

137
2eja



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS Y DISEÑO REOLOGICO DE
UN SILO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

(AREA MECANICA)

P R E S E N T A :

JOSE ROBERTO ZENIT CAMACHO

Director: Dr. Baltasar Mena I.

México, D. F.

1992



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

RESUMEN

Se realiza un estudio del diseño y construcción de silos para el almacenamiento de granos, así como de las condiciones de almacenamiento de granos. Se hace además una revisión de los aspectos teóricos involucrados con el estudio de los materiales granulares y el flujo granular.

Con base a algunas consideraciones reológicas se propone un nuevo diseño de silo, que es básicamente de forma hexagonal. Esta geometría elimina los sobreesfuerzos que se presentan en el vaciado en los silos verticales convencionales. El flujo obtenido en este nuevo diseño es homogéneo y suave, con lo que se logra una distribución de esfuerzos controlada. El grano adopta su ángulo natural de reposo lo cual reduce los esfuerzos por compactación y por fricción, eliminando así la pulverización y las pérdidas por almacenaje.

Se muestran en detalle los resultados experimentales tomados en un modelo del laboratorio a escala.

Como consecuencia de este estudio se decidió construir un silo prototipo de 400 toneladas de capacidad de almacenamiento en cual se realizaran pruebas para ratificar los resultados de laboratorio.

ANÁLISIS Y DISEÑO REOLÓGICO DE UN SILO

INDICE

INTRODUCCIÓN, 1.

CAPÍTULO 1.

PLANTEAMIENTO: JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES.

- 1.1 JUSTIFICACIÓN ¿PORQUÉ ESTUDIAR SILOS?, 4.**
- 1.2 ANTECEDENTES EN EL DISEÑO DE SILOS, 8.**
 - 1.2.1 Instalaciones en un silo convencional, 8.**
 - 1.2.2 Categorías de silos, 9.**
 - 1.2.3 Estudios de las sobre-presiones en silos, 11.**
- 1.3 PROBLEMAS COMUNES EN EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE SILOS, 13.**
 - 1.3.1 Sobre-presiones de vaciado, 13.**
 - 1.3.2 Explosiones en silos, 13.**
 - 1.3.3 Problemas de construcción y diseño en general, 15.**
- 1.4 PROBLEMAS EN EL MANEJO, ALMACENAMIENTO Y CONSERVACIÓN DE GRANOS Y SEMILLAS, 16.**
 - 1.4.1 Carencia de almacenes adecuados, 16.**
 - 1.4.2 Contenido de humedad e impurezas, 16.**
 - 1.4.3 Presencias de plagas, 17.**
 - 1.4.4 Manejo deficiente y desconocimiento de los principios de conservación de granos, 18.**

CAPÍTULO 2.

CONCEPTOS TEÓRICOS SOBRE LOS MATERIALES GRANULARES Y EL FLUJO GRANULAR.

- 2.1 NATURALEZA DE LOS MATERIALES GRANULARES, 19.
 - 2.1.1 Algunas comparaciones entre fluidos moleculares y materiales granulares, 21.
- 2.2 ESTADO FÍSICO DEL MEDIO, 25.
- 2.3 ASPECTOS SOBRE EL FLUJO DE MATERIALES GRANULARES, 28.
 - 2.3.1 Transferencia de momentum y esfuerzo en los materiales granulares, 28.
 - 2.3.2 Esfuerzos de fricción, 30.
 - 2.3.3 Esfuerzos de colisión y translación, 36.
 - 2.3.4 Combinación de los esfuerzos de colisión-translación y los esfuerzos de fricción, 41.
- 2.4 CONSIDERACIONES TEÓRICAS EN EL MODELADO DEL FLUJO GRANULAR DENTRO DE UN SILO, 43.

CAPÍTULO 3.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL PARA EL DISEÑO DE UN NUEVO TIPO DE SILO.

- 3.1 ANÁLISIS REOLÓGICO PRELIMINAR, 47.
- 3.2 GEOMETRÍA HEXAGONAL, 49.
- 3.3 ESTUDIO EXPERIMENTAL, 52.
 - 3.3.1 Diseño e Instrumentación del modelo experimental, 52.
 - 3.3.2 Resultados, 57.
- 3.4 COMPARACIÓN CON UN SILO VERTICAL CONVENCIONAL, 73.
 - 3.4.1 Experimentos, 73.
 - 3.4.2 Resultados en el silo cilíndrico, 75.

CONCLUSIONES.

A. COCLUSIONES GENERALES, 81.

B. CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO, 83.

REFERENCIAS, 90.

INTRODUCCIÓN

El diseño y construcción de silos es un problema industrial práctico común. La mayoría de los países importan y/o exportan granos, y estos últimos deben ser almacenados y transportados con rapidez y con un mínimo de daño.

Históricamente y hasta hace unos pocos años, el desarrollo de silos ha sido de naturaleza empírica. Su diseño ha sido responsabilidad de agrónomos, granjeros, o en el mejor de los casos de ingenieros civiles. La reología¹ nunca ha sido considerada como un aspecto importante en el diseño de silos. A pesar de que existe una gran variedad de geometrías de silos, la mayor parte de estos son de tipo vertical, es decir, en forma de prisma vertical con base circular, hexagonal, cuadrada, etc. Un silo con esta geometría acarrea serios problemas, por lo general imprevistos, tales como la aparición de esfuerzos dinámicos "secundarios" durante el vaciado, la distribución no-uniforme de esfuerzos en las paredes, la destrucción del grano debido a la fricción y a la compactación irregular generada durante el proceso de llenado, y dificultades en el diseño de la tobera de descarga, solo por nombrar algunos.

Hasta ahora no existen en México, ni en muchos países del mundo, cifras estadísticas confiables que indiquen la cantidad de pérdidas anuales debidas al almacenamiento de granos. Sin embargo, suele aceptarse que las pérdidas por almacenamiento, debidas a todos los diversos factores, van del 5% al 30% de la producción total.

¹ La Reología es la parte de la Física que se encarga de estudiar el flujo y la deformación de la materia.

El ingeniero responsable del cálculo estructural de una instalación para almacenamiento de granos se encuentra, en el momento de efectuar el diseño, ante un grave dilema: lo poco que se puede leer en los libros especializados presenta serios errores de concepto u omisión, por desconocimiento del tema. Por obvias razones el flujo granular dentro de un silo está muy lejos de ser un problema simple. Esfuerzos de fricción, colisión, y su interacción, presentan un situación un tanto complicada.

Muchos de estos problemas son familiares en reología. Sin embargo, la gran mayoría de los estudios reológicos al respecto han sido enfocados al desarrollo de ecuaciones constitutivas para flujos granulares específicos, en condiciones teóricas e ideales. Por ejemplo, para partículas inelásticas, para campos sin gravedad, flujo supersónico, etc. Esto indudablemente es apropiado pero es difícilmente aplicable en este caso. Aún así, algunas ideas reológicas simples pueden incorporarse fácilmente al diseño de un silo. Este es el propósito básico de este trabajo.

Con base en consideraciones reológicas se propone una nueva geometría para la construcción de silos, que es básicamente de forma hexagonal. Se hizo un estudio experimental extenso sobre este diseño en un modelo a escala y las pruebas realizadas en éste demostraron que el diseño presenta enormes ventajas sobre los silos verticales convencionales.

Esta tesis está dividida en tres capítulos:

- El primero sienta las bases que justifican este proyecto. Se hizo una evaluación económica simple sobre el problema de las pérdidas por mal almacenamiento, la cual mostró resultados espectacularmente elocuentes. Se incluye una revisión sobre mantenimiento de granos y el diseño y construcción de silos.
- En el capítulo dos se presentan los aspectos teóricos fundamentales sobre los materiales granulares y sobre el flujo granular. En el se pretende dar un entendimiento global del

comportamiento de los materiales granulares, que no es tan simple como el de otros estados de la materia. Se analiza la solución de un flujo granular convergente, el cual se asemeja al flujo en el silo de geometría hexagonal.

- Por último, en el capítulo tres se propone la nueva geometría de silos, basada en algunas consideraciones reológicas simples. Se describe la serie de experimentos realizados en el modelo a escala del silo hexagonal y de un modelo de silo cilíndrico convencional de similares características de almacenamiento. Se muestran los arreglos experimentales para ambos casos, así como las técnicas y materiales empleados en los experimentos. Los resultados obtenidos muestran que el nuevo diseño presenta grandes ventajas sobre los silos convencionales.

Finalmente, junto con las conclusiones del estudio experimental y teórico, se presenta el diseño y construcción de un prototipo basado en los estudios anteriores. El prototipo, de 400m^3 de capacidad, se encuentra listo para efectuar las pruebas finales de campo las cuales, o bien, podrán comprobar las predicciones teóricas y experimentales del proyecto ó, en el peor de los casos, mostrará las correcciones necesarias para el diseño y construcción final, a gran escala, de silos de distribución de 40,000 toneladas o más.

CAPITULO 1.

PLANTEAMIENTO: JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES.

1.1 JUSTIFICACIÓN

¿PORQUÉ ESTUDIAR SILOS?

En México el consumo de granos alimenticios, tanto los de producción nacional como los importados, forman una parte importante de la economía; la infraestructura existente de almacenamiento y distribución de dichos granos es insuficiente para las necesidades básicas de la nación, por lo cual se tiene una imperiosa necesidad de construir un gran número de silos de alta capacidad de almacenamiento y rapidez de distribución, los cuales se localizarían en puntos claves de acceso y puertos de importancia.

La irregularidad de la magnitud de las cosechas de temporada, así como la desigual de la distribución de cereales en el mundo, tiene como consecuencia un consumo desigual de los mismos. Esto ha llevado a la construcción de sistemas almacenadores para asegurar un consumo más uniforme.

El almacenaje de cereales tiende a expandirse preferentemente en silos lo cual elimina el uso de sacos y reduce el costo de mano de obra. Esto es aplicable por igual a ciertos productos alimenticios tales como azúcar, harinas, alimento para ganado, etc., o para productos industriales como partículas de plástico, polvos varios, etc., que son resultado del crecimiento de la industria.

A continuación, y con el fin de justificar formalmente el estudio de silos, se muestra una estimación económica sobre la pérdidas por almacenaje.

De acuerdo con las normas de calidad dictadas por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos las pérdidas por mal almacenamiento no deben exceder el 9% de las cantidades cosechadas. Según estimaciones hechas por A.N.D.S.A. (Almacenes Nacionales de Depósito) las pérdidas por ensilaje se encuentran, en el mejor de los casos, entre el 10% y el 30%.

Según datos del I.N.E.G.I. (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) [4] las cantidades de cosechas producidas, para los tipos principales de grano, durante 1990 y sus respectivos precios se muestran a continuación:

Tabla 1. Cosechas Nacionales de 1990, de los granos de mayor importancia. [4]

<i>Tipo de grano</i>	<i>Precio (\$/ton)</i>	<i>Producido (toneladas)</i>
maíz	640,000	12,651,364
frijol	1,650,000	961,810
trigo	550,000	390,837
arroz	550,000	321,698

Y en lo que respecta a importaciones:

Tabla 2. Cosechas Importadas en 1990, de los granos de mayor importancia. [4]

IMPORTACIÓN		
Tipo de grano	toneladas	USD/ton
maíz	4,102,443	106.1
frijol	330,181	766.4
trigo	338,699	136.7

Si se estima, conservadoramente, que las pérdidas por almacenamiento alcanzan un 10%, podemos hacer un cálculo simple de las cantidades desperdiciadas durante 1990: (considerando 1 USD = \$3000.00)

Tabla 3. Estimación Económica de las cantidades de grano consumido durante 1990.

Tipo de Grano	Producción Nacional		Importación	
	Toneladas	millones de pesos	Toneladas	millones de pesos
maíz	1,265,136	809,687.3	410,244	130,580.8
frijol	96,181	158,698.7	33,018	75,915.2
trigo	39,084	21,496.0	33,870	13,890.0
arroz	32,170	17,693.4	----	----

subtotal: \$ 1,007,575.0 \$ 220,386.0

total: \$ 1,227,884.0 (millones de \$)/año

Como base de comparación se tomó el presupuesto de la Universidad Nacional Autónoma de México de 1991.[6]

Tabla III. Presupuesto de la U.N.A.M.

SECCIÓN	millones de pesos	porcentaje
1) Docencia	1,088,051.5	66.36%
2) Investigación	395,654.0	24.13%
3) Ext.Universitaria	101,382.6	6.18%
4) Apoyo	54,451.3	3.32%

100%

total: \$ 1,639,539.3 (Millones de \$)/año

En las cifras anteriores podemos observar la magnitud del problema del mal almacenaje de granos. La estimación anterior a pesar de ser de cierta manera conservadora y burda, pues solo consideramos el mejor caso en que las pérdidas por almacenaje son del 10%¹ y no se consideraron otros factores importantes, nos dice que si pudiéramos evitar por completo las pérdidas por almacenaje podríamos "ahorrar" el suficiente dinero como para mantener un 75% de la Universidad durante un año; o podríamos aumentar el presupuesto destinado a investigación en 310%.

Estos resultados son la base que motiva a formar grupos de trabajo que se preocupen por el problema del almacenamiento de granos en forma adecuada.

¹ Nota: En realidad las pérdidas por almacenamiento en México son del orden del 20%, o sea el doble veces las cifras anteriores.

1.2 ANTECEDENTES EN EL DISEÑO DE SILOS.

Como antecedente en este estudio es importante revisar la forma en que se han construido y diseñado silos. A continuación se hace una sinopsis histórica del desarrollo del diseño, cálculo y construcción de almacenes de grano alcanzado hasta nuestros días.

1.2.1 Instalaciones en un silo convencional.

Los silos son usualmente construidos de acero o de concreto reforzado y están formados por celdas situadas lado a lado, de secciones transversales diversas y grandes alturas. Estas tienen en su base toberas de descarga y en su parte superior se encuentran cerradas por un "techo" que contiene dispositivos para su llenado.

La instalación general de un silo comprende:

- a. Un espacio de recepción F, en el cual los materiales se depositan a su llegada.
 - b. Un elevador E, que toma los materiales desde el lugar de recepción R, y los lleva hasta el techo que cubre las celdas.
 - c. Una banda sinfín T acarrea los granos después de que han sido descargados por el elevador, llevándolos al orificio de llenado de las celdas.
 - d. Las celdas C del silo.
 - e. Una banda sinfín inferior T' que transporta los granos después de que son descargados de las celdas.
- Además, la instalación puede comprender equipo de pesado, limpieza, aireación, etc.

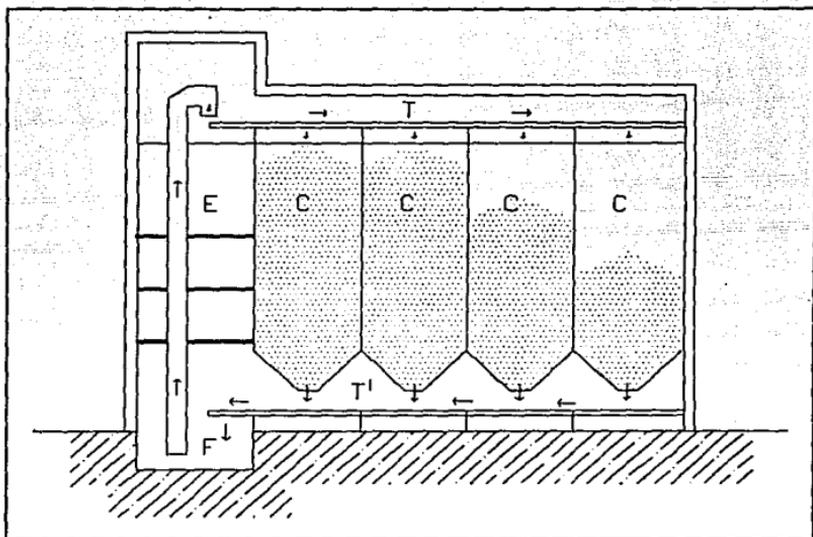


Figura 1. Diagrama de la instalación típica en un silo.

1.2.2 Categorías de silos.

Los silos pueden clasificarse por su uso en dos categorías generales:

a. Silos para la agricultura.

Entre estos podemos considerar:

a.1 Silos para granja.

Muchas granjas están equipadas con uno o más silos para el almacenamiento de cereales. Estos pueden ser de diferentes tipos:

Un silo "exterior" consiste de una o más celdas de entre 5 y 10 toneladas, cada una de las cuales tiene su propio techo usualmente en conjuntos colindando con el granero o almacén. Estos

están contruidos de concreto o acero.

Un silo "interior" se arma en el interior de los almacenes, y tiene una capacidad de 15 a 50 toneladas, se construye de madera o de láminas de acero.

Estos silos se construyen a base de unidades prefabricadas, por lo que su ensamblaje y desmantelamiento es fácil.

a.2 Silos para cooperativas.

Su capacidad varía entre 1,000 y 10,000 toneladas y en algunas ocasiones mucho más. Estos silos pueden estar contruidos a base de concreto reforzado o de laminas de acero. Algunos usuarios prefieren almacenar los cereales en silos de madera.

Las celdas de estos silos son, en general, de un promedio de 80 a 1,000 toneladas. Una instalación comprende varias celdas de menor capacidad.

a.3 Silos portuarios o de distribución.

Su capacidad varía desde 10,000 hasta 20,000 toneladas y en ocasiones alcanzan capacidades de hasta 50,000 o más.

Estos son de concreto reforzado y rara vez de acero, debido al agresivo ambiente marino.

Las celdas o elementos de estos silos son de una capacidad de 400 a 1,000 toneladas cada una, con el objeto de almacenar diferentes tipos de semillas ya sean de importación o exportación.

b. Silos industriales.

Estos están destinados a almacenar materiales granulares o pulverulentos tales como: coque, grava, carbón, fosfatos, arena, cemento, azúcar, etc.

Están contruidos de concreto reforzado o acero, y son

particularmente de construcción muy sólida debido a que los esfuerzos producidos por estos materiales, en el llenado y en el vaciado, son mayores.

La capacidad de éstos últimos es variable dependiendo del material y de la cantidad a almacenar.

1.2.3 Estudios de las sobre-presiones en silos.

El estudio de las presiones laterales y sobre el fondo, que aparecen en las paredes de los silos, es un tema que en el último siglo se ha desarrollado considerablemente. Durante los últimos años del siglo pasado se plasmaron las primeras teorías sobre presiones en silos y a lo largo de este siglo se han ampliado y mejorado. En los últimos veinte años se ha estudiado más que en los ochenta años anteriores.[8,15,23,29]

La causa de esta investigación ha sido los serios problemas surgidos en infinidad de silos y prácticamente en todos los países del mundo. La mayoría de los silos presentan problemas de deformaciones, grietas y roturas en las paredes, porque, en general, no se consideran las sobrepresiones que aparecen durante el vaciado de la masa ensilada. El rozamiento entre grano y pared produce también esfuerzos de compresión sobre las paredes, que al no ser considerados causan serios problemas en la estructura del silo.

Los estudios realizados hasta ahora por los especialistas en silos están únicamente enfocados a determinar las presiones en las paredes en el fondos de los silos, y siempre con una geometría vertical. El grado de complejidad de estas teorías es cada vez más elevado y para ciertos casos la determinación de las sobrepresiones y su localización es ya predecible.[1,8,11,16,23,30] Sin embargo, los esfuerzos que deben soportar las paredes del silo son de magnitud considerable. Por esto es que el grosor de las

paredes de los silos comerciales es excesiva, pues consideran "factores de seguridad" de considerable magnitud.

Un aspecto importante, que suelen olvidar los diseñadores de silos, es que en la geometría de tipo vertical no es posible controlar el esfuerzo ejercido sobre el material granular almacenado. En el caso de granos (semillas comestibles o no comestibles) este aspecto es determinante, ya que en la mayoría de los casos estos se rompen o se pulverizan y se vuelven inservibles. Se ha calculado que en silos de almacenamiento de semillas las pérdidas por pulverización son de entre el 10% (en el mejor de los casos) y el 30%.

1.3 PROBLEMAS COMUNES EN EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE SILOS CONVENCIONALES.

A continuación se citan algunos de los problemas recurrentes en el diseño, construcción y operación de silos.

1.3.1 Sobrepresiones de vaciado.

Cuando el silo se llena, aparecen sobre las paredes laterales presiones, que denominaremos estáticas o de llenado. Estas son, en general, muy inferiores a la correspondiente presión hidrostática que ejercería el material si este fuera isotrópico. No es raro encontrar diseños, a lo largo del mundo, que aún basan sus diseños en cálculos de presión hidrostática. Un cálculo de este tipo genera sería averías al silo, deformaciones e incluso roturas en la instalación.

La causa de estas averías es no tener en cuenta los fenómenos dinámicos que aparecen durante el vaciado y dan origen a sobrepresiones de vaciado, que denominaremos dinámicas.

1.3.2 Explosiones en silos.

Desde que a finales del siglo XIX se inició la construcción masiva de instalaciones para almacenamiento de los más diversos tipos de productos, y hasta nuestros días se han producido miles de explosiones, con cuantiosos daños materiales y pérdida de vidas humanas. [23]

Muchos son los factores que afectan la probabilidad de una explosión, a saber:

- cantidad de polvo
- naturaleza del polvo
- tamaño de las partículas
- contenido de humedad
- concentración de oxígeno
- tamaño y temperatura de la fuente de ignición
- distribución en el recinto.

En silos de almacenamiento existen tres tipos en los cuales son más frecuentes las explosiones: polvos de materiales metálicos, polvos de materiales plásticos y polvos de productos agrícolas. Los productos agrícolas destacan por su importancia, ya que son empleados para el manejo y almacenamiento de cereales, que por su naturaleza poseen una gran capacidad explosiva. Por ejemplo, al pulverizarse el maíz se produce nitrato de celulosa que es la base de la pólvora comercial (tamo).

Para disminuir la posibilidad de explosión en el silo se deben tomar precauciones tanto en la operación como en el diseño del silo, tales como:

- el control del polvo (evitar la formación de nubes de polvo, evitar la formación de depósitos de polvo en toberas y canales, etc.)
- eliminación de las fuentes de ignición (prohibición de fumar y todo tipo de llamas directas, normas antideflagrantes e n equipos eléctricos, evitar calentamiento excesivo por fricción en los equipos mecánicos, etc.)
- el diseño de edificios almacenadores deberá contemplar ventanales y diafragmas para prevenir los daños de la explosión.

Calentamiento espontáneo.

El calentamiento espontáneo empieza con una pequeña oxidación que genera un pequeño calentamiento y este proceso se acelera hasta que aparece una rápida oxidación. Los productos agrícolas tales como cereales, alimentos, heno y estiércol se calientan a tal grado que pueden comenzar a arder espontáneamente.

Aunque no se alcance la temperatura y/o la condiciones de ignición este calentamiento puede afectar los valores nutritivos de productos alimenticios, tales como avena, maíz, trigo, etc.

1.3.3. Problemas de construcción y diseño en general.

1.3.3.1 Cimentaciones. En general en la mayoría de los silos que se construyen actualmente se efectúan sondeos en el terreno para determinar su capacidad portante. No obstante es común encontrar fallas y agrietamientos en silos debidos a un mal cálculo de los cimientos.

1.3.3.2 Diseño incorrecto de celdas e interceldas. En muchas ocasiones se requiere edificar silos conectados entre sí de diferentes alturas , los asientos son diferentes y es muy frecuente la aparición de grietas en las conexiones de los silos.

1.3.3.3 Tensiones de origen térmico. Cuándo la construcción se encuentra situada en una zona en la que ocurren cambios súbitos de temperatura, las contracción y dilataciones pueden causar fallas importantes en la estructura del silo.

1.4 PROBLEMAS EN EL MANEJO, ALMACENAMIENTO Y CONSERVACIÓN DE GRANOS Y SEMILLAS.

Todos los estudios y avances para incrementar la producción de granos alimenticios pueden perder su valor si no se dispone de sistemas apropiados para conservarlos durante su etapa de almacenamiento. [21,31]

Los factores cruciales que determinan y acentúan las pérdidas en cosechas de granos que se almacenan son los siguientes:

1.4.1 Carencia de almacenes adecuados.

El almacén es el lugar que determina, en gran parte, la buena conservación de los granos y productos allí depositados. Este tipo de construcción, su localización y funcionamiento, deben ser planeados específicamente para éste servicio.

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

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

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 se predispone a un calentamiento excesivo y espontáneo, debido a su alto rango respiratorio. Simultánea o subsecuentemente el grano se descompone y se pierde debido al 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 será mucho mejor.

Los granos rotos e impurezas que se encuentren presentes en aquellos volúmenes de grano que se van a almacenar representan,

aparte de la contaminación en sí, una amenaza para la buena conservación de estos productos, ya que los volúmenes de grano en estas condiciones son más favorables para el desarrollo de insectos y microorganismos que perjudican y demeritan su calidad. Así mismo 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 una mayor superficies de acceso para los hongos y bacterias, y son una fuente más accesibles para los insectos.

1.4.3 Presencia de plagas.

Son cuatro los tipos de plagas que se consideran importantes y que pueden causar pérdidas importantes en las cosechas. Éstas son: insectos, microorganismos (hongos y bacterias), roedores y pájaros.

Insectos: 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 insectos adultos y sus estados larvarios, 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 debido al metabolismo de los insectos que los infestan.

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, deteriorando su calidad. La acidez de los granos, en estas condiciones, se incrementa y la aptitud para germinar decrece o desaparece.

Roedores: Las ratas y lo ratones representan un problema muy serio en el proceso de manejo y conservación de granos y productos alimenticios. Este problema se agudiza en los casos en que por emergencia o por falta de la instalaciones, los granos se almacenan en el campo abierto o en lugares no adaptados para ello, causando cuantiosas pérdidas. Las ratas y ratones destruyen cantidades diez veces mayores a las que realmente consumen. Además de esto, sus excrementos constituyen uno de los más dañinos tipos de contaminación. Esto coloca a esta plaga en un nivel de gran importancia económica.

1.4.4 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.

CAPITULO 2.

CONCEPTOS TEÓRICOS SOBRE LOS MATERIALES GRANULARES Y EL FLUJO GRANULAR.

2.1 NATURALEZA DE LOS MATERIALES GRANULARES

Por mucho tiempo hemos estado acostumbrados a dividir los estados de la materia en gases, líquidos y sólidos. Los materiales granulares se apartan esencialmente de estos límites preestablecidos. Estos materiales muestran varias propiedades simplemente observables que son manifestaciones inmediatas de sus excepcionales propiedades. A diferencia de los líquidos, un sistema granular se mantiene estacionario siempre y cuando la inclinación de su superficie sea menor que su "ángulo natural de reposo" θ_r . No ocurren avalanchas espontáneamente hasta que la inclinación llega al "ángulo máximo de estabilidad", θ_m . Cuando este ángulo es ligeramente incrementado los granos comienzan a fluir y ocurre una avalancha de partículas; sin embargo, en lugar de que el flujo ocurra a todo lo largo del espesor, como es de esperarse en el caso de un fluido, todo el movimiento ocurre en una capa relativamente delgada cerca de la superficie. Consideremos ahora otro ejemplo simple: un recipiente lleno con un material granular hasta una altura h . En el caso de un fluido normal la presión en el fondo del recipiente es proporcional a la altura h del líquido. En el caso granular la presión en el fondo del recipiente, para una altura lo suficientemente grande, puede llegar a ser independiente de h , debido a que la fricción entre partículas y las paredes del

contenedor puede llegar a ser suficiente para contrarrestar el peso de las partículas situadas por encima del fondo.[12]

Otra característica particular de estos materiales es que presentan un fenómeno llamado "arqueo"¹. Como analogía podemos mencionar la manera en que se construyen cúpulas, la cuál depende de la exacta colocación de una "piedra angular" que permite la creación de vastos espacios vacíos (claros). En una configuración aleatoria de gránulos, existirán lugares donde aparezcan "arcos" naturalmente, de tal forma que dejen espacios vacíos por debajo de ellos. Los materiales granulares son inherentemente heterogéneos, y la red de fuerzas que estabiliza al sistema es también no uniforme.

Los materiales granulares, podría decirse, ocupan una posición intermedia entre sólidos y fluidos: en primer término, no son fluidos debido a que pueden soportar un esfuerzo cortante sin deformarse. Por otra parte, éstos pueden soportar grandes deformaciones y subsecuentemente recuperar estados anteriores. Estas propiedades nos permiten almacenarlos y manejarlos en silos. Por esto, ninguna relación constitutiva para estos materiales sería capaz de describir la resistencia estática al corte y el flujo a la vez. Desde el punto de vista de la teoría de la plasticidad, el flujo se considera que ocurre tan pronto como se satisface cierta condición de fluencia. Esta teoría propone relaciones lineales entre incrementos en la deformación e incrementos en el esfuerzo. Un ejemplo es la transición del comportamiento sólido al comportamiento fluido observado cuando se supera el ángulo máximo de estabilidad, mencionado anteriormente.

¹ "arching" o "vaulting".

2.1.1 Algunas comparaciones entre sistemas granulares y fluidos moleculares simples.

A continuación se enumeran algunos de los aspectos por los cuales podemos comparar o contrastar sistemas granulares con sistemas de fluidos simples. [9]

a. Tamaño de los granos vs. tamaño de las moléculas. La diferencia más obvia entre granos y moléculas se encuentra en su tamaño (o masa). Un grano de arena promedio tiene del orden de 10^{18} veces más masa y volumen que una molécula de agua. Esta diferencia, aunque "impactante", no es particularmente fundamental debido a que los movimientos microscópicos de ambos sistemas pueden ser tratados de acuerdo a las leyes de la mecánica clásica. Sin embargo, la consideración del tamaño del grano es muy importante en la aplicabilidad de la hipótesis del medio continuo.

b. Conservación de energía. Aunque tanto la trayectoria de las partículas como la de las moléculas puede ser descrita por la mecánica clásica, la naturaleza "mecánica-cuántica" de la molécula se muestra en su capacidad de experimentar colisiones completamente elásticas. Los granos, sin embargo, son totalmente clásicos, y cada colisión siempre involucra una pérdida de energía cinética que aparece como energía térmica real entre los granos que chocan. En los sistemas granulares, el hecho de que las colisiones entre granos no conserven la energía cinética conduce a un comportamiento notablemente diferente del sistema macroscópico del que podría esperarse para un fluido molecular. Esto es cierto siempre cuando las pérdidas inelásticas por colisiones no sean muy pequeñas.

c. Los granos no son partículas idénticas. A diferencia de las moléculas, no existen dos granos que sean completamente iguales. Es de esperarse que la inexistencia de un espectro esencialmente continuo de tamaños de grano en un sistema granular dado podría introducir complicaciones significativas para encontrar una descripción teórica de dicho sistema. En realidad se espera que

las pequeñas diferencias de tamaño no tendrán grandes efectos en el movimiento.

d. Las interacciones grano-grano son "no-centradas". Debido a que los granos no son exactamente esféricos -y en algunos casos están muy lejanos de parecer esféricos- y, porque las superficies de los granos son típicamente rugosas, pueden existir fuerzas de fricción tangenciales. Esto significa que en la mayoría de las colisiones entre granos se ejercen pares o torques mutuamente, y por ello aparece una rotación, o "spin", que acompaña el movimiento de cualquier sistema granular real. Aunque las moléculas no son necesariamente esféricas, la mayoría son razonablemente redondas, y en el caso molecular no hay una analogía con las fuerza de fricción macroscópica.

e. La validez de la hipótesis del medio continuo. Debido al tamaño de las partículas granulares, sabemos que el valor de la densidad es mucho menor que el valor de la densidad de las partículas en el correspondiente fluido molecular. Esto origina algunas dudas sobre la validez de la hipótesis continua. Un milímetro cúbico de agua contiene del orden de 10^{19} moléculas, pero el mismo volumen de arena puede contener aproximadamente 10^1 granos o menos. En un sistema hidrodinámico, una cantidad macroscópica, tal como la velocidad de flujo, puede cambiar significativamente en una distancia de 1 mm, y el número de partículas involucradas es tan grande que podríamos separar el milímetro cúbico en volúmenes aún más pequeños, cada uno de los cuales conteniendo muchísimas moléculas, a través de sus dimensiones el cambio en la velocidad de flujo es muy pequeña. Sin embargo, si una cantidad como la velocidad de flujo cambia rápidamente en una distancia de 1 mm en el caso de un sistema de granos de arena, no es muy clara la aplicabilidad del medio continuo, debido a que involucra a un número finito de partículas.

Si el único factor de escala en un experimento de flujo granular fuera el tamaño del grano, entonces podríamos esperar que

la hipótesis continua se aplicara tanto en sistemas hidrodinámicos como en sistemas granulares (porque esencialmente no habría manera de distinguir entre los dos sistemas). No obstante, existen además por lo menos otros dos factores de escala, independientes, que se toman en cuenta en un experimento de flujo granular. Uno de ellos es el tamaño del contenedor (o recipiente) donde se encuentra confinado el sistema. La relación entre esta dimensión lineal con el diámetro molecular sería del orden de 10^6 , mientras que la relación correspondiente para un sistema de arena típico sería de 10^3 (además de que las partículas de arena son muy pequeñas comparadas con muchas partículas de interés). Por esta razón, en cualquier experimento los sistemas granulares son siempre "aglomerados" y no es fácil encontrar un factor de escala adecuado para eliminar el problema.

El otro factor de escala se genera debido a la inevitable existencia de colisiones inelásticas entre grano y grano. Para entender esto, es útil considerar la respuesta del sistema a una entrada localizada de energía. Después de un cierto número promedio de colisiones n , la energía cinética total en el pulso será degradada por un factor de e^{-1} . El correspondiente radio del pulso a ese tiempo provee el deseado factor de escala l^i . Si la inelasticidad no es muy pequeña, n no será muy grande, y así entonces l^i será únicamente un múltiplo pequeño del diámetro del grano.

f. Las interacciones grano-grano no tienen una fuerza de atracción apreciable. Típicamente la fuerza de molécula-molécula en un fluido tiene una parte repulsiva debido al principio de exclusión, y una parte atractiva débil pero relativamente grande la cual es responsable de fenómenos tales como la tensión superficial, la cual es muy importante en la evaluación de los parámetros (propiedades) del fluido, tales como la viscosidad. En los sistemas granulares las interacciones grano-grano (parte elástica) se considera infinita, como en una dispersión de esferas sólidas, y además se considera que no existe parte atractiva.

g. Hipótesis de colisión binaria. Una simplificación, asumida frecuentemente supuesta para fluidos moleculares, es que las únicas colisiones que son importantes en la evolución dinámica del fluido son las que ocurren entre parejas de moléculas. Esta consideración ciertamente no se cumple en densidades donde las "colas" de los potenciales de las moléculas² vecinas comienzan prácticamente a encimarse. Sin embargo en un fluido con esferas rígidas, debido a la falta de estas "colas", la validez de la hipótesis de colisión binaria se mantendrá válida para cualquier rango de densidades. (En el caso granular el rango de la interacción superficial σ desde luego no es cero, pero es determinada por aspectos de tan pequeña escala como la rugosidad; sin embargo, la relación del rango de interacción con el tamaño del grano es $\sigma/d < 1$. En el caso molecular la relación equivalente es del orden de la unidad). Esta hipótesis, entonces, puede resultar mejor para sistemas granulares que para fluidos moleculares.

² "tails of the molecule potentials".

2.2 EL ESTADO FÍSICO DEL MEDIO.

Además de las consideraciones acerca del estado físico de las partículas, mencionadas anteriormente, se considera además que la densidad volumétrica del medio ρ sea tan grande tal que el promedio de espaciamiento entre granos vecinos " s " sea siempre menor que el diámetro medio " d " del grano. Si " s " es el promedio de separación entre superficies de granos vecinos, como se ilustra en la figura 1 entonces asumimos que

$$s < d \quad (2.1)$$

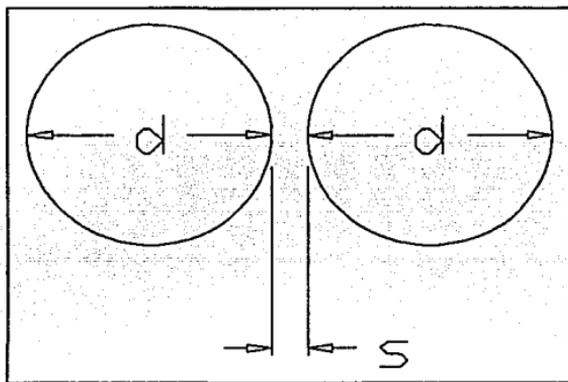


Figura 1. El promedio de separación entre granos vecinos, de diámetro d , se designa como s .

Cuando consideramos la ecuación anterior (2.1) podríamos realizar una simplificación en las ecuaciones del movimiento, la cual resulta del hecho de que la densidad ρ es casi constante. La dependencia de ρ sobre " s " es

$$\rho \sim \frac{m}{(s+d)^3} \quad (2.2)$$

y

$$\rho \sim \frac{m}{d^3} \quad (2.3)$$

si consideramos la condición 2.1. Esto tiene la consideración práctica de que las derivadas de la densidad pueden ser igualadas a cero, con una importante reducción en la complejidad de las ecuaciones.

Por otra parte, podemos anticipar que el proceso de transporte de momentum involucrará una parte de colisión, proporcional a s^{-1} . Debido a que s^{-1} puede variar en un intervalo de entre d^{-1} e infinito y aún así satisfacer la ecuación, es obvio que las propiedades de transporte son muy sensibles a los cambios en s y, así, de la densidad. Las pequeñas variaciones que existen en la densidad ocasionan pequeñas variaciones en los términos de inercia y estos pequeños cambios son críticos para describir el transporte de varias cantidades físicas del medio granular.

Debe también notarse que la ecuación 2.2 es solo cierta en términos de promedio. Esto es, no tiene que existir una relación uno a uno entre el parámetro de espaciado " s " y la densidad ρ . Para altas densidades la manera en que el grano se compacta influirá en la densidad. Con esto, en principio, ρ puede ser descrita como una función tanto de s como de un número de coordinación local " ν ".

Otra consideración importante es que a pesar de que requerimos que ρ sea grande de tal manera que se cumpla que $s < d$, no es posible llegar al límite de $s=0$. En cada colisión ocurrida, por supuesto, la separación entre granos colindantes se vuelve cero; sin embargo " s " en un punto nunca será cero ya que está definida como el promedio de la separación entre granos de una vecindad de ese punto. Si en realidad en cierta porción del volumen $s \rightarrow 0$, entonces la reología del flujo es dominada por esfuerzos únicamente de fricción. Para $s=0$ los granos no perderán contacto entre sí por

largos períodos de tiempo y se deslizan unos sobre otros. Para $s \neq 0$ los granos rebotan continuamente entre sí como moléculas en un fluido. Por supuesto existen situaciones en las cuales la condición de $s=0$ se cumple, por ejemplo en un montón (una pila) de granos en reposo.

Es importante, también, remarcar el papel que juega el fluido intersticial. Estrictamente hablando si consideramos que este no afecta el comportamiento del flujo sería decir que en realidad existe vacío en los intersticios. Sin embargo, los efectos de un fluido intersticial se espera que sean muy pequeños si la viscosidad efectiva, debida a las colisiones grano-grano³, es substancialmente más grande que la viscosidad del fluido intersticial. Para granos lo suficientemente densos, esta condición se cumple cabalmente cuando el fluido intersticial es aire. (Podemos notar que, por el contrario, en ciertos casos el fluido intersticial puede tomar parte importante en la transferencia de momentum, como el caso de lechos fluidizados).

³Suele hacerse una "analogía" entre la colisión entre granos y un coeficiente de viscosidad.

2.3 ASPECTOS SOBRE EL FLUJO DE MATERIALES GRANULARES.

2.3.1 Transferencia de momentum y esfuerzo en materiales granulares.

El esfuerzo generado en un conjunto de partículas sólidas está fuertemente influenciado por la naturaleza del fluido que llena los intersticios. Las partículas reflejan las propiedades reológicas de este fluido, modificado por la suspensión de partículas sólidas. Sin embargo, cuando hablamos de la mecánica de materiales granulares nos referimos, por lo general, a casos en los cuales el esfuerzo influenciado por el fluido es despreciable, y está primordialmente asociado con el contacto entre partículas. Esto es comúnmente considerado cuando el fluido intersticial es un gas. En base a esto podemos decir que los esfuerzos se generan por tres mecanismos:

- (i) transporte de momentum acompañado por *traslación* de partículas, entre capas en movimiento relativo.
- (ii) transporte de momentum por *colisiones* entre partículas de capas en movimiento relativo, y
- (iii) fuerzas entre partículas en los puntos de *contacto sostenido*.

El primer mecanismo, que se asemeja al transporte molecular de momentum en gases, es dominante cuando la fracción volumétrica de sólidos es pequeña. Así cuando la fracción volumétrica de sólidos aumenta, el movimiento de las partículas se vuelve más restringido y los mecanismos segundo y tercero, antes mencionados, son dominantes. El segundo mecanismo es análogo al transporte molecular de momentum en líquidos, pero el tercero no tiene una analogía molecular. Éste difiere de los otros mecanismos en dos importantes caminos: primero, esta asociado con un esfuerzo de fluencia que no desaparece⁴ y, segundo, cuando el material

⁴ "non-vanishing yield stress"

comienza a fluir genera esfuerzos los cuales son independientes de la rapidez de deformación. La fluencia está asociada con el comienzo de deslizamiento en los puntos de contacto de partícula-partícula, y así continua ocurriendo cuando la relación fuerzas tangenciales y fuerzas normales en estos puntos excede el límite de fricción. Debido a que éste límite de fuerzas friccionantes es independiente del rango de deslizamiento en los puntos en contacto, la correspondiente contribución de esfuerzos es independiente de la rapidez de deformación.

Cuando la fracción volumétrica de sólidos es grande, los esfuerzos de contacto donimarán, a baja rapidez de deformación y los esfuerzos de colisión donimarán a altas rapidezces de deformación.

La teoría de los esfuerzos de contacto o de fricción tiene su origen en la mecánica de suelos y puede atribuírsele a Coulomb [5], quien fue el primero en tratar al material granular como un medio continuo que fluye debido a corte en planos donde el esfuerzo cortante T alcanza un valor relacionado con el esfuerzo normal N por:

$$T = N \cdot \tan\theta + c \quad (2.4)$$

donde θ y c son parámetros característicos del material. Cuando c es positiva se dice que el material es cohesivo. Hablaremos solo de sistemas no-cohesivos, en los cuales considera $c=0$. El símbolo θ es el ángulo natural de reposo del material.

La relación de Coulomb (ecn. 2.4) es empírica, y el desarrollo subsecuente de la teoría ha continuado en este camino, complementando correlaciones empíricas de fluencia con relaciones constitutivas empíricas para el movimiento después de la fluencia. Por otra parte, la teoría de la transferencia de momentum de traslación y colisión se ha desarrollado mucho más recientemente y está fundamentada en la teoría cinética. Esta comienza de un

punto de vista microscópico del material como un conjunto de partículas.

2.3.2 Esfuerzos de Fricción.

El criterio de fluencia de Coulomb para un plano cortante es equivalente a la proporción entre los esfuerzos principales.⁵

$$\frac{\sigma_{maj}}{\sigma_{min}} = \frac{1 + \text{sen}\theta}{1 - \text{sen}\theta} \quad (2.5)$$

y así podemos construir un sector de fluencia ("yield locus")⁶ en el plano de los esfuerzos principales, que consiste en un par de líneas rectas que parten del origen, como se ve en la figura 2. Entonces la región asegurada corresponde al comportamiento elástico, mientras la fluencia ocurre bajo la acción de esfuerzos correspondientes a puntos en las líneas.

Las pruebas de fluencia son llevadas a cabo tanto en un aparato plano-cortante, como en el medidor de Jenike, o por el llamado método triaxial [13]. El punto de fluencia, determinado por una combinación de estos métodos, no corresponde muy cercanamente a la forma de Coulomb (ecn. 2.2) y depende fuertemente del grado de compactación al cual el material ha sido sometido. Formas típicas de esto se muestran en la figura 2, la cual muestra un diferente sector de fluencia para cada valor de fracción volumétrica de sólidos v . Estos están dibujados como ciclos cerrados, pero para grandes valores de compactación v bajo esfuerzo isotrópico, que corresponde al punto donde el sector cruza la diagonal principal, requiere de esfuerzos muy grandes y las

⁵ El tensor de esfuerzos (σ) sigma será definido como positivo en el sentido de compresión.

⁶ Denominamos sector de fluencia o "yield locus" al conjunto de puntos que dada la combinación de esfuerzos principales producen que el material granular fluya.

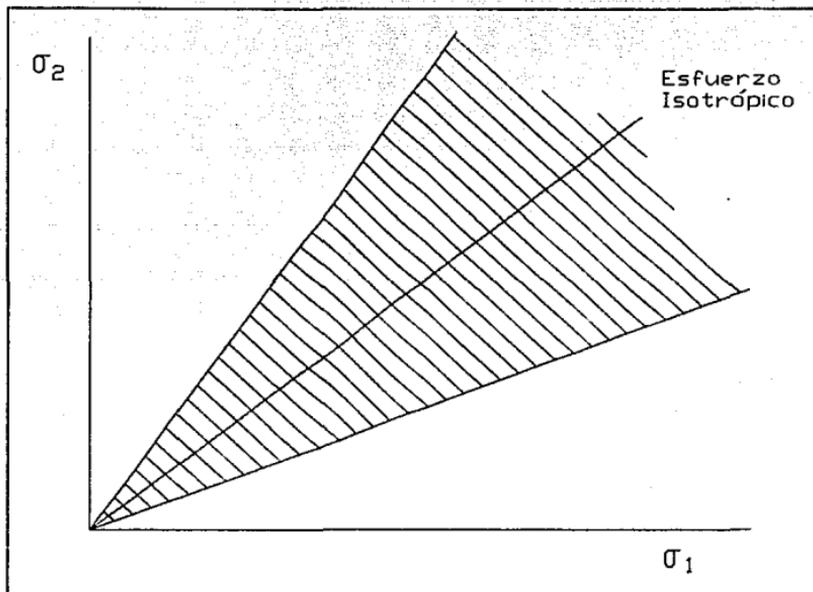


Figura 2. Sector de fluencia de Coulomb en el plano de esfuerzos principales.

partículas pueden quebrarse antes que dicho punto sea alcanzado. El rápido incremento en el esfuerzo fluencia con el grado de compactación mostrado en la figura 3 es una propiedad característica de los materiales granulares.

Un segundo aspecto importante fue reconocido, muy temprano, por Reynolds [25], quien notó que la densidad volumétrica del material cambiaba mientras este se deformaba. Específicamente, observó dilatación, pero ambas dilatación y compactación pueden ocurrir dependiendo de los valores relativos de los esfuerzos principales y de la densidad volumétrica. Puesto que el cambio en la densidad volumétrica está acompañado por un cambio en la

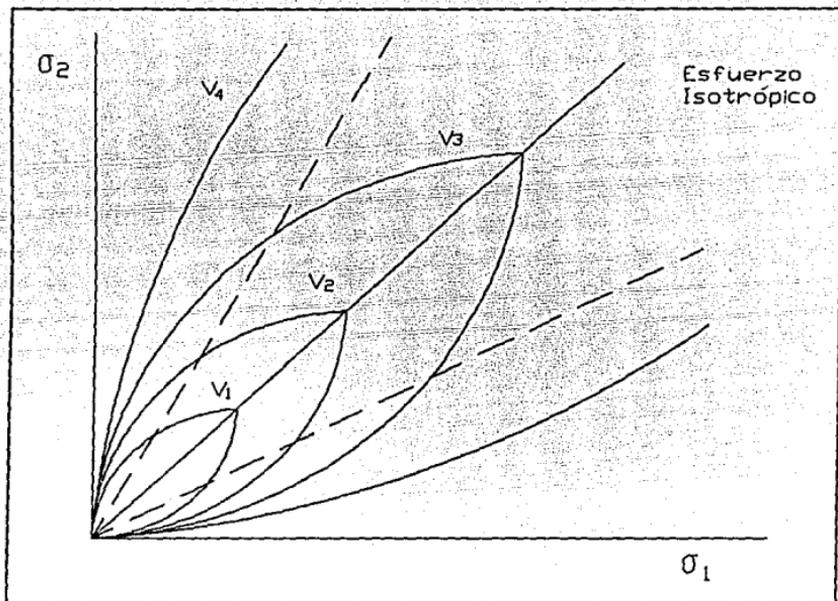


Figura 3. Sector de fluencia en el plano de esfuerzos principales para varias fracciones volumétricas de sólidos (resultados experimentales).

"fortaleza"⁷, un material granular puede también "reforzarse" o "debilitarse", durante la deformación. La deformación de un material de baja densidad volumétrica bajo cargas relativamente altas esta acompañada por una compactación y por un reforzamiento, mientras que la deformación de materiales con gran densidad volumétrica bajo cargas relativamente bajas esta acompañada por dilatación y un debilitamiento.

⁷"Fortaleza" entendida como una cierta manera de medir la compactación.

Las teorías constitutivas para esfuerzos friccionantes caen en dos clases principales. La primera, que está basada directamente en la teoría de Coulomb, pretende representar la deformación del material como una superposición de rotaciones y planos cortantes en aquellas superficies donde la relación entre esfuerzo tangencial y esfuerzo normal ha alcanzado el valor límite de $\tan \theta$ prescrito por la condición de fluencia de Coulomb⁸. Los cambios en la densidad volumétrica durante la deformación no aparecen como una consecuencia natural de este tipo de teoría, pero pueden ser incluidos suponiendo que el "corte" sobre cada plano deslizando está acompañado por una expansión o contracción en una dirección normal al plano.

En contraste con esto, los cambios en la densidad volumétrica durante la deformación son un aspecto inherente en las teorías del segundo tipo, basadas en la teoría de la plasticidad. Es estas, la proporción entre el tensor de deformación y el tensor de esfuerzos están relacionados por la regla del flujo potencial plástico [6], el cual puede ser formulado como sigue en términos de sector de fluencia en el plano de esfuerzos principales.

- (i) Los ejes principales de rapidez de deformación están alineados con los del esfuerzo, con el eje del rango principal de deformación mayor paralelo al eje del esfuerzo principal menor.
- (ii) La relación de rangos de deformación principales es igual a la relación entre los componentes de la "normal hacia adentro"⁹ para el sector de fluencia en el plano de esfuerzos principales.

La figura 2 muestra la normal interior para un sector de fluencia del tipo de Coulomb. De la condición (ii) anterior, la proyección de este vector sobre la diagonal principal es

⁸Teorías de este tipo fueron iniciadas por Mandel de Jong, con desarrollos posteriores de Spencer, Mandl y Luque, de Jong y Mehrabadi y Cowin.

⁹"inward normal" : normal hacia adentro.

proporcional a la traza del tensor rapidez de deformación; esto es, que es proporcional a la divergencia del campo de velocidades. Debido a que esta proyección es siempre positiva, nos lleva a que la fluencia esté siempre acompañada por una dilatación del material, contrario al comportamiento observado en el que se observaba compactación o dilatación. Y además la disipación de calor por fricción en un material de Coulomb es cero, lo que se contrapone con la idea de deslizamiento friccionante.

Un método para resolver todas estas dificultades fue sugerido por la escuela de mecánica de suelos de Cambridge¹⁰ [29]. Este método reconoce que la fortaleza del material granular debe representarse por un parámetro único de superficies de flujo, uno para cada valor de fracción volumétrica de sólidos, como se mostró en la figura 2. Una parte de este parámetro se muestra en la figura 3, donde se dibujaron normales interiores en tres posiciones. Sus proyecciones sobre la diagonal principal son positivas para n_1 , negativo para n_2 y cero para n_c . Por esto cuando el flujo se produce en 1 en material se dilata, en el punto 2 se comprime, mientras que en el punto C se deformará sin un cambio en el volumen. Se acostumbra llamar al punto C como "estado crítico". Además existe otro estado crítico en C', con los esfuerzos mayor y menor intercambiados. Por esto el sector de fluencia está dividido en dos partes por los estados críticos; una parte "dilatante" entre los estados críticos y el origen, y una parte "compactante" más allá de los estados críticos. En la figura 4 el lugar donde se localizan los estados críticos es mostrado por las líneas punteadas.

El efecto del comportamiento descrito es mover rápidamente al material hacia un estado crítico cuando este se deforma, y así, para materiales en deformación continua puede ser una buena aproximación suponer que estos se encuentran siempre cerca de su estado crítico. Esto significa que el punto que representa los

¹⁰ siempre y cuando el material se mantenga en el rango donde cumpla con la regla del flujo potencial plástico.

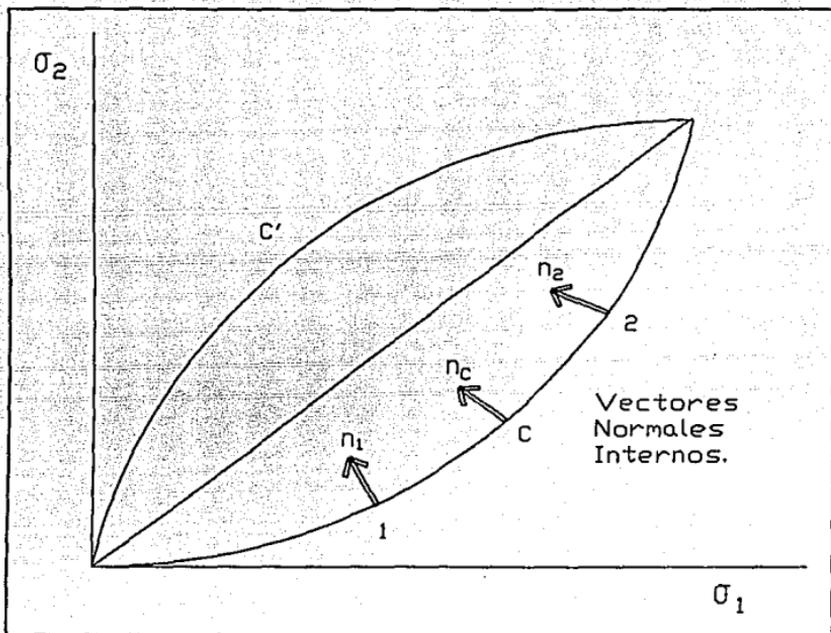


Figura 4. Regla del flujo potencial plástico en relación al sector de fluencia.

esfuerzos principales se encuentra cerca del sector de estados críticos, así que suponiendo este sector como un par de líneas rectas, como se indica en la figura 3, puede asegurarse que los esfuerzos satisfacen la condición de Coulomb, con una buena aproximación, durante deformación continua.

2.3.3 Esfuerzos por colisión y traslación.

Así como el mecanismo de transferencia de momentum por colisión y traslación es similar al de transferencia molecular de momentum en fluidos, no existe una analogía para la agitación térmica. Para un conjunto de partículas, los componentes aleatorios de la velocidad de las partículas son generalmente debidos a colisiones causadas por la misma deformación, las cuales decaen rápidamente cuando la deformación cesa.

Los primeros estudios sobre esfuerzos de colisión fueron realizados por Bagnold [2], el cual midió los esfuerzos normales y tangenciales generados en un aparato de Couette por una suspensión de igual densidad de partículas sólidas grandes. Si bien la viscosidad del fluido juega una parte muy importante a baja rapidez de corte, Bagnold identificó un "régimen de inercia de los granos" a altas rapidezces de corte, en el cual la transferencia de momentum debido a las colisiones entre partículas fue la mayor contribución al esfuerzo. Bagnold puntualizó que la frecuencia de colisiones y la transferencia de momentum por colisiones entre partículas de capas adyacentes eran proporcionales a la rapidez de corte. Así, los esfuerzos normales y de corte deberían estar generados, de acuerdo con sus observaciones experimentales, con una magnitud proporcional al cuadrado de la rapidez de corte. [19]

Posteriormente McTigue elaboró este argumento para crear relaciones constitutivas para formas generales de deformación. Los modelos de McTigue muestran la dependencia cuadrática del esfuerzo a la rapidez de deformación en un plano cortante, pero la magnitud de los esfuerzos predichos es mucho menor que la observada por Bagnold y su dependencia en la fracción volumétrica de sólidos no está bien representada. McTigue ignoró la componente fluctuante de la velocidad de la partícula, pero fue introducida, empleando argumentos de la teoría cinética, por Savage y Jeffrey [28], quienes fueron capaces de explicar mejor los resultados de Bagnold.

Un avance mayor en la teoría de esfuerzos por colisión fue reconocer que el valor cuadrático promedio $\langle c^2 \rangle$ de las fluctuaciones de la velocidad de la partícula σ , análogamente, una "temperatura de partícula" T_p , definida por $T_p = \frac{1}{2} \langle c^2 \rangle$ estaría propiamente determinado por una "Ecuación de Energía Pseudo-Térmica" la cual complementa las ecuaciones de continuidad y momentum. Esta es una ecuación de balance de la energía de las fluctuaciones aleatorias, pero a diferencia de la ecuación de la Energía Térmica de la mecánica de fluidos molecular, ésta contiene un término de disipación que cuenta en la degradación de ésta energía en energía térmica verdadera como resultado de las colisiones inelásticas entre partículas. Esta idea fue desarrollada independientemente por Jenkins y Savage [15] y por Haff [9] basándose formalmente en la teoría cinética aplicada a partículas cuasi-elásticas y más tarde argumentándola intuitivamente con la teoría cinética de líquidos.

Las ecuaciones propuestas son las mismas en ambos casos. La ecuación de continuidad:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (2.6)$$

y la ecuación de momentum para el movimiento:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (2.7)$$

y la ecuación de energía "pseudo-térmica" que tiene la forma siguiente cuando se escribe en términos de T_p :

$$\frac{3}{2} \rho \frac{DT_p}{Dt} = \boldsymbol{\sigma} : \nabla \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{q} - \gamma \quad (2.8)$$

en estas ecuaciones:

$$\rho (= \rho_p v) \quad (2.9)$$

ρ denota la densidad volumétrica del material, \mathbf{u} es la velocidad local promedio de las partículas, v es la fracción volumétrica de

sólidos, g es la fuerza gravitacional específica, q es el vector de flujo de la energía pseudo-térmica, γ y el rango de conversión de esta energía por colisiones inelásticas en energía térmica verdadera. Ambos autores suponen que el esfuerzo está relacionado con la rapidez de deformación por:

$$\sigma = [p - (\kappa - \frac{2}{3}\mu) \text{tr}D] I - 2\mu D \quad (2.10)$$

mientras que el flujo de energía es proporcional al gradiente de temperatura de la partícula:

$$q = -k \nabla T_p \quad (2.11)$$

Estas dos teorías difieren únicamente en las expresiones constitutivas que proponen para p , k , μ , κ y γ , que se presentan en la tabla 1.

Notamos, en principio, que las expresiones de Jenkins & Savage están más precisamente definidas, pues contienen solo un parámetro sin especificar que llaman α . Notemos también que las expresiones de Haff omiten el término $\text{tr}p$ de los balances de momentum y energía, lo cual es justificable para conjuntos de partículas de alta densidad. Otra ligera diferencia es la aparición de un factor $1+\epsilon$ en la expresión de Jenkins & Savage para k , el cual no se presenta en la expresión de Haff. En forma similar un factor $1+\epsilon$ aparece en la expresión de Haff para γ . Esto no se considera como una discrepancia importante.

La mayor diferencia entre ambos puntos de vista se observa en la manera en que las distintas cantidades dependen de v . La expresión de Haff para k contiene un factor, $1/(v_0 - v)$, donde v_0 es conocido como el valor de fracción volumétrica al cuál las partículas se mantienen en contacto permanente, tal que las colisiones difícilmente ocurren. Debido a que p , μ , κ y γ contienen k como un factor, el esfuerzo por colisiones crecerá sin límite a

Tabla 1. Relaciones Constitutivas para Esfuerzos de Colisión.

- Modelo de Jenkins & Savage.

$$\kappa = 2\rho_p v^2 g_o(v) d(1+e) \sqrt{\frac{T_p}{\sigma}}$$

$$\rho = \kappa \sqrt{\frac{\pi T_p}{d}}$$

$$\mu = \frac{1}{3} \kappa (2 + \alpha)$$

$$\kappa = \frac{3}{2} \mu$$

$$\gamma = \frac{(1-e)}{2d^2} [12\kappa T_p + (3\pi - 4\alpha) \kappa d \sqrt{\left(\frac{T_p}{\sigma}\right) \pi r D}]$$

- Modelo de Haff.

$$\kappa = \frac{3\sqrt{3}\pi r \rho_p v_o^2}{(v_o - v)} d \sqrt{\frac{T_p}{\sigma}}$$

$$\rho = \kappa \sqrt{\frac{\pi T_p}{d}}$$

$$\mu = q\kappa$$

$$\kappa = \frac{2}{3} \mu$$

$$\gamma = \omega (1-e^2) \kappa \frac{T_p}{\sigma^2}$$

$\alpha, r, \epsilon, q, \omega$ = constantes dimensionales de orden unitario.

$$g_o(v) = \frac{1}{1-v} + \frac{3v}{2(1-v)^2} + \frac{v^2}{2(1-v)^3}$$

v_o = fracción volumen de sólidos mínima.

e = coeficiente de restitución

d = diámetro de la partícula.

medida que $v \rightarrow v_0$, y al mismo tiempo que $T_p \rightarrow 0$. Por esto, las expresiones constitutivas de Haff aseguran que la energía cinética de las fluctuaciones se vuelve despreciable cuando la compactación es lo suficientemente densa para forzar a las partículas a permanecer en contacto permanente. Por el contrario, la expresión de Jenkins & Savage puede ser evaluada formalmente a valores de v mucho más grandes que los geoméricamente correspondientes a una compactación elevada, y no contiene algún aspecto para distinguir el punto de más alta compactación.

Las ecuaciones anteriores pueden ser resueltas con la conjunción de las adecuadas condiciones de contorno. En superficies de contorno sólidas existen dos condiciones además de la condición cinemática de velocidad normal igual a cero. La velocidad tangencial u y su derivada normal du/dy , evaluadas en la pared, deberá estar relacionada con

$$u(0) - u_w = a \frac{d}{d\phi} \left(\frac{du}{dy} \right)_0 \quad (2.12)$$

donde u_w es la velocidad de la pared. Aquí a es un factor adimensional de orden de la unidad, mientras ϕ es un número entre cero y uno el cual mide la reflexión de partículas que colisionan en la pared. $\phi=0$ corresponde a una reflexión perfecta y $\phi=1$ se refiere a una reflexión difusa. Existe también una condición de contorno para el flujo de energía que se supone de la forma

$$T_p(0) = \frac{bd}{(1 - e_w^2)} \cdot \left(\frac{dT_p}{dy} \right)_0 \quad (2.13)$$

donde b es un factor adimensional de orden unitario y e_w es el coeficiente de restitución por colisiones entre partículas y la pared.

2.3.4 Combinación de los esfuerzos de Colisión-Traslación y los de Fricción.

Problemas de plano cortante, tanto como flujo entre placas paralelas o flujo completamente desarrollado por gravedad en un plano inclinado, han sido resueltos por varios autores, tomando en cuenta únicamente los esfuerzos de colisión.

Existen cierto tipo de problemas en los cuales no cabe la menor duda de que los esfuerzos dominantes son de tipo friccionante, tales como descarga de materiales a través de toberas, con alta densidad y deformación lenta. Varios autores han resuelto distintos problemas tomando en cuenta únicamente los esfuerzos de colisión, sin embargo es difícil encontrar un problema en el que claramente estos esfuerzos sean los dominantes.¹¹ La compactación del material debida tan solo a su propio peso es suficiente para asegurar que los esfuerzos por fricción son significativos, si no son parte dominante del esfuerzo total. Podríamos decir que resultados experimentales para una condición en la cual los esfuerzos de traslación-colisión sean dominantes solo podría lograrse en un ambiente sin gravedad.

Con el fin de tratar con problemas más cercanos a la realidad, como flujos cortantes rápidos, es necesario incluir ambas partes del esfuerzo: fricción y colisión-traslación. Sin embargo, como hemos podido observar, las teorías de estas dos partes que forman parte del esfuerzo son muy distintas en su naturaleza y planteamiento; por esto no está del todo claro como es que podrían ser combinadas. Una primera formulación a este respecto fue hecha por Savage, quien supuso que el tensor total de esfuerzos era la simple suma de las contribuciones de fricción y colisión,

¹¹ Solo en una dispersión de partículas en caída libre podemos asegurar que los esfuerzos de traslación-colisión son los dominantes.

$$\sigma = \sigma_f + \sigma_c \quad (2.14)$$

con

$$\sigma_f = \sigma_o I - \sigma_o \cdot \text{sen} \theta \frac{D}{\sqrt{[\frac{1}{2} tr(DD)]}} \quad (2.15)$$

y asumiendo que

$$\sigma_c = [p - (\kappa - \frac{2}{3}\mu) trD] \cdot I - 2\mu D \quad (2.16)$$

que es la forma propuesta por Jenkins-Savage comentada anteriormente.

La idea de simplemente sumar las contribuciones de fricción y colisión puede ser lo suficientemente razonable, debido a que los esfuerzos de fricción tienen la capacidad "llenar el hueco"¹² entre la contribución por colisión y el esfuerzo aplicado, como ocurre con la presión hidrostática en un fluido.

¹² "Take up the slack".

2.4 CONSIDERACIONES TEÓRICAS EN EL MODELADO DEL FLUJO GRANULAR DENTRO DE UN SILO.

Los puntos anteriores nos dan una base formal para el entendimiento general del flujo granular. Sin embargo en un problema particular podemos asumir ciertas suposiciones con el fin de simplificar el problema.

En el caso del flujo granular dentro de un silo los esfuerzos predominantes son de fricción, debido a que en general el flujo es de una manera lenta. Podemos decir que las colisiones que ocurren entre granos son relativamente pocas y de poca importancia, por lo tanto podemos despreocuparnos de los esfuerzos por colisión. De esta manera tomaríamos tan solo las suposiciones de Coulomb, logrando así una notable reducción en la complejidad del problema teórico.

Podemos considerar además que a las partículas del material granular como incompresibles, y que el material se encuentre todo el tiempo cerca de su estado crítico, por tanto en éste la variación de la densidad debida al esfuerzo promedio será despreciable.

La geometría de silo propuesta en este trabajo es básicamente de forma hexagonal, la cual podemos simplificar de tal manera a que se acerque a un modelo de "tobera"¹³ en forma de cuña. Problemas similares a este han sido abordado por varios autores. [9,10,14,17,18]

Así el tensor de esfuerzos puede quedar completamente definido por dos cantidades que son el esfuerzo promedio

¹³ hopper.

$$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_{maj} + \sigma_{min}) \quad (2.17)$$

y por un ángulo γ que determina la orientación de los ejes de los esfuerzos principales. γ será medido en la dirección circular en un sistema de coordenadas polares con origen en la intersección de los planos de la tobera. Entonces los componentes del tensor de esfuerzos quedarían como:

$$\sigma_{rr} = \sigma (1 - \text{sen}\theta \cdot \cos 2\gamma)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \sigma (1 + \text{sen}\theta \cdot \cos 2\gamma)$$

y

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma (\text{sen}\theta \cdot \text{sen} 2\gamma)$$

y las ecuaciones del movimiento quedarían:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} = 0 \quad (2.18)$$

$$2 \frac{\partial v_r}{\partial r} \cdot \tan 2\gamma = \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned}
& (1 - \operatorname{sen}\theta \cos 2\gamma) \frac{\partial \sigma}{\partial r} - \operatorname{sen}\theta \operatorname{sen} 2\gamma \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma}{\partial \varphi} + 2\sigma \operatorname{sen}\theta \operatorname{sen} 2\gamma \frac{\partial \gamma}{\partial r} \\
& - \frac{2\sigma}{r} \operatorname{sen}\theta \cos 2\gamma \left(1 + \frac{\partial \gamma}{\partial \varphi}\right) + \rho g \cos \varphi \\
& + \rho \left[v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi^2}{r} \right] = 0 \quad (2.20)
\end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned}
& - \operatorname{sen}\theta \operatorname{sen} 2\gamma \frac{\partial \sigma}{\partial r} + (1 + \operatorname{sen}\theta \cos 2\gamma) \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma}{\partial \varphi} \\
& - 2\sigma \operatorname{sen}\theta \operatorname{sen} 2\gamma \frac{\partial \gamma}{\partial r} - \frac{2\sigma}{r} \operatorname{sen}\theta \operatorname{sen} 2\gamma \left(1 + \frac{\partial \gamma}{\partial \varphi}\right) - \rho g \operatorname{sen} \varphi \\
& + \rho \left[v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + \frac{v_r v_\varphi}{r} \right] = 0 \quad (2.21)
\end{aligned}$$

donde la ecn. (2.18) es la ecuación de continuidad, la ecn. (2.19) es la condición de coaxialidad de los tensores de esfuerzos y de rapidez de deformación, y las ecuaciones (2.20) y (2.21) son las componentes radial y angular del balance de momentum.

Estas ecuaciones son hiperbólicas. En un principio pueden ser integradas a largo de la tobera desde condiciones iniciales en la superficie superior del material granular, complementando estas con las condiciones de contorno en las paredes laterales. En las paredes, la componente normal de velocidad de desvanecerá y la relación entre los esfuerzos normales y tangenciales tomará un valor constante $\tan \delta$, donde δ es el ángulo de fricción deslizante

entre las partículas y la pared. Puede demostrarse que esta segunda condición es equivalente al valor requerido para γ en la pared:

$$\gamma_w = \frac{1}{2} [\delta + \text{sen}^{-1}(\frac{\text{sen}\delta}{\text{sen}\theta})]$$

con

$$0 \leq \text{sen}^{-1}(\frac{\text{sen}\delta}{\text{sen}\theta}) \leq \frac{\pi}{2}$$

La estructura de la solución de este problema fue mostrada por Savage [27], que resolvió el problema más simple considerando paredes perfectamente lisas ($\gamma_w=0$) y cambiando la dirección de la gravedad actuando a lo largo de la dirección radial únicamente. Así la solución es independiente de ϕ y las ecuaciones del movimiento se reducen en una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden de σ . Sin embargo, en un caso más cercano a la realidad la gravedad actúan en forma vertical y las paredes no son perfectamente lisas. A pesar de que existen algunas aproximaciones teóricas y computacionales de la solución de este problema [16,17,18], que es uno de los más básicos en flujo granular, aún no sido completamente resuelto ni siquiera se ha sido completamente entendida su correcta formulación.

CAPITULO 3.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL PARA EL DISEÑO DE UN NUEVO TIPO DE SILO.

3.1 ANÁLISIS REOLÓGICO PRELIMINAR.

UNA PROPUESTA PARA UN NUEVO DISEÑO DE SILO.

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

1. 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, densidad aparente de los granos.

2. Esfuerzos principales en el silo. Cuando el material está en reposo existen presiones y esfuerzos estáticos actuando en las paredes del 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.

3. 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, de tal manera que los esfuerzos debidos a la fricción sean mínimos.

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

3.2 GEOMETRÍA HEXAGONAL.

De acuerdo a los criterios anteriores, y después de un proceso de pre-selección, se sugiere la geometría de sección transversal hexagonal, que se muestra en las figuras 1 y 2.

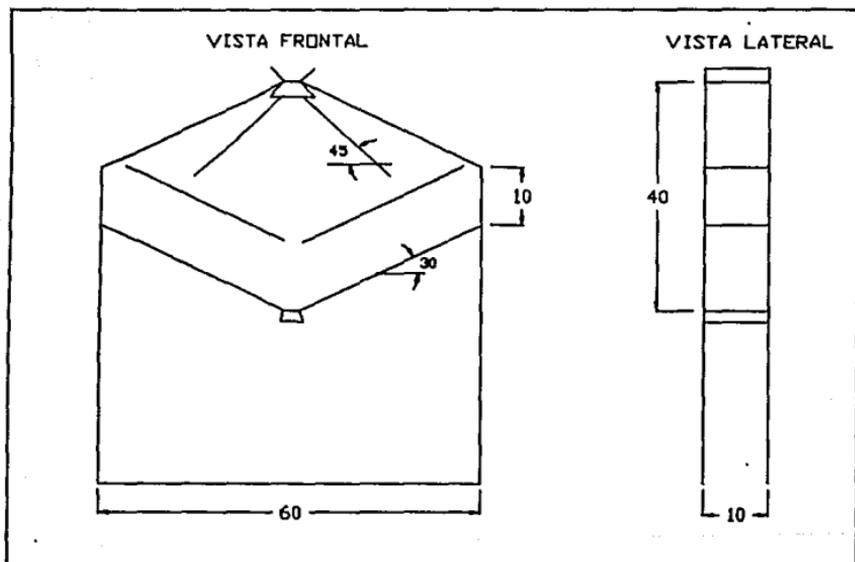


Figura 1. Esquema del Silo Hexagonal.

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

La sección transversal hexagonal está dividida en dos secciones interiores por medio de placas transversales. Estas son

paralelas a las paredes del fondo del silo, a 30° con respecto a la horizontal. El propósito de dichas placas es reducir los esfuerzos entre las paredes y el grano, y asegurar un flujo homogéneo durante los proceso de llenado y vaciado.

La inclinación de las paredes y las placas es de 30° debido a que este valor es ligeramente superior a cualquiera de los ángulos naturales de reposo de las semillas más comúnmente almacenadas en silos. Esto hace que el vaciado ocurra de una manera suave, evitando daños al material. En el llenado, el grano se acomoda de manera natural y sin compactarse demasiado, lo cual es completamente deseable para el almacenamiento de granos.

Esta geometría pretende modificar la idea general de construcción de silos, basándose en algunas consideraciones reológicas simples.

La estructura, la cual puede estar formada por una o varias celdas del tipo antes descrito, esta soportada por paredes laterales. La altura de la estructura podrá permitir el paso de trasportes terrestres por debajo y de recibir los granos durante el vaciado.

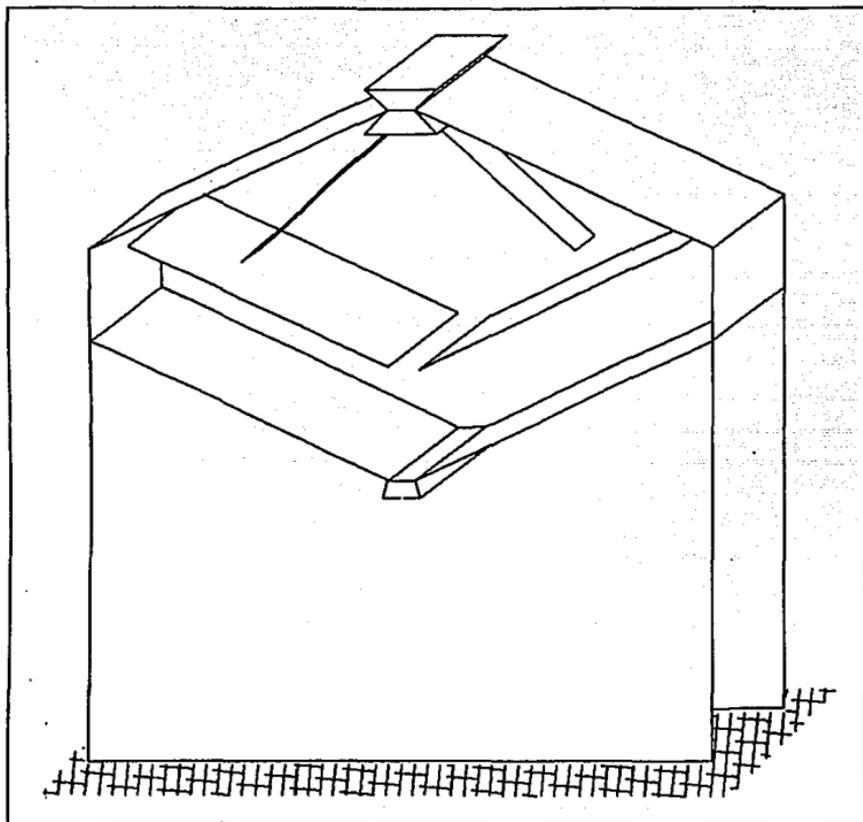


Figura 2. Perspectiva simple del Silo Hexagonal.

3.3 ESTUDIO EXPERIMENTAL.

3.3.1 Diseño e Instrumentación del Modelo Experimental.

Con el fin de determinar las presiones estáticas y los esfuerzos dinámicos en las paredes del silo, se construyó un modelo a escala en acrílico transparente. Cada celda hexagonal es de 40 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 procesos de llenado y vaciado del modelo. 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 granos, fricción en la pared, etc.

El arreglo experimental anteriormente descrito se ilustra en la figura 3.

a. Medición de Presión en el modelo.

La primera parte del arreglo experimental y quizá la más importante es la que corresponde a los transductores de presión. Estos se emplearon pues era el único medio por el cual se puede medir presión en un medio granular.

Estos transductores, de tipo semiconductor, convierten la presión que incide en su membrana sensora en una señal eléctrica (diferencial de potencial). La membrana sensora del transductor está fabricada de un compuesto de silicón. Ésta tiene la propiedad de variar su resistencia eléctrica cuando se le somete a pequeñas deformaciones. Esta membrana, que en realidad son cuatro, está conectada a un circuito "puente de Wheatstone", como se observa en

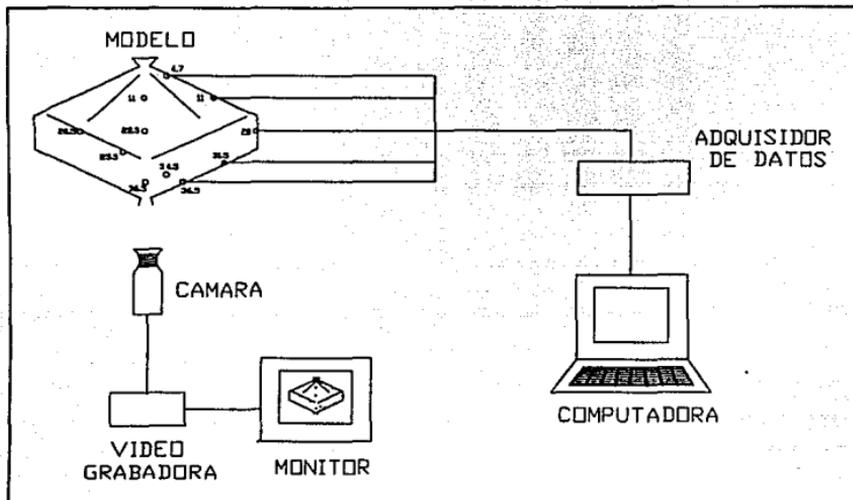


Figura 3. Arreglo experimental.

la figura 4.

El cambio de resistencia eléctrica en los elementos del puente causa un desequilibrio en el circuito, lo cual genera que en la terminales de salida se produzca un cambio de voltaje que es proporcional a la presión aplicada a la membrana sensora.

Los transductores empleados son de tipo comercial, y fueron fabricados por la compañía "Druck Limited".

La calibración de estos se llevo a cabo aplicando una presión conocida a la membrana sensora (columna de agua) y midiendo la respuesta en voltaje en las terminales de salida con una voltímetro. Una curva típica de calibración la podemos ver en la figura 5.

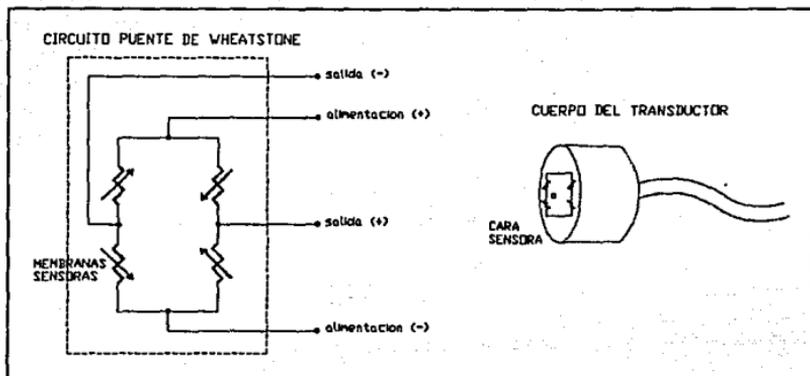


Figura 4. Circuito del transductor de presión.

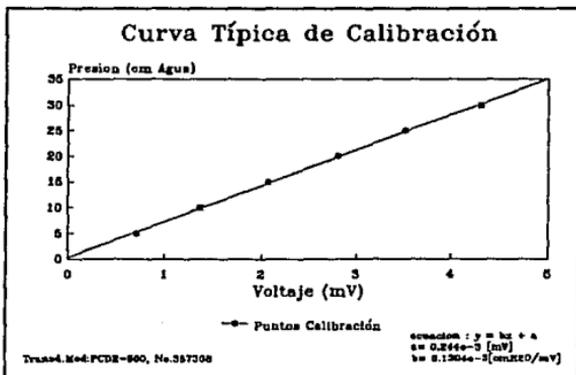


Figura 5. Curva típica de calibración.

b. Sistema de adquisición y almacenamiento de datos.

Una vez calibrados todos los transductores se colocaron en puntos claves en las paredes del modelo, con el fin de monitorear el comportamiento de la presión durante los procesos de llenado y vaciado. Los 11 transductores estaban conectados a un sistema de adquisición de datos Hewlett-Packard 3421A, éste a su vez conectado a una computadora controladora HP mod.85. Cada uno de los transductores se conecta a uno de los canales del adquisidor de datos, que no es más que una multiplexor, es decir un aparato capaz de procesar varias señales simultáneamente. La computadora ordena cada determinado tiempo al adquisidor de datos que lea el voltaje existente en cada una de sus entradas. La lectura de voltaje es procesada dentro de la computadora y aparece en pantalla y/o en papel ya convertida a unidades de presión. Así podemos saber que presión existe en varios puntos clave del silo de manera simultanea.

c. Sistema de video grabación.

Se instaló un sistema de video-grabación enfrente del modelo de acrílico, con el fin de poder observar y analizar varias veces los procesos de llenado y , sobre todo, vaciado del silo. El sistema consistía de una cámara de video y una grabadora convencionales.

d. Materiales experimentales.

Los materiales empleados y sus características principales se muestran en la Tabla 1. Estos se eligieron pensando en conservar lo más cercanamente posible la relación dimensional en un silo de proporciones reales.

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

Las propiedades antes mencionadas se midieron con métodos convencionales.

Tabla 1. Algunas propiedades de los materiales granulares.

MATERIAL	DENSIDAD (gr/cm ³)	TAMAÑO (mm)	ANGULO REPOSO (grados)	FORMA
semillas				
MIJO	0.75	3.0-3.5 (l) 2.0-2.2 (a)	28.5-30	oval
AJONJOLI	0.66	3.0-3.5 (l) 1.8-2.1 (a)	32-34	oval aplanada
AMARANTO	0.86	1.4-1.6 (d)	29-30	esfera aplanada
NABO	0.67	1.4-1.7 (d)	30-31.5	cuasi- esférica
CHIA	0.66	1.8-2.0 (l) 1.1-1.3 (a)	26-28	elíptica
otros materiales				
ARENA	1.53	0.2-0.3 (d)	28-35	irregular
ESFERAS POLIESTIRENO	0.6	0.05-0.1 (d)	25-27	cuasi- esférica

l:largo
a:ancho
d:diámetro

3.3.2 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_m y la presión P_i que el material tendría, a una profundidad dada, bajo condiciones isotrópicas; esto es:

$$P = \frac{P_m}{\rho g \cdot h} \quad (3.1)$$

donde P_m es la presión experimental medida en la pared, a una profundidad específica h medida desde la parte superior del silo, g es la aceleración gravitatoria y ρ es la densidad promedio del material. Este parámetro puede ser graficado en función de un tiempo adimensional dado por:

$$t = \frac{t_m}{T} \quad (3.2)$$

donde t_m 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 traslación 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. Los distintos gastos máxicos para cada material son mostrados en la Tabla 2.

a. Gráficas

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 5 a 19 para varios materiales. Los valores iniciales de P en el tiempo cero representan la distribución de presiones estáticas sobre la pared. Los valores subsecuentes representan las presiones durante el vaciado.

Tabla 2. Gastos para diversos materiales.

MATERIAL	GASTO (gr/s) (promedio)
ESFERAS DE POLIESTIRENO	18.97
ARENA	40.88
MIJO	15.93
NABO	15.78
AJONJOLI	12.67
AMARANTO	23.58
CHIA	15.23

Las figuras 6 a 15 son los valores promedio de decenas de corridas para cada material específico.

Las figuras 16 a 20 son únicamente las presiones máximas obtenidas en los experimentos y son de particular interés para el diseño estructural. 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.

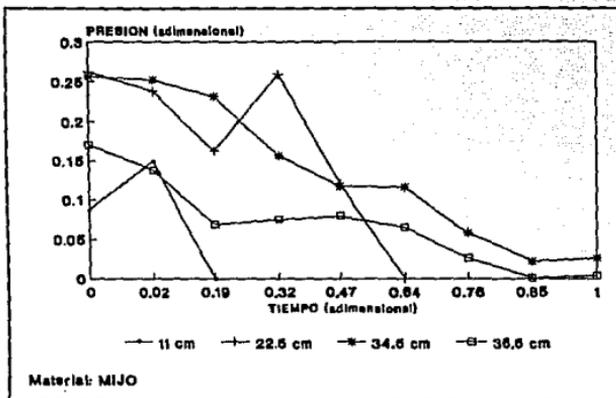


Figura 6. Variación de presión adimensional promedio. Pared frontal.

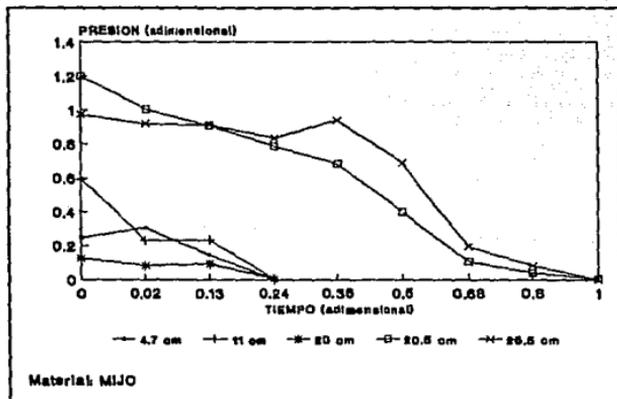


Figura 7. Variación de presión adimensional promedio. Paredes inclinadas.

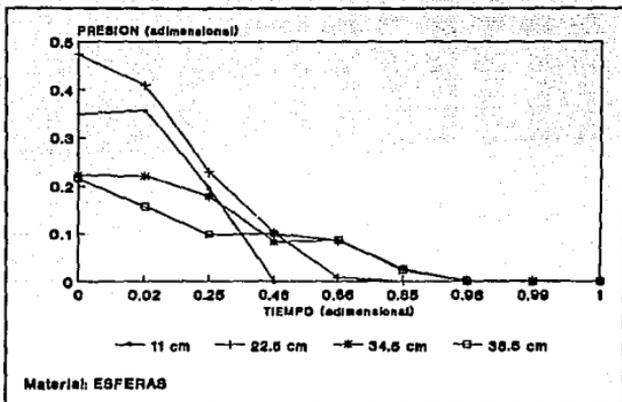


Figura 8. Variación de presión adimensional promedio. Pared frontal.

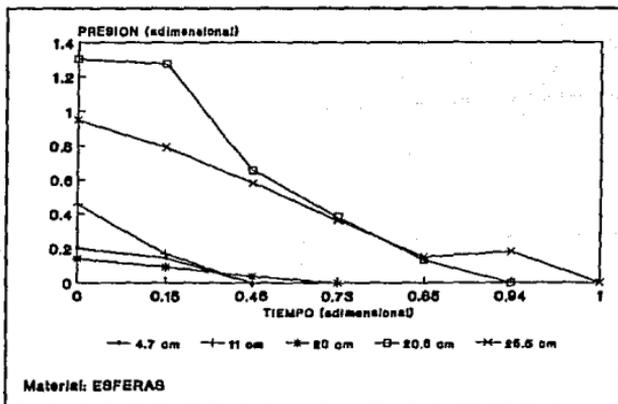


Figura 9. Variación de presión adimensional promedio. Paredes inclinadas.

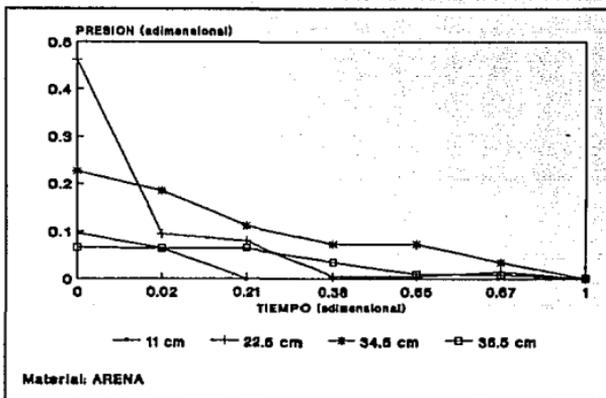


Figura 10. Variación de presión adimensional promedio. Pared frontal.

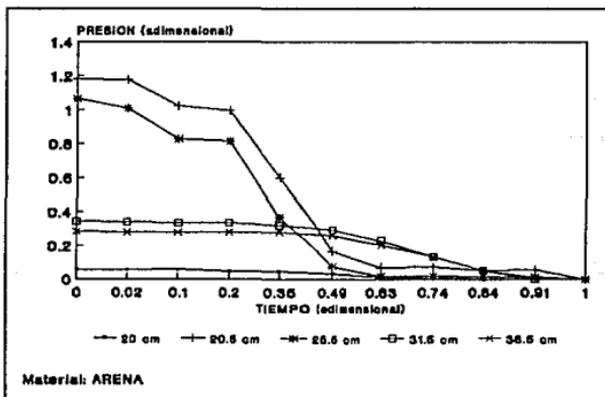


Figura 11. Variación de presión adimensional promedio. Paredes inclinadas.

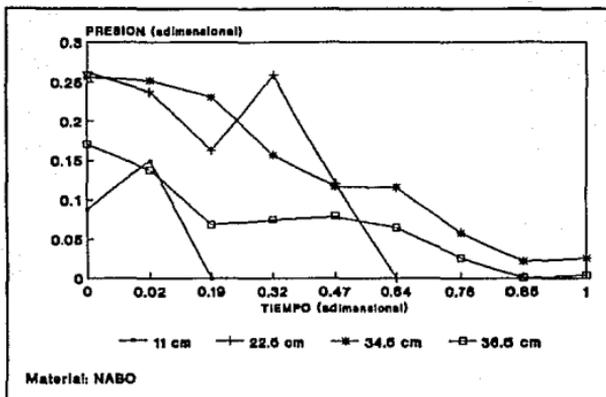


Figura 12. Variación de presión adimensional promedio. Pared frontal.

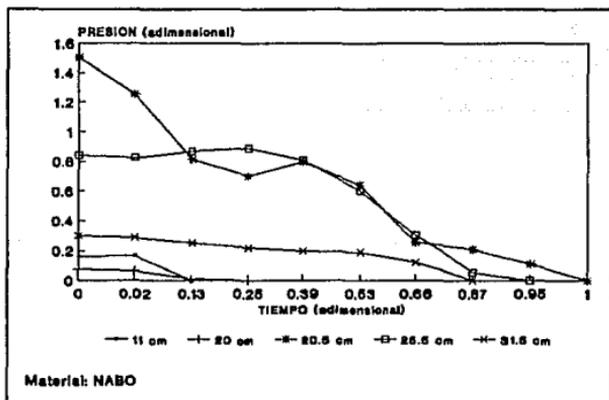


Figura 13. Variación de presión adimensional promedio. Paredes inclinadas.

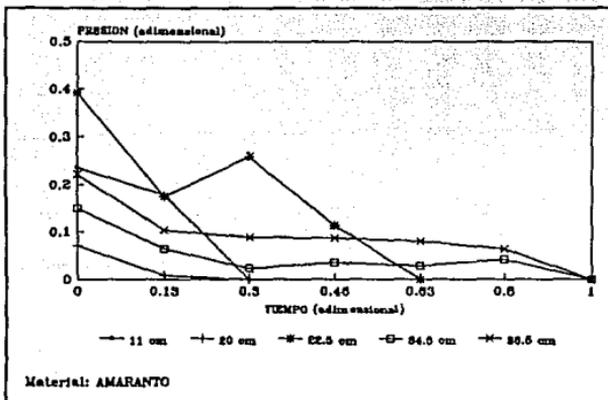


Figura 14. Variación de presión adimensional promedio. Pared frontal.

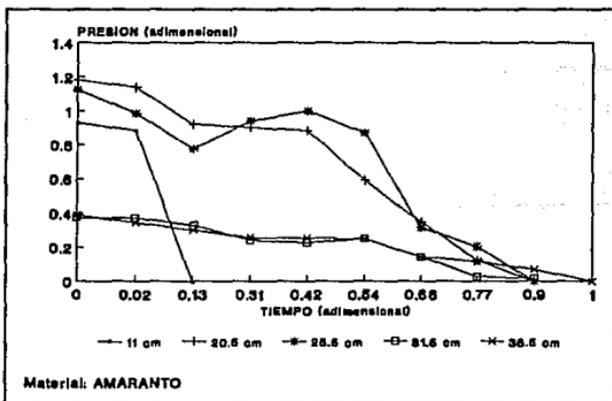


Figura 15. Variación de presión adimensional promedio. Paredes inclinadas.

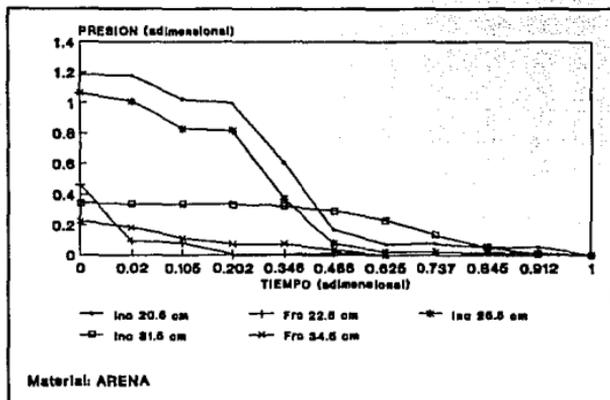


Figura 16. Variación de presiones adimensionales máximas.

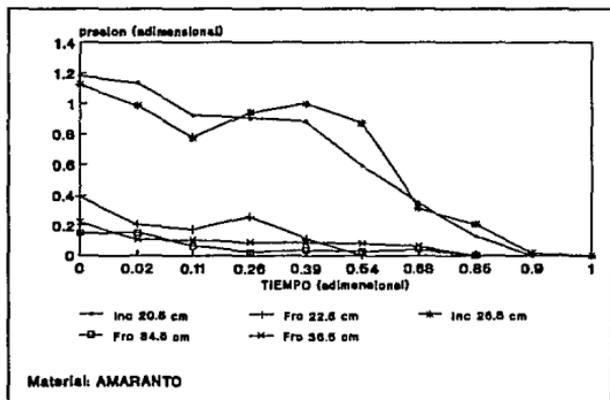


Figura 17. Variación de presiones adimensionales máximas.

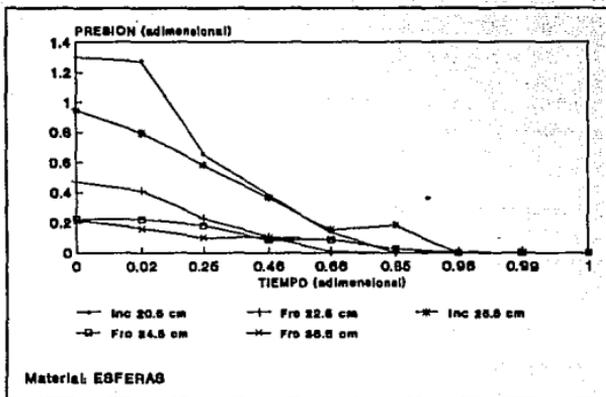


Figura 18. Variación de presiones máximas adimensionales.

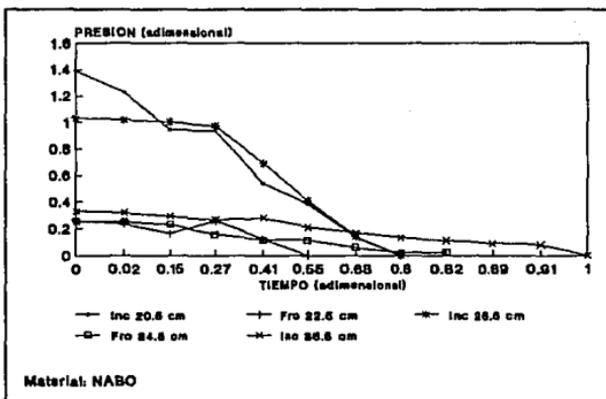


Figura 19. Variación de presiones máximas adimensionales.

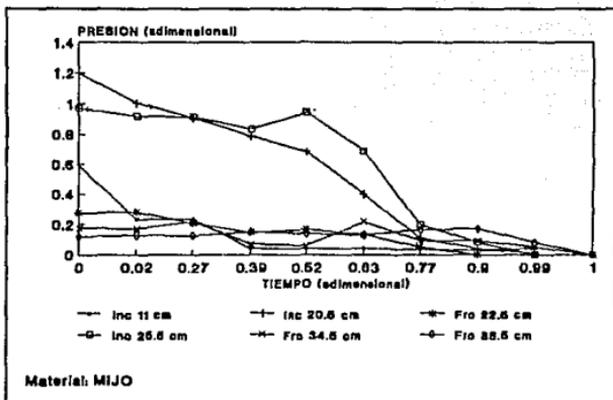


Figura 20. Variación de presiones máximas adimensionales.

b. Proceso de llenado.

Se observó el proceso de llenado del silo hexagonal el cual se muestra en la serie de fotografías I. 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.

c. Procesos 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. 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.

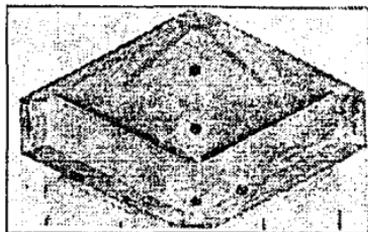


Foto I.a



Foto I.b

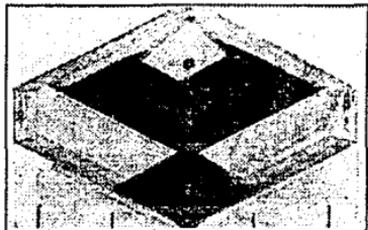


Foto I.c



Foto I.d

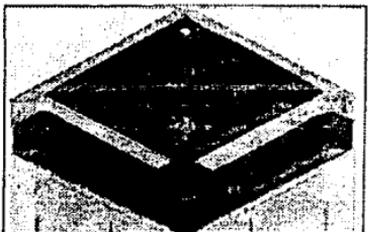


Foto I.e



Foto I.f

Fotografías I. Proceso de Llenado del Silo Hexagonal.

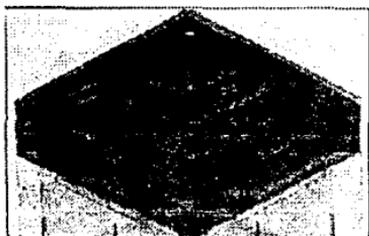


Foto II.a

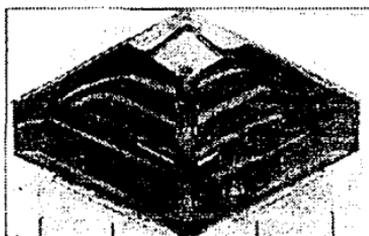


Foto II.b

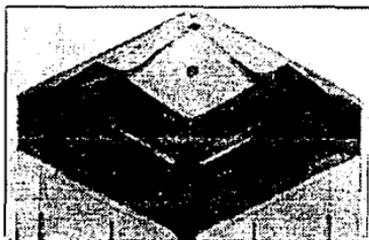


Foto II.c

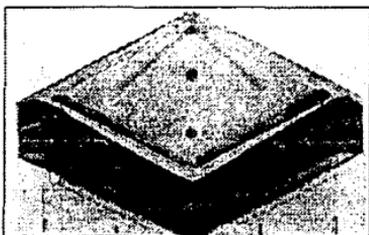


Foto II.d

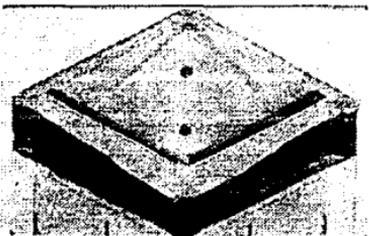


Foto II.e

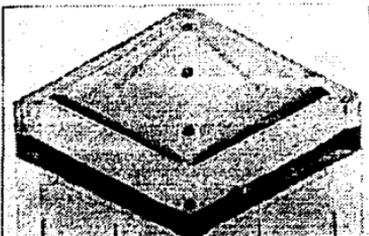


Foto II.f

Fotografías II. Proceso de Vaciado Tipo 1.
Material: Arena.



Foto III.a



Foto III.b

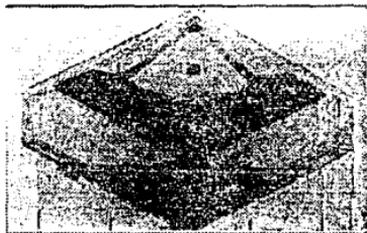


Foto III.c



Foto III.d

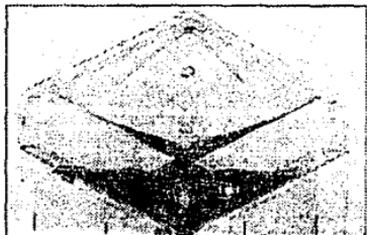


Foto III.e



Foto III.f

Fotografías III. Proceso de Vaciado Tipo 2.
Material: Mijo.

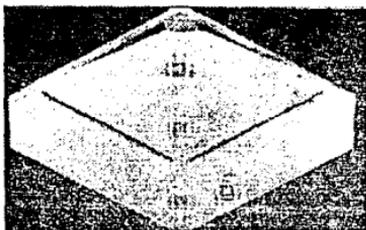


Foto IV.a



Foto IV.b

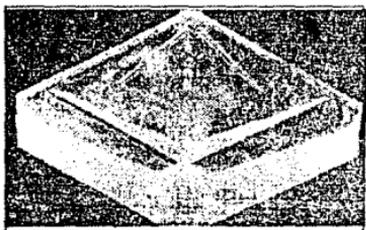


Foto IV.c



Foto IV.d

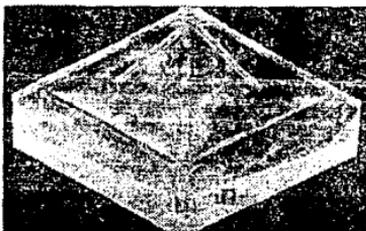


Foto IV.e

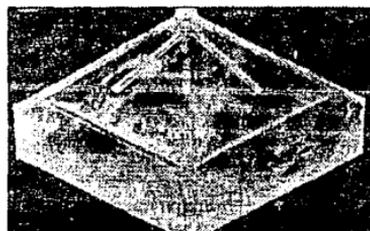


Foto IV.f

Fotografías IV. Proceso de Vaciado Tipo 3.
Material: Esferas de poliestireno.

3.4 COMPARACIÓN CON UN SILO VERTICAL.

El tipo de silo más comúnmente usando es el compuesto de celdas verticales, tanto cilíndricos o de sección transversal cuadrada. Una celda típica de este tipo se muestra en la figura 21.

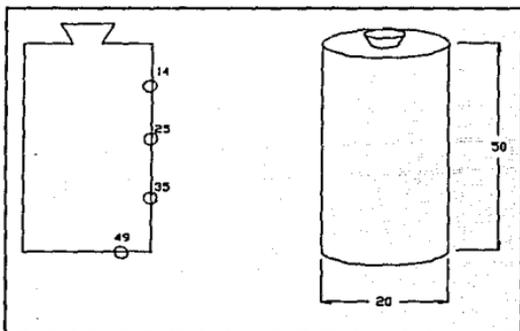


Figura 21. Silo cilíndrico convencional.

3.4.1 Experimentos.

Como se mencionó en el capítulo 1, es bien sabido que en este tipo de silos se presentan sobre-presiones en el vaciado, que son de magnitudes considerablemente mayores a las estáticas. Con el fin de cuantificar la magnitud de estas sobre-presiones y como un ejemplo ilustrativo, se efectuaron pruebas experimentales para un silo vertical de sección circular de similares características de almacenamiento. Para esto se preparó un modelo de acrílico preparado de manera similar al del silo hexagonal, de 20 cm de diámetro y 50 cm de alto. Se colocaron 4 transductores de presión a lo largo de la pared del silo y en el fondo del mismo con el fin

de monitorear la variación de presiones en el proceso de vaciado. Se instaló el mismo sistema de adquisición de datos y video que en el modelo hexagonal (Figura 22). Se probó con los mismos materiales y métodos que en el caso anterior. Pudo observarse que, como se cita en la literatura, los esfuerzos dinámicos pueden alcanzar varias veces el valor del esfuerzo estático. Esto ocurrirá simultáneamente en dos diferentes profundidades en el silo: cerca del fondo y en la mitad. Estos indudablemente causarían fractura.

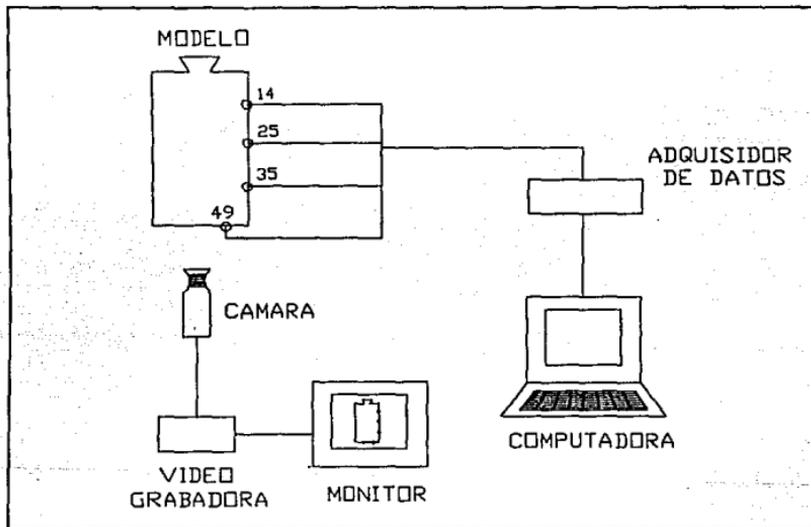


Figura 22. Arreglo experimental para el silo cilíndrico.

2. Resultados en el Silo Cilíndrico.

a. Gráficas

Los resultados se graficaron empleando los mismos parámetros dimensionales citados anteriormente.

La figura 23 muestra una gráfica típica P vs. t para amaranto. Pueden observarse algunas sobrepresiones durante la descarga. Estos casos, en particular, pueden alcanzar hasta tres veces el valor de la presión estática en la mitad superior del silo.

Las figuras 24 a 26 muestran los resultados para diversos materiales.

En la figura 26 cabe mencionar que la sobre-presión aparecida es del orden de seis veces el valor estático en la mitad del silo. El material usado en dicho caso el Mijo.

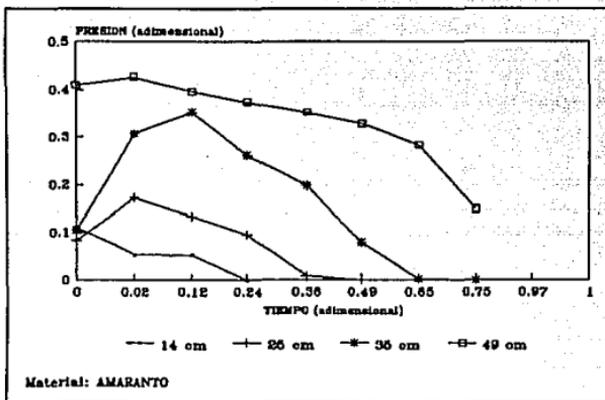


Fig. 23. Variación de presiones adimensionales promedio. (silo cilíndrico).

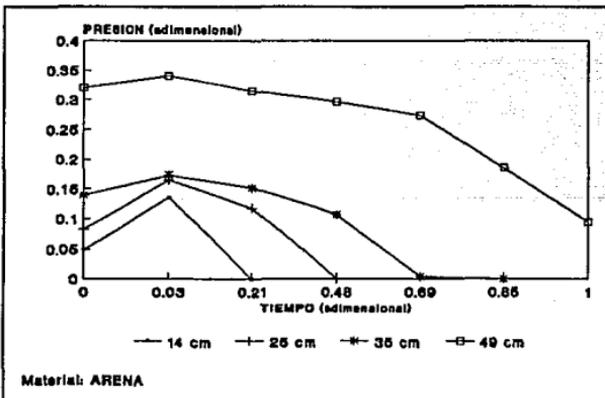


Fig. 24. Variación de presiones adimensionales promedio. (silo cilíndrico)

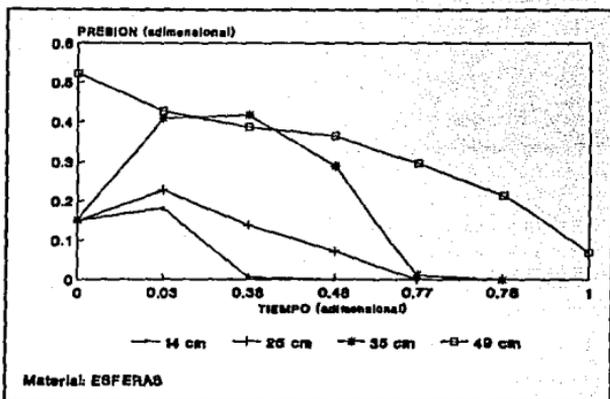


Fig. 25. Variación de presiones adimensionales promedio. (Silo Cilíndrico).

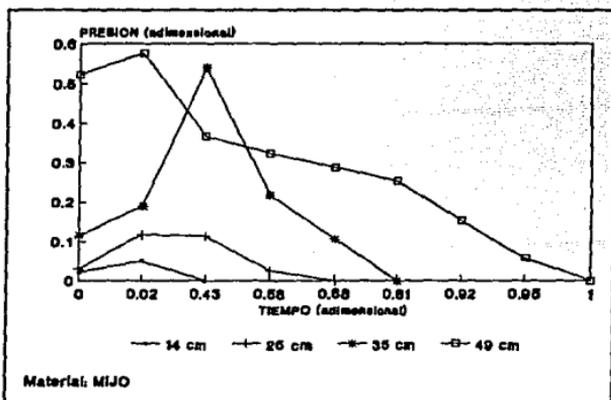


Fig. 26. Variación de presiones adimensionales promedio. (silo cilíndrico).

b. Procesos de Vaciado.

A manera de comparación se muestra el proceso de vaciado en un silo vertical. En el primer caso, (fotografías V), el vaciado se realiza en forma de embudo hacia la tobera de descarga, con movimiento de todo el material como una sola masa. El perfil de velocidades en la pared es prácticamente plano como si no existiera fricción en la paredes (los materiales granulares finos como el arena, se comportan de esta manera). En este caso los esfuerzos extras se presentan en la mitad superior del silo.

Un segundo procedimiento de vaciado se muestra en las fotografías VI. Aquí el perfil de velocidades en la pared adopta una forma cuasi-parabólica con esfuerzos máximos en las paredes. En realidad, la situación es similar al flujo de fluido a través de una contracción u orificio. Para este tipo de vaciado los mayores esfuerzos se presentan en las paredes la mitad inferior del silo.

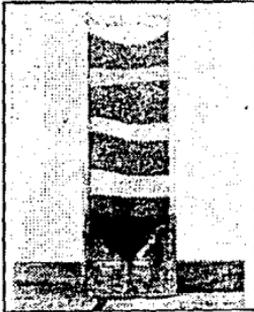


Foto V.a

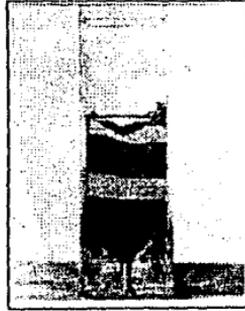


Foto V.b



Foto V.c



Foto V.d



Foto V.e



Foto V.f

Fotografías V. Proceso de Vaciado Tipo 1. Material: Arena.

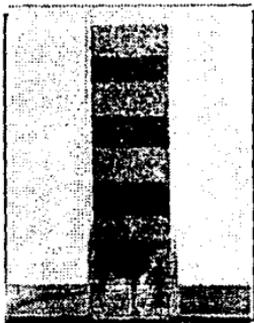


Foto VI.a

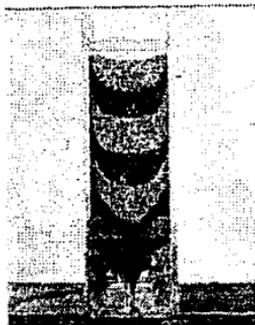


Foto VI.b

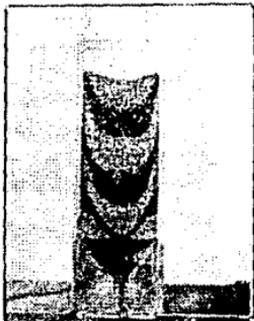


Foto VI.c

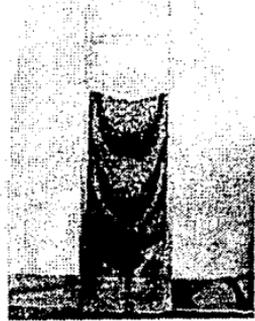


Foto VI.d

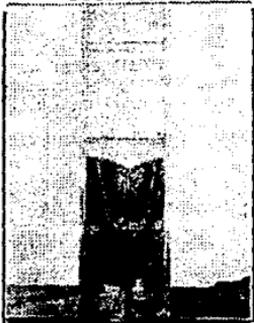


Foto VI.e

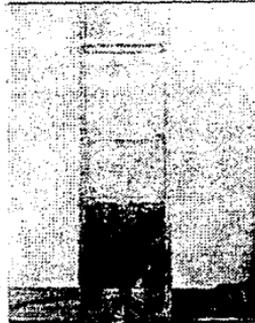


Foto VI.f

Fotografías VI. Proceso de Vaciado Tipo 2. Material: Mijo.

CONCLUSIONES

A. CONCLUSIONES GENERALES.

Se realizó una investigación acerca del almacenamiento de granos y semillas. Esta investigación puso de manifiesto la necesidad del empleo de nuevas disciplinas científicas, en este caso la Reología, con el fin de mejorar el funcionamiento y diseño de almacenes de grano.

A pesar de que los estudios reológicos previos han sido enfocados al análisis cinemático y dinámico del flujo granular y a la creación de ecuaciones constitutivas para materiales granulares de una manera completamente teórica, se pudieron tomar algunas consideraciones simples para lograr un nuevo diseño en la geometría de un silo.

Pudimos observar en la investigación bibliográfica que los estudios teóricos sobre flujos granulares se encuentran en pleno desarrollo; el conocimiento en este tema es muy "joven" lo cual brinda una opción muy interesante para continuar con futuros estudios.

Se mencionan algunas ideas para la solución teórica y experimental de un flujo granular convergente, el cual es la geometría de flujo más parecida al diseño de silo propuesto. Esto nos permitiría hacer una "comprobación" más formal de los resultados obtenidos para el nuevo diseño.

Se presentó un estudio experimental del 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 maltrato del grano durante los procesos de llenado y vaciado es mínimo. El grano adopta su ángulo natural de reposo reduciendo esfuerzos por fricción y compactación.

- 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, únicamente de fricción¹, se desarrolla naturalmente provocando una distribución homogénea de esfuerzos y 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. Un análisis teórico del tipo de Coulomb (esfuerzos de fricción) es suficiente para el diseño de la misma.

- Dependiendo de las características particulares de cada tipo de grano, se presentan tres tipos básicos de vaciado en el silo hexagonal. Cabe mencionar que, independientemente del tipo de vaciado, los esfuerzos que se presentan en el vaciado jamás sobrepasan el valor estático.

- El diseño de este nuevo silo está basado en consideraciones simples. Si logramos un desarrollo teórico más formal podremos

¹ Es decir, que los esfuerzos de fricción son dominantes y se eliminan casi por completo los de colisión.

justificar los resultados experimentales, así como también podremos realizar las mejoras pertinentes en el diseño.

Se presentó también un estudio comparativo con un silo vertical de geometría convencional. Este último también fue examinado experimentalmente:

- Se comprobó la aparición de sobre-presiones en el proceso de vaciado, que llegan a ser de hasta 6 veces el valor de su valor estático, que en un silo de tamaño real produciría daños en las paredes de la construcción y pulverización en el grano.

- Una distribución no-homogénea de esfuerzos estáticos aparece en el silo vertical. Esta depende del proceso de llenado del silo, y es una variable de fuerte influencia en la aparición de los citados sobre-esfuerzos en el proceso de vaciado.

- Los sobre-esfuerzos pueden presentarse en diversos puntos del silo y parecen estar ligados a la forma de descarga y al llenado del mismo.

B. CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO.

En base a los resultados obtenidos se decidió construir un prototipo de silo hexagonal de 400 m³. Esto con el fin de realizar mediciones a una escala más parecida a la real.

Este se encuentra en el rancho Santiago del Paraíso, en el estado de Guanajuato, Y fue diseñado para almacenaje de sorgo y maíz. El prototipo se encuentra completamente instrumentado de una manera muy similar a la del modelo a escala de laboratorio.

En este se pretenden verificar todas las predicciones que el estudios teórico y experimental mostraron, y se encuentra

supeditado a una mínima inversión para la constatación de los resultados finales.

El prototipo, formado por dos celdas hexagonales únicamente, representa un modelo para silos de gran capacidad construidos de manera similar; por ejemplo, silos portuarios, de distribución, etc. con capacidades de 40,000 toneladas o más.

Cabe añadir que el costo total de un silo hexagonal de gran capacidad, es considerablemente menor que el de un silo vertical de similar capacidad. Esto es debido, en gran parte, al sistema de construcción a base de losas de concreto, utilizando el sistema "LOZATEC" el cual permite abatir costos de construcción considerablemente.

A continuación se muestran los planos de construcción y algunas fotografías del proceso de construcción del silo piloto, el cuál se encuentra completamente terminado e instrumentado y está listo para realizar las pruebas finales.

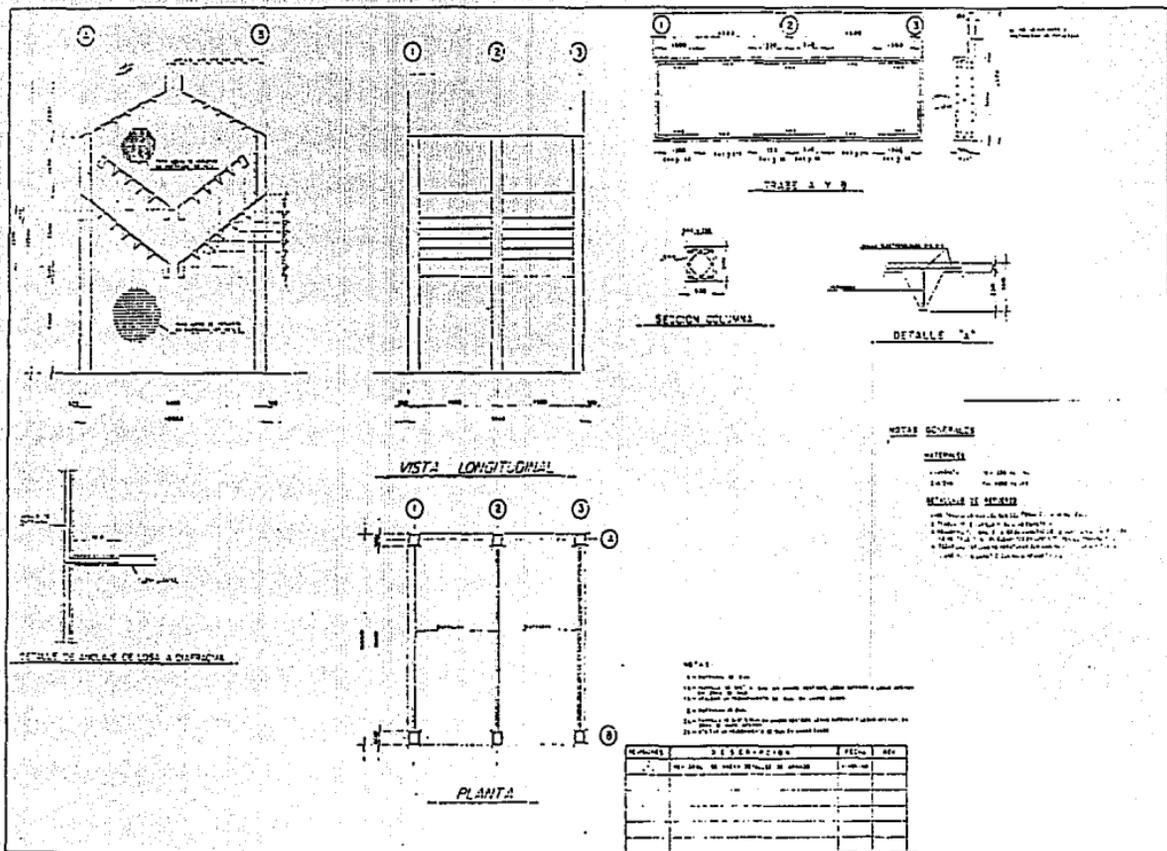
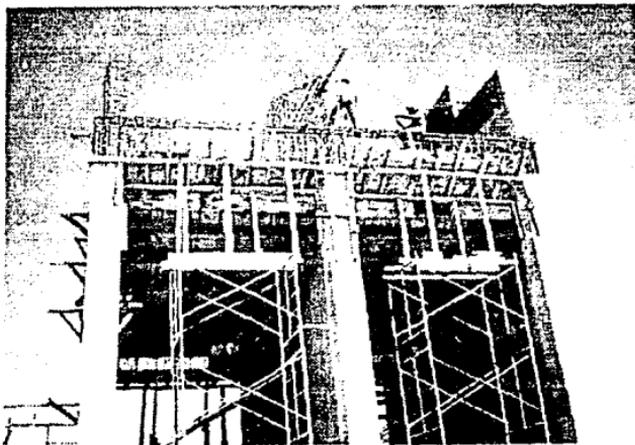
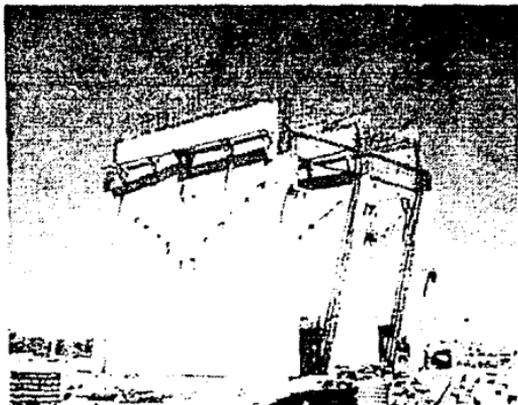
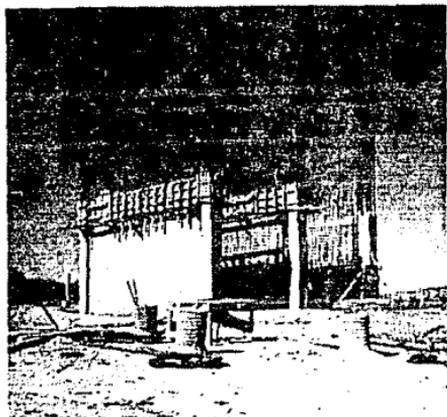
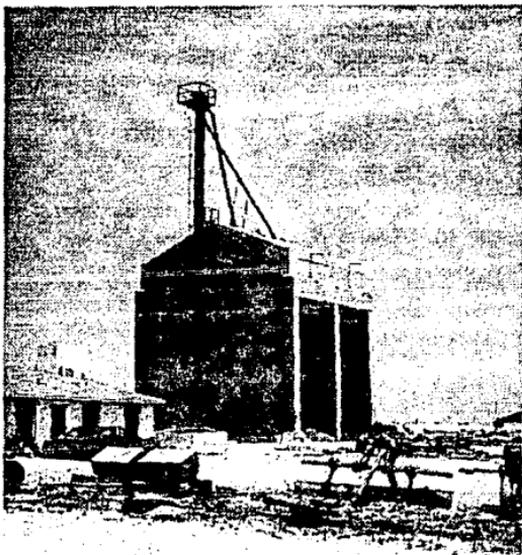
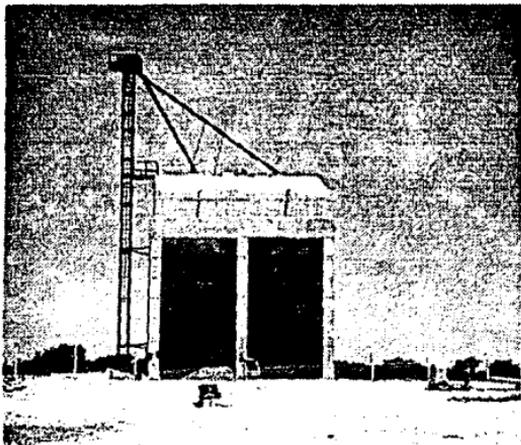


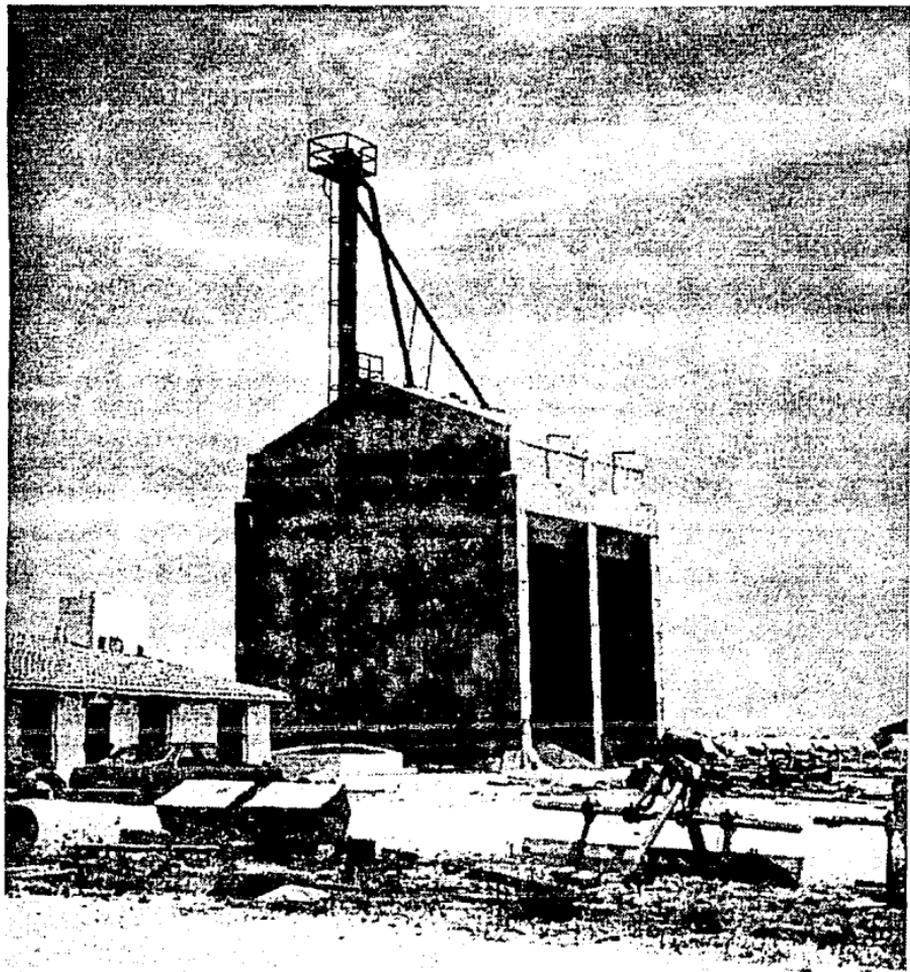
Figura C.1 Plano de construcción del silo prototipo.



Fotografías VII. Contrucción del silo piloto.



Fotografías VIII. Silo piloto terminado.



Fotografias IX. Silo piloto.

REFERENCIAS.

1. Arnold, C. & McLean, A.G. An Analytical Solution for the Stress Function at the Wall of a converging channel. Powder Tech. (1975), Vol.13, pp. 255-260.
2. Bagnold, R.A. Experiments on gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Proc. Roy. Soc. Lond., (1954), vol. A225, pp.49-63.
3. Bransby, P.L., Blair-Fish, P.M. & James, R.G. An investigation of flow of Granular materials. Powder Tech., (1973), vol.8, pp. 197-206.
4. Boletín Mensual de Información Básica de sector Agropecuario y Forestal. Avance del Mes de Febrero de 1991. México, abril 1991. I.N.E.G.I.
5. Coulomb, C.A. Essai sur ue application des règles de maximis et minimis, à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. Memories de Mathematiques de l'Academie Royal des Sciences, (1776), Vol. 7, pp 343-382.
6. Cowin S.C. & Mehrabadi M.M. On the double-sliding free rotating model for the deformation of granular materials. J. Mech. Phys. Solids, (1981), vol.29, pp. 269-282.

7. Dirección General de Planeación, Evaluación y Proyectos. Agenda Estadística U.N.A.M. México, Publicaciones UNAM 1991.
8. Gudehus, G. , Kolymbas, D. & Tjchman, J. Behaviour of granular Materials in cylindrical silos. Powder Tech. (1986), vol.48, pp.81-90.
9. Haff, P.K. Grain Flow as a fluid-mechanical phenomenon. J.Fluid Mech., (1983), vol.134, pp 401-430.
10. Jackson, R. Some features of the Flow of Granular Materials and Aereated Granular Materials. Journal of Rheology, (1986), vol.30(5), pp 907-930.
11. Janssen, H.A. Experiemnts on grain pressures in silos. Vereign Deutscher Ingenieere, Zeitschrift. 1895.
12. Jaeger, H.M. & Nagel, S.R. Physics of the granular state. Science, (1992), vol.255, pp.1523-1531.
13. Jenike, A.W. Gravity flow of solids. Trans.Inst.Chem.Engrs., 1940.
14. Jenike, A.W. Steady gravity flow of frictional-cohesive solids in converging channels. J.Appl.Mech., (1964), vol.31, pp. 5-11.
15. Jenkins, J.T. & Savage S.B. A Theory for rapid flow of identical, smooth & nearly elastic particles. J.Fluid Mech., (1983), vol. 130, pp. 187-202.
16. Johanson, J.R. & Colijn, H. New Design Criteria for hoppers and bins. Iron and Steel Engineer, 1964.

17. Kaza, K.R. & Jackson, R. The rate of discharge of coarse granular materials from a wedge-shaped mass flow hopper. Powder Tech., (1982), vol.33, pp. 223-237.

18. Kaza, K.R. & Jackson, R. Boundary conditions for granular materials flowing out of a hopper or bin. Chem. Eng. Sci., (1984), vol.39, pp.915-916.

19. McTigue, D.F. A model for stress in shear flow of a granular material. Proc. U.S.-Japan Seminar on Continuum Mechanical and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials. (1978), pp.266-271.

20. Michalowski, R.L. Flow of Granular Material Through a plane hopper. Powder Tech., (1983), vol.39, pp. 29-40.

21. Pitman, E.B. Stress and Velocity fields in two- and three-dimensional hoppers. Powder Tech., (1986), vol. 47, pp. 219-231.

22.-Ramírez, Genel. Almacenamiento y Conservación de granos y semillas. México 1966. Edit. C.E.C.S.A., p.p. 13-100, 275-289

23. Ravanet, J. Silos (Tomos I y II), Madrid, 1975. Editores Técnicos Asociados.

24. Reimbert, André M. Silos, Theory and Practice. Germany 1976. Trans. Tech. Publications.

25. Reynolds, O. On the dilatancy of composed media of rigid particles in contact. Phil. Mag., (1885), vol.20, pp.469-481.

26. Rowe, R.E. An investigation into the cause of cracking in a reinforced concrete silo containing cement. Concrete and cement Association. London, 1958.

27. Savage S.B., The mass flow of granular materials from coupled velocity-stress fields. Brit.J.Appl.Phys., (1965), vol. 16, pp. 1885-1888.

28. Savage S.B. & Jeffrey, D.J. The stress tensor in a granular flow at high Shear Rates. J.Fluid.Mech., (1981), vol.110, pp.255-272.

29. Schofield N. & Wroth C.P. Critical state soil mechanics. McGraw-Hill, New York, 1968.

30. Safarian, S.S. Design pressure of granular materials in silos. ACI Journal, Proceedings, Vol.66, Nº8, 1969.

31. Watson, Stephen J. El Ensilaje. México 1963. Edit. C.E.C.S.A. p.p. 22-49.