = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

Tiempo estimado que un cliente espera en una línea, en el caso de que decida esperar

El medio ambiente del sistema es la situación geográfica del silo, las vías de comunicación y el estado en que se encuentran, así como el clima del lugar.

El estado inicial del sistema es: celda llena y no hay camiones cargando (descargando) o esperando cargar (descargar).

El sistema puede verse afectado si:

- llega a fallar:
  - el sistema de carga
  - la tolva de descarga
  - un camión durante su carga o descarga
- hay un accidente en alguna de las vías de comunicación, que impida el paso de camiones hacia el silo
- las condiciones climatológicas impiden la operación de carga o descarga

eventos que provocarían retrasos o demoras en el sistema y repercuten en la formación de colas más largas que la longitud esperada.

Se debe considerar lo siguiente: el silo a estudiar es únicamente de distribución, es decir, es un silo puente entre silos de almacenamiento y silos portuarios, por lo que cuenta con una sola celda; la operación de carga o descarga no se realiza

simultáneamente, primero llegan los camiones para vaciar el silo, acabando de vaciarlo, empiezan a llegar los camiones para cargarlo; la llegada del camión vacío o con carga, depende de la llegada de material al puerto; el sistema se analiza a partir de que entran los camiones llenos del silo portuario, o vacíos del silo almacén, hasta que salen vacíos o llenos respectivamente.

El control de calidad del material (peso, humedad, limpieza, tipo de grano y calidad) que va a entrar al silo, ya se ha llevado a cabo en otra estación, por lo que el material que llegue va del camión al silo, y del silo al camión.



**Bibliografía**  
**Capítulo 2.2**

**INVESTIGACION DE OPERACIONES (UN ENFOQUE FUNDAMENTAL)**  
**SHAMBLIN, E. James / STEVENS G.T.**  
**México 1988. Edit. MC GRAW HILL**  
**p.p. 198 - 234**

## 2.3 ANALISIS DEL SISTEMA

Por efectos prácticos, los datos y resultados se presentan en forma adimensional; el parámetro adimensional utilizado es la relación entre el tiempo medio requerido para cada operación y el tiempo total de vaciado del modelo de silo.

Como ejemplo se estudió el modelo de silo hexagonal utilizando esferas de poliestireno como material. A continuación se presentan algunas de sus características y propiedades:

- El modelo de silo tiene un volumen de 14 880 cm<sup>3</sup>. Dado que el silo no se llena completamente, las placas ocupan espacio y el llenado del silo no se hace con compactación, entonces se considera que la capacidad del modelo es de 14 200 ± 100 cm<sup>3</sup>.
- La densidad del material a estudiar (esferas) es de 0.604 gr/cm<sup>3</sup>, por lo que la masa es de 8.9875 kg.
- El tiempo que tarda en llenarse (vaciar) es de 230 segundos.
- A la misma escala, un camión carga en promedio 250 gramos, por lo que se necesitan 36 camiones para llenar (vaciar) completamente el silo; cada camión tarda 6.4 segundos en cargar (descargar).
- Se cuenta con un servidor.

En forma adimensional, podemos decir que:

- El silo tiene una capacidad de 36 unidades (llamando unidad a un camión).
- La tasa de servicio adimensional ( $\mu^*$ ), se obtiene a partir de:

$$\mu^* = \frac{230 \text{ [seg]}}{6.4 \text{ [seg]}} = 36$$

en tanto que la tasa de llegadas adimensional ( $\lambda^*$ ) se obtendrá realizando una simulación analítica empleando las fórmulas citadas en el capítulo anterior; entonces, considerando lo anterior y manteniendo la tasa de servicios como constante, obtenemos la siguiente tabla, que nos da los resultados de nuestro análisis analítico:

$\lambda^*$	$\mu^*$	$\rho$ [%]	$P_0$ [%]	$L_q$	$L$	$W_q^*$	$W_n^*$	Puntuación (1,2,3)			
								$\rho$	$L_q$	$W_q^*$	Tot
32.2	36	89.4	10.6	7	8	0.235	0.263	3	1	1	5
29.9	36	83.1	16.9	4	4	0.136	0.164	3	2	1	6
27.6	36	76.7	23.3	2	3	0.091	0.119	3	3	2	8
25.3	36	70.3	29.7	1	2	0.066	0.093	2	3	2	7
23.0	36	63.9	36.1	1	1	0.049	0.077	1	3	2	6
20.7	36 2	57.5	42.5	0	1	0.038	0.065	1	3	3	7
18.4	36 2	51.1	48.9	0	1	0.029	0.057	1	3	3	7
16.1	36	44.7	55.3	0	0	0.022	0.050	1	3	3	7

El criterio de selección se hace con base en la mayor puntuación; ésta se realiza sobre el porcentaje de utilización, el número de clientes formando cola y el tiempo que esperan en cola.

El criterio de calificación es:

Para el porcentaje de utilización (%)

3	75 a 100	(muy bueno)
2	65 a 74.9	(regular)
1	0 a 64.9	(malo)

Para el número de clientes formando cola ( $L_q$ )

3	0 a 2	(muy bueno)
2	3 a 4	(regular)
1	5 en adelante	(malo)

Para el tiempo que espera un cliente formando cola ( $W_q$ )

3	0 a 10	(muy bueno)
2	10.1 a 24	(regular)
1	24.1 en adelante	(malo)

De allí que el mejor comportamiento lo tiene la tasa de llegadas de  $\lambda^* = 27.6$  y  $\mu^* = 36$ .

$$\lambda^* = 27.6$$

$$\mu^* = 36.0$$

$$\rho = 76.67 \quad \%$$

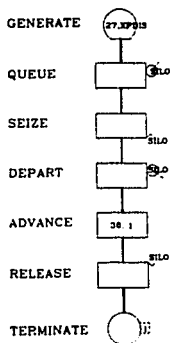
$P_0 = 23.33$      §  
 $L_q = 2$   
 $L = 3$   
 $W_q^* = 0.09127$   
 $W_n^* = 0.11905$

### Simulación con GPSS

Describiendo el sistema a simular, tenemos que:

A un silo distribuidor compuesto por una celda única, llegan camiones para su carga o descarga a razón de 27 por unidad de tiempo de acuerdo a una distribución de Poisson; la capacidad de servicio del silo es unitaria y se toma en promedio 36 unidades de tiempo en atender a cada camión. La unidad de tiempo unitaria de simulación es de 1, que equivale al tiempo que se lleva en cargar o descargar el silo, que para el caso del modelo es de 230 segundos, haciéndolo adimensional: 230 seg/ 230 seg = 1.

Entonces, el diagrama de bloques es:



El bloque GENERATE crea las transacciones que representan a los camiones. El patrón de llegadas se representa mediante una distribución de Poisson. Para éste caso se supone un tiempo medio entre llegadas de 27, y la función XPDIS.

Se ocasionará cierta congestión en el silo, por lo que las transacciones pasarán al bloque QUEUE que las forma en una cola llamada silo. En cuanto se desocupa el servidor, la transacción sale del bloque QUEUE y entra al bloque SEIZE, que permite se utilice el servidor disponible (en éste caso único); a continuación se pasa al bloque DEPART que disminuye en uno el número de transacciones en la cola, para entrar al bloque ADVANCE donde se inicia el servicio, con una media de 36.

Se continúa con el bloque RELEASE, que permite se libere el servidor y, por último, la transacción pasa al bloque TERMINATE para salir del sistema.

El listado del programa es el siguiente:

```

10 *****
20 *
30 *           SIMULACION DEL SISTEMA SILO
40 *
50 *****
60 *
70 *
80 XPDIS      FUNCTION      RN1,C24      ;Distribución Poisson
   0,0/.1,.104/.2,.222/.3,.335/.4,.509/.5,.69
   .6,.915/.7,1.2/.75,1.38/.8,1.6/.84,1.83/.88,2.12
   .9,2.3/.92,2.52/.94,2.81/.95,2.99/.96,3.2/.97,3.5
   .98,3.9/.99,4.6/.995,5.3/.998,6.2/.999,7/.9997,8
90 *
100 *
110          GENERATE      27,FN$XPDIS      ;Genera llegadas
120          QUEUE        SILO              ;Formación de cola
130          SEIZE        SILO              ;Disponibilidad
140          DEPART       SILO              ;Disminución de cola
150          ADVANCE      36,1              ;Servicio
160          RELEASE      SILO              ;Liberación servidor
170          TERMINATE    1                  ;Salida del sistema

```

## 2.4 RESULTADOS

A continuación se presentan cinco simulaciones de la operación del silo hexagonal, se considera la entrada y salida de 36 camiones.

1.

```

GPSS/PC Report file SILO.GPS. (V 2, # 39513) 10-28-1991 12:01:59 page 1
START_TIME          END TIME          BLOCKS          FACILITIES STORAGES FREE MEMORY
   -0                1347                7                1                0                205872

LINE   LOC   BLOCK TYPE      ENTRY COUNT    CURRENT_COUNT  RETRY
 110   1     GENERATE        45              0              0
 120   2     QUEUE           45              8              0
 130   3     SEIZE           37              1              0
 140   4     DEPART          36              0              0
 150   5     ADVANCE         36              0              0
 160   6     RELEASE         36              0              0
 170   7     TERMINATE       36              0              0

FACILITY ENTRIES UTIL. AVE. TIME AVAILABLE OWNER PEND INTER RETRY DELAY
SILO      37  0.963  35.08      1      37  0  0  0  8
QUEUE    MAX CONT. ENTRIES ENTRIES(0) AVE.CONT. AVE.TIME AVE(-0) RETRY
SILO      9  9      45          1      5.63  168.64  172.48  0
    
```

Los reportes de cada simulación nos indican:

```

START_TIME: tiempo de inicio de la simulación
END_TIME: tiempo absoluto de simulación
BLOCKS: número de bloques del programa
FACILITIES: número de servidores
STORAGES: número de entidades en memoria al final de la
           simulación
FREE MEMORY: bytes libres de memoria en la computadora

LINE: número de línea del bloque
LOC: localización del bloque
BLOCK TYPE: nombre del bloque
ENTRY COUNT: número de transacciones que entraron al bloque
CURRENT_COUNT: número de transacciones que permanecen en el bloque
              al final de la simulación
RETRY: número de transacciones esperando por una condición
       especial para continuar avanzando

FACILITY: nombre o número del servidor
ENTRIES: número de veces que el servidor se utiliza hasta el
         final de la simulación
UTIL.: utilización del servidor
AVE. TIME: tiempo medio de servicio
AVAILABLE: estado del servicio al final de la simulación (1/0),
           en el caso de ser 0 indica saturación del sistema
OWNER: número de transacción que está siendo servida al
       finalizar la simulación
    
```

**PEND.:** número de transacción esperando el servicio, en el caso de que se interrumpa la simulación  
**INTER:** número de transacción en el servidor, en el caso de verse interrumpida la simulación  
**RETRY:** número de transacción esperando por alguna condición especial del servidor para continuar  
**DELAY:** número e transacciones esperando a que el servidor se desocupe  
  
**QUFUE:** número o nombre de la cola formada  
**MAX.:** número máximo de transacciones en la cola durante la simulación  
**CONT.:** último registro de transacciones en la cola  
**ENTRIES:** número total de entradas al sistema  
**ENTRIES (0):** el número de entidades con un tiempo de permanencia en el sistema de cero (entradas cero)  
**AVE.TIME:** tiempo medio por entidades en la cola durante el periodo de análisis, sin considerar las entradas cero  
**AVE.(-0):** tiempo medio por entidad en la cola, considerando las entradas cero  
**RETRY:** número de transacciones esperando por una condición especial de la cola para avanzar

El reporte de ésta simulación indica que el programa consta de siete bloques, el tiempo de simulación fue de 1347; el sistema cuenta con un servidor, se generaron 45 llegadas de las cuales, 36 pasaron por el sistema completo, se formó una cola máxima de nueve y al término de la simulación existía una cola de ocho transacciones esperando servicio y una siendo servida; el tiempo medio de servicio fue de 35.08 unidades de tiempo.

De igual forma se pueden analizar los siguientes reportes.

2.

GPSS/PC	Report file	SILO.GPS.	(V 2, # 39513)	10-28-1991 12:25:31	page 1
START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES	FREE MEMORY
0	1523	7	1	0	206032

LINE	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
110	1	GENERATE	49	0	0
120	2	QUEUE	49	12	0
130	3	SEIZE	37	1	0
140	4	DEPART	36	0	0
150	5	ADVANCE	36	0	0
160	6	RELEASE	36	0	0
170	7	TERMINATE	36	0	0

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAILABLE	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
SILO	37	0.847	34.86	1	37	0	0	0	12
QUEUE	MAX	CONT.	ENTRIES	ENTRIES(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE(-0)	RETRY	
SILO	13	13	49	6	4.24	131.86	150.26	0	

3. GPSS/PC Report file SILO.GPS. (V 2, # 39513) 10-28-1991 12:17:51 page 1  
 START TIME END TIME BLOCKS FACILITIES STORAGES FREE MEMORY  
 0 1348 7 1 0 205856

LINE	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
11J	1	GENERATE	55	0	0
120	2	QUEUE	55	18	0
130	3	SEIZE	37	1	0
140	4	DEPART	36	0	0
150	5	ADVANCE	36	0	0
160	6	RELEASE	36	0	0
170	7	TERMINATE	36	0	0

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAILABLE	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
SILO	37	0.960	35.00	1	37	0	0	0	18
QUEUE	MAX CONT.	ENTRIES	ENTRIES(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE(-0)	RETRY		
SILO	21	19	55	2	12.64	309.67	321.36	0	

4. GPSS/PC Report file SILO.GPS. (V 2, # 39513) 10-28-1991 12:31:56 page 1  
 START TIME END TIME BLOCKS FACILITIES STORAGES FREE MEMORY  
 0 1343 7 1 0 204688

LINE	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
110	1	GENERATE	45	0	0
120	2	QUEUE	45	8	0
130	3	SEIZE	37	1	0
140	4	DEPART	36	0	0
150	5	ADVANCE	36	0	0
160	6	RELEASE	36	0	0
170	7	TERMINATE	36	0	0

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAILABLE	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
SILO	37	0.966	35.08	1	37	0	0	0	8
QUEUE	MAX CONT.	ENTRIES	ENTRIES(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE(-0)	RETRY		
SILO	10	9	45	4	5.33	159.20	174.73	0	

5. GPSS/PC Report file SILO.GPS. (V 2, # 39513) 10-28-1991 12:34:59 page 1  
 START TIME END TIME BLOCKS FACILITIES STORAGES FREE MEMORY  
 0 1368 7 1 0 206032

LINE	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
110	1	GENERATE	51	0	0
120	2	QUEUE	51	14	0
130	3	SEIZE	37	1	0
140	4	DEPART	36	0	0
150	5	ADVANCE	36	0	0
160	6	RELEASE	36	0	0
170	7	TERMINATE	36	0	0

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAILABLE	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
SILO	37	0.942	34.86	1	37	0	0	0	8
QUEUE	MAX CONT.	ENTRIES	ENTRIES(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE(-0)	RETRY		
SILO	16	15	51	4	6.20	166.25	180.40	0	



Obsérvese que la longitud máxima de la cola fue de 21 unidades con un tiempo medio de servicio de 35 unidades de tiempo.

No debemos perder de vista que por el hecho de no existir un silo piloto ya construido, estos resultados corresponden únicamente al análisis del sistema. En el momento en que exista información precisa de su comportamiento será posible mejorarlo si se logra un mínimo de unidades en cola, reducción de costos por espera y otros factores que conducen a la optimización del mismo. Para lo cual será necesario una programación adecuada de rutas y tiempos de llegadas de los camiones, no sólo a éste pequeño silo sino a lo que conforma el gran sistema de red de silos en México.

De cualquier forma haremos una comparación entre un silo cilíndrico vertical y uno hexagonal de gran capacidad, considerando que la tasa de servicio y la tasa de llegadas es la misma para ambos.

Entonces, si:

silos cilíndricos      =      10 celdas silo hexagonal

	silos cilíndricos	10 celdas s. hexa.
Número de servidores	máximo dos	uno por celda. Es decir, 10
Número de colas	máximo dos	una por servidor. Es decir, 10
Longitud de cada cola	50 unidades	10 unidades
Tiempo en el sistema	850 [u. tiempo]	170 [u. tiempo]

Esto significa, que mientras el silo cilíndrico puede atender simultáneamente a 2 unidades (camiones), el silo hexagonal atiende a 10. Los camiones, al entrar al sistema del silo cilíndrico, tienen 2 opciones para elegir servidor, en el otro sistema tienen 10 opciones.

También podemos considerar el caso de que se tenga un conjunto de silos cilíndricos con una capacidad unitaria igual a una celda del silo hexagonal, de tal forma que el número de servidores que se tengan sean los mismos en ambos sistemas. Para éste caso, el número de servidores, el número de colas, la longitud de cada cola y el tiempo en el sistema serían iguales. La diferencia estriba en el costo de construcción de los silos (siendo el del silo hexagonal más barato), en la facilidad en el manejo de materiales (para el

silos cilíndricos la descarga es subterránea), así como en la flexibilidad del silo hexagonal para dar servicio (existe la posibilidad de atender camiones y vagones de ferrocarril en el mismo conjunto de celdas).

**Bibliografía**  
**Capítulo 2.3 y 2.4**

**GPSS/PC General Purpose Simulation REFERENCE MANUAL**  
**MINUTEMAN SOFTWARE**  
**U.S.A. 1988.**

**GPSS/PC General Purpose Simulation TUTORIALS**  
**MINUTEMAN SOFTWARE**  
**U.S.A. 1988.**

**INVESTIGACION DE OPERACIONES (UN ENFOQUE FUNDAMENTAL)**  
**SHAMBLIN, E. James / STEVENS G.T.**  
**México 1988. Edit. MC GRAW HILL**  
**p.p. 198 - 234**

## 2.5 CONCLUSIONES

Con base en el análisis del sistema silo, podemos concluir:

1. La máxima cola formada tiene una longitud de 21 unidades, con un tiempo medio de servicio de 35.
2. Si se compara el silo hexagonal con el cilíndrico, observamos que pueden existir las mismas condiciones operacionales para ambos. La diferencia estriba en la facilidad del manejo de materiales, versatilidad de servicio y costo de construcción de los silos (siendo en el silo hexagonal mejor para todos los casos).
3. Es posible la optimación del sistema, siempre y cuando se cuente con la información precisa del comportamiento de éste silo. No bajo condiciones de laboratorio.
4. Para lograr una mejora considerable, será necesario realizar un diseño del sistema, no sólo a éste silo, sino a lo que conforma la red de silos en México.

## CONCLUSIONES GENERALES

El interés de disponer de productos de mejor calidad en todos los aspectos, lleva a la obtención de datos prácticos y experimentales que permitan conocer con certidumbre la forma de reducir las pérdidas que se presentan actualmente en lo que se refiere al almacenamiento de granos.

Con base en lo anterior, se diseñó un nuevo tipo de silo de gran capacidad. La forma de éste silo es hexagonal y puede constar de una o varias celdas de idéntica forma alineadas horizontalmente. El silo se encuentra soportado a varios metros sobre el nivel del suelo.

Debido a su forma, existe una disminución considerable de pérdidas por fricción y compactación del material. El grano adopta su ángulo natural de reposo dentro del silo, lo que reduce fuerzas de fricción y esfuerzos en las paredes. No se registran esfuerzos dinámicos secundarios. La operación de llenado y vaciado del silo es segura, con un riesgo de fractura en las paredes prácticamente nulo.

El silo hexagonal, al estar constituido por celdas, permite la versatilidad en las capacidades de almacenamiento; la elevación sobre el nivel del suelo otorga enormes ventajas en el manejo de materiales. Tiene gran flexibilidad de servicio. El costo de construcción y mantenimiento es menor que el de un silo cilíndrico.

La optimización del sistema, desde el punto de vista operacional, se logrará en cuanto se tenga disponible la información precisa del comportamiento de éste silo (en cuanto se puedan recabar datos del silo piloto), y además se considere la realización del diseño del sistema, no sólo de éste silo, sino de la red de silos en México.

**ANEXO**

*Publicaciones*

**RHEOLOGY OF A SILO  
II PAN AMERICAN CONGRESS OF APPLIED MECHANICS (PACAM)  
Valparaiso, Chile  
Enero 2-4, 1991  
p.p. 352 - 354**

**REOLOGIA DE UN SILO  
XVII CONGRESO  
ACADEMIA NACIONAL DE INGENIERIA, A.C.  
Monterrey, N.L. México  
Septiembre 18-20, 1991  
p.p. 438 - 442**

**GRANULAR FLOW IN A SILO  
SECOND CARIBBEAN CONFERENCE ON FLUID DYNAMICS  
Trinidad y Tobago  
Enero 5-8, 1992  
(enviado para su revisión)**

II PAN AMERICAN CONGRESS OF APPLIED MECHANICS  
(PACAM)

**PROCEEDINGS**

VALPARAISO, CHILE

January 2 - 4, 1999

## RHEOLOGY OF A SILO

B. Mena\*, J. Hernández C., M.O. Huergo and R. Zenit  
Instituto de Investigaciones en Materiales  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Apartado Postal 70-360, Coyoacán 04510, México, D.F.  
México

## ABSTRACT

Although theoretical and experimental studies during the last few decades have promoted a better understanding of material behavior in silos, the granular flow inside the silo is a complicated problem which is far from being well characterized. The more conventional silos are of the vertical type with circular or rectangular cross section. In these geometries, grain damage is often encountered during the filling and emptying processes. In the present article, a silo of hexagonal shape is considered. This new type of silo completely eliminates grain damage as well as extra stresses which are a main cause of wall failure in conventional silos. A homogeneous distribution of the grain is achieved during the emptying process. The silo is supported above ground level to allow emptying into any variety of ground transportation. Finally, the total cost of this new type of silo is considerably less than the equivalent silo of the conventional vertical type.

## INTRODUCTION

A rheological study of silos should cover the following points

1. Principal characteristics of the ensiled materials, i.e. internal friction between grains, friction factors against the walls, the natural angle of slope and the apparent density of the material.
2. Principal Stresses in the silo. First, there are static stresses due to the ensiled material, such as pressures on the bottom and stresses on the walls; secondly, the appearance of important and difficult to calculate over-pressures during the emptying process. The latter are particularly difficult to predict for cases where off-center emptying is employed.
3. Emptying Process  
The rheological behavior of the grains during the emptying of a silo is of paramount importance. It accounts for a homogeneous mixture of



grains, a smooth flow with reduced friction and the possible elimination of over-pressures on the walls.

Hopper design.

Finally, since the emptying of a silo is performed through a nopper, the geometrical design of the latter should be in accordance to the desired emptying speed and should be able to resist the vertical pressure exerted by the ensiled material.

#### A NEW SILO DESIGN

Following the above criterium for the desired rheological characteristics of a silo, let us consider the hexagonal cross-sectional geometry of Figure 1.

Grains flow into the silo through a feeder F which distributes the flow into two symmetric channels both at  $30^\circ$  with respect to the horizontal. The channels are parallel to the upper walls of the silo. During the filling process, the grains adopt their natural angle of repose minimizing grain friction, unwanted packing and pulverization of the ensiled material.

Once the filling level has reached the ends of the feeding channels, the grains naturally overflow the channels until the silo is completely filled.

The structure which may be formed by one or many cells of the type described above, is supported above the ground by lateral walls. The height of the structure being such as to allow for ground transportation to pass underneath and receive the grains during the emptying process.

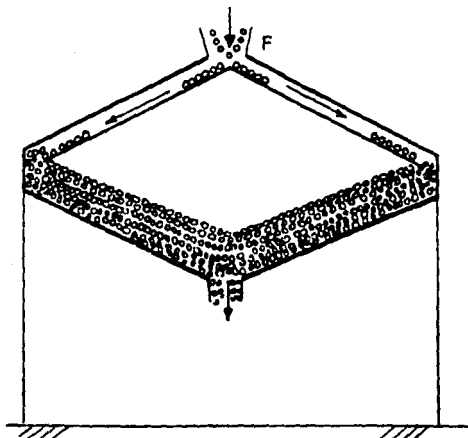


FIG. 1

## PRESSURE DISTRIBUTION IN THE SILO

A series of pressure transducers was located throughout the lateral, bottom and side walls giving the overall pressure distribution at the walls. A variety of materials was tested under different filling and packing conditions. During the filling and emptying of the silo, many measurements were taken to ensure repetitive and precise data. The results are too extensive to include in this communication but they are summarized in the conclusions.

## CONCLUSIONS

1. A silo of hexagonal shape greatly reduces grain damage during the filling and emptying processes. The grain adopts its natural rest angle reducing frictional forces and wall pressures.
2. The static stresses at the walls of the silo are always less than the corresponding hydrostatic pressure. The maximum wall pressure is located at 0.6 the total depth and its value is, at least, 20% less than its equivalent in a vertical silo.
3. Virtually no secondary dynamic stresses appear during the emptying process.
4. A homogeneous grain distribution is easily achieved during the emptying of the silo.
5. No particular calculations are needed for the hopper since the emptying pressures are minimal.
6. Since the silo is supported above ground level, it allows for its efficient emptying into any form of ground transportation.
7. Finally, the total cost of the silo is less than 50% of the cost of an equivalent vertical silo.



**ACADEMIA  
NACIONAL DE  
INGENIERIA, A.C.**

**XVII  
CON  
GRESO**

---

**18-20 SEPTIEMBRE 1991-MONTERREY, N.L. MEXICO**

**REOLOGIA DE UN SILO**

J. HERNANDEZ C., M.O. HUERGO, R. SENIT, B. MENA

Instituto de Investigaciones en Materiales, U.N.A.M.  
Coyoacan 04510, México D.F.**Abstract**

The rheology of a new type of silo of hexagonal form is considered experimentally. This geometry eliminates secondary dynamic stresses that appear in conventional silos and can cause wall fracture. A homogeneous, low friction flow is achieved, providing a controlled stress distribution during filling and emptying. The grain adopts its natural rest angle reducing frictional stresses, packing and powder formation.

**Resumen**

El estudio reológico de nuevo tipo de silo de forma hexagonal es considerado de forma experimental. Esta geometría elimina esfuerzos dinámicos secundarios, que aparecen en los silos convencionales y que son responsables de fracturas en las paredes. El flujo obtenido es homogéneo y de baja fricción, con lo que se logra una distribución de esfuerzos predecible durante los procesos de llenado y vaciado. El grano adopta su ángulo natural de reposo, reduciendo los esfuerzos por fricción, la compactación y la formación de polvos.

**1. Introducción.**

Históricamente, el desarrollo de silos ha sido completamente de naturaleza práctica. Su diseño ha sido responsabilidad de agrónomos, granjeros, o en el mejor de los casos de ingenieros civiles. La reología nunca ha sido considerada como un aspecto importante en el diseño de silos. A pesar de que existe un gran número de silos con formas geométricas diversas, la mayor parte de estos son de tipo vertical. Esto acarrea problemas imprevistos, tales como la aparición de esfuerzos dinámicos "secundarios" durante el vaciado, la distribución no-uniforme de esfuerzos en las paredes, destrucción del grano

debido a la fricción, compactación irregular de los materiales dentro del silo en el proceso de llenado, y dificultad en el diseño de la tobera de descarga, solo por nombrar algunos. Muchos de estos problemas son familiares en reología. Sin embargo los estudios reológicos han sido enfocados al desarrollo de ecuaciones constitutivas para flujos granulares "generales", como polvos y pastas. Esto aunque indudablemente apropiado es difícilmente aplicable. Aún así, algunas ideas reológicas simples pueden ser fácilmente incorporadas al diseño de un silo. Este es el propósito básico de este artículo.

**II. Un Nuevo Diseño de Silo.**

El análisis reológico de un silo debe cubrir los siguientes puntos:

a) Características principales los materiales a almacenar, por ejemplo, fricción interna entre granos, factor de fricción entre los granos y las paredes del silo, el ángulo natural de reposo bajo varias condiciones de humedad relativa, y la densidad aparente de los granos.

b) Esfuerzos Principales en el silo. Cuando el material está en reposo, existen presiones y esfuerzos estáticos actuando en las paredes y fondo del silo. Los esfuerzos iniciales son fácilmente predecibles. Sin embargo durante el proceso de vaciado aparecen esfuerzos dinámicos secundarios, cuya magnitud y localización son difíciles de predecir y representan un factor crucialmente importante para el diseño seguro y adecuado de un silo.

c) Proceso de Vaciado. El comportamiento reológico de los granos durante el proceso de vaciado es de suma importancia en el diseño de un silo. Se debe procurar una mezcla homogénea de material, así como un flujo suave y uniforme con fricción mínima entre granos, con el fin de eliminar los sobre-esfuerzos en las paredes.

d) Diseño de la tobera. El proceso de vaciado debe de realizarse, invariablemente, a través de una tobera. Esta debe tener un diseño geométrico capaz de soportar las presiones verticales que se presentan de acuerdo a las características del material almacenado.

De acuerdo al criterio anterior, se sugiere la geometría de sección transversal hexagonal, que se muestra en la figura 1.

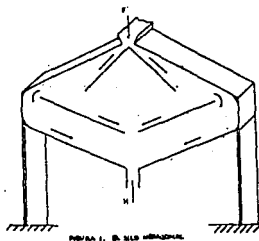


FIGURA 1. B. SILO HEXAGONAL.

Los granos fluyen al interior del silo a través del alimentador F el cual distribuye el flujo en dos canales simétricos, ambos a  $45^\circ$  con respecto a la horizontal.

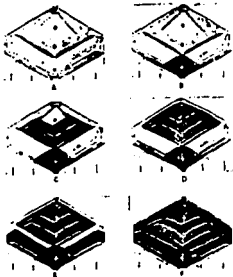
La sección transversal hexagonal está dividida en dos secciones hexagonales interiores por medio de placas transversales. Estas son paralelas a las paredes del fondo del silo, a  $30^\circ$  con respecto a la horizontal. El propósito de dichas placas es reducir los esfuerzos en las paredes y asegurar un flujo de grano más homogéneo durante los procesos de llenado y vaciado.

La estructura, la cual puede estar formada por una o muchas celdas del tipo antes descrito, está soportada por paredes laterales. La altura de la estructura permite a transportes terrestres pasar por debajo y recibir los granos durante el vaciado.

#### Proceso de Llenado.

Inicialmente los granos forman una sección transversal pseudo-cónica en el fondo del silo, con una inclinación que corresponde al ángulo natural de reposo del material granular. La segunda región de llenado es la formada entre las dos placas transversales y las paredes superiores del silo. Cuando esta sección está casi llena, el grano cae suavemente a la parte inferior de la estructura, que está formada por las

placas transversales y las paredes inferiores de la geometría hexagonal. Así se obtiene un llenado suave y simétrico con un daño mínimo para el grano, que además provoca una distribución homogénea de esfuerzos, eliminando la compactación debida a los efectos gravitacionales y eliminando también la tan indeseada pulverización del material almacenado. (Fotografías I)



FOTOGRAFIA I.

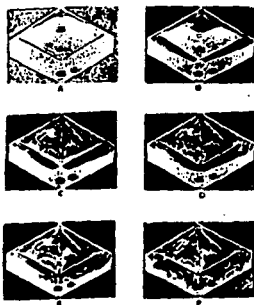
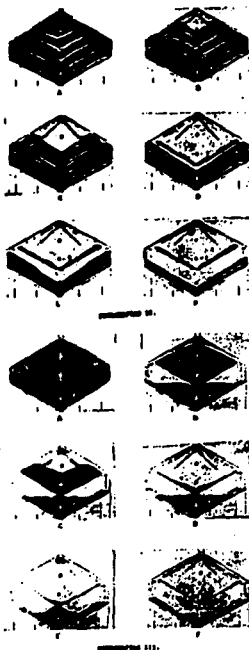
#### Proceso de Vaciado.

El proceso de vaciado del silo hexagonal puede ocurrir de tres diferentes formas, dependiendo del tipo de material en cuestión. El grano, invariablemente, elige el camino de mínima resistencia o mínima energía. Este camino dependerá de las características geométricas del grano, de su ángulo natural de reposo, del factor de fricción con las paredes del silo y del acomodamiento geométrico del grano durante el proceso de llenado.

La primera forma de vaciado es mostrada en las fotografías II. El material localizado en la parte superior de la estructura fluye verticalmente hasta que esta sección se vacía completamente.

Un segundo tipo de vaciado se muestra en las fotografías III, donde la sección superior permanece estática mientras que la parte inferior descarga hasta que se logra un estado de equilibrio cuasi-horizontal. En ese punto la parte superior descarga completamente, seguida por el material restante en la parte inferior.

El tercer y último sistema de vaciado puede observarse en las fotografías IV. Las partes superior e inferior del silo descargan simétrica y simultáneamente hasta que se alcanza un equilibrio.



construyó un modelo a escala en acrílico transparente. Cada celda hexagonal es de 50 cm. de alto, 60 cm. de largo y 10 cm., de ancho. Una serie de 11 transductores de presión de alta precisión de tipo semiconductor fueron montados a lo largo del modelo para monitorear la distribución de esfuerzos durante los estados estático y dinámico, i.e. el proceso de vaciado. Los transductores de presión se conectaron a través de un sistema de adquisición de datos a una computadora. Los datos obtenidos fueron almacenados y posteriormente graficados. Durante cada experimento, el proceso fue simultáneamente videograbado. Esto permitió el estudio posterior de la interacción de los granos durante el flujo, la medición de la velocidad relativa entre los granos, fricción en la pared, etc. Estos importantes aspectos forman parte de un estudio detallado que será presentado en un estudio próximo.

El arreglo experimental anteriormente descrito se ilustra en la figura 2.

Entonces la sección superior descarga completamente, seguido por la sección inferior.

Es importante notar, como se mostró anteriormente, que sin importar el tipo de vaciado, no aparecen esfuerzos dinámicos extras durante este proceso. Este tipo de esfuerzos es común en silos de otras geometrías, particularmente en los silos verticales donde a menudo son responsables de daños irreparables en las paredes [1],[2].

### III. Estudio Experimental.

Con el fin de determinar las presiones estáticas y los esfuerzos dinámicos en las paredes del silo, se

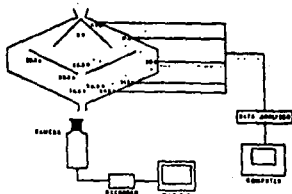


FIGURA 2. FOTOGRAFIA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL.

Materiales Experimentales. Los materiales esleados y sus características principales se muestran en la tabla 1.

Se estudiaron diferentes grados de compactación, humedades relativas, así como tres distintos factores de rugosidad en las paredes.

Tabla 1. Algunas propiedades de los materiales granulares.

Material	Humedad (gr/100%)	Vanado (cm)	Ángulo de reposo (grados)	Forma
ARCILLAS B20	0.75	1.0-1.5 (1) 1.0-1.3 (4)	20.0-30	oval
ARENILLAS	0.64	1.0-1.5 (1) 1.0-1.1 (4)	12-24	oval afilado
ARENILLAS	0.64	1.4-1.6 (4)	20-30	ovales afilado
ARENILLAS	0.67	1.0-1.7 (4)	20-21.5	cuadrado estático
ARENILLAS	0.66	1.0-2.0 (1) 1.1-1.3 (4)	20-20	elíptico
ARENILLAS B20	1.12	0.2-0.3 (4)	20-20	irregular
ARENILLAS B20	0.0	0.05-0.1 (4)	23-27	cuadrado estático

#### IV. Resultados.

Para propósitos prácticos los resultados se presentan en forma adimensional. Un parámetro adimensional obvio (aunque no único) es la relación entre la presión medida en la pared  $P_w$  y la presión  $P_0$  que el material tendría, a una profundidad dada, bajo condiciones isotrópicas; esto es:

$$P = \frac{P_w}{p_0 \cdot h} \quad (1)$$

donde  $P_w$  es la presión experimental medida en la pared, a una profundidad específica  $h$  medida desde la parte superior del silo y  $p_0$  es el peso específico del material. Este parámetro puede ser graficado en función de un tiempo adimensional dado por:

$$t = \frac{t_w}{T} \quad (2)$$

donde  $t_w$  es el tiempo al cual la presión fue medida y  $T$  es el tiempo total de vaciado del silo. Este último dependerá del gasto de vaciado, pero un cambio en su valor se reflejará en una translación del eje de las abscisas en la gráfica correspondiente. Observamos que el gasto es un caso particular para cada material. Este dependerá del ángulo de reposo, de la forma, del tamaño y de la densidad del material.

Algunos resultados selectos se muestran en las figuras 3 y 4. Los valores iniciales de  $P$  en el tiempo cero representan la distribución de presiones estáticas sobre la pared. Los valores subsiguientes representan las

presiones dinámicas durante el vaciado. Estas figuras son los valores promedio de decenas de corridas para cada material específico.

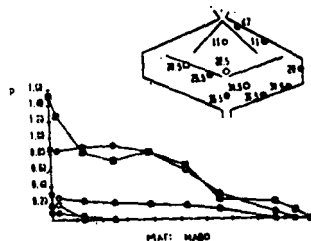
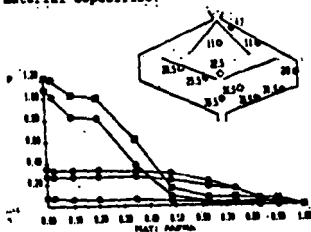


Figura 3

Se puede observar que para ciertos materiales aparecen algunos "valores pico", que en ningún caso exceden el valor estático inicial. En otras palabras, en el silo hexagonal no aparecen presiones dinámicas extras durante el proceso de vaciado que pudieran ocasionar ruptura en las paredes. Sin embargo en un silo vertical de similares características dichos esfuerzos pueden alcanzar valores de hasta 5 veces la presión estática ocasionando daño en las paredes. [1], [2].

Comparación con un silo vertical. Como un ejemplo ilustrativo, se presentan resultados obtenidos para un silo vertical de sección circular de similares características de almacenamiento (figura 3). Puede observarse que los esfuerzos dinámicos pueden alcanzar cinco veces el valor del esfuerzo estático, simultáneamente en dos diferentes profundidades en el silo: cerca del fondo y en la mitad. Estos indudablemente causarán fractura.

### V. Conclusiones.

Se presentó un estudio de un nuevo tipo de silo de forma hexagonal. Los resultados obtenidos para esta nueva geometría pueden resumirse de la siguiente manera:

- Las características geométricas del silo hexagonal son tales que el saltar del grano durante los procesos de llenado y vaciado es mínimo. El grano adopta su ángulo natural de reposo reduciendo esfuerzos por fricción.

- La geometría hexagonal elimina la aparición de esfuerzos dinámicos secundarios durante el proceso de vaciado. Estos esfuerzos son los responsables de la ruptura de paredes en los silos convencionales de tipo vertical.

- Un flujo homogéneo de baja fricción se desarrolla naturalmente lo que provoca una distribución homogénea de esfuerzos, eliminando la compactación y la formación de polvos en el silo.

- El diseño tipo celda permite versatilidad en las capacidades de almacenamiento y la elevación por encima del suelo permite facilidades ilimitadas de transportación durante el vaciado.

- La tobera de descarga no requiere un diseño de consideraciones especiales, debido a que los esfuerzos que actúan sobre esta son mínimos.

### Agradecimientos.

Agradecemos el financiamiento de "Proyectos de Innovación Tecnológica" (PAPIID-UNAM). Así como las invaluable conversaciones con el Prof. M. Rodríguez Cúevas del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Finalmente agradecemos el apoyo técnico del personal del taller del I.I.N. (UNAM) y en particular al Ing. J. Canacho y a M. Serrano.

### NOTA:

El silo hexagonal está registrado bajo derechos de autor. (No. cont. 1297, Reg. 834-90, 10, 17).

### Referencias.

1. Reimbert, M.A. Silos: Theory and Practice, Trans. Tech Publications, 1976.
2. J. Hernandez C., M.O. Muergo, R. Zenit y B. Mena. Rheology of a Silo, Proc. PACAM II, 1991, pp 352.
3. Ravenet Catalán, J. Silos, Ed. Técnicos Asociados, 1978.

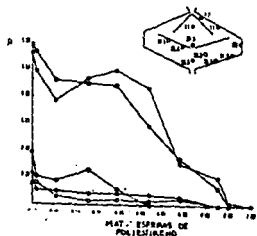
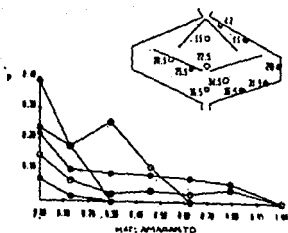
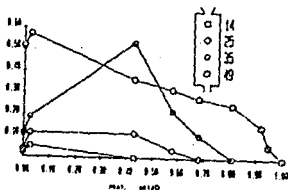


Figura 4

Figura 5





**NOTA:** Enviado para su revisión y aceptación a:  
SECOND CARIBBEAN CONFERENCE ON FLUID DYNAMICS  
que se llevará a cabo en Trinidad y Tobago del 5 al 8  
de enero de 1992.

---

### **GRANULAR FLOW IN A SILO**

J. Hernández C., M.O. Huergo, R. Zenit and B. Mena  
Instituto de Investigaciones en Materiales  
National University Of Mexico  
Apdo. Postal 70-360, Coyoacán 04510, México D.F.  
MEXICO

#### **ABSTRACT.**

The rheology of a new type of silo of hexagonal form is considered experimentally. This geometry eliminates secondary dynamic stresses that appear in conventional silos and can cause wall fracture. A homogeneous, low friction flow is achieved, providing a controlled stress distribution during filling and emptying. The grain adopts its natural rest angle reducing frictional stresses, packing and powder formation.

#### **I. INTRODUCTION.**

Historically, the development of silos has been entirely of a practical nature. Their design has been the property of agronomers, farmers or at most, of civil engineers. In any case, rheology has never been called upon or even considered as an important feature in silo design. Although several ingenious geometrical variations have been suggested, most commercially available silos are basically of the vertical type. This entails a number of unforeseen problems for silo engineers, such as the appearance of "secondary" dynamic stresses during emptying, non-uniform stress distribution at the walls, grain destruction due to friction, irregular packing of the ensiled materials during filling, heating of the grains due to the humidity, and difficult hopper design, just to name a few. Many of these problems are familiar to rheologists; particularly those who are dedicated to granular flow. Nevertheless the latter type, is devoted to the development of constitutive equations for "general" granular flows, pastes and powders. This is undoubtedly a very commendable but almost impossible task. Nonetheless, some simple minded rheological ideas may be easily incorporated to silo design. This is the basic aim of this article.

## II. A NEW SILO DESIGN.

A rheological analysis of a silo should cover the following points:

a) Principal characteristics of the ensiled materials. i.e internal friction between grains, friction factor between the grains and the walls of the silo, the natural rest angle under various conditions of relative humidity, and the apparent density of the grains.

b) Principal stresses in the silo. When the material is at rest, there are static pressures and stresses acting on the walls and on the bottom of the silo. These initial stresses are easily predicted. Nevertheless during the emptying process, secondary dynamic stresses appear. These stresses are difficult to calculate both in size and location, and are a crucially important factor for an adequate and safe design of a silo.

c) Emptying Process. The rheological behaviour of grains during the emptying is of paramount importance in silo design. A homogeneous mixture of the material, as well as a smooth, uniform flow with reduced internal grain friction should be provided in order to eliminate extra stresses on the walls.

d) Hopper design. The emptying process invariably occurs through a hopper. The latter should have a geometrical design capable of withstanding the vertical pressures whilst conforming to the emptying discharge characteristics of the ensiled material.

Following the above criterium for the desired rheological characteristics of a silo, let us consider the hexagonal cross-sectional geometry shown in Figure 1.

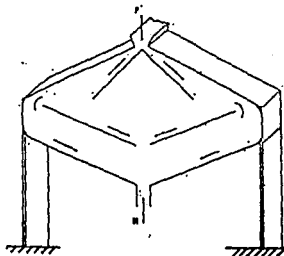


FIGURE 1.

Grains flow into the silo through a feeder F which distributes the flow into two symmetric channels both at  $45^\circ$  with respect to the horizontal. During the filling process, the grains adopt their natural angle of repose minimizing grain friction, unwanted packing and pulverization.

The hexagonal cross section is divided into two inner sections by means of transverse plates. These are parallel to the bottom walls of the silo at  $30^\circ$  with respect to the horizontal. The purpose of these plates is to relieve wall stresses and to

insure a more homogeneous grain flow during the filling and emptying processes.

The structure, which may be formed by one or many cells of the type described above, is supported above the ground by lateral walls. The height of the structure allows for ground transportation to pass underneath and receive the grains during the emptying.

#### Filling Process

The filling process of the silo is shown in Plate I. Initially the grains form a pseudo-conical cross section at the bottom of the silo, with a slope corresponding to the natural repose angle of the material. The second section to be filled, is a region formed between the transverse plates and the upper walls of the silo. When this section is almost filled, the grains fall gently onto the lower section of the structure, i.e. the one formed by the transverse plates and the the bottom walls of the hexagonal geometry. Thus, a smooth symmetrical filling process is achieved with minimal grain damage. It also ensures a homogeneous stress distribution avoiding packing due to gravity effects and unwanted pulverization of the ensiled material.

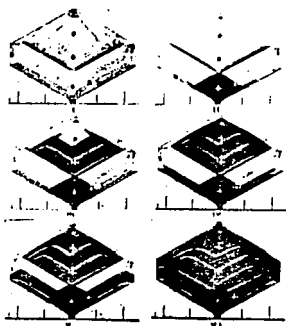


PLATE I.

#### Emptying Process

The emptying process of the hexagonal silo may occur in three different ways, depending on the type of material being ensiled. The grain invariably selects the path of minimum resistance or minimum energy. This path will depend on the geometrical characteristics of the grain, its natural repose angle, the friction against the walls of the silo and the geometrical accommodation of the grain during the filling process.

The first emptying fashion is depicted in Plate II. The material located in the upper section of the structure flows vertically until this section is emptied. The bottom section then

flows parallel to the bottom walls of the silo until emptying is completed.

A second emptying process is shown in Plate III, where the upper section remains static while the lower section discharges until a quasi-horizontal state of equilibrium is achieved. At that point the upper section discharges completely, followed by the material that was left in the lower section.

The third and final emptying system may be seen in Plate IV. The upper and lower sections of the silo discharge symmetrically and simultaneously until equilibrium is achieved. Then the upper section discharges completely, and the lower section follows accordingly.

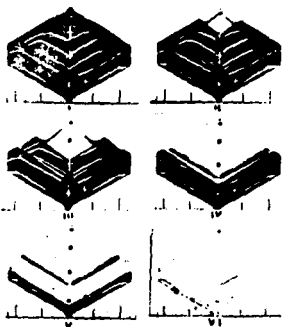


PLATE II.

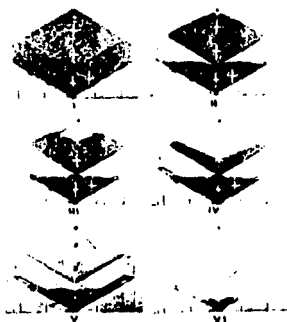


PLATE III.

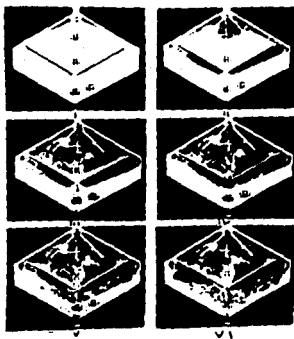


PLATE IV.

It is worthwhile noticing, as will be shown below, that regardless of the type of emptying, no secondary or extra dynamic stresses appear during the process. These stresses are known to occur in different silo geometries, particularly in vertical silos where they are often responsible for irreparable wall damages [1],[2].

### III. EXPERIMENTAL STUDY.

In order to determine the static pressures and dynamic stresses on the walls of the silo, an acrylic scale model was constructed. Each hexagonal cell was 50 cm. in height, 60 cm. in length and 10 cm. wide. A series of 11 high precision flush-mounted pressure transducers of the semi-conductor type were located throughout the model in order to monitor the stress distribution during the static and dynamic modes, i.e. emptying process. The pressure transducers were connected through a data acquisition system to a computer. The data was then stored and plotted. During each experiment, the process was simultaneously recorded through a video system. This allowed for further study of the grain interaction during the flow and for measurements of relative velocity between the grains, wall friction, etc. These important features form part of a detailed study to be presented in the near future.

The experimental arrangement as described above, is depicted in Figure 2.

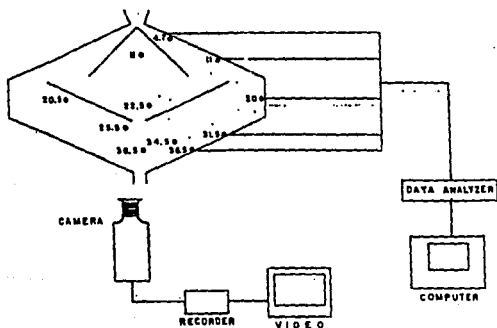


FIGURE 2.

#### Experimental Materials.

The materials used in the experiment and their characteristics are shown in table I. Four different values of the roughness factor were examined, i.e. 0.5, 2, 5 and 10 times the grain diameter. Several degrees of compactation as well as relative humidity (0-30%) were also examined.

**TABLE I. SOME PROPERTIES OF THE GRANULAR MATERIALS**

MATERIAL	DENSITY (gr/cm <sup>3</sup> )	SIZE (mm)	REPOSE ANGLE (degrees)	SHAPE
<u>seeds:</u> MILLET	0.75	3.0 - 3.5 (l) 2.0 - 2.2 (w)	28.5-30	oval
SESAME	0.66	3.0 - 3.5 (l) 1.8 - 2.1 (w)	32-34	flat oval
AMARANTH	0.86	1.4 - 1.6 (d)	29-30	flat sphere
TURNIP	0.67	1.4 - 1.7 (d)	30-31.5	quasi spherical
LINE-LEAVED SAGE	0.66	1.8 - 2.0 (l) 1.1 - 1.3 (w)	26-28	elliptical
<u>other materials:</u> SAND	1.53	0.3 - 0.2 (d)	28-35	irregular
POLYSTYRENE BEADS	0.6	0.05- 0.1 (d)	25-27	quasi spherical

l: large  
w: width  
d: diameter.

#### IV. RESULTS.

For practical purposes the results will be presented in dimensionless form. A natural (although not unique) dimensionless parameter is the ratio of the measured wall pressure  $P_m$  to a pressure  $P_i$  that the material would have at a given depth, if it were isotropic, that is:

$$P = \frac{P_m}{\rho_e \cdot h} \quad (1)$$

where  $P_m$  is the experimentally measured wall pressure, at a specific depth  $h$  measured from the top of the silo and  $\rho_e$  is the specific weight of the material. The above parameter may be plotted as a function of a dimensionless time given by:

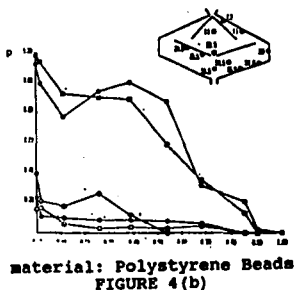
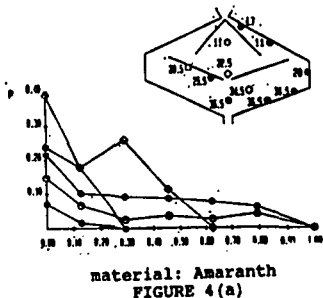
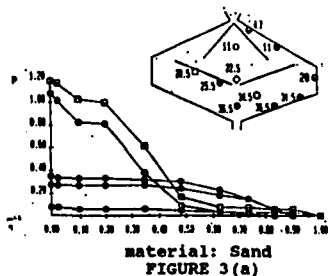
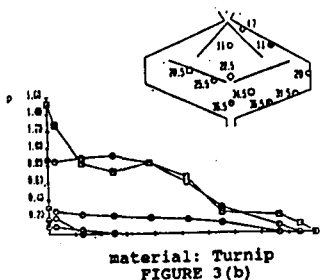
$$t = \frac{t_m}{T} \quad (2)$$

where  $t_m$  is the time at which the pressure is measured and  $T$  is the total emptying time of the silo at a given flow rate. Changes in flow rate will merely affect the horizontal scale factor in the plot.

Some selected results are shown in Figures 3 and 4 for the various materials tested. The initial values of  $P$  at time zero represent the static wall pressure distribution. Subsequent values represent the dynamic pressure distribution during emptying.

It may be observed, that although some "peaks values" are present for certain materials, these values do not, in any case,

exceed the initial static value. In other words, in the hexagonal silo considered above, no dynamical extra pressures appear during the emptying process that would cause wall fracture. This is not the case for vertical type silos, where dynamic stresses can achieve values of up to five times the static pressure resulting in wall breakage. [2],[3].



#### Comparison with a vertical silo

As an illustrative example, results are presented below for an equivalent vertical silo of cylindrical cross section, of similar ensiling characteristics (Figure 5). It may be observed that extra stresses of five times the value of the static stress appear simultaneously at two different depths of the silo: near the top and at the middle. This will undoubtedly cause fracture.

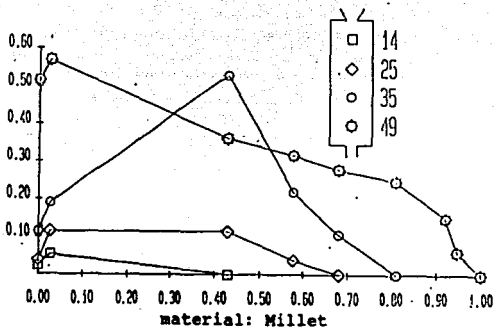


FIGURE 5.

#### V. CONCLUSIONS.

An experimental study of a new type of silo of hexagonal shape has been presented. The results obtained for this new geometry may be summarized as follows:

- The hexagonal silo provides the geometrical characteristics that yield minimal grain damage during the filling and emptying processes. The grain adopts its natural rest angle thus reducing frictional stresses.

- The hexagonal geometry completely eliminates the appearance of secondary dynamic stresses during the emptying process. These dynamic stresses are responsible for wall fracture in the most commonly used silos of the vertical type.

- A homogeneous, low friction flow is naturally achieved which provides a controlled stress distribution during filling and emptying. This eliminates packing and powder formation in the silo.

- The cell type design allows for versatile storage capabilities and the elevation above ground provides unlimited transportation facilities during emptying.

- The hopper does not require special design considerations since the stresses acting upon it are minimal.

#### ACKNOWLEDGEMENTS.

Financial support from Proyectos de Investigación y de Innovación Tecnológica (PAPIID-UNAM) is gratefully acknowledged. Many helpful discussions with Prof. N. Rodríguez Cúevas of the Institute of Engineering, UNAM are also acknowledged. Also the observations of Prof. H. Henning Winter of the Dept. of Chemical Engineering, University of Massachusetts. Finally the technical help from the workshop of the I.I.M., UNAM and in particular of Ing. J. Camacho and I. Lopez is duly appreciated.

#### NOTE:

The hexagonal silo is registered under authors' rights (No. cont.1297, Reg.834-90, 10, 17).



**REFERENCES:**

1. Reimbert, M.A. Silos: Theory and Practice, Trans. Tech Publications, 1976.
2. J. Hernandez C., M.O. Huergo, R. Zenit and B. Mena. Rheology of a Silo, Proc. PACAM II, 1991. pp 352.
3. Ravanet Catalán, J. Silos, Ed. Técnicos Asociados, 1978.

*Reportes*

**RHEOLOGY OF A SILO**

**GRANULAR FLOW IN SILOS. -A COMPARATIVE STUDY**

RHEOLOGY OF A SILO

J.Hernandez C., M.O.Huergo,R.Zenit and B.Mena\*  
Instituto de Investigaciones en Materiales  
National University of Mexico  
Apdo.Postal 70-360,Coyoacan 04510,Mexico D.F.  
MEXICO

**ABSTRACT:**

The rheology of a new type of silo of hexagonal form is considered experimentally. This geometry eliminates secondary dynamic stresses that appear in conventional silos and can cause wall fracture. A homogeneous, low friction flow is achieved, providing a controlled stress distribution during filling and emptying. The grain adopts its natural rest angle reducing frictional stresses, packing and powder formation.

**KEYWORDS:** Rheology, Silo, Granular Flow.

**Adresss for proofs:**

Prof. B.Mena  
Instituto de Investigaciones en Materiales  
National University of Mexico  
Apdo.Postal 70-360,Coyoacan 04510,Mexico D.F.  
MEXICO

\*to whom correspondence should be sent.

GRANULAR FLOW IN SILOS. -A COMPARATIVE STUDY

J.Hernandez C., M.O.Huergo, R.Zenit and B.Mena\* .  
Instituto de Investigaciones en Materiales  
National University of Mexico  
Apdo.Postal 70-360, Coyoacan 04510, Mexico D.F.  
MEXICO

SYNOPSIS

An experimental study of granular flow in a silo is presented. The most common type of vertical silo is critically reviewed and analyzed from a rheological approach. As a result, a silo of hexagonal geometry is suggested and examined in detail. This new type of silo presents numerous advantages over any available alternatives.

\* to whom correspondence should be sent.