UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

TRES METODOS PARA EL ANALISIS ESTRUCTURAL DE SILOS DE CONCRETO REFORZADO

POR

ADOLFO ARTURO ELIAS CHAVEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN
INGENIERIA ESTRUCTURAL

MAYO, 2001

TM
TA444
.E4
2001
c.1

1080095026

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

UN MÉTODO PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE MUROS DE CONCRETO REFORZADO

POR

[illegible]

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA ESTRUCTURAL

MAYO, 2001

TM
TA444
4
2

B U Raúl Ra. del Frías
UANL
FONDO
TESIS MAESTRIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TRES MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE SILOS DE CONCRETO REFORZADO

Por:

ADOLFO ARTURO ELÍAS CHÁVEZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Especialidad en
Ingeniería Estructural

Mayo, 2001

TRES MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

DE SILOS DE CONCRETO REFORZADO

Aprobación de la Tesis:

Asesor de la Tesis
Dr. Ricardo González Alcorta

Evaluador de Tesis
M. I. Ernesto Treviño Treviño

Evaluador de Tesis
M. C. Anastacio Vásquez Vásquez

Sub-director de Estudios de Postgrado

Dr. Ricardo González Alcorta

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECRETARIA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

COMPROBANTE DE CORRECCION

Tesista: ADOLFO ARTURO ELÍAS CHÁVEZ

Tema de la tesis: TRES MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE SILOS DE CONCRETO REFORZADO.

Este documento certifica la corrección DEFINITIVA **del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.**

Recomendaciones adicionales:

(Ninguna)

Nombre y firma de quien corrigió: _____

Arq. Ramón Longoria Ramírez

El Secretario de Posgrado: _____

Dr. Ricardo González Alcorta

Ciudad Universitaria, a 13 **de** febrero **de** 2001.

RESUMEN

Adolfo Arturo Elías Chávez **Fecha de Graduación: Mayo, 2001**

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Título del Estudio: **TRES MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE SILOS DE CONCRETO REFORZADO**

Número de páginas: 214 **Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Estructural**

Área de Estudio: Ingeniería Estructural

Propósito del Estudio: Aportar recomendaciones en cuanto al uso y limitaciones que tienen algunos de los métodos de análisis de silos circulares individuales de concreto reforzado tomando en cuenta el efecto de las cargas excéntricas, diferentes sistemas de fondo y de relaciones de altura con el diámetro.

Contribuciones y Conclusiones: El método del Elemento Finito es el más completo, por lo que se recomienda ampliamente su utilización para el análisis definitivo de los silos de concreto. También se pueden utilizar otros métodos de análisis, pero con ciertas limitaciones que se indican en las conclusiones y recomendaciones de esta tesis. Estos métodos de análisis podrían aplicarse en forma preliminar para la estimación económica de proyectos de inversión

FIRMA DEL ASESOR:_____

DEDICATORIA

Dedico especialmente esta tesis:

A mi esposa; por su apoyo, confianza y aliento:

Adriana Montemayor Villela

A mis padres:

Filiberto Elías Flores

María Guadalupe Chávez García

A mis hijos:

Adolfo Arturo

Ángel Adrián

Adriana Lizbeth

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ricardo González Alcorta, por todo

el apoyo y tiempo brindado para

la elaboración de esta tesis

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo	2
2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	4
2.1 Métodos de análisis seleccionados	4
2.2 Hipótesis y consideraciones	5
2.3 Estudio comparativo	6
3. DESCRIPCIÓN DE LOS SILOS DE CONCRETO	7
3.1 Tipos de silos	7
3.2 Elementos estructurales	20
3.3 Cargas en silos	28
3.4 Presiones ocasionadas por los materiales almacenados	32
4 MODELOS ESTRUCTURALES DE LOS SILOS ANALIZADOS	52
4.1 Dimensiones de los modelos estructurales de silos	52
4.2 Datos propuestos para los análisis	53
4.3 Acciones mecánicas	55
4.4 Deformaciones	56
5 ANÁLISIS CON EL MÉTODO CONVENCIONAL	57
5.1 Descripción del método	58
5.2 Análisis de los modelos	66
5.3 Resultados de los análisis	70
6. ANÁLISIS CON EL MÉTODO DE LA ANALOGÍA DE MARCOS	73
6.1 Descripción del método	73
6.2 Análisis de los modelos	77
6.3 Resultados de los análisis	83

7. ANÁLISIS CON EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO 85

7.1 Descripción del método 85
7.2 Análisis de los modelos 88
7.3 Resultados de los análisis 93

8. ESTUDIO COMPARATIVO DE ACCIONES MECÁNICAS 95

8.1 Casos de estudio 95
8.2 Discusión de resultados 97

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 107

ANEXOS:

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 111

TABLAS 112

FIGURAS 144

FOTOGRAFÍAS 197

APÉNDICES:

Apéndice A. Propiedades físicas de materiales granulares y factores de sobrepresión e impacto para silos de concreto de acuerdo con el ACI 313-91. 203

Apéndice B. Ayudas para el cálculo de presiones totales de diseño utilizando el Método de Reimbert. 207

Apéndice C. Factores de sobrepresión recomendados por S. Safarian para silos de concreto. 213

LISTA DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
4-1	Relación entre los métodos de análisis, elementos estructurales y acciones mecánicas	113
5-1	Datos para el análisis de silo con losa plana y H/D = 3, usando el Método I	114
5-2	Datos para el análisis de silo con losa plana y H/D = 2, usando el Método I	115
5-3	Datos para el análisis de silo con losa plana y H/D = 1.5, usando el Método I	116
5-4	Datos para el análisis de silo con losa cónica concéntrica y H/D = 3, usando el Método I (información para losa cónica)	117
5-5	Datos para el análisis de silo con losa cónica excéntrica y H/D = 3, usando el Método I (información para losa cónica)	118
6-1	Datos para el análisis de silo con losa plana y H/D = 3, usando el Método II	119
6-2	Datos para el análisis de silo con losa plana y H/D = 2, usando el Método II	120
6-3	Datos para el análisis de silo con losa plana y H/D = 1.5, usando el Método II	121
6-4	Datos para el análisis de silo con losa cónica concéntrica y H/D = 3, usando el Método II (información para losa cónica)	122
6-5	Datos para el análisis de silo con losa cónica excéntrica y H/D = 3, usando el Método II (información para losa cónica)	123

Tabla	Descripción	Página
7-1	Datos para el análisis de silo con losa plana y H/D = 3, usando el Método III	124
7-2	Datos para el análisis de silo con losa plana y H/D = 2, usando el Método III	125
7-3	Datos para el análisis de silo con losa plana y H/D = 1.5, usando el Método III	126
7-4	Datos para el análisis de silo con losa cónica concéntrica y H/D = 3, usando el Método III (información para losa cónica)	127
7-5	Datos para el análisis de silo con losa cónica excéntrica y H/D = 3, usando el Método III (información para losa cónica)	128
8-1	Resultados del análisis para silo con losa plana y H/D = 3	129 - 131
8-2	Resultados del análisis para silo con losa plana y H/D = 2	132 - 134
8-3	Resultados del análisis para silo con losa plana y H/D = 1.5	135 - 137
8-4	Resultados del análisis para silo con losa cónica concéntrica y H/D = 3	138 - 140
8-5	Resultados del análisis para silo con losa cónica excéntrica y H/D = 3	141 - 143

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
3-1	Esquema típico de manejo de materiales.	145
3-2	Clasificación de silos, usando el plano de ruptura.	145
3-3	Secciones transversales típicas de silos.	146
3-4	Grupos de silos típicos.	146
3-5	Preesfuerzo circunferencial mediante traslape de tendones.	147
3-6	Post-tensado de silos múltiples.	147
3-7	Silos de 6 m de diámetro fabricado con unidades curvas presforzadas atornilladas.	148
3-8	Unidades precoladas y uniones para grupo de silos rectangulares.	148
3-9	Silo octagonal con unidades precoladas, unidas con concreto colado en el lugar.	148
3-10	Grupo de silos precolados rectangulares.	149
3-11	Silos circulares prefabricados.	149
3-12	Silos precolados. Planta y detalles de conexión.	150
3-13	Sección transversal de silo de homogenización de Claudius Peters.	151
3-14	Sistema de mezclado con cámara cilíndrica interior.	151
3-15	Sistema con cámara de cono invertido dentro del silo.	152
3-16	Planta típica de silo y cámara de mezclado.	152
3-17	Silos de homogenización Fuller, vistas isométricas.	153

Figura	Descripción	Página
3-18	Fondo de silo para sistema de aireación Fuller, con descarga central.	153
3-19	Tipos de silos de almacenamiento, con fondos de cono invertido.	154
3-20	Silos de cemento con facilidades de envase y embarque de cemento y carbón.	154
3-21	Soporte de fondos cónicos elevados.	155
3-22	Silos concéntricos con cono invertido, soportado en el interior del silo.	155
3-23	Elementos estructurales típicos de los silos de concreto.	156
3-24	Detalles típicos de viga de soporte de tolva.	157
3-25	Fuerzas en tolva cónica.	157
3-26	Tipos de losas de cimentación para silos.	157
3-27	Cimentación con trabes y pedestales sobre losa.	157
3-28	Lámina horizontal para las ecuaciones de Janssen.	158
3-29	Lámina de material almacenado para la ecuación de Reimbert.	158
3-30	Curvas de presión vertical, lateral y fricción para las ecuaciones de Reimbert.	158
3-31	Presiones sobre superficies inclinadas.	159
3-32	Patrones de canales de flujo con diferentes descargas excéntricas.	159
3-33	Flujos de masa y embudo.	160
3-34	Silos con diferentes flujos de material.	160
3-35	Silos con flujo de embudo incluyendo el ángulo del canal.	161
3-36	Límites para flujos de masa y embudo.	161

Figura	Descripción	Página
3-37	Silos con flujo expandido.	162
3-38	Mecanismos de pulsación.	162
3-39	Silo con saliente circunferencial.	162
3-40	Modelo para material con pulsación.	162
3-41	Curvas de diseño para presión lateral, según Reimbert.	163
3-42	Curva de diseño para presión lateral, según Safarian.	163
3-43	Modificación de presión, debido a descarga excéntrica en silo rectangular.	164
3-44	Modificación de presión, debido a descarga excéntrica en silo circular.	164
4-1	Modelos estructurales de silos con losa de fondo plana.	165
4-2	Modelos estructurales de silos con losa de fondo cónica.	166
4-3	Acciones mecánicas y elementos estructurales en silo típico.	167
5-1	Silo o tanque con base articulada bajo presión de material.	168
6-1	Viga sobre cimentación elástica y simulación de la analogía de marcos.	168
6-2	Distribución de presión sísmica en silos y tanques cilíndricos.	168
6-3	Simulación de analogía de marcos para silos y tanques elevados no cilíndricos.	169
6-4	Cargas equivalentes en nudos para la simulación de marcos.	169
6-5	Distribución de cambios de temperatura en paredes de silos o tanques.	169

Figura	Descripción	Página
6-6	Modelo estructural de silo de 12 m de diámetro, H/D = 3 y losa de fondo plana para el análisis con el Método II.	170
6-7	Modelo estructural de silo de 18 m de diámetro, H/D = 2 y losa de fondo plana para el análisis con el Método II.	170
6-8	Modelo estructural de silo de 24 m de diámetro, H/D = 1.5 y losa de fondo plana para el análisis con el Método II.	171
6-9	Modelo estructural de silo de 12 m de diámetro, H/D = 3 y losa cónica concéntrica para el análisis con el Método II.	171
6-10	Modelo estructural de silo de 12 m de diámetro, H/D = 3 y losa cónica excéntrica para el análisis con el Método II.	172
7-1	Elementos típicos de silos para el programa SAP 2000.	173
7-2	Geometría de medio silo de 12 m de diámetro, H/D = 3 y losa de fondo plana. (Modelo estructural para utilizarse en el análisis con el Método III)	174
7-3	Planta de losa de fondo plano de silo de 12 m de diámetro.	175
7-4	Planta de losa de cimentación de silo de 12 m de diámetro.	175
7-5	Geometría de medio silo de 18 m de diámetro, H/D = 2 y losa de fondo plana. (Modelo estructural para utilizarse en el análisis con el Método III)	176
7-6	Geometría de medio silo de 24 m de diámetro, H/D = 1.5 y losa de fondo plana. (Modelo estructural para utilizarse en el análisis con el Método III)	176
7-7	Geometría de medio silo de 12 m de diámetro, H/D = 3 y losa cónica concéntrica. (Modelo estructural para utilizarse en el análisis con el Método III)	177

Figura	Descripción	Página
7-8	Geometría de medio silo de 12 m de diámetro, H/D = 3 y losa cónica excéntrica. (Modelo estructural para utilizarse en el análisis con el Método III)	177
8-1	Silo de 12 m de diámetro con H/D = 3 y losa plana. Caso de estudio A.	178
8-2	Comparación de silos con descarga concéntrica y excéntrica. Caso de estudio B.	179
8-3	Comparación de silos con H/D = 3 y diferentes tipos de losas de fondo. Caso de estudio C.	180
8-4	Comparación de silos con losa de fondo plana para diferentes relaciones H/D con descarga concéntrica. Caso de estudio D.	181
8-5	Comparación de silos con losa de fondo plana para diferentes relaciones H/D con descarga excéntrica. Caso de estudio E.	182
8-6	Comparación de silos con diferentes losas de fondo con descarga concéntrica. Caso de estudio F.	183
8-7	Comparación de silos con diferentes losas de fondo con descarga excéntrica. Caso de estudio G.	184
8-8	Acciones mecánicas en silo con H/D = 3, losa plana y descarga concéntrica. Caso de estudio A.	185
8-9	Acciones mecánicas en silo con H/D = 3, losa plana y descarga concéntrica. Caso de estudio B. (Presión estática)	186
8-10	Acciones mecánicas en silo con H/D = 3, losa plana y descarga excéntrica. Caso de estudio B. (Carga excéntrica)	187
8-11	Acciones mecánicas en silo con H/D = 3, losa plana y descarga excéntrica. Caso de estudio B. (Carga total)	188
8-12	Acciones mecánicas en silo con H/D = 3, con losa cónica concéntrica. Caso de estudio C.	189

Figura	Descripción	Página
8-13	Acciones mecánicas en silo con H/D = 3, con losa cónica excéntrica. Caso de estudio C.	190
8-14	Acciones mecánicas en silo con H/D = 2, losa plana y descarga concéntrica. Caso de estudio D.	191
8-15	Acciones mecánicas en silo con H/D = 1.5, losa plana y descarga concéntrica. Caso de estudio D.	192
8-16	Acciones mecánicas en silo con H/D = 2, losa plana y descarga excéntrica. Caso de estudio E.	193
8-17	Acciones mecánicas en silo con H/D = 1.5, losa plana y descarga excéntrica. Caso de estudio E.	194
8-18	Comparación de acciones mecánicas entre silo de losa plana con descarga concéntrica y silo con losa cónica concéntrica. Caso de estudio F.	195
8-19	Comparación de acciones mecánicas entre silo de losa plana con descarga excéntrica y silo con losa cónica excéntrica. Caso de estudio G.	196

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía	Descripción	Página
3-1	Silo típico individual de concreto, para almacenamiento de granos.	198
3-2	Grupo de doce silos de concreto, para almacenamiento de granos.	198
3-3	Grupo de silos de concreto, para almacenamiento de granos	199
3-4	Vista frontal de silos gemelos, para almacenamiento de cemento.	199
3-5	Vista lateral de silos gemelos, para almacenamiento de cemento.	200
3-6	Silos de concreto reforzado, para almacenamiento de cemento, en etapa de construcción.	200
3-7	Silos gemelos de concreto post-tensado, para almacenamiento de clinker.	201
3-8	Silos para almacenamiento de carbón.	201

NOMENCLATURA

a	=	dimensión menor de un silo rectangular
a'	=	longitud ficticia para un lado de un silo rectangular
A	=	área de la sección transversal de un silo (Método de Janssen) dimensión menor de un silo rectangular o su diámetro
Ag	=	área gruesa de la sección de concreto
Ai	=	área de la sección transversal del strut en el nudo i que representa la rigidez circunferencial de un silo para el método de analogía de marcos
As	=	área de acero requerida
b	=	lado largo de un silo rectangular, ancho de la franja de pared que se selecciona para el análisis de un silo con el método de analogía de marcos
b_{cono}	=	ancho de una franja de pared de losa cónica para el análisis con el método de la analogía de marcos
C	=	factor de las ecuaciones de Reimbert
Cd	=	factor de sobrepresión
Ci	=	factor de impacto
d	=	profundidad efectiva de una sección a flexión, desde la cara en compresión hasta el centroide del acero de refuerzo en tensión, diámetro de una losa cónica a una profundidad Y
des	=	subíndice que significa valor de diseño
d'	=	distancia desde la cara en compresión del concreto hasta el centroide del acero de refuerzo en compresión
D	=	diámetro interior de un silo
De	=	diámetro equivalente a un círculo de la misma área que el área de un silo poligonal
Di	=	diámetro equivalente de un silo imaginario
e	=	excentricidad de la descarga de material con respecto al centro del silo, base de los logaritmos naturales en las ecuaciones de Janssen
ecc	=	subíndice que significa excéntrico o excentricidad
eff	=	subíndice que significa efectivo
Ec	=	módulo de elasticidad del concreto
Ei	=	módulo de elasticidad de un strut para el método de analogía de marcos
fc	=	esfuerzo de compresión, esfuerzo circunferencial
$f'c$	=	resistencia del concreto
fh	=	esfuerzo radial promedio
fm	=	esfuerzo meridional
fr	=	esfuerzo vertical en paredes cilíndricas

fy	=	esfuerzo de fluencia del acero
F	=	fuerza
$F_{circunf}$	=	fuerza circunferencial
F_{fricc}	=	fuerza de fricción
Fm	=	fuerza meridional en tolvas cónicas
Fmu	=	fuerza meridional factorizada en tolvas cónicas
F_{strut}	=	fuerza axial en un strut que se obtiene del análisis con el método de analogía de marcos
Ft	=	fuerza tangencial en tolvas cónicas
Ftu	=	fuerza tangencial factorizada en tolvas cónicas
Fu	=	fuerza factorizada
Fvu	=	fuerza vertical total factorizada por unidad de longitud de pared
g	=	aceleración de la gravedad (cm/ seg2)
h	=	espesor de la pared de un silo, altura del cono de material en la parte superior de un silo
hc	=	altura efectiva sobre la tolva
hh	=	altura de una tolva
ho	=	altura de hueco en paredes de silos
H	=	altura total de un silo
i, j, k	=	subíndices que identifican la localización arbitraria de un nudo en un modelo estructural
I	=	momento de inercia
k	=	factor de Janssen, factor que representa el módulo de reacción para el método de analogía de marcos
Ka, Kb, Kd	=	factores de sobrepresión para el método de Reimbert
li	=	longitud del strut en el nudo i que representa la rigidez circunferencial de un silo para el método de analogía de marcos
L	=	longitud de un lado de un silo poligonal
Lij	=	longitud de un elemento de un silo con doble curvatura desde el nudo i hasta el nudo j para el método de analogía de marcos
max	=	subíndice que significa máximo
med	=	subíndice que significa medio
min	=	subíndice que significa mínimo
M	=	momento flexionante
Met.	=	método
p	=	presión horizontal del material almacenado a una profundidad Y
pi	=	presión estática lateral a una profundidad H en un silo imaginario
po	=	presión máxima debido a cargas sísmicas
$prom$	=	subíndice que significa promedio
pst	=	presión estática lateral
pH	=	presión estática lateral a una profundidad H
q	=	presión vertical estática a una profundidad Y
Q	=	fuerza
r	=	radio de un silo
R	=	radio hidráulico de un silo

U	=	perímetro de la sección transversal
v	=	subíndice que significa vertical
V	=	cortante, suma de fuerzas de fricción vertical arriba del punto en cuestión
w	=	carga uniformemente distribuida
W_{eff}	=	peso total efectivo del material almacenado
W_g	=	peso de la tolva más equipo por debajo de la profundidad Y
W_L	=	peso de material por debajo de la profundidad Y
X	=	subíndice que significa "dirección x"
y	=	subíndice que significa "dirección y", deflexión radial de un silo
Y	=	profundidad de almacenamiento de material
z	=	subíndice que significa "dirección z", deflexión radial de un silo, abscisa para la curva experimental de Reimbert
α	=	ángulo de inclinación de las paredes de tolvas; subíndice para fuerzas o presiones sobre superficies inclinadas
α_c	=	coeficiente de expansión térmica
$\Delta T'$	=	diferencial de temperatura entre el exterior y el interior de las paredes de silos
ΔY	=	altura de un segmento de pared para el análisis con el método de analogía de marcos
δ	=	ángulo efectivo de fricción
ξ_h	=	deformación unitaria radial
φ	=	factor de reducción de resistencia, ángulo para definir el ancho de una franja de pared de un silo con doble curvatura en el método de analogía de marcos
γ	=	peso volumétrico del material
γ_c	=	peso volumétrico del concreto
μ	=	ángulo de fricción entre el material almacenado y la pared del silo
μ'	=	coeficiente de fricción entre el material almacenado y la pared del silo
ν	=	relación de Poisson
ϑ	=	ángulo de inclinación de la losa cónica con respecto a la horizontal, rotación
ϑ_i	=	temperatura interior
ϑ_o	=	temperatura exterior
ϑ_r	=	temperatura libre de esfuerzos térmicos
ϑ_A	=	cambio de temperatura promedio de las paredes con respecto a la temperatura libre de esfuerzos
ϑ_D	=	cambio de temperatura diferencial en la superficie de las paredes de un silo relativa a ϑ_A
ρ	=	ángulo de fricción interna (aproximadamente el mismo que el ángulo de reposo), densidad de la masa
ζ	=	ángulo medido alrededor de la circunferencia de un silo