

EUROCÓDIGOS

NORMA EUROPEA
EXPERIMENTAL

UNE-ENV 1991-4
Marzo 1998



EUROCÓDIGO 1

BASES DE PROYECTO Y ACCIONES EN ESTRUCTURAS

**PARTE 4: ACCIONES EN
SILOS Y DEPÓSITOS**

PREÁMBULO

Esta publicación recoge en sus páginas la Norma Experimental UNE-ENV 1991-4:1997, que contiene un conjunto de especificaciones técnicas no obligatorias relativas a las acciones en silos y depósitos para almacenamiento de líquidos y materiales granulares a considerar en los proyectos de este tipo de obras y constituye la versión española de la correspondiente Norma Europea Experimental.

Es conocido el hecho de que, en España, existen normas básicas a utilizar para el proyecto de dichas estructuras que constituyen materia regulada de obligado cumplimiento ("reglamentaciones técnicas"). La necesidad de garantizar, en la medida de lo posible, la seguridad de los usuarios de tales obras así como las exigencias derivadas de la contratación pública son, entre otras, las causas que motivan la existencia de tales reglamentaciones.

La Normativa básica de acciones a considerar en los proyectos de edificación, aprobada por Real Decreto 1370/1988, de 11 de noviembre, con la denominación de Norma Básica de la Edificación NBE-AE/88 constituye la reglamentación técnica (por tanto, obligatoria) sobre la materia, la cual contiene prescripciones relativas al cálculo de los empujes de las materias almacenadas sobre las paredes de depósitos y silos, que están directamente relacionadas con esta norma europea.

Lo anterior no es obstáculo para que las especificaciones técnicas contenidas en esta Norma Experimental UNE-ENV 1991-4:1997 sean divulgadas y conocidas para su consideración por todos los interesados en el sector de la construcción.

La posibilidad de uso alternativo de la misma surgirá en el momento en que se apruebe y promulgue en el Boletín Oficial del Estado el correspondiente "Documento Nacional de Aplicación" para España.

La innegable importancia de esta Norma Experimental se deriva, sustancialmente, del hecho de que está llamada a constituir el punto de partida de una futura norma europea que contribuirá a la libre circulación de personas y productos de construcción en el ámbito de la Unión Europea y será susceptible de integrarse, en su momento, en las reglamentaciones técnicas españolas obligatorias correspondientes.

La traducción de esta Norma Experimental, desde la versión original en inglés a su texto en español, ha sido realizada por el Subcomité 1 del Comité Técnico de Normalización 140 "Eurocódigos Estructurales" de AENOR.

Gerardo Mingo Pinacho

Subdirector General de Arquitectura

*Dirección General de la Vivienda,
la Arquitectura y el Urbanismo*

MINISTERIO DE FOMENTO

Octubre 1997

Marzo 1998

TÍTULO

EUROCÓDIGO 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras

Parte 4: Acciones en silos y depósitos

Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Part 4: Actions in silos and tanks.

Eurocode 1: Bases de calcul et actions sur les structures. Partie 4: Actions dans les silos et réservoirs.

CORRESPONDENCIA

Esta norma experimental es la versión oficial, en español, de la Norma Europea Experimental ENV 1991-4 de mayo 1995.

OBSERVACIONES

ANTECEDENTES

Esta norma experimental ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 140 *Eurocódigos Estructurales* cuya Secretaría desempeña SEOPAN.

ICS 91.040.00

Descriptores: Ingeniería civil, estructuras, proyecto, construcción, códigos de edificios, computación, cargas, silos, depósitos: contenedores.

Versión en español

EUROCÓDIGO 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras
Parte 4: Acciones en silos y depósitos

Eurocode 1: Basis of design and
actions on structures. Part 4:
Actions in silos and tanks.

Eurocode 1: Bases de calcul et actions
sur les structures. Partie 4: Actions dans
les silos et réservoirs.

Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung
und Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 4:
Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter.

Esta Norma Europea Experimental (ENV) ha sido aprobada por CEN el 1993-06-30 como una norma experimental para su aplicación provisional. El período de validez de esta Norma ENV está limitado inicialmente a tres años. Pasados dos años, los miembros de CEN enviarán sus comentarios, en particular sobre la posible conversión de la Norma ENV en Norma Europea (EN).

Los miembros de CEN deberán anunciar la existencia de esta Norma ENV utilizando el mismo procedimiento que para una Norma EN y hacer que esta Norma ENV esté disponible rápidamente y en la forma apropiada a nivel nacional. Se permite mantener (en paralelo con la Norma ENV) las normas nacionales que estén en contradicción con la Norma ENV hasta que se adopte la decisión final sobre la posible conversión de la Norma ENV en Norma EN.

Los miembros de CEN son los organismos nacionales de normalización de los países siguientes: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, Suecia y Suiza.

CEN
COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN
European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung
SECRETARÍA CENTRAL: Rue de Stassart, 36 B-1050 Bruxelles

ÍNDICE

	Página
PREÁMBULO	9
Objetivos de los Eurocódigos	9
Antecedentes al programa de Eurocódigos	9
Programa de Eurocódigos	9
Documentos Nacionales de Aplicación (DNA)	10
 1 GENERALIDADES	 11
1.1 Campo de aplicación	11
1.1.1 Campo de aplicación de ENV 1991 - Eurocódigo 1	11
1.1.2 Campo de aplicación de ENV 1991-4 Acciones en silos y depósitos	11
1.1.3 Otras Partes de ENV 1991	12
1.2 Normativas de referencia	12
1.3 Distinción entre Principios y Reglas de Aplicación	13
1.4 Definiciones	13
1.5 Notaciones	15
 2 CLASIFICACIÓN DE LAS ACCIONES	 18
 3 SITUACIONES DE PROYECTO	 18
 4 REPRESENTACIÓN DE LAS ACCIONES	 19
 5 CARGAS EN SILOS DEBIDAS A MATERIALES GRANULARES	 19
5.1 Generalidades	19
5.2 Silos esbeltos	20
5.2.1 Presiones de llenado	21
5.2.1.1 Sección de paredes verticales	21
5.2.1.2 Fondos planos	23
5.2.1.3 Tolvas	24
5.2.2 Presiones de vaciado	25
5.2.2.1 Sección de paredes verticales	25
5.2.2.2 Fondos planos y tolvas	25
5.2.2.3 Método simplificado para llenado y vaciado	26
5.3 Silos cortos	26
5.4 Silos de homogeneización y silos de alta velocidad de llenado	28
 6 CARGAS EN DEPÓSITOS DEBIDAS A LÍQUIDOS	 29
6.1 Generalidades	29
6.2 Propiedades de los líquidos	29

	Página
7 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	29
7.1 Propiedades de los materiales granulares	29
7.2 Aproximación simplificada	29
7.3 Ensayo de materiales granulares	30
7.3.1 Peso específico γ	30
7.3.2 Coeficiente de rozamiento de la pared μ_m	31
7.3.3 Relación $K_{s,m}$ entre las presiones horizontales y verticales	31
7.4 Máximo coeficiente de mayoración de la carga	31
ANEXO A BASES DE PROYECTO. CLÁUSULAS ADICIONALES A LA ENV 1991-1 PARA SILOS Y DEPÓSITOS	32
ANEXO B MÉTODOS DE ENSAYO DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES GRANULARES	33
ANEXO C ACCIONES SÍSMICAS	39

PREÁMBULO

Objetivos de los Eurocódigos

- (1) Los Eurocódigos Estructurales comprenden un grupo de normas para el proyecto de edificaciones y obras de ingeniería civil desde los puntos de vista estructural y geotécnico.
- (2) Abarcan la ejecución y el control, sólo hasta el punto que es necesario para indicar la calidad de los productos de construcción y el nivel de ejecución necesarios para cumplir con las prescripciones de las reglas de proyecto.
- (3) Hasta que el conjunto necesario de especificaciones técnicas armonizadas para los productos y los métodos de ensayo de los mismos esté disponible, algunos de los Eurocódigos Estructurales cubren estos aspectos en anexos informativos.

Antecedentes al programa de Eurocódigos

- (4) La Comisión de las Comunidades Europeas (CCE) inició el trabajo de establecer un conjunto de normas técnicas armonizadas para el proyecto de edificaciones y obras de ingeniería civil, que sirviese, inicialmente, como una alternativa a las diferentes normas vigentes en los distintos Estados Miembros y que, finalmente, las sustituyese. Estas reglas técnicas son las denominadas "Eurocódigos Estructurales".
- (5) En el año 1990, después de consultar a sus respectivos Estados Miembros, la CCE transfirió el trabajo del futuro desarrollo de los Eurocódigos al CEN al mismo tiempo que la secretaría de la EFTA estuvo de acuerdo en apoyar el trabajo del CEN.
- (6) El Comité Técnico del CEN, CEN/TC 250, es el responsable de todos los Eurocódigos Estructurales.

Programa de Eurocódigos

- (7) El trabajo se está desarrollando en los siguientes Eurocódigos Estructurales, los cuales se subdividen en Partes:

EN 1991	Eurocódigo 1:	Bases de proyecto y acciones en estructuras.
EN 1992	Eurocódigo 2:	Proyecto de estructuras de hormigón.
EN 1993	Eurocódigo 3:	Proyecto de estructuras de acero.
EN 1994	Eurocódigo 4:	Proyecto de estructuras mixtas de hormigón y acero.
EN 1995	Eurocódigo 5:	Proyecto de estructuras de madera.
EN 1996	Eurocódigo 6:	Proyecto de estructuras de fábrica de ladrillo.
EN 1997	Eurocódigo 7:	Proyecto geotécnico.
EN 1998	Eurocódigo 8:	Proyecto de estructuras resistentes al sismo.
EN 1999	Eurocódigo 9:	Proyecto de estructuras de aluminio.
- (8) CEN/TC 250 ha formado subcomités independientes para cada uno de los Eurocódigos mencionados.
- (9) Esta parte de ENV 1991 ha sido publicada como Norma Experimental Europea ENV 1991-4.
- (10) Esta norma experimental está pensada para su aplicación experimental y para el envío de comentarios, y en el futuro se intentará que cubra las grandes excentricidades y silos con tirantes interiores.
- (11) Después de aproximadamente dos años, los miembros de CEN serán invitados a enviar comentarios formales que serán tenidos en cuenta en los trabajos futuros.

- (12) Mientras tanto, las observaciones y los comentarios a esta Norma Experimental deben enviarse a la secretaría de CEN/TC250/SC1, a la siguiente dirección:

SIS
Box 3295
S- 103 66 STOCKHOLM
SWEDEN

o al Organismo Nacional de Normalización correspondiente.

NOTA NACIONAL – El Organismo Nacional de Normalización en España:

AENOR
Génova, 6
28004 MADRID
Teléfono: 91-4326000
Fax: 91-3104976

Documentos Nacionales de Aplicación (DNA)

- (13) A la vista de las responsabilidades de los estados miembros en temas relacionados con la seguridad, la salud y otras materias cubiertas por los requisitos esenciales de la Directiva Europea de Productos de Construcción (DPC), a algunos elementos que afectan a la seguridad, en esta norma experimental, se les han asignado valores indicativos que están identificados por | ___ | ("valores en recuadro"). Las autoridades de cada Estado Miembro examinarán los "valores en recuadro" y podrán sustituirlos por valores aplicables a nivel nacional.
- (14) Algunas de las normas de apoyo europeas o normas internacionales no van a estar disponibles en el momento de publicación de esta norma experimental. Por lo tanto, se considera prematura la publicación, por parte de cada estado miembro o por parte de sus organizaciones normativas nacionales, de un Documento Nacional de Aplicación (DNA) que proponga valores definitivos de los elementos que afectan a la seguridad, que haga referencia a normas de apoyo compatibles o que dé una guía nacional para la aplicación de esta norma experimental.
- (15) Se pretende que esta prenorma sea usada conjuntamente con el DNA vigente en el país donde se realice la edificación o el trabajo de ingeniería civil.
- (16) El campo de aplicación de la ENV 1991 está definido en el apartado 1.1.1 y el campo de aplicación de esta parte de la ENV 1991 se define en el apartado 1.1.2. Las partes adicionales de la ENV 1991, que están previstas, se indican en el apartado 1.1.3.
- (17) Esta parte se complementa con varios anexos informativos.

1 GENERALIDADES

1.1 Campo de aplicación

1.1.1 Campo de aplicación de ENV 1991 - Eurocódigo 1

- (1)P ENV 1991 describe los principios generales y las acciones para el proyecto de estructuras de edificación e ingeniería civil incluyendo algunos aspectos geotécnicos. Deberá ser utilizada conjuntamente con las ENV 1992-1999.
- (2) Puede utilizarse como base para el proyecto de estructuras no recogidas en las ENV 1992-1999, y cuando se utilicen otros materiales u otras acciones para el proyecto estructural.
- (3) ENV 1991 también comprende el diseño de estructuras durante su ejecución, así como el proyecto de estructuras temporales. ENV 1991 se refiere a todas las circunstancias bajo las cuales una estructura debe tener una adecuada funcionalidad.
- (4) ENV 1991 no está expresamente pensada para la valoración del estado estructural de construcciones existentes ni para el desarrollo de proyectos de reparación por daños o cambios de uso.
- (5) ENV 1991 no cubre totalmente todas las situaciones especiales de proyecto que requieran una fiabilidad excepcional, tales como estructuras nucleares, para las cuales se deberán utilizar procedimientos específicos de proyecto.

1.1.2 Campo de aplicación de ENV 1991-4 Acciones en silos y depósitos

- (1)P Esta Parte describe los principios generales y las acciones para el proyecto estructural de depósitos y silos, incluyendo algunos aspectos geotécnicos que se emplearán junto con la ENV 1991-1: "Bases de proyecto", y otras partes de ENV 1991 y de ENV 1992-1999.
- (2) Esta parte se puede utilizar también como base para el proyecto de estructuras no comprendidas en las ENV 1992-1999 y en las que intervengan otros materiales o acciones en el proyecto estructural.
- (3) Las normas de proyecto para silos se aplicarán con las siguientes limitaciones:

- La forma de la sección transversal de los silos se limita a las mostradas en la figura 1.2.
- El llenado produce unos efectos de inercia y unas cargas de impacto despreciables.
- El diámetro máximo de las partículas del material almacenado no será mayor de $0,3 d_c$.

NOTA – Cuando las partículas sean grandes en comparación con el espesor de los muros del silo, la carga debe aplicarse mediante fuerzas unitarias.

- El material almacenado está suelto.
- La excentricidad e_i del material almacenado debida al llenado es menor de $0,25 d_c$ (figura 1.2).
- La excentricidad e_0 del centro de la salida es menor de $0,25 d_c$; y ninguna parte de la salida está a una distancia mayor de $0,3 d_c$ del plano central de un silo con flujo plano, o de la línea central en los demás silos (figura 1.2).
- Cuando se empleen mecanismos de vaciado (por ejemplo, alimentadores o canales de flujo interno) el flujo del material será suave y centrado, dentro de los límites de excentricidad indicados arriba.
- La transición se encontrará en un único plano horizontal.

– Se aplicarán las siguientes limitaciones geométricas:

$$\begin{array}{ll} h / d_c & < 10 \\ h & < 100 \text{ m} \\ d_c & < 50 \text{ m} \end{array}$$

– Cada silo se proyectará para un rango definido de propiedades de los materiales granulados.

- (4) Las normas de proyecto de depósitos se aplicarán únicamente a depósitos que almacenen líquidos a presión atmosférica normal.
- (5) La ENV 1991-4 se empleará conjuntamente con la ENV 1991-1 y otras partes de la ENV 1991.

1.1.3 Otras Partes de ENV 1991

- (1) Otras Partes de ENV 1991, que en la actualidad están siendo preparadas o planificadas, están definidas en el apartado 1.2.

1.2 Normativas de referencia

Esta norma experimental europea incorpora, con referencias fechadas o no, referencias de otras normas. Estas normativas de referencia se citan a lo largo del texto y en las publicaciones enumeradas a continuación.

ISO 3898 1987 – *Bases de proyecto de estructuras. Notación. Símbolos generales.*

NOTA – Las siguientes normas europeas experimentales, que están publicadas o en preparación, son citadas en el lugar apropiado en el texto y en las publicaciones siguientes:

ENV 1991-1 – *Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 1: Bases de proyecto.*

ENV 1991-2-1 – *Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-1: Densidades, pesos propios y cargas exteriores.*

ENV 1991-2-2 – *Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-2: Acciones en estructuras expuestas al fuego.*

ENV 1991-2-3 – *Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-3: Cargas de nieve.*

ENV 1991-2-4 – *Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-4: Cargas de viento.*

ENV 1991-2-5 – *Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-5: Acciones térmicas.*

ENV 1991-2-6 – *Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-6: Cargas y deformaciones impuestas durante la ejecución.*

ENV 1991-2-7 – *Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-7: Acciones accidentales.*

ENV 1991-3 – *Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 3: Cargas de tráfico en puentes.*

ENV 1991-5 – *Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 5: Acciones inducidas por grúas y maquinaria.*

ENV 1992 – *Proyecto de estructuras de hormigón.*

ENV 1993 – *Proyecto de estructuras de acero.*

ENV 1994 – *Proyecto de estructuras mixtas de hormigón y acero.*

ENV 1995 – *Proyecto de estructuras de madera.*

ENV 1996 – *Proyecto de estructuras de fábrica de ladrillo.*

ENV 1997 – *Proyecto geotécnico.*

ENV 1998 – *Proyecto de estructuras resistentes al sismo.*

ENV 1999 – *Proyecto de estructuras de aluminio.*

1.3 Distinción entre Principios y Reglas de Aplicación

- (1) Este Eurocódigo distingue entre Principios y Reglas de Aplicación dependiendo del carácter de las cláusulas individuales.
- (2) Los Principios comprenden:
 - Aspectos generales y definiciones para las que no hay alternativa.
 - Requisitos y modelos analíticos para los que no se permiten alternativas salvo que esté específicamente indicado.
- (3) Los Principios se identifican mediante la letra P precedida del número del párrafo.
- (4) Las Reglas de Aplicación son reglas reconocidas que se adecuan a los Principios y satisfacen sus requisitos.
- (5) Está permitido el uso de reglas alternativas a las reglas de aplicación propuestas en este Eurocódigo cuando esté demostrado que dichas reglas alternativas son acordes con los Principios y tienen, al menos, la misma fiabilidad.
- (6) Las reglas de aplicación en esta Parte se identifican por un número entre paréntesis, por ejemplo, esta cláusula.

1.4 Definiciones

Para su aplicación en esta Norma Experimental, en la ENV 1991-1, "Bases de proyecto", se encuentra una lista básica de definiciones. Las siguientes definiciones son específicas para esta Parte:

1.4.1 superficie equivalente: Superficie horizontal a un nivel tal que da el mismo volumen de material almacenado que la superficie real (figura 1.2).

1.4.2 fondo plano: Un silo con el fondo plano, o un silo con las paredes del fondo inclinadas, siendo $\alpha \leq 20^\circ$.

1.4.3 tipo de flujo: El modo de fluir el material en el silo cuando el flujo está completamente establecido (figura 1.1). El silo está cercano a su máxima capacidad de llenado.

1.4.4 material fluidificado: Material almacenado al que se le inyecta aire, lo que cambia significativamente su comportamiento.

1.4.5 material suelto: Material con baja cohesión.

1.4.6 flujo en embudo (o flujo de núcleo) (figura 1.1): Tipo de flujo en el que se produce un canal de flujo de material dentro de una zona confinada por encima de la salida, mientras que el material adyacente a la pared cercana a la salida permanece quieto. El canal de flujo puede interseccionar a la sección vertical de la pared, o extenderse a la superficie del material almacenado.

1.4.7 silo de homogeneización: Silo que contiene material fluidificado.

1.4.8 tolva: Fondo de un silo con paredes inclinadas, siendo $\alpha > 20^\circ$.

1.4.9 flujo interno (figura 1.1): Tipo de flujo en embudo en el que el canal de flujo se extiende hasta la superficie del material almacenado.

1.4.10 sobrepresión en tolva (figura 5.3): Carga local producida en la transición durante el vaciado.

1.4.11 baja cohesión: Una muestra de material tiene baja cohesión si la cohesión es menor de 4 kPa, cuando la muestra está preconsolidada a 100 kPa. (En el anexo B se proporciona un método para determinar la cohesión.)

1.4.12 flujo en masa (figura 1.1): Tipo de flujo en el que todas las partículas almacenadas se movilizan durante el vaciado.

1.4.13 presión local: Carga local actuante sobre una zona específica de la pared de un silo.

1.4.14 flujo plano: Perfil de flujo en un silo de sección rectangular o cuadrada con salida en ranura. La ranura es paralela a dos de las paredes del silo y su longitud es igual a la de dichas paredes.

1.4.15 silo: Estructura de contención utilizada para el almacenamiento de materiales granulados (por ejemplo carboneras, silos).

1.4.15.1 silo esbelto: Silo en el que $h / d_c \geq 1,5$

1.4.15.2 silo corto: Silo en el que $h / d_c < 1,5$

1.4.15.3 silo circular de pared delgada: Silo de sección transversal circular sin rigidizadores en el que $d_c/t > 200$.

1.4.16 depósito: Estructura de contención empleada en el almacenamiento de líquidos.

1.4.17 transición: Intersección de la tolva con la sección de paredes verticales.

1.4.18 sección de paredes verticales: Parte del silo o depósito con paredes verticales.

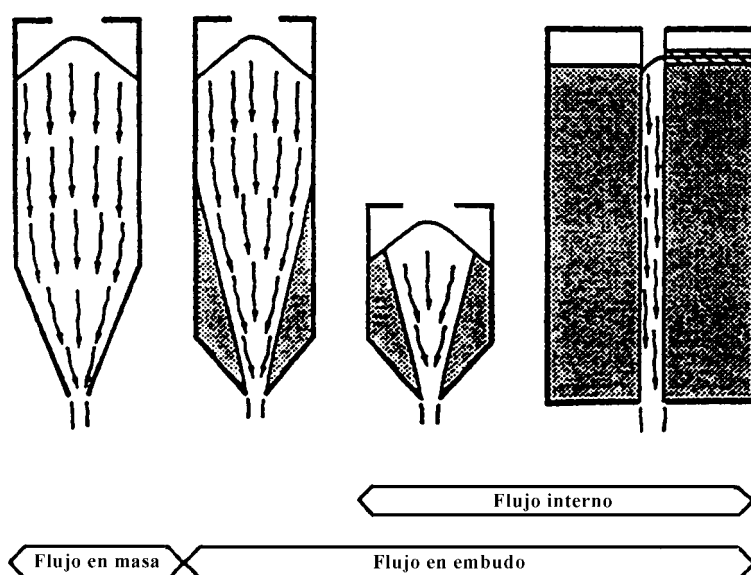


Fig. 1.1 – Tipos de flujo

1.5 Notaciones

- (1) Para su aplicación en esta Norma Experimental se utilizarán los siguientes símbolos.

NOTA — La notación utilizada está basada en la Norma ISO 3898:1987.

- (2) En la ENV 1991-1, "Bases de proyecto", se encuentra una lista básica de notaciones, a la que se añade la lista siguiente para su uso específico en esta Parte.

Mayúsculas latinas

A	superficie de la sección transversal de la sección de paredes verticales
C	coeficiente de mayoración de la presión sobre las paredes
C_0	máximo coeficiente de mayoración de la presión sobre paredes
C_b	coeficiente de mayoración de la presión sobre el fondo
C_h	coeficiente de mayoración de la presión horizontal
C_w	coeficiente de mayoración de la tracción debida al rozamiento con la pared
C_z	coeficiente de Janssen
F_p	fuerza horizontal total debida a la carga local en silos circulares de pared delgada
K_s	valor de proyecto de la relación de presiones horizontal y vertical
$K_{s,m}$	valor medio de la relación entre las presiones horizontal y vertical
P_w	presión resultante vertical por unidad de perímetro en la sección de paredes verticales
U	perímetro interno de la sección de paredes verticales

Minúsculas latinas

d_c	dimensión característica de la sección transversal (figura 1.2)
e	el mayor de e_i y e_0
e_i	excentricidad debida al llenado (figura 1.2)
e_0	excentricidad del centro de la boca de salida (figura 1.2)
h	distancia desde la salida a la superficie equivalente (figura 1.2)
h_1, h_2	parámetros empleados en la determinación de las presiones verticales en silos cortos
I_h	longitud de la pared de la tolva (figura 5.3)
p	presión hidrostática
p_h	presión horizontal debida al material almacenado
p_{he}	presión horizontal durante el vaciado (figura 1.2)
$p_{he,s}$	presión horizontal durante el vaciado, calculada empleando el método simplificado
p_{hf}	presión horizontal tras el llenado
$p_{hf,s}$	presión horizontal tras el llenado, calculada empleando el método simplificado
p_{ho}	presión horizontal tras el llenado en la base de la sección de paredes verticales

p_n, p_{ni}	presión normal a la pared inclinada de la tolva, siendo $i = 1, 2$ y 3
p_p	presión local
$p_{p,sq}$	presión local en silos cortos
p_{ps}	presión local (silos circulares de pared delgada)
p_s	sobrepresión en tolva
p_t	tracción de rozamiento de la tolva (figura 1.2)
p_v	presión vertical debida al material almacenado (figura 1.2)
p_{ve}	presión vertical durante el vaciado
p_{vi}	componentes de la presión vertical empleados en la determinación de la presión vertical en silos cortos, $i = 1, 2, 3$
p_{vf}	presión vertical tras el llenado
$p_{vf,sq}$	presión vertical tras el llenado en silos cortos
p_{v0}	presión vertical tras el llenado en la base de la sección de paredes verticales
p_w	presión de rozamiento en la pared en la sección vertical (figura 1.2)
p_{we}	presión de rozamiento en la pared durante el vaciado
$p_{we,s}$	presión de rozamiento en la pared durante el vaciado, calculada empleando el método simplificado
p_{wf}	presión de rozamiento en la pared tras el llenado
$p_{wf,s}$	presión de rozamiento en la pared tras el llenado calculada empleando el método simplificado
s	dimensiones de la zona afectada por la carga local ($s = 0,2 d_c$)
t	espesor de la pared (figura 1.2)
w	anchura de un silo rectangular
x	parámetro empleado en el cálculo de las presiones en la tolva
z	profundidad bajo la superficie equivalente con llenado máximo
z_0	parámetro empleado en el cálculo de las presiones

Minúsculas griegas

α	ángulo medio de inclinación, respecto de la horizontal, de la pared de la tolva (figura 1.2)
β	coeficiente de mayoración de la presión local
γ	peso específico de la carga del líquido o material almacenado
γ_1	peso específico del material almacenado fluidificado
θ	coordenada angular de la circunferencia
μ	valor de proyecto del coeficiente de rozamiento de la pared para el cálculo de la presión
μ_m	valor medio del coeficiente de rozamiento de la pared para el cálculo de la presión
φ	ángulo efectivo de rozamiento interno
φ_w	ángulo de rozamiento de la pared de la tolva para la evaluación del flujo

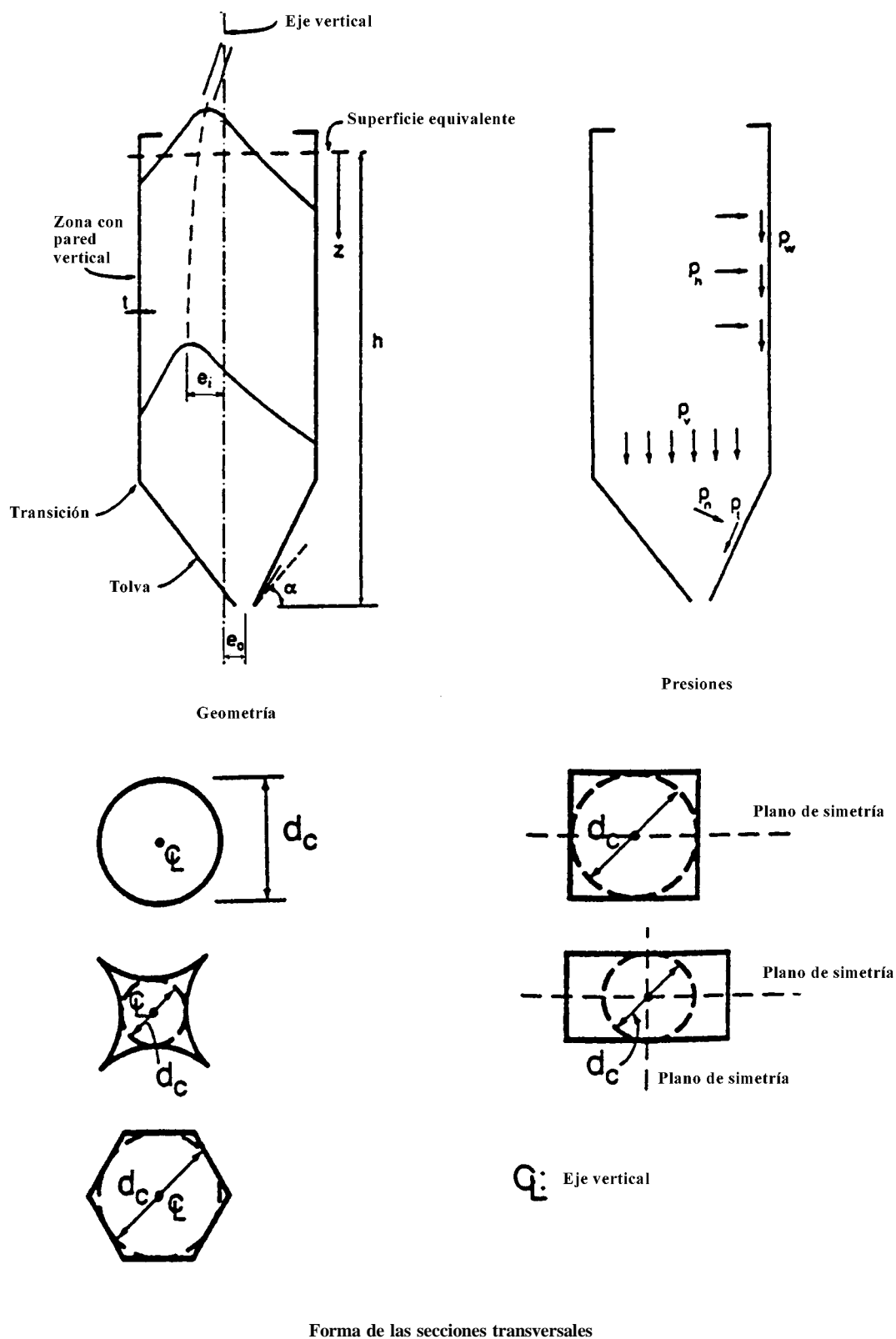


Fig. 1.2 – Forma de los silos, dimensiones y notación de las presiones

2 CLASIFICACIÓN DE LAS ACCIONES

- (1)P Las cargas debidas a materiales almacenados se clasifican como acciones variables, véase ENV 1991-1.
- (2)P Las cargas en depósitos se clasifican como acciones variables, véase ENV 1991-1.
- (3)P Las presiones locales durante los procesos de llenado y vaciado de silos se clasifican como acciones libres.
- (4)P Las presiones debidas a explosiones de polvo se clasifican como acciones accidentales.

3 SITUACIONES DE PROYECTO

- (1)P Se aplica el formato general dado en la ENV 1991-1 para los procedimientos de proyecto.

NOTA – Esto no significa que los puntos y valores especificados para edificios en la ENV 1991-1 se puedan aplicar a silos y depósitos.

- (2)P Se considerarán las situaciones de proyecto seleccionadas y se identificarán las hipótesis críticas de carga. Para cada hipótesis crítica de carga se determinarán los valores de proyecto de los efectos de las acciones combinadas.
- (3)P Las reglas de combinación dependen de la comprobación considerada, y se identificarán de acuerdo a la ENV 1991-1 "Bases del proyecto", y de acuerdo al anexo A.
- (4) Más adelante se indica la disposición de las acciones en silos y depósitos para las hipótesis de carga de cada situación de proyecto.
- (5)P Los silos prefabricados se deben proyectar teniendo en cuenta las acciones durante la manipulación, transporte y colocación.
- (6) Se deben considerar las presiones provocadas por el máximo llenado posible.
- (7) Los esquemas de presiones para el llenado y el vaciado se pueden emplear en Estados Límite de Servicio y Últimos.
- (8) Si es necesario, deben considerarse las siguientes acciones y situaciones accidentales:
 - acciones debidas a explosiones;
 - acciones debidas al impacto de vehículos;
 - acciones sísmicas;
 - situaciones de fuego.
- (9) Los depósitos y silos se pueden emplear para el almacenamiento de líquidos y materiales granulados explosivos. En la tabla 7.1 se muestran algunos de los materiales que pueden provocar explosiones de polvo.
- (10) El daño potencial de una explosión de polvo debe limitarse o evitarse por medio de la adecuada elección de una o más de las medidas siguientes:
 - la incorporación de la suficiente superficie de expansión de presión;
 - el proyecto de la estructura para resistir la presión de la explosión.

- (11) La presión provocada por la explosión en un silo sin una adecuada superficie de expansión puede alcanzar un valor de 1 N/mm^2 .
- (12) En el proyecto se debe considerar la prevención de las explosiones de polvo por medio de la adecuada elección de una o más de las siguientes medidas:
 - la prescripción de un plan apropiado de mantenimiento y limpieza;
 - evitar la ignición por medio de la adecuada elección del equipamiento electrónico;
 - la utilización cuidadosa del equipo de soldadura.
- (13) Se debe limitar la fisuración en Estado Límite de Servicio para prevenir la entrada de agua cuando se proyecten silos para materiales sensibles al agua.
- (14) Se deben considerar los efectos de la fatiga en silos o depósitos sometidos a una media de más de un ciclo de llenado diario. Un ciclo de carga es igual a un llenado y un vaciado. También se considerará la fatiga en silos afectados por maquinaria vibratoria.
- (15)P Se tomarán en consideración las acciones sobre las estructuras adyacentes.

4 REPRESENTACIÓN DE LAS ACCIONES

- (1)P Se elegirá la forma estructural del silo de modo que sea poco sensible a las desviaciones de las cargas.
- (2)P Las presiones debidas a materiales granulados se calcularán para el llenado y para el vaciado. La magnitud y colocación de las cargas de proyecto dependen de la estructura del silo, de las propiedades del material almacenado y de los tipos de flujo que se produzcan durante el proceso de vaciado.
- (3) La variabilidad inherente de los materiales almacenados y las simplificaciones de los modelos de carga producen diferencias entre las presiones reales sobre el silo y las presiones definidas por las normas de proyecto en el capítulo 5. Por ejemplo, la distribución de presiones de vaciado varía a lo largo de la pared en función del tiempo, y no es posible predecir exactamente el valor medio de la presión, o su variación.
- (4) Se pueden emplear reglas simplificadas para la predicción de tipos de flujo (figura 5.1) en el cálculo de las presiones sobre silos.
- (5) No se deben emplear reglas simplificadas para la predicción de tipos de flujo (figura 5.1) en el proyecto de silos para flujo.

5 CARGAS EN SILOS DEBIDAS A MATERIALES GRANULARES

5.1 Generalidades

- (1) Las cargas debidas a materiales granulares dependen de:
 - las propiedades del material granular;
 - la variación en las condiciones de rozamiento de la superficie;
 - la geometría del silo;
 - los métodos de llenado y vaciado.

- (2) El tipo de flujo (flujo en masa o en embudo) se determinará según la figura 5.1.
- (3) Para la determinación del tipo de flujo, el ángulo de rozamiento de la pared se puede obtener bien por medio de ensayos, tal y como se describe en el apartado 5.5.2, o bien mediante la siguiente fórmula, empleando los valores aproximados del coeficiente de rozamiento dados en la tabla 7.1:

$$\varphi_w = \arctan \mu_m \quad (5.1)$$

- (4) Los valores característicos para las presiones de llenado y vaciado se definen para los siguientes tipos de silo:
- silos esbeltos;
 - silos cortos;
 - silos de homogeneización y silos de alta velocidad de llenado.
- (5) En el cálculo de las presiones se puede despreciar cualquier ayuda a las paredes del silo debida a la rigidez del material granulado. Esto significa que la interacción entre la deformación de la pared y la carga del material almacenado se considera despreciable.

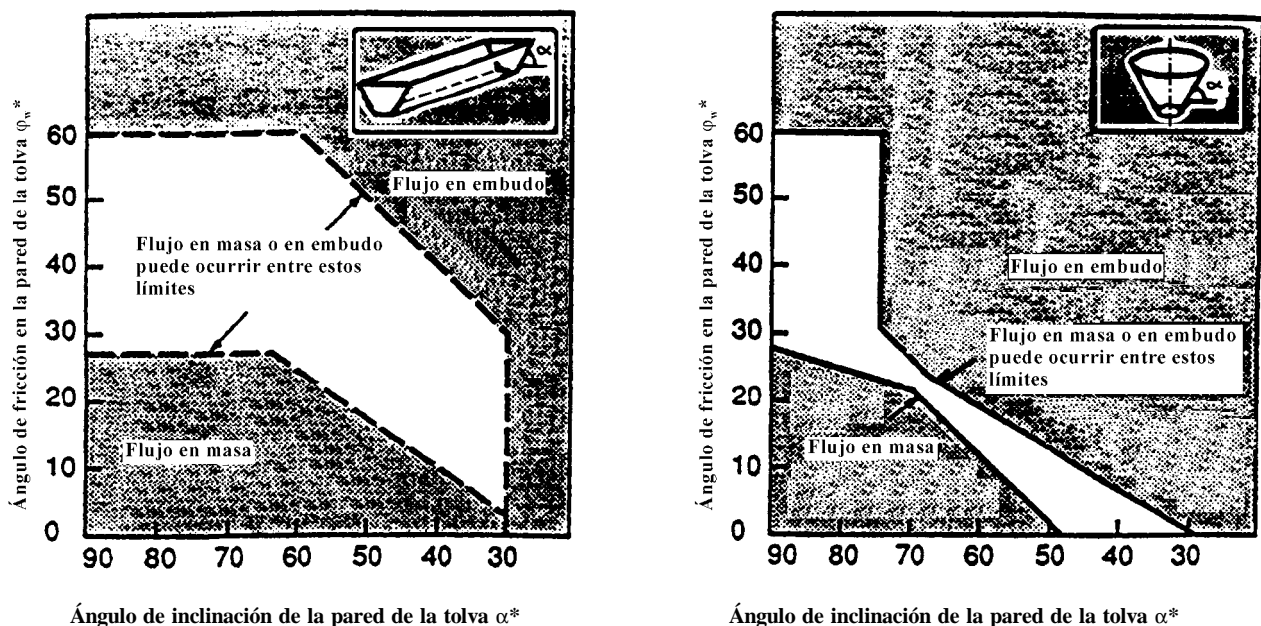


Fig. 5.1 – Límite entre el flujo en masa y en embudo en tolvas cónicas y en forma de cuña

5.2 Silos esbeltos

- (1) En el apartado 5.2.1 se dan normas detalladas para el cálculo de las presiones de llenado, y en el apartado 5.2.2 para las de vaciado. En el apartado 5.2.3 se dan normas simplificadas para el llenado y el vaciado.
- (2)P En el apartado 5.2.1 se dan las ecuaciones generales para el cálculo de las presiones sobre las paredes de un silo. Se deben utilizar como base para el cálculo de las siguientes cargas de proyecto:
- presiones de llenado sobre la sección de paredes verticales (5.2.1);
 - presiones de llenado sobre fondos planos (5.2.1);

- presiones de llenado sobre tolvas (5.2.1);
- presiones de vaciado sobre la sección de paredes verticales (5.2.2);
- presiones de vaciado sobre fondos planos y tolvas (5.2.2).

5.2.1 Presiones de llenado

- (1)P Tras el llenado, los valores de la presión de rozamiento sobre la pared (p_{wf}), la presión horizontal (p_{hf}) y la presión vertical (p_v), a cualquier profundidad, son:

$$p_{wf}(z) = \gamma \frac{A}{U} C_z(z) \quad (5.2)$$

$$p_{hf}(z) = \frac{\gamma A}{\mu U} C_z(z) \quad (5.3)$$

$$p_v(z) = \frac{\gamma A}{K_s \mu U} C_z(z) \quad (5.4)$$

donde

$$C_z(z) = 1 - e^{(-z/z_0)} \quad (5.5)$$

$$z_0 = \frac{A}{K_s \mu U} \quad (5.6)$$

donde

γ es la densidad de la carga;

μ es el coeficiente de rozamiento de la pared;

K_s es la relación de presiones horizontal y vertical;

z es la profundidad;

U es el perímetro interior.

- (2)P La fuerza vertical resultante sobre una pared [$p_w(z)$] por unidad de longitud del perímetro actuando a una profundidad z es:

$$P_w(z) = \int_0^z p_{wf}(z) dz = \gamma \frac{A}{U} [z - z_0 C_z(z)] \quad (5.7)$$

- (3) En el capítulo 7 se ofrecen métodos para la determinación de la densidad de los materiales granulares, el rozamiento de las paredes y las relaciones de presiones.

5.2.1.1 Sección de paredes verticales

- (1) La presión de llenado se compone de una presión fija y de una presión libre llamada carga local.
- (2)P La presión fija se calcula mediante las expresiones (5.2) y (5.3).

- (3) La presión local (p_p) se considera actuando sobre cualquier parte de la pared del silo, y se toma igual a:

$$p_p = 0,2 \beta p_{hf} \quad (5.8)$$

donde

$$\beta = 1 + 4 \frac{e_i}{d_c} \quad (5.9)$$

donde e_i y d_c se definen en la figura 1.2.

- (4) En silos de hormigón, silos con rigidizadores y silos de sección transversal no circular, la presión local se considerará actuando sobre dos superficies cuadradas opuestas de lado s (figura 5.2) igual a:

$$s = 0,2 d_c \quad (5.10)$$

- (5) Generalmente, en los silos, se puede emplear una aproximación simplificada para la aplicación de la presión local. Se puede proyectar para los esquemas de carga más desfavorables aplicando la presión local a la altura media del silo y utilizando el incremento porcentual de la tensión en la pared a esa altura para incrementar la tensión de las paredes en todo el silo.
- (6) En silos circulares de pared delgada, la presión local se considerará actuando sobre una altura s , pero extendiéndose desde una presión máxima p_p hacia afuera en un lado, hasta una presión hacia dentro p_p en el lado opuesto (figura 5.2). La variación será:

$$p_{ps} = p_p \cos\theta \quad (5.11)$$

donde

θ es definido en la figura 5.2.

- (7) La fuerza horizontal total F_p debida a la presión local en silos de acero no rigidizados se obtiene de:

$$F_p = \frac{\pi}{2} s d_c p_p \quad (5.12)$$

- (8) Se puede utilizar un método simplificado para la aplicación de la presión local sobre silos circulares de pared delgada. La presión local se puede considerar actuando a una profundidad z_0 bajo la superficie equivalente, o a la mitad de la altura de la sección de paredes verticales, tomando la posición más alta de la carga.

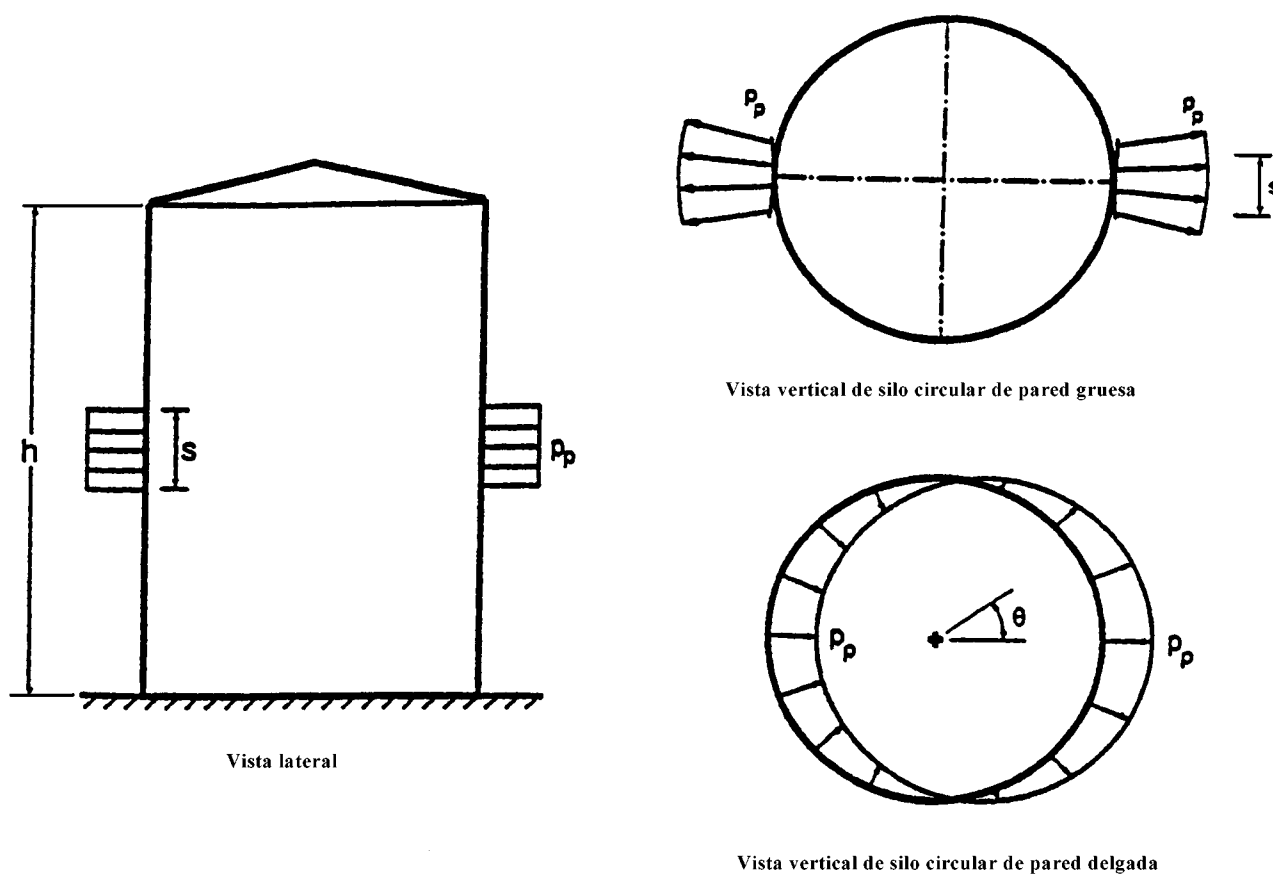


Fig. 5.2 – Planta y alzado de la presión local

5.2.1.2 Fondos planos

- (1) Las presiones verticales actuantes sobre el fondo plano o liso de un silo (inclinación $\alpha \leq 20^\circ$) se calcularán del siguiente modo:

$$p_{vf} = C_b p_v \quad (5.13)$$

donde

p_v se calcula mediante la expresión (5.4);

C_b es el coeficiente de mayoración de la presión sobre el fondo, al tener en cuenta la desigual distribución de la carga, calculado por medio de la expresión (5.14);

$$C_b = 1,2 \quad (5.14)$$

5.2.1.3 Tolvas

- (1)P Cuando $\alpha > 20^\circ$ (véase figura 5.3) la presión perpendicular a la pared inclinada de la tolva (p_n) se calcula como sigue:

$$p_n = p_{n3} + p_{n2} + (p_{n1} - p_{n2}) \frac{x}{I_h} \quad (5.15)$$

$$p_{n1} = p_{v0} (C_b \cos^2 \alpha + \operatorname{sen}^2 \alpha) \quad (5.16)$$

$$p_{n2} = C_b p_{v0} \cos^2 \alpha \quad (5.17)$$

$$p_{n3} = 3,0 \frac{A}{U} \frac{\gamma K_s}{\sqrt{\mu}} \operatorname{sen}^2 \alpha \quad (5.18)$$

donde

x es la longitud entre 0 y I_h (véase figura 5.3);

p_{n1} , p_{n2} es la presión debida al llenado de la tolva;

p_{n3} es la presión debida a la presión vertical sobre el material almacenado directamente por encima de la transición;

C_b es el coeficiente de mayoración de la presión sobre el fondo, tomado de la expresión (5.14);

p_{v0} es la presión vertical actuante en la transición, calculada por medio de la expresión (5.4).

- (2)P El valor de la presión de rozamiento sobre la pared p_t se obtiene mediante:

$$p_t = p_n \mu \quad (5.19)$$

donde

p_n se calcula por medio de la expresión (5.15).

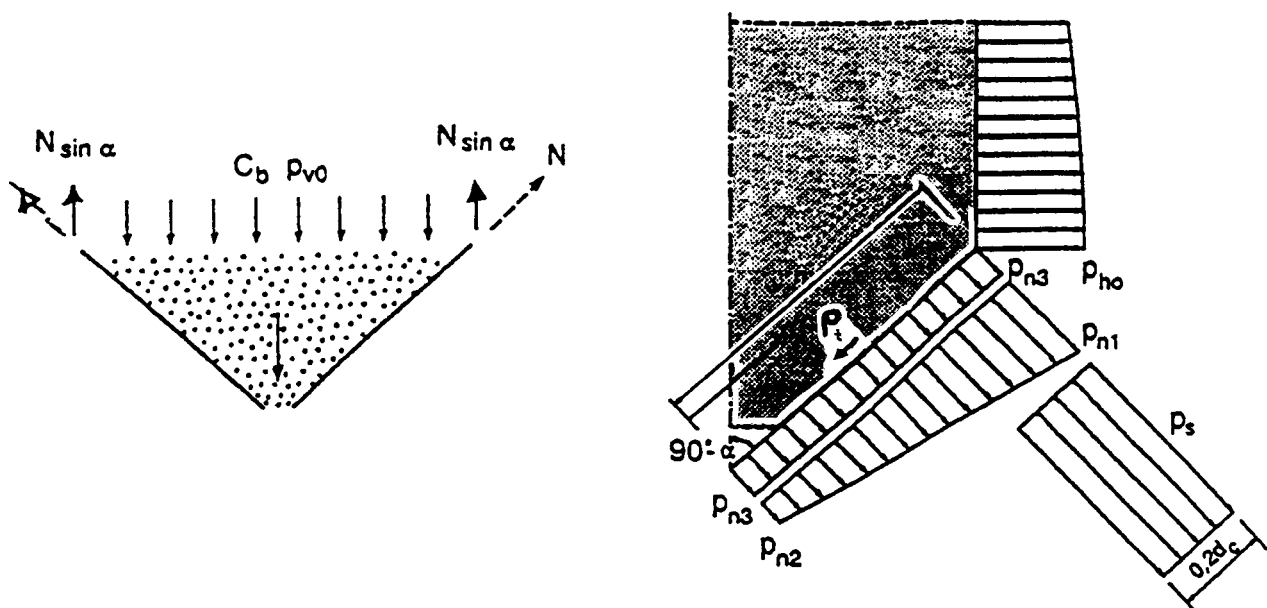


Fig. 5.3 – Cargas en la tolva y fuerzas de tracción en la parte superior de la tolva

- (3) Para el proyecto de silos puede ser necesario conocer la componente vertical de la fuerza de tracción sobre la parte superior de la tolva (por ejemplo, para el proyecto de los soportes del silo, o de un anillo de refuerzo en la zona de transición). La componente vertical se calculará por medio del equilibrio de fuerzas, añadiendo una sobrecarga vertical $C_b p_{v0}$ calculada en el nivel de transición más el peso del contenido de la tolva (figura 5.3).

5.2.2 Presiones de vaciado

5.2.2.1 Sección de paredes verticales

- (1)P Las presiones de vaciado se componen de una presión fija y de una presión libre llamada presión local.
- (2) Las presiones fijas p_{we} , p_{he} se obtienen de:

$$p_{we} = C_{wl} p_{wf} \quad (5.20)$$

$$p_{he} = C_h p_{hf} \quad (5.21)$$

donde

C_w y C_h son los coeficientes de mayoración de la presión, obtenidos en las expresiones (5.22) y (5.23).

En silos que no se carguen desde la parte superior (sin flujo):

$$C_w = C_h = 1,0 \quad (5.22)$$

En el resto de silos esbeltos, los coeficientes de mayoración de la presión sobre las paredes y de la presión horizontal serán:

$$C_w = 1,1 \quad \text{y} \quad C_h = C_0 \quad (\text{véase 7.1}) \quad (5.23)$$

- (3) La magnitud de la presión local de vaciado p_p es:

$$p_p = 0,2 \beta p_{he} \quad (5.24)$$

donde

p_{he} calculada con la expresión (5.21);

β depende de la mayor de las excentricidades de llenado o de vaciado, y es:

$$\beta = 1 + 4 e / d_c \quad (5.25)$$

- (4) Para el cálculo de las presiones locales de vaciado se puede utilizar lo expuesto para el cálculo de las presiones locales de llenado [5.2.1.1 (4) a (8)].

5.2.2.2 Fondos planos y tolvas

- (1) En silos con flujo en embudo, las presiones de vaciado sobre el fondo y sobre la tolva se pueden calcular aplicando lo expuesto para las presiones de llenado (5.2.1.2 y 5.2.1.3).
- (2) En silos con flujo en masa se aplicará una presión perpendicular fija adicional (sobrepresión en tolva p_s , véase figura 5.3), a una distancia inclinada de $0,2 d_c$ a lo largo de la pared de la tolva alrededor del perímetro.

$$p_s = 2 p_{h0} \quad (5.26)$$

donde

p_{h0} es la presión horizontal de llenado en la transición.

5.2.2.3 Método simplificado para llenado y vaciado

- (1) En silos en los que d_c sea menor de 5,0 m, se puede aplicar un método simplificado para la consideración de los procesos de llenado y vaciado. Con este método, las presiones locales indicadas en los apartados 5.2.1 y 5.2.2 se pueden eliminar, incrementando las presiones horizontales.
- (2) En silos de hormigón, con rigidizadores, o de sección transversal no circular, los incrementos de la presión horizontal de llenado ($p_{hf,s}$) y de vaciado ($p_{he,s}$) son:

$$p_{hf,s} = p_{hf} (1 + 0,2 \beta) \quad (5.27)$$

$$p_{he,s} = p_{he} (1 + 0,2 \beta) \quad (5.28)$$

donde

p_{hf} es calculado mediante la expresión (5.3);

p_{he} es calculado mediante la expresión (5.21);

β es calculado mediante las expresiones (5.9) ó (5.25).

- (3) En silos circulares de paredes delgadas, los incrementos de la presión horizontal de llenado $p_{hf,s}$ y de vaciado $p_{he,s}$, y los incrementos de la presión vertical de llenado $p_{wf,s}$ y de vaciado $p_{we,s}$ son:

$$p_{hf,s} = p_{hf} (1 + 0,1 \beta) \quad (5.29)$$

$$p_{he,s} = p_{he} (1 + 0,1 \beta) \quad (5.30)$$

$$p_{wf,s} = p_{wf} (1 + 0,2 \beta) \quad (5.31)$$

$$p_{we,s} = p_{we} (1 + 0,2 \beta) \quad (5.32)$$

donde

$p_{hf,s}$ se calcula con la expresión (5.3);

p_{he} se calcula con la expresión (5.21);

$p_{wf,s}$ se calcula con la expresión (5.2);

p_{we} se calcula con la expresión (5.20);

β se calcula con la expresiones (5.9) ó (5.25).

5.3 Silos cortos

- (1) Las cargas sobre las paredes de silos cortos se calcularán igual que en los silos esbeltos (véase 5.2), con las correspondientes modificaciones para los coeficientes de mayoración de las presiones, la presión local, las presiones horizontales y las presiones sobre el fondo.
- (2) Las modificaciones concernientes a los coeficientes de mayoración de las cargas C_h y C_w y la presión local serán:

Para silos con $h / d_c \leq 1,0$

$$C_w = C_h = 1,0 \quad \text{y} \quad p_{p,sq} = 0 \quad (5.33)$$

Para silos con $1,0 < h / d_c < 1,5$

$$C_w = 1,0 + 0,2 \left(\frac{h}{d_c} - 1,0 \right) \quad (5.34)$$

y

$$C_h = 1,0 + 2 (C_0 - 1,0) \left(\frac{h}{d_c} - 1,0 \right) \quad (5.35)$$

y

$$p_{p,sq} = 2 p_p \left(\frac{h}{d_c} - 1,0 \right) \quad (5.36)$$

donde

p_p es determinado en (5.2.1.1) y (5.2.2.1).

- (3) En la figura 5.4 se muestran las modificaciones realizadas para la presión lateral. La presión lateral p_h en el punto en que la superficie superior del material almacenado se encuentra con la pared del silo se puede reducir a cero. Por debajo de este punto se puede suponer una variación lineal de la presión (figura 4.4), calculada empleando un valor de $K_s = 1,0$, hasta que esta presión lineal sea igual a la presión determinada por la más apropiada de las ecuaciones (5.3) ó (5.21).
- (4) Las presiones verticales $p_{vf,sq}$ durante el llenado y el vaciado, actuantes sobre el fondo del silo serán:

$$p_{vf,sq} = C_b \left(p_{v1} + (p_{v2} - p_{v3}) \frac{1,5 D - h}{1,5 D - h_1} \right) \quad (5.37)$$

donde

p_{v1} obtenido de la expresión (5.4) con $z = h$;

p_{v2} obtenido de $p_{v2} = \gamma h_2$;

p_{v3} obtenido de la expresión (5.4) y $z = h_1$ (véase figura 5.4);

D es el punto más bajo de la pared que no está en contacto con el material almacenado (figura 5.4);

C_b calculado con la expresión (5.14).

- (5) Las presiones sobre la tolva durante el llenado se calcularán empleando la expresión (5.15).
- (6) Las presiones sobre la tolva durante el vaciado se calcularán aplicando las indicaciones dadas en el apartado 5.2.2.2 para fondos planos y tolvas.

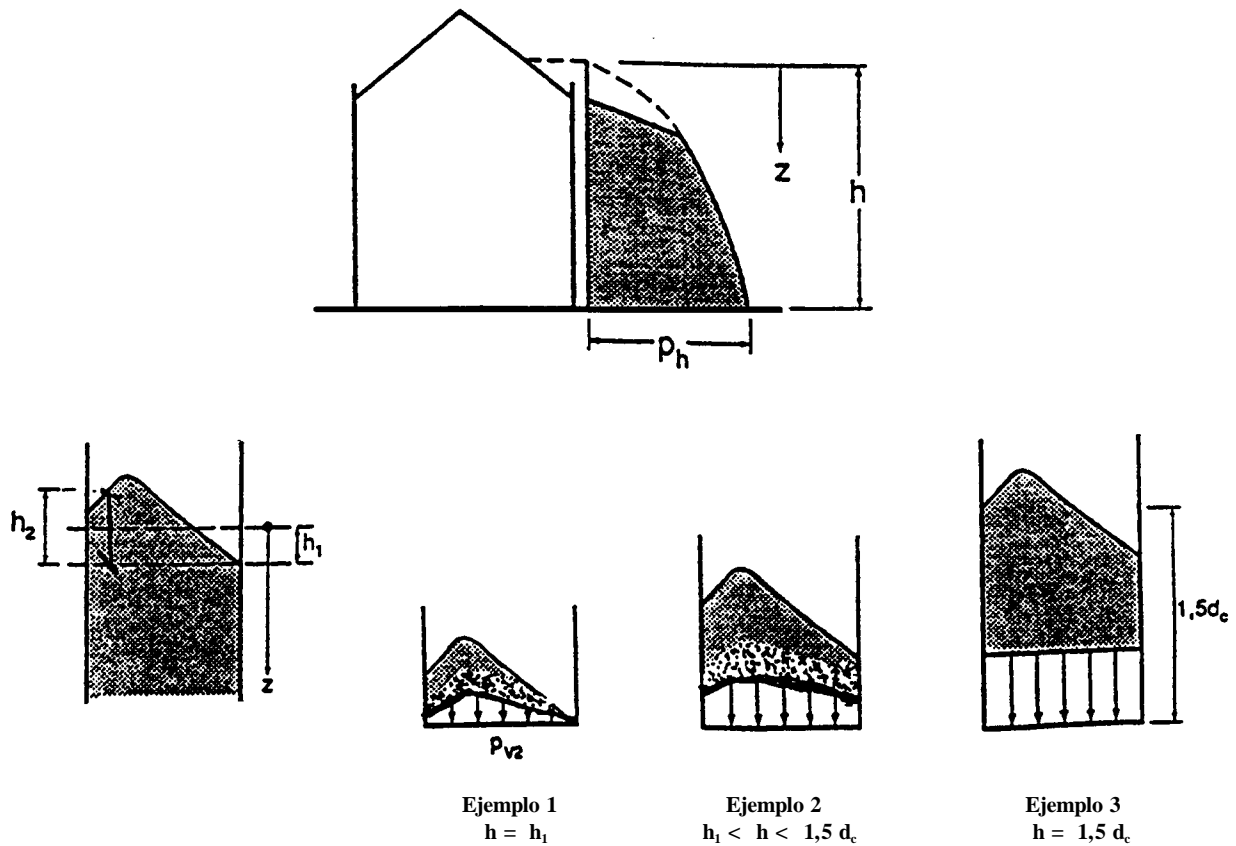


Fig. 5.4 – Cargas sobre las paredes y fondos planos en silos cortos

5.4 Silos de homogeneización y silos de alta velocidad de llenado

- (1)P Los silos de homogeneización y los de alta velocidad de llenado deben proyectarse para las siguientes hipótesis de carga:
- material almacenado fluidificado;
 - material almacenado no fluidificado.

- (2)P En silos para almacenamiento de material en polvo, en los que la velocidad de ascenso de la superficie del material almacenado exceda de 10 m/h, se asumirá que el material almacenado está fluidificado.

- (3)P La presión p sobre las paredes de un silo, debida a materiales fluidificados, se calculará del siguiente modo:

$$p = \gamma_1 z \quad (5.38)$$

donde

γ_1 es la densidad fluidificada.

- (4) La densidad fluidificada γ_1 de materiales en polvo se puede tomar como:

$$\gamma_1 = 0,8 \gamma \quad (5.39)$$

donde

γ es el peso específico del polvo, determinado en el capítulo 7.

- (5)P Las presiones de proyecto, cuando el material no esté fluidificado, se deben calcular de acuerdo con el apartado 5.2 para silos esbeltos, y de acuerdo con el apartado 5.3 para silos cortos.

6 CARGAS EN DEPÓSITOS DEBIDAS A LÍQUIDOS

6.1 Generalidades

- (1) Las cargas debidas a líquidos se calcularán considerando:
 - los tipos de líquidos a almacenar en el depósito;
 - la geometría del depósito;
 - la máxima profundidad posible del líquido en el depósito.
- (2) El valor característico de la presión, p , es:

$$p(z) = \gamma z \quad (6.1)$$

donde

z es la profundidad;

γ es la densidad del líquido.

6.2 Propiedades de los líquidos

- (1) Las densidades se encuentran en la ENV 1992-2-1, "Densidades, Pesos Propios y Cargas Exteriores".

7 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

7.1 Propiedades de los materiales granulares

- (1) Las propiedades de los materiales granulares se determinarán bien empleando la aproximación simplificada presentada en el apartado 7.2, o por medio de ensayos, como se indica en el apartado 7.3. En la tabla 7.1 se da el máximo coeficiente de mayoración de la presión, C_0 , o bien puede determinarse mediante lo expuesto en el apartado 7.4.

7.2 Aproximación simplificada

- (1) En la tabla 7.1 se definen las propiedades de los materiales. Los valores dados para γ son los valores límite superiores, mientras que los dados para μ_m y $K_{s,m}$ son valores medios.
- (2) Para tener en cuenta la variabilidad inherente de las propiedades de los materiales granulares, y para obtener valores que representen las propiedades extremas de los materiales, se deben aplicar los factores de conversión 0,9 y 1,15 a los valores de μ_m y $K_{s,m}$. De este modo, para calcular las presiones máximas se emplearán las siguientes combinaciones:

$$\text{Máx. } p_h \text{ para } K_s = 1,15 K_{s,m} \text{ y } \mu = 0,9 \mu_m \quad (7.1)$$

$$\text{Máx. } p_v \text{ para } K_s = 0,9 K_{s,m} \text{ y } \mu = 0,9 \mu_m \quad (7.2)$$

$$\text{Máx. } p_w \text{ para } K_s = 1,15 K_{s,m} \text{ y } \mu = 1,15 \mu_m \quad (7.3)$$

NOTA – Para estructuras en membrana, las cargas mínimas (de soporte) pueden ser las cargas desfavorables.

Tabla 7.1
Propiedades de los materiales granulados

Material granular	Densidad ³⁾ γ [kN/m ³]	Relación de presiones ($K_{s,m}$)	Coeficiente de rozamiento de la pared μ_m		Máximo coeficiente de mayoración de la presión C_0
			Acero ⁴⁾	Hormigón	
cebada ¹⁾	8,5	0,55	0,35	0,45	1,35
cemento	16,0	0,50	0,40	0,50	1,40
<i>clinker</i> de cemento	18,0	0,45	0,45	0,55	1,40
arena seca ²⁾	16,0	0,45	0,40	0,50	1,40
harina ¹⁾	7,0	0,40	0,30	0,40	1,45
ceniza volante ²⁾	14,0	0,45	0,45	0,55	1,45
maíz ¹⁾	8,5	0,50	0,30	0,40	1,40
azúcar ¹⁾	9,5	0,50	0,45	0,55	1,40
trigo ¹⁾	9,0	0,55	0,30	0,40	1,30
carbón ^{1), 2)}	10,0	0,50	0,45	0,55	1,45

1) Este material puede provocar explosiones de polvo.

2) Se debe tener cuidado por la posible variación en las propiedades del material.

3) Las densidades se dan para el cálculo de presiones, y no deben emplearse para el cálculo de volúmenes. Las densidades dadas en el capítulo 2 "Densidades de materiales de construcción y de materiales almacenados" de la ENV 1991-2-1 se pueden emplear para el cálculo de volúmenes.

4) No aplicable en paredes corrugadas.

7.3 Ensayo de materiales granulares

(1)P Los ensayos se deben realizar sobre muestras representativas del material granular. Se deben determinar los valores medios para cada propiedad del material, teniendo en cuenta las adecuadas variaciones de algunos parámetros secundarios tales como la composición, la granulometría, el contenido de humedad, la temperatura, la edad, la carga eléctrica debida a la manipulación y los métodos de producción.

(2)P Los valores medios de los ensayos se deben ajustar por medio de factores de conversión para obtener valores extremos. Los factores de conversión se deben seleccionar para tener en cuenta la variación de las propiedades del material a lo largo de la vida del silo, así como las imprecisiones de la muestra.

(3)P Los factores de conversión para una propiedad del material se deben ajustar si el efecto de uno de los parámetros secundarios representa más del 75% del margen introducido para dicha propiedad del material mediante los factores de conversión.

7.3.1 Peso específico γ

(1) El peso específico se debe determinar con un nivel de tensión correspondiente a la máxima presión vertical en el silo. La presión vertical p_{vf} en el silo se puede obtener empleando la expresión (5.4).

(2) En el anexo B se describe un método de ensayo para la medida del peso específico.

(3) El factor de conversión no será menor de 1,15.

7.3.2 Coeficiente de rozamiento de la pared μ_m

- (1) Se medirán dos valores de μ_m . Uno se empleará para la determinación de los tipos de flujo, y el otro para el cálculo de las presiones en las paredes.
- (2) Los ensayos para la determinación de μ_m , utilizado en la evaluación de los tipos de flujo, se llevarán a cabo a un bajo nivel de tensión, correspondiente al producido durante el flujo en la parte baja de la tolva.
- (3) Los ensayos para la determinación de μ_m , utilizado en el cálculo de presiones, se llevarán a cabo al nivel de tensión correspondiente a la máxima presión horizontal p_{hf} en la parte vertical del silo. p_{hf} se puede obtener empleando la expresión 5.3.
- (4) En el anexo B se describen los métodos de ensayo para la medida de los dos valores de μ_m .
- (5) Los factores de conversión no serán menores que 1,15 para los valores del límite superior, ni mayores que 0,9 para los valores del límite inferior.

7.3.3 Relación $K_{s,m}$ entre las presiones horizontales y verticales

- (1) La relación $K_{s,m}$ entre las presiones horizontales y verticales se calculará con un nivel de tensión vertical correspondiente a la máxima presión vertical en el silo. La muestra del ensayo se confinará lateralmente. La presión vertical se puede obtener empleando la expresión 5.4.
- (2) En el anexo B se propone un método de ensayo.
- (3) Se ofrece también un método de ensayo alternativo basado en la medida del ángulo de rozamiento interno.
- (4) Los factores de conversión no serán menores que 1,15 para los valores del límite superior, ni mayores que 0,9 para los valores del límite inferior.

7.4 Máximo coeficiente de mayoración de la carga

- (1)P El coeficiente de mayoración C de la presión tiene en cuenta varios fenómenos que ocurren durante el vaciado del silo. La magnitud del coeficiente de mayoración de la presión aumenta con el aumento de la resistencia del material.
- (2) No se ha desarrollado, de momento, un método apropiado de ensayo en laboratorio para el parámetro C . Los coeficientes de mayoración de presiones se basan en la experiencia y se aplican a silos con sistemas de llenado y vaciado convencionales, y construidos con tolerancias estándar de ingeniería.
- (3) Para los materiales no listados en la tabla 7.1, el máximo coeficiente de mayoración de la presión sobre las paredes se puede obtener empleando:

$$\text{Para } \varphi \leq 30^\circ \quad C = 1,35$$

y

$$\text{para } \varphi > 30^\circ \quad C = 1,35 + 0,02 (\varphi - 30^\circ) \quad (7.4)$$

donde

φ es medido en grados.

- (4) En el anexo B se da un método de ensayo para determinar φ .
- (5) Se pueden estimar coeficientes de mayoración de presión adecuados a silos específicos con materiales almacenados específicos, basados en ensayos detallados realizados sobre dichos silos.

ANEXO A (Informativo)**BASES DE PROYECTO. CLÁUSULAS ADICIONALES
A LA ENV 1991-1 PARA SILOS Y DEPÓSITOS**

NOTA – Se pretende que este anexo, en un período posterior, sea incorporado a la ENV 1991-1 "Bases de Proyecto".

A1 Generalidades

- (1) En principio se puede aplicar el formato general definido en la ENV 1991-1 para métodos de proyecto. Sin embargo, los silos y depósitos difieren de otras estructuras en que éstos están sujetos a las cargas de proyecto totales provocadas por líquidos o materiales granulares durante la mayor parte de su vida.
- (2) En este anexo se ofrece información adicional aplicable a silos y depósitos en lo referente a los coeficientes parciales sobre las acciones (factores γ), y a las combinaciones con otras acciones sobre silos y depósitos, así como los factores ψ relevantes.
- (3) Las acciones térmicas incluyen efectos climáticos, así como el efecto de materiales calientes. Las situaciones de proyecto a considerar incluyen:
 - Material caliente en un silo o depósito parcialmente lleno. Se considerará el efecto del aire caliente sobre el material almacenado.
 - Resistencia a la contracción de las paredes del silo por el material almacenado, durante el enfriamiento.
- (4) La determinación del efecto de los asientos diferenciales sobre grupos de silos o depósitos debe basarse en la peor combinación posible de elementos llenos y vacíos.

A2 Estado Límite Último**A2.1 Coeficientes parciales**

- (1) Para el proyecto de silos y depósitos se pueden emplear los valores dados en la tabla 9.2 de la ENV 1991-1 "Bases de Proyecto".
- (2) Si la profundidad máxima del líquido y la densidad del líquido almacenado más pesado están bien definidas, el valor del coeficiente γ se puede reducir de 1,50 a 1,35.

A2.2 Factores ψ

- (1) En la tabla A.1 se encuentran los coeficientes de combinación ψ para cargas de silos y de depósitos, así como los coeficientes de combinación con otras cargas.

Tabla A1
Factores ψ para cargas de silos y depósitos

Acción	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Cargas sobre silos debidas a materiales granulares	1,0	0,9	0,8
Cargas sobre depósitos debidas a líquidos	1,0	0,9	0,8
Cargas exteriores. Deformaciones impuestas	0,7	0,5	0,3
Cargas de nieve	0,6 ¹⁾	0,2 ¹⁾	0
Cargas de viento	0,6 ¹⁾	0,5 ¹⁾	0
Temperatura	0,6 ¹⁾	0,5 ¹⁾	0

1) Valores aplicables excepto en determinadas zonas geográficas que requieren modificar estos valores.

ANEXO B (Informativo)

MÉTODOS DE ENSAYO DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES GRANULARES

B1 Objeto

Este anexo describe los métodos de ensayo para la determinación de los parámetros de los materiales almacenados introducidos en la ENV 1991-4.

B2 Campo de aplicación

- (1) Los métodos de ensayo se pueden emplear en el proyecto de silos específicos para materiales no indicados en la tabla 7.1, o como una alternativa a los valores simplificados dados por dicha tabla. Las tensiones de referencia de los ensayos deben ser verticales u horizontales, y deben ser representativas de las tensiones en la transición del silo tras el llenado del material almacenado.
- (2) Los métodos de ensayo pueden utilizarse, también, en la obtención de valores generales de propiedades de los materiales. En los ensayos llevados a cabo para la determinación de las propiedades generales se emplearán los siguientes niveles de tensión de referencia, siempre que sean aplicables:

100 kPa para representar la presión vertical del silo (B7, B8 y B9).

50 kPa para representar la presión horizontal del silo (B6.2).

B3 Notación

En este anexo se aplicará la siguiente notación:

c cohesión

F_1 esfuerzo rasante (Figura B1)

$K_{s,m0}$ relación entre la presión horizontal y la vertical, con paredes lisas

σ_r tensión de referencia

φ_c ángulo de rozamiento interno medido sobre una muestra de ensayo consolidada

τ_{fi} máxima tensión cortante, medida sobre una muestra de ensayo a cortante, $i = 1, 2$

B4 Definiciones

En este anexo se aplicarán las siguientes definiciones:

B4.1 parámetro secundario: Parámetros que pueden influir en las propiedades del material almacenado. Los parámetros secundarios incluyen la composición del material, la granulometría, el grado de humedad, la temperatura, la edad, la carga eléctrica debida a la manipulación y el método de producción. Para la determinación de valores generales a la tensión de referencia, tal como se indica en el capítulo B2, las variaciones de dichos niveles de tensión se considerarán como un parámetro secundario.

B4.2 toma de muestras: La selección de muestras representativas de un material almacenado o del material de las paredes de un silo.

B4.3 tensión de referencia: Nivel de tensión al que se realizan las comprobaciones de las propiedades de un material almacenado. La tensión de referencia se toma de modo que corresponda al nivel de tensión en el silo tras el llenado.

B5 Toma y preparación de muestras

- (1) Los ensayos se llevarán a cabo sobre muestras representativas del material granular. El valor medio de cada propiedad del material debe determinarse mediante una adecuada variación de los parámetros secundarios.
- (2) Se debe emplear el siguiente método de preparación de muestras en los ensayos descritos en B6.2, B7, B8.1 y B9:
 - La muestra se verterá en el molde, sin vibraciones ni otras fuerzas de compactación, y entonces se aplicará la tensión de referencia σ_r . Un disco superior girará hacia adelante y hacia atrás tres veces un ángulo de 10° , para consolidar la muestra (véase figura B1).
- (3) Los valores medios de los ensayos deben ajustarse mediante unos coeficientes de conversión que proporcionen valores extremos. Dichos coeficientes de conversión deben seleccionarse de tal forma que tengan en cuenta la influencia de los parámetros secundarios, la variabilidad de las propiedades de los materiales a lo largo de la vida del silo, y las inexactitudes en la toma de muestras.
- (4) Los factores de conversión para una propiedad del material se ajustarán si el efecto de un solo parámetro secundario representa más del 75% del margen introducido a la propiedad del material por el factor de conversión.

B6 Rozamiento de las paredes

Se deben utilizar dos parámetros:

- Ángulo de rozamiento ϕ_w de la pared para la evaluación del flujo.
- Coeficiente de rozamiento μ_m de la pared para la determinación de presiones.

B6.1 Ángulo de rozamiento ϕ_w de la pared para la evaluación del flujo

B6.1.1 Principio del ensayo

Una muestra del material granular se frota a lo largo de una superficie que representa la pared de la tolva, midiéndose la fuerza de rozamiento sobre la superficie frotada. La presión de referencia se mantendrá baja, para simular las bajas presiones producidas durante el vaciado cerca de la salida del silo.

B6.1.2 Aparato y método de ensayo

El ensayo se puede llevar a cabo empleando el aparato descrito en el apartado B.6.2, y de acuerdo con el procedimiento de ensayo definido en "Técnica Internacional Estándar de Ensayo de Frotado", Informe de la Federación Internacional de Ingeniería Química, EFCE, Grupo de Trabajo de la Mecánica de Sólidos Granulares, Institución de Ingenieros Químicos, 1989 (o revisiones).

B6.2 Coeficiente de rozamiento μ_m de la pared para la determinación de presiones

B6.2.1 Principio del ensayo

Una muestra del material granulado se frota a lo largo de una superficie que representa la pared del silo (una muestra con corrugado, en el caso de un silo de acero corrugado), midiéndose la fuerza de rozamiento sobre la superficie frotada.

B6.2.2 Aparato

El aparato del ensayo se muestra en la figura B1. El diámetro del molde será al menos 40 veces el tamaño máximo de las partículas, y la altura compactada H de la muestra debe estar comprendida entre $0,15 D$ y $0,20 D$. En el caso de muestras de pared con irregularidades semejantes a corrugas, el tamaño del molde se elegirá de forma adecuada.

B6.2.3 Procedimiento

- (1) La tensión de referencia debe ser igual a la presión horizontal del silo.
- (2) La preparación de las muestras se llevará a cabo de acuerdo con lo indicado en el capítulo B5.
- (3) El frotado de la muestra se llevará a cabo a una velocidad constante de aproximadamente $0,04 \text{ mm/sec}$.
- (4) La fuerza de rozamiento F_1 obtenida con grandes deformaciones se empleará en el cálculo del coeficiente de rozamiento (figura B1).

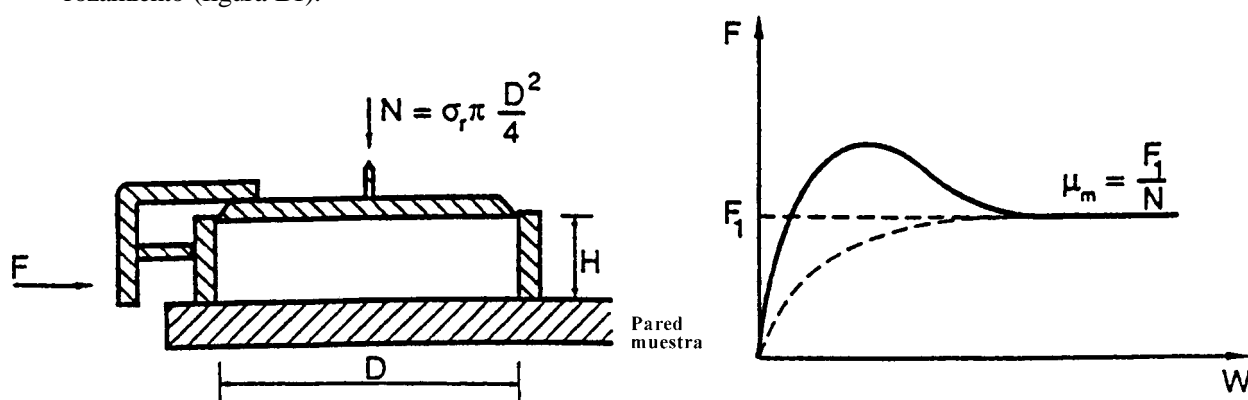


Fig. B1 – Método de ensayo para la determinación del coeficiente de rozamiento de la pared

B7 Peso específico γ consolidado

B7.1 Principio del ensayo

El peso específico γ se determina por medio de una muestra consolidada del material granulado.

B7.2 Aparato

El molde mostrado en la figura B2 se empleará en la medición del peso y el volumen de la muestra del material. El diámetro D del molde será al menos 40 veces el tamaño máximo de las partículas, y la altura compactada H estará entre $0,3 D$ y $0,4 D$.

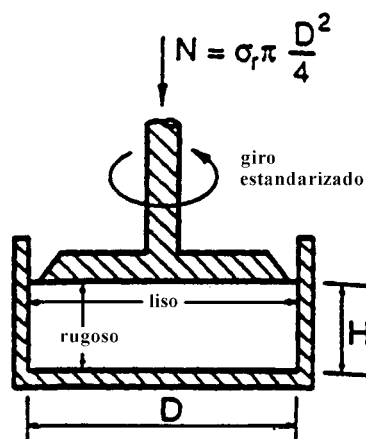


Fig. B2 – Dispositivo para la determinación de γ

B7.3 Procedimiento

- (1) La tensión de referencia será igual a la presión vertical del silo.
- (2) La preparación de las muestras se atenderá a lo indicado en el capítulo B5. El peso específico se determinará dividiendo el peso de la muestra consolidada del material granulado entre su volumen aparente.

B8 Relación $K_{s,m}$ entre las presiones horizontal y vertical

B8.1 Medición directa

B8.1.1 Principio del ensayo

Se aplica una presión vertical sobre una muestra cuya deformación horizontal está impedida. Se miden las tensiones horizontales y verticales resultantes, determinándose el coeficiente $K_{s,m0}$.

NOTA – La magnitud del coeficiente $K_{s,m0}$ está influenciada por la dirección de las tensiones principales en la muestra del ensayo. Las tensiones horizontales y verticales serán aproximadamente tensiones principales en la muestra a ensayar, aunque no tienen por qué serlo en el silo.

B8.1.2 Aparato

La geometría del aparato de ensayo es similar a la del aparato descrito en el capítulo B7 para la medida del peso específico γ (figura B3). Para medir la tensión horizontal es necesario disponer de una placa de fondo separada.

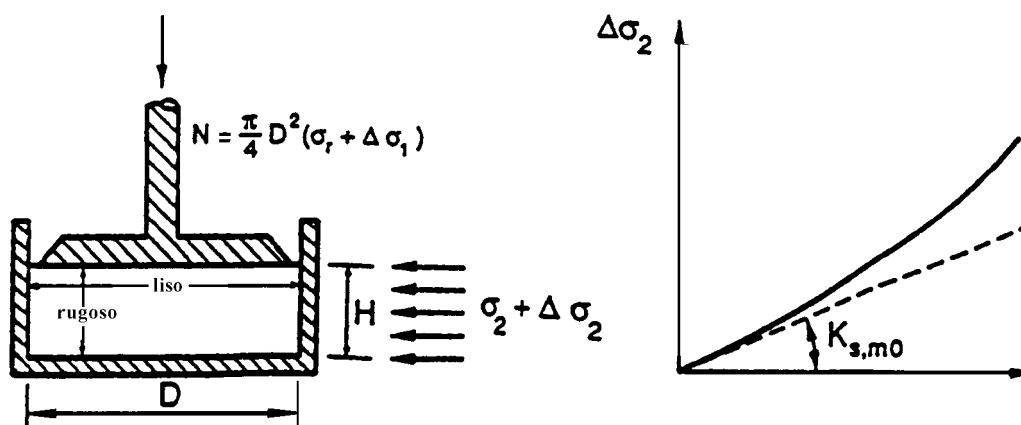


Fig. B3 – Método de ensayo para la determinación de $K_{s,m0}$

B8.1.3 Procedimiento

- (1) La tensión de referencia será igual a la presión vertical del silo.
- (2) La preparación de las muestras se atenderá a lo indicado en el capítulo B5.
- (3) La relación entre los incrementos de presiones horizontales y verticales, a partir de los cuales se calcula $K_{s,m0}$, se determina tal y como se indica en la figura B3.

$K_{s,m}$ se tomará como $K_{s,m} = 1,1 K_{s,m0}$

B8.2 Medición indirecta

Un valor apropiado de $K_{s,m}$ en condiciones de llenado y almacenamiento es:

$$K_{s,m} = 1,1 (1 - \sin \varphi) \quad (\text{B.1})$$

donde φ es el ángulo de rozamiento interno que puede ser determinado bien por los métodos descritos en el capítulo B9 o bien por medio de un aparato de ensayo triaxial.

B9 Parámetros de resistencia, c , φ_c y φ

B9.1 Principio del ensayo

La resistencia de una muestra de material almacenado se puede determinar mediante el ensayo del molde de corte. Para la definición de la resistencia de un material almacenado tras el llenado del silo se emplean tres parámetros, c , φ_c y φ .

B9.2 Aparato

El aparato de ensayo consiste en un molde cilíndrico de frotado, tal y como muestra la figura B4. El diámetro del molde, D , será al menos 40 veces el tamaño máximo de las partículas, y la altura H estará entre $0,3 D$ y $0,4 D$.

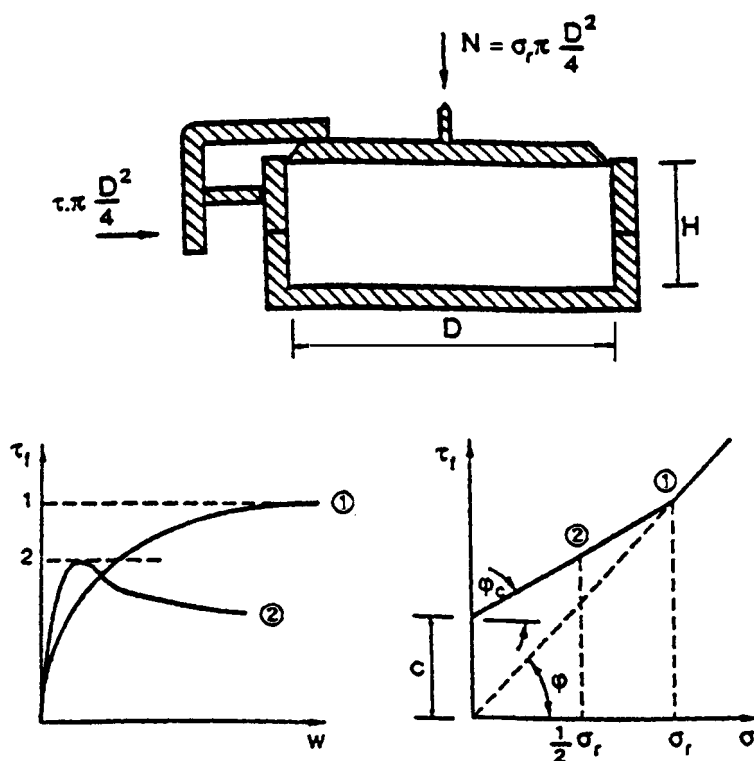


Fig. B4 – Método de ensayo para la determinación de los ángulos de rozamiento interno φ_c y φ y la cohesión c al nivel de preconsolidación σ_r .

B9.3 Procedimiento

- (1) La tensión de referencia σ_r será igual a la presión vertical del silo. La preparación de las muestras se atenderá a lo indicado en el capítulo B5.

- (2) La máxima tensión rasante τ_f producida antes de completar un desplazamiento horizontal $w = 0,05 D$ se empleará para calcular los parámetros de resistencia del material.
- (3) Se realizarán al menos dos ensayos (tabla B1 y figura B4). Una muestra se frotará estando sometida a la tensión de referencia, y la otra se frotará a la mitad de la tensión de referencia, tras realizar una carga inicial hasta la tensión de referencia. En la tabla B1 se definen las tensiones determinadas en los dos ensayos.

Tabla B1
Ensayos recomendados

Ensayo	Pre-carga	Carga de ensayo	Resultado
Nº 1	σ_r	σ_r	τ_{f1}
Nº 2	σ_r	$0,5 \sigma_r$	τ_{f2}

Los parámetros de resistencia c , φ_c y φ del material almacenado se calcularán del siguiente modo:

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\tau_{f1}}{\sigma_r} \right) \quad (B2)$$

$$\varphi_c = \arctan \left(\frac{\tau_{f1} - \tau_{f2}}{0,5 \sigma_r} \right) \quad (B3)$$

$$c = \sigma_r (\tan \varphi - \tan \varphi_c) \quad (B4)$$

- (4) La resistencia de los materiales sin cohesión ($c = 0$) se describe por medio del parámetro: ángulo de rozamiento interno φ (igual a φ_c).

NOTA – En lugar del método descrito se puede emplear un ensayo triaxial estándar.

ANEXO C (Informativo)

ACCIONES SÍSMICAS

C1 Acciones sísmicas

NOTA – Este anexo se eliminará cuando este tema sea tratado en la ENV 1998.

- (1) En este anexo se exponen recomendaciones generales para el proyecto de silos sometidos a acciones sísmicas. Las reglas de proyecto complementan las normas generales para el cálculo de acciones sísmicas en estructuras, definidas en ENV 1998, y podrán ser incorporadas a la ENV 1998 en una fase posterior.
- (2) El valor de la aceleración provocada por el terremoto en la estructura del silo se calcula de acuerdo con ENV 1998. El silo y el material granular pueden ser considerados como una sola masa rígida.

C2 Notación

a aceleración horizontal debida al terremoto;

p_{hs} presión horizontal debida a acciones sísmicas.

C3 Situaciones de proyecto

- (1) Se considerarán las siguientes situaciones de proyecto:
 - las aceleraciones horizontales y las cargas verticales resultantes sobre los soportes y la cimentación del silo (C4.1);
 - las presiones adicionales sobre las paredes del silo (C4.2);

la recolocación del material granular en la parte superior del silo. Las acciones sísmicas pueden provocar que el material almacenado forme líneas de desprendimiento que pongan en peligro la construcción de la cubierta y las paredes del silo en la zona superior (figura C1).

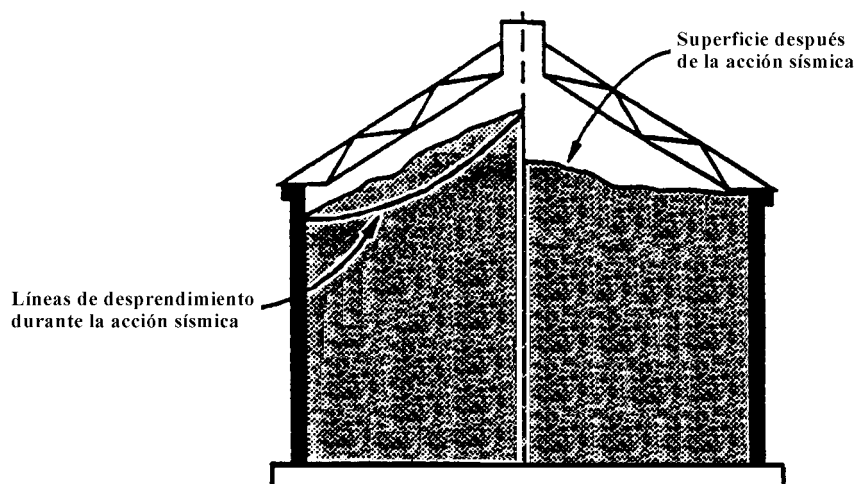


Fig. C1 – Redistribución de material granular en la parte superior del silo

C4 Acciones sísmicas

En el apartado C4.1 se da una guía para el cálculo de acciones sísmicas sobre soportes y cimentaciones de silos, y en el apartado C4.2 para las paredes de los silos.

C4.1 Soportes y cimentación del silo

Las acciones sísmicas debidas al peso propio del silo y al material granular se pueden considerar como una sola fuerza actuante en el centro de gravedad de la estructura y el material granulado combinados (figura C2).

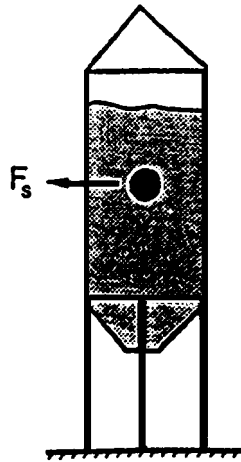


Fig. C2 – Acciones sísmicas en subestructuras

C4.2 Paredes del silo

Se aplicará una presión horizontal a las paredes del silo. Dicha presión es equivalente a la masa del material granular multiplicada por el valor de la aceleración del sismo. En la figura C3 se muestra la distribución horizontal de presiones debida a acciones sísmicas en silos circulares y rectangulares. La presión horizontal es constante a lo largo de la altura del silo, excepto cerca de la parte superior del silo, donde la resultante de la presión sísmica y la presión de llenado o vaciado no serán menores que cero.

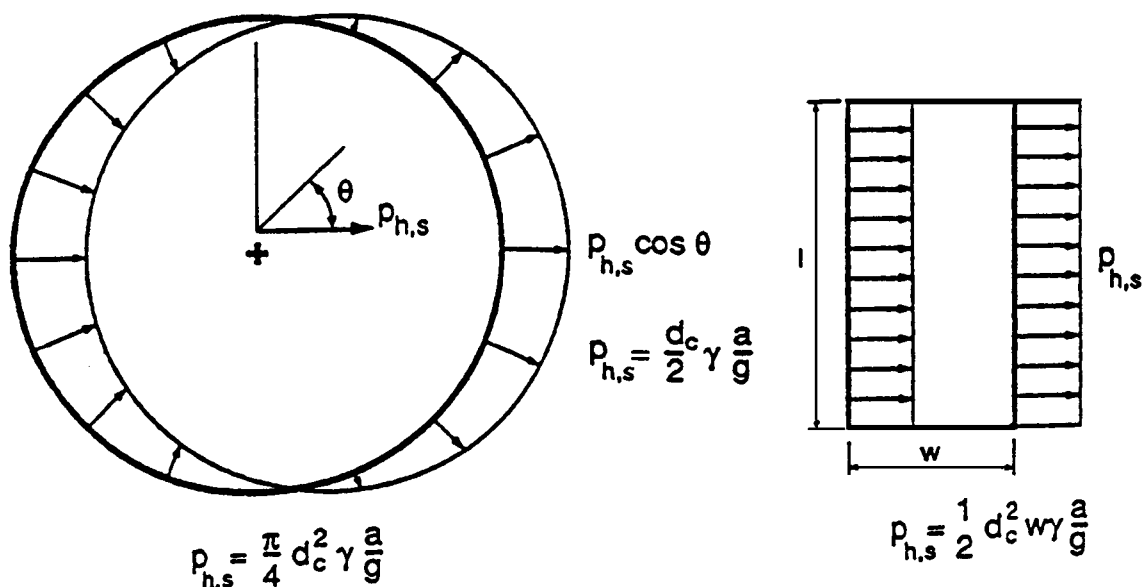


Fig. C3 – Vista en planta de la presión horizontal adicional debida a acciones sísmicas sobre la zona de paredes verticales de silos de sección circular y rectangular

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Dirección C Génova, 6
28004 MADRID-España

Teléfono (91) 432 60 00

Fax (91) 310 40 32