



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

ANÁLISIS SÍSMICO DE SILOS DE MATERIAL GRANULAR

OSCAR ABARCA PAVEZ

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:
MATIAS HUBE GINESTAR

Santiago de Chile, Noviembre, 2016.

A mis padres, Anita y Ernesto, que con su infinito amor y compañía han hecho de cada día de mi vida un lugar en el encuentro a Dios...

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todos los profesores del Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica por su disposición y capacidad para transmitir sus conocimientos en esta nueva etapa de formación académica. Un especial agradecimiento para el profesor Matías Hube, por su tiempo, apoyo y guía constante en el desarrollo del presente trabajo.

Por último, quiero agradecer a mi familia, polola y compañera, muchas gracias por el amor que me entregan día a día. También a mis amigos, colegas y a todas las personas que de una u otra forma me apoyaron durante este proceso.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN	12
I.1 Objetivos	12
I.2 Metodología.....	13
I.3 Organización del documento.....	13
II. RESUMEN DE LA LITERATURA.....	15
II.1 Normas de diseño de silos	15
II.2 Parámetros para la determinación de cargas en Silos	16
II.3 Cargas del contenido.....	19
II.4 Cargas de descarga del contenido.....	23
II.5 Cargas sísmicas	25
II.5.1 Disposiciones generales	25
II.5.2 Análisis elástico estático	27
II.5.3 Análisis elástico dinámico.....	28
III. DESCRIPCIÓN CASO DE ESTUDIO	31
IV. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	38
IV.1 Modelo estructural	38
IV.2 Cargas permanentes	39
V. ANÁLISIS SÍSMICO	46
V.1 Análisis elástico estático	47

V.1.1 Cargas sísmicas	47
V.1.2 Resultados análisis elástico estático	52
V.2 Análisis tiempo-historia	61
V.2.1 Cargas sísmicas	61
V.2.2 Resultados análisis tiempo-historia	67
V.3 Comparación de resultados entre análisis elástico estático y análisis tiempo-historia.....	75
VI. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....	96
VII BIBLIOGRAFIA	100
VIII ANEXOS.....	101
Anexo A : CARGAS DEL CONTENIDO (ESTÁTICO).....	102
Anexo B : CARGAS DEL CONTENIDO (SÍSMICO)	112

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla II-1: Categorías superficie muro (Tabla 4.1 BS EN 1991-4 (2006))	17
Tabla II-2: Propiedades partículas sólidas (Tabla E.1 BS EN 1991-4(2006))	18
Tabla II-3: Combinación de parámetros del material almacenado (Tabla 3.1 BS EN 1991-4 (2006)).....	22
Tabla III-1: Parámetros del Cemento (Tabla 3.1 BS EN 1991-4 (2006)).....	37
Tabla IV-1: Cargas de contenido para la máxima presión normal sobre los muros del silo	41
Tabla IV-2: Cargas de contenido para la máxima fricción sobre los muros del silo	42
Tabla IV-3: Cargas de contenido para la máxima carga vertical en el fondo del silo	43
Tabla V-1: Peso sísmico estructura del silo	48
Tabla V-2: Periodos naturales del silo, análisis elástico estático (modelo SAP2000).....	49
Tabla V-3: Reacciones basales para la presión sísmica del contenido (modelo SAP2000)	52
Tabla V-4: Corte basal análisis elástico estático (Modelo SAP2000)	53
Tabla V-5: Esfuerzos zona crítica muros superiores silo- análisis elástico estático - (modelo SAP2000)	60
Tabla V-6: Esfuerzos zona crítica muros inferiores silo- análisis elástico estático - (modelo SAP2000)	61
Tabla V-7: Periodos naturales del silo, análisis tiempo-historia (modelo SAP2000).....	63
Tabla V-8: Esfuerzos zona crítica muros superiores silo- análisis tiempo-historia-(modelo SAP2000)	74
Tabla V-9: Esfuerzos zona crítica muros inferiores silo- análisis tiempo-historia-(modelo SAP2000)	75
Tabla V-10: Esfuerzos máximos y mínimos zona crítica muro superior silo	89
Tabla V-11: Esfuerzos máximos y mínimos zona crítica muros inferior Norte.....	93
Tabla V-12: Esfuerzos máximos y mínimos zona crítica muros inferior Sur	94
Tabla V-13: Esfuerzos máximos y mínimos zona crítica muros inferior Este.....	94

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura II-1: Formas del silo y dimensiones (Figura 1.1 EN 1991-4 (2006))	16
Figura II-2 : Cargas del contenido	20
Figura II-3: Flujo excéntrico de descarga y distribución de presiones por descarga de material (Figura 5.5 BS EN 1991-4 (2006)).....	25
Figura III-1: Vista general estructuras de silos monocámara y tricámara.....	31
Figura III-2: Sección eje silo monocámara	33
Figura III-3: Sección transversal silo monocámara	34
Figura III-4: Sección transversal silo monocámara	35
Figura III-5: Sección eje silo estudio	36
Figura III-6: Sección transversal silo estudio.....	37
Figura IV-1 Vista 3D modelo computacional silo monocámara.....	39
Figura IV-2: Variación presión normal sobre los muros del silo (P_{hf} v/s z)	44
Figura IV-3: Variación carga fricción sobre los muros del silo (P_{wf} v/s z)	44
Figura IV-4: Variación carga vertical en el fondo del silo (P_{vft} v/s z).....	45
Figura V-1: Masa sísmica utilizada para el análisis elástico estático (modelo SAP2000) .	48
Figura V-2: Deformadas modos 1 y 2, análisis elástico estático (modelo SAP2000)	49
Figura V-3: Espectro de diseño Nch2369 (Zona 2, Suelo Tipo II, Categoría I, $R=1, \xi=5\%$)	50
Figura V-4: Presiones sísmicas por contenido sismo en dirección “y”- P_y (modelo SAP2000)	51
Figura V-5: Nodo utilizado para determinar el desplazamiento techo (Modelo SAP2000)	54
Figura V-6: Deformada techo análisis elástico estático (modelo SAP2000)	55
Figura V-7: Deformada en elevación análisis elástico estático (modelo SAP2000)	55
Figura V-8: Vista para análisis esfuerzos silo (Modelo SAP2000).....	56
Figura V-9: Fuerzas F_{11} (tonf/m) y Momentos M_{11} (tonf-m/m) análisis elástico estático- (modelo SAP2000).....	57
Figura V-10: Fuerzas F_{22} (tonf/m) y Momentos M_{22} (tonf-m/m) análisis elástico estático- (modelo SAP2000).....	57

Figura V-11: Corte V23 (tonf/m) análisis elástico estático - (modelo SAP2000).....	58
Figura V-12: Corte F12 (tonf/m) análisis elástico estático - (modelo SAP2000)	59
Figura V-13 Masas sísmicas análisis tiempo-historia (modelo SAP2000).....	62
Figura V-14: Deformadas modos principales (modos 5 y 6), análisis tiempo-historia (modelo SAP2000).....	64
Figura V-15: Deformadas modos 1 y 2, análisis tiempo-historia (modelo SAP2000)	64
Figura V-16 Registro de aceleraciones análisis tiempo-historia	66
Figura V-17 Espectro Nch2369 Of.2003 v/s Espectro de registro análisis tiempo-historia	66
Figura V-18: Corte basal en “y” (tonf) v/s tiempo (s) análisis tiempo-historia (modelo SAP2000)	68
Figura V-19 Desplazamiento en “y” (m) v/s tiempo (s) análisis tiempo-historia (modelo SAP2000)	69
Figura V-20 Deformada techo análisis tiempo-historia t = 17.065 (s) (modelo SAP2000)	70
Figura V-21 Deformada en elevación análisis elástico estático t = 17.065 (s) (modelo SAP2000)	70
Figura V-22 Fuerzas F11 (tonf/m) y Momentos M11(tonf-m/m) análisis tiempo-historia t=17.065 (s)-(modelo SAP2000)	71
Figura V-23 Fuerzas F22 (tonf/m) y Momentos M22(tonf-m/m) análisis tiempo-historia t=17.065 (s)-(modelo SAP2000)	72
Figura V-24 Corte V23 (tonf/m) análisis tiempo-historia t=17.065 (s) - (modelo SAP2000)	73
Figura V-25 Corte F12 (tonf/m) análisis tiempo-historia t=17.065 (s) - (modelo SAP2000)	73
Figura V-26: Corte basal en “y” (tonf) v/s tiempo (s)-(Comparación con respecto a máximo corte basal análisis elástico estático)	77
Figura V-27: Desplazamiento en “y” (tonf) v/s tiempo (s)-(Comparación con respecto a máximo desplazamiento análisis elástico estático).....	78
Figura V-28: Deformada de techo (comparación de resultados-Modelo SAP2000).....	79
Figura V-29: Deformada en elevación (comparación de resultados-Modelo SAP2000) ...	80

Figura V-30: Regiones Fuerzas F11 (tonf/m) y M11 (tonf-m/m)- (modelo SAP2000)	82
Figura V-31: Regiones Fuerzas F22 (tonf/m) y M22 (tonf-m/m)- (modelo SAP2000)	83
Figura V-32: Regiones Fuerzas V23 (tonf/m)-(modelo SAP2000).....	84
Figura V-33: Fuerzas F11 (tonf/m) y M11 (tonf-m/m) muro superior- (modelo SAP2000)	85
Figura V-34: Fuerzas F22 (tonf/m) y M22 (tonf-m/m) muro superior - (modelo SAP2000)	86
Figura V-35: Fuerza V23 muro superior (tonf/m)- (modelo SAP2000).....	87
Figura V-36: Fuerza F12 muro superior (tonf/m)-(modelo SAP2000).....	87
Figura V-37: Fuerzas F11 (tonf/m) y M11 (tonf-m/m) muro inferior- (modelo SAP2000)	90
Figura V-38: Fuerzas F22 (tonf/m) y M22 (tonf-m/m) muro inferior - (modelo SAP2000)	91
Figura V-39: Fuerzas V23 muro inferior (tonf/m) - (modelo SAP2000).....	92
Figura V-40: Fuerzas F12 muro inferior (tonf/m) - (modelo SAP2000)	92

RESUMEN

El presente estudio surge de la necesidad de abordar los aspectos principales del análisis sísmico de silos con material granular. El objetivo de este estudio es comparar los resultados de un análisis elástico estático con los de un análisis dinámico simplificado que permita reproducir los efectos sísmicos del contenido en un silo. En este análisis simplificado no se modela la rigidez y las propiedades geométricas del contenido. Para la comparación de ambos análisis, se eligió una estructura simplificada de un silo real de 38 (m) de altura y 18 (m) de diámetro, con muros superiores de 0.35 (m) de espesor y muros inferiores de 0.95 (m) de espesor. La losa de descarga del material fue simplificada a una losa plana de 1 (m) de espesor. El análisis elástico estático se realiza de acuerdo a las indicaciones de la norma BS EN1998-4(2006). El análisis tiempo-historia se realiza utilizando un registro artificial de aceleraciones compatible con el espectro de diseño de la norma NCh2369(2003).

De la comparación de los resultados obtenidos se concluye que la simplificación en la modelación del contenido considerada en el análisis tiempo-historia es adecuada si se desean obtener resultados generales tales como corte basal, desplazamiento máximo de techo y esfuerzos generales en los muros inferiores del silo. Sin embargo, el análisis tiempo-historia no predice adecuadamente los efectos del sismo en el muro superior del silo.

ABSTRACT

This study arises from the need to address the main aspects of seismic analysis of silos with granular material. The aim of this study is to compare the results of a static elastic analysis with a simplified dynamic analysis to seismic effects play content in a silo. In this simplified analysis stiffness and geometric properties of the content is not modeled. For comparison of both analyzes, a simplified structure of a real silo of 38 (m) above sea level and 18 (m) in diameter with walls above 0.35 (m) thick and lower walls of 0.95 (m) it elected thickness. The slab material discharge was simplified to a flat slab 1 (m) thick. The static elastic analysis is performed according to the indications of standard BS EN1998-4 (2006) .The time-history analysis is performed using a compatible artificial accelerograms with the design spectrum given for NCh2369(2003) standard.

Comparison of the results it is concluded that simplification in shaping the content considered in time-history analysis is appropriate if you want to obtain general results such as base shear, maximum roof displacement and overall stress in the lower walls of the silo . However, time-history analysis predicts inadequately the effects of the earthquake on the upper wall of the silo.

I. INTRODUCCIÓN

En la operación de las plantas para la producción de cemento se contempla normalmente el almacenamiento de las materias primas y producto terminado en silos de hormigón armado. En estos silos se realiza la recepción de cemento y materias primas, para su posterior despacho a través de camiones que son cargados en la base de estos. Los Silos de almacenamiento están compuestos por muros cilíndricos con diámetros que van desde los 10 m hasta los 30 m y más, con capacidades de almacenamiento de hasta 40000 toneladas. El presente estudio surge de la necesidad de abordar los aspectos principales del análisis sísmico de silos para almacenar cemento. Específicamente, se pretende profundizar en el conocimiento de un análisis dinámico para silos con material granular. Esto considerando que las normas existentes para el diseño sísmico de silos no profundizan en aspectos relevantes en el análisis dinámico como son la modelación del contenido.

I.1 Objetivos

El objetivo de este estudio es comparar los resultados de un análisis elástico estático con los de un análisis dinámico simplificado que permita reproducir los efectos sísmicos del contenido en un silo. En este análisis simplificado no se modelarán las propiedades del contenido tales como su rigidez y propiedades geométricas.

I.2 Metodología

La metodología consiste en primer lugar en determinar la respuesta sísmica de un silo utilizando un análisis elástico estático de acuerdo a las recomendaciones dadas por el Eurocódigo BS EN 1998-4 (2006). En segundo lugar, se estima la respuesta sísmica utilizando un análisis tiempo-historia lineal, mediante una modelación simplificada del contenido. Finalmente, se comparan los resultados de los dos análisis sísmicos para validar el método dinámico simplificado.

La estructura de estudio consiste en un silo monocámara utilizado para almacenar cemento, y la estructura considerada es una simplificación de un silo real. Para realizar los análisis se utilizó el programa computacional SAP2000 v15.2.1 (2012) En este programa se generan modelos estructurales lineales tridimensionales, los cuales consideran elementos tipo placa (“Shell”) para las losas y muros del silo.

I.3 Organización del documento

El capítulo II de este trabajo presenta el marco teórico asociado al diseño de silos de con material granular, mostrando un resumen de las principales normas existentes. En el capítulo III se describe la estructura de silo que motiva este estudio y se detalla la simplificación hecha a este silo para realizar los análisis sísmicos de este documento. En el capítulo IV se describe el modelo de elementos finitos realizado y las cargas estáticas que genera el contenido. El capítulo V muestra las cargas sísmicas debido al contenido producto de un análisis sísmico estático junto con los resultados obtenidos. Adicionalmente este capítulo presenta el modelo simplificado para modelar el contenido y

los resultados del análisis tiempo-historia lineal. En el capítulo VI se presentan las conclusiones y comentarios obtenidos de este estudio. Finalmente, los anexos detallan los cálculos principales requeridos para la obtención de las cargas estáticas y sísmicas en el silo debido al contenido.

II. RESUMEN DE LA LITERATURA

Este capítulo resume las principales normas utilizadas para el diseño estructural de silos que contienen material granular. Se describen las cargas estáticas más importantes así como también las consideraciones sísmicas para incluir el efecto dinámico que generan el contenido en la estructura del silo.

II.1 Normas de diseño de silos

Para el diseño de silos que contienen material granular las principales normas internacionales existentes son las siguientes:

- BS EN 1991-4 (2006).
- BS EN 1998-4 (2006).
- BS EN 1998-1 (2004).
- ACI 313-97 (1997)

Adicionalmente, para este estudio se consideraran las recomendaciones sísmicas dadas por el código NCh 2369 (2003) para edificios industriales y equipos.

II.2 Parámetros para la determinación de cargas en Silos

Para determinar las cargas generadas por el contenido en un silo, el BS EN 1991-4: 2006 clasifica los silos y propone parámetros para su diseño. En la Figura II-1 se muestran los parámetros que se definen para calcular las cargas de material de un silo.

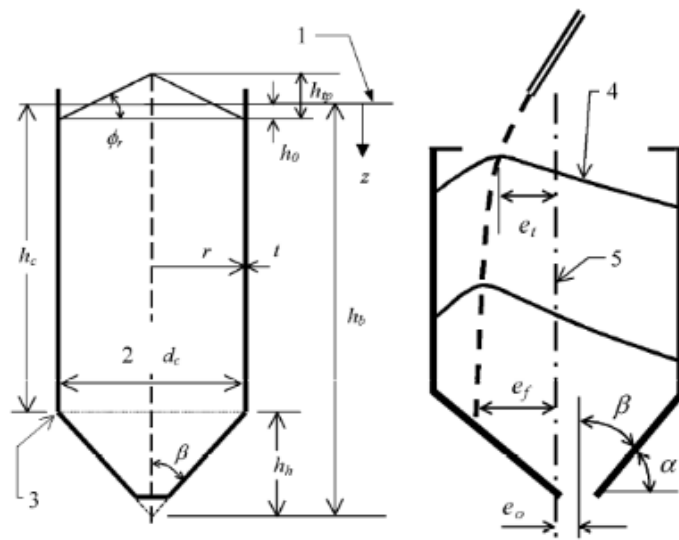


Figura II-1: Formas del silo y dimensiones (Figura 1.1 EN 1991-4 (2006))

De acuerdo al volumen del contenido de los silos y la excentricidad de descarga, el BS EN 1991-4 (2006) clasifica los silos en tres clases:

- Clase 1: Silos con capacidad menor a 100 toneladas.
- Clase 2: Todos los silos que no pertenecen a Clase 1 o Clase 3.
- Clase 3: Silo con capacidad sobre las 10000 toneladas, y silos con capacidad sobre las 1000 toneladas en que se cumplen algunas de las siguientes condiciones:

- a) Silos con excentricidad de descarga en que se cumpla que $e_o/d_c > 0.25$
- b) Silos bajos (Squat Silos) con excentricidad de carga superior $e_t/d_c > 0.25$

En función de la razón entre la altura del material almacenado (h_c) y el diámetro del Silo (d_c) estos se clasifican en:

- Silos esbeltos: $h_c / d_c \geq 2.0$
- Silos esbeltez intermedia : $1.0 < h_c / d_c < 2.0$
- Silos bajos: $0.4 < h_c / d_c \leq 1.0$
- Silo de contención de fondo plano: $h_c / d_c \leq 4.0$

En relación a las características de la superficie del muro se define el valor del coeficiente de roce. Las cuatro posibles categorías se muestran en Tabla II-1.

Tabla II-1: Categorías superficie muro (Tabla 4.1 BS EN 1991-4 (2006))

Category	Descriptive title	Typical wall materials
D1	Low friction classed as "Slippery"	Cold-rolled stainless steel Polished stainless steel Coated surface designed for low friction Polished aluminium Ultra high molecular weight polyethylene ³
D2	Moderate friction classed as "Smooth"	Smooth mild carbon steel (welded or bolted construction) Mill finish stainless steel Galvanized carbon steel Oxidized aluminium Coated surface designed for corrosion resistance or abrasive wear
D3	High friction classed as "Raspy"	Off form concrete, steel finished concrete or aged concrete Aged (corroded) carbon steel Abrasion resistant steel Ceramic tiles
D4	Irregular	Horizontally corrugated walls Profiled sheeting with horizontal ribs Non-standard walls with large aberrations
NOTE: The descriptive titles in this table are given in terms of friction rather than roughness because there is a poor correlation between measured wall friction between a sliding granular solid and the surface and measures of roughness.		
³ The roughening effect of particles being impressed into the surface should be considered carefully for these surfaces.		

Debido a que por lo general no se conocen con exactitud las propiedades mecánicas del material almacenado, el BS EN 1991-4 (2006) contiene una tabla (ver Tabla II-2) con valores de estas propiedades para materiales granulares comunes. La tabla contiene recomendaciones de valores medios para el peso específico (γ), ángulo de reposo (ϕ_r), ángulo de fricción interna (ϕ_i) y coeficiente de roce del material (μ).

Tabla II-2: Propiedades partículas sólidas (Tabla E.1 BS EN 1991-4(2006))

Type of particulate solid ^{d, e}	Unit weight ^b		Angle of repose ϕ_r	Angle of internal friction ϕ_i		Lateral pressure ratio K		Wall friction coefficient ^c μ ($\mu = \tan \phi_w$)				Patch load solid reference factor C_{op}
	γ_f	γ_u		Mean ϕ_{im}	Factor a_ϕ	Mean K_m	Factor a_K	Wall type D1	Wall type D2	Wall type D3	a_μ	
	Lower kN/m ³	Upper kN/m ³	degrees									
Default material ^a	6,0	22,0	40	35	1,3	0,50	1,5	0,32	0,39	0,50	1,40	1,0
Aggregate	17,0	18,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,39	0,49	0,59	1,12	0,4
Alumina	10,0	12,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5
Animal feed mix	5,0	6,0	39	36	1,08	0,45	1,10	0,22	0,30	0,43	1,28	1,0
Animal feed pellets	6,5	8,0	37	35	1,06	0,47	1,07	0,23	0,28	0,37	1,20	0,7
Barley Ⓢ	7,0	8,0	31	28	1,14	0,59	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,5
Cement	13,0	16,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5
Cement clinker ‡	15,0	18,0	47	40	1,20	0,38	1,31	0,46	0,56	0,62	1,07	0,7
Coal Ⓢ	7,0	10,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,44	0,49	0,59	1,12	0,6
Coal, powdered Ⓢ	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5
Coke	6,5	8,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,6
Flyash	8,0	15,0	41	35	1,16	0,46	1,20	0,51	0,62	0,72	1,07	0,5
Flour Ⓢ	6,5	7,0	45	42	1,06	0,36	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,6
Iron ore pellets	19,0	22,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,5
Lime, hydrated	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,20	0,36	0,41	0,51	1,07	0,6
Limestone powder	11,0	13,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5
Maize Ⓢ	7,0	8,0	35	31	1,14	0,53	1,14	0,22	0,36	0,53	1,24	0,9
Phosphate	16,0	22,0	34	29	1,18	0,56	1,15	0,39	0,49	0,54	1,12	0,5
Potatoes	6,0	8,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,33	0,38	0,48	1,16	0,5
Sand	14,0	16,0	39	36	1,09	0,45	1,11	0,38	0,48	0,57	1,16	0,4
Slag clinkers	10,5	12,0	39	36	1,09	0,45	1,11	0,48	0,57	0,67	1,16	0,6
Soya beans	7,0	8,0	29	25	1,16	0,63	1,11	0,24	0,38	0,48	1,16	0,5
Sugar Ⓢ	8,0	9,5	38	32	1,19	0,50	1,20	0,46	0,51	0,56	1,07	0,4
Sugarbeet pellets	6,5	7,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,35	0,44	0,54	1,12	0,5
Wheat Ⓢ	7,5	9,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,24	0,38	0,57	1,16	0,5

Para la obtención de los valores máximos y mínimos de las propiedades mecánicas de la Tabla II-2 el BS EN 1991-4 (2006) establece las siguientes fórmulas :

$$K_{up} = a \cdot K_m \quad (\text{II-1})$$

$$K_{low} = \frac{K_m}{a_k} \quad (\text{II-2})$$

$$\mu_{up} = a_\mu \cdot \mu_m \quad (\text{II-3})$$

$$\mu_{low} = \frac{\mu_m}{a_\mu} \quad (\text{II-4})$$

$$\phi_{up} = a_\phi \cdot \phi_{im} \quad (\text{II-5})$$

$$\phi_{low} = \frac{\phi_{im}}{a_\phi} \quad (\text{II-6})$$

Donde, K_{up} es el coeficiente de empuje lateral máximo del contenido; K_{low} el coeficiente de empuje lateral mínimo del contenido; μ_{up} el coeficiente de fricción máximo entre contenido y paredes del silo; μ_{low} el coeficiente de fricción mínimo entre contenido y paredes del silo; ϕ_{up} el ángulo de fricción interna máximo del contenido; ϕ_{low} el ángulo de fricción interna mínimo del contenido; Finalmente, a_k , a_μ y a_ϕ son los factores de ponderación de las propiedades del material para la obtención de los valores máximos y mínimos.

II.3 Cargas del contenido

Las cargas del contenido corresponden a las presiones estáticas generadas por el material en las paredes y el fondo del silo. A continuación se describen las cargas que se producen

en un silo esbelto ($h_c / d_c \geq 2.0$), correspondiente al caso en estudio. Dichas cargas se encuentran indicadas en el punto 5.2.1 de BS EN 1991-4 (2006).

Las cargas del contenido generan tres tipos de presiones que actúan simultáneamente en el silo. Sobre las paredes del silo se desarrollan presiones normales (p_{hf}) en conjunto con tensiones verticales de fricción (p_{wff}). El tercer tipo de carga corresponde a la presión vertical que se produce en el fondo del silo, normal al cono o losa de descarga (p_{vft}). En la Figura II-2 se muestra un silo con estas tres presiones.

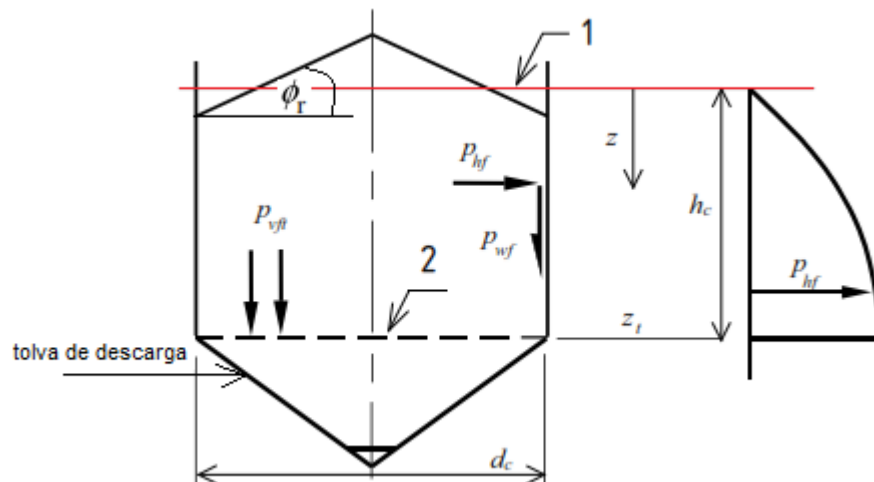


Figura II-2 : Cargas del contenido

Para determinar la altura (h_c), en la que se desarrollan las cargas del contenido es necesario definir la superficie equivalente del material en la zona superior del silo. Este nivel corresponde al nivel horizontal que se obtiene considerando el mismo volumen de contenido que con un cono cuya geometría está dada por el ángulo de reposo del material (Φ_r). Las cargas del contenido están limitadas en la cota inferior por la superficie de

transición (identificada con el número 2 en Figura II-2) y en la cota superior por la superficie equivalente del material (identificada con el número 1 Figura II-2).

Las ecuaciones que se utilizan para obtener las tres tipos de presiones generadas por el contenido en función de la profundidad bajo la superficie equivalente de material almacenado son las siguientes:

$$p_{hf}(z) = p_{ho} \cdot Y_j(z) \quad (\text{II-7})$$

$$p_{wf}(z) = \mu \cdot p_{ho} \cdot Y_j(z) \quad (\text{II-8})$$

$$p_{vft}(z) = \frac{p_{ho}}{K} \cdot Y_j(z) \quad (\text{II-9})$$

En que:

$$p_{ho}(z) = \gamma \cdot K \cdot z_o \quad (\text{II-10})$$

$$z_o = \frac{1}{K \cdot \mu} \cdot \frac{A}{U} \quad (\text{II-11})$$

$$Y_j(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_o}} \quad (\text{II-12})$$

Donde, μ es el coeficiente de fricción del muro; K el coeficiente de empuje lateral del material almacenado; z la profundidad bajo la superficie equivalente del material almacenado; A el área sección transversal del silo; U el perímetro interno de la sección transversal del silo.

La fuerza vertical resultante en el muro producto de las tensiones verticales de fricción del material por unidad de longitud de perímetro en función del nivel de llenado puede ser determinada con la siguiente expresión:

$$n_{zSk} = \int_0^z p_{wf}(z) dz = \mu \cdot p_{ho} \cdot [z - z_o \cdot Y_j(z)] \quad (\text{II-13})$$

De acuerdo al BS EN 1991-4 (2006), las propiedades del material almacenado deben ser combinadas de tal forma que generen los mayores esfuerzos en las paredes y fondo del silo. En la Tabla II-3 se muestran las combinaciones recomendadas.

Tabla II-3: Combinación de parámetros del material almacenado (Tabla 3.1 BS EN 1991-4 (2006))

	Characteristic value to be adopted		
Purpose:	Wall friction coefficient μ	Lateral pressure ratio K	Angle of internal friction ϕ_i
For the vertical wall or barrel			
Maximum normal pressure on vertical wall	Lower	Upper	Lower
Maximum frictional traction on vertical wall	Upper	Upper	Lower
Maximum vertical load on hopper or silo bottom	Lower	Lower	Upper
Purpose:	Wall friction coefficient μ	Hopper pressure ratio F	Angle of internal friction ϕ_i
For the hopper wall			
Maximum hopper pressures on filling	Lower value for hopper	Lower	Lower
Maximum hopper pressures on discharge	Lower value for hopper	Upper	Upper
NOTE 1: It should be noted that $\phi_{wh} \leq \phi_i$ always, since the material will rupture internally if slip at the wall contact demands a greater shear stress than the internal friction can sustain. This means that, in all evaluations, the wall friction coefficient should not be taken as greater than $\tan \phi_i$ (i.e. $\mu = \tan \phi_w \leq \tan \phi_i$ always).			
NOTE 2: Hopper normal pressure p_n is usually maximized if the hopper wall friction is low because less of the total hopper load is then carried by wall friction. Care should be taken when choosing which property extreme to use for the hopper wall friction to ensure that the structural consequences are fully explored (i.e. whether friction or normal pressures should be maximized depends on the kind of structural failure mode that is being considered).			

En consecuencia los estados de carga que define BS EN 1991-4 (2006) para las cargas del contenido son:

Caso 1: Máxima presión normal sobre los muros del silo

P_{hf1} : Presión normal máxima sobre los muros del silo.

P_{wf1} : Carga fricción sobre los muros del silo para la máxima presión normal.

P_{vf1} : Carga vertical en el fondo del silo para la máxima presión normal.

Caso 2: Máxima fricción sobre los muros del silo

P_{hf2} : Presión normal sobre los muros del silo para la máxima fricción.

P_{wf2} : Carga fricción máxima sobre los muros del silo.

P_{vf2} : Carga vertical en el fondo del silo para la máxima fricción.

Caso 3: Máxima carga vertical en el fondo del silo

P_{hf3} : Presión normal sobre los muros del silo para la máxima carga vertical en el fondo.

P_{wf3} : Carga fricción sobre los muros del silo para la máxima carga vertical en el fondo.

P_{vf3} : Máxima carga vertical en el fondo del silo.

II.4 Cargas de descarga del contenido

Las cargas debido a la descarga del contenido corresponden a las presiones estáticas generadas por el material en las paredes y fondo del silo producto del vaciado. En el caso de un silo esbelto ($h_c / d_c \geq 2.0$) estas se encuentran indicadas en el punto 5.2.4 de BS EN

1991-4 (2006). Estas cargas se resumen a continuación y no se profundiza en el cálculo de las mismas debido a que no se consideran para el caso en estudio.

Para la descarga del contenido se deben considerar las distintas dimensiones posibles que generan los flujos del material por las aberturas de la tolva de descarga. Cuando la geometría del canal de descarga no se puede deducir directamente de la disposición de las aberturas de la tolva de descarga y la geometría del silo, el código BS EN 1991-4 (2006) establece que los cálculos deben ser desarrollados de acuerdo a por lo menos tres dimensiones del radio del flujo de descarga de material ($r_c = k r$), de manera tal que se suponga la variación aleatoria en las dimensiones del flujo de descarga en cada instante. Los valores recomendados por el código BS EN 1991-4 (2006) son $k_1=0.25$, $k_2=0.4$, $k_3=0.6$. La Figura II-3 muestra las cargas debido a la descarga del contenido que actúan simultáneamente.

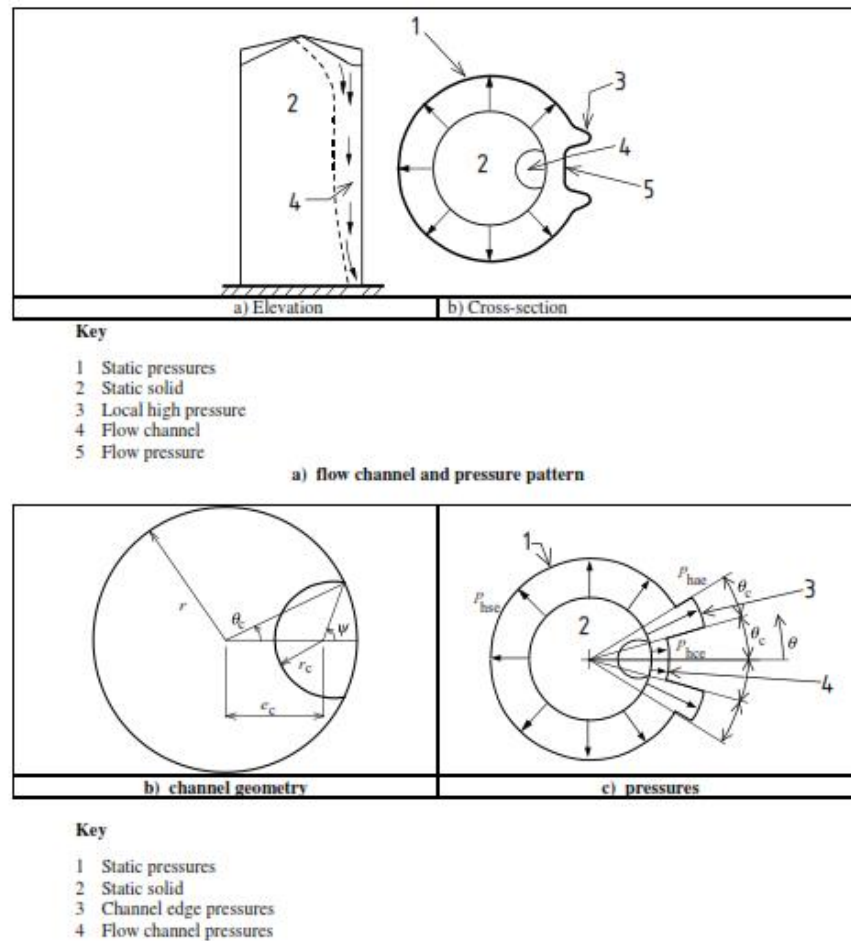


Figura II-3: Flujo excéntrico de descarga y distribución de presiones por descarga de material (Figura 5.5 BS EN 1991-4 (2006))

II.5 Cargas sísmicas

II.5.1 Disposiciones generales

El BS EN 1998-4 (2008) contiene recomendaciones para determinar la carga sísmica en las paredes y fondo del silo debido al contenido. La masa efectiva del material almacenado

que participa en el sismo se puede considerar como el 80% del total de la masa, de acuerdo a 3.3 (4) BS EN 1998-4 (2008).

En silos axisimétricos, el análisis y diseño sísmico se puede realizar considerando la acción de las componentes del sismo horizontal actuando separadamente. En otros casos, los silos deben ser diseñados con los esfuerzos obtenidos al considerar el 100% de la sollicitación sísmica que actúa en una dirección más los esfuerzos que se generan al aplicar el 30% de la sollicitación sísmica actuando en la dirección ortogonal a la anterior, y viceversa.

Los efectos de las aceleraciones sísmicas verticales deben ser considerados en conjunto con las componentes sísmicas horizontales de acuerdo a BS EN1998-4 (2006). Si la aceleración sísmica vertical es mayor a 0.25 g esta debe ser considerada en el cálculo de los esfuerzos, según se indica en BS EN1998-1 (2004). Los casos en que se debe considerar sismo vertical corresponden a:

- Estructuras horizontales o prácticamente horizontales con luces mayores o iguales a 20 m.
- Estructuras horizontales o prácticamente horizontales con componentes en voladizo con luces mayores a 5 m.
- Estructuras pretensadas horizontales o prácticamente horizontales.
- Vigas que soportan columnas.
- Estructuras con aislación sísmica.

Como las aceleraciones sísmicas verticales generan aumento en las presiones que produce el contenido en las paredes del silo es recomendable contemplar este efecto considerando

un factor que pondere las cargas del contenido del silo utilizando las recomendaciones dadas por la NCh2369 (2003).

II.5.2 Análisis elástico estático

Para un análisis sísmico estático, el efecto de las cargas que se generan por la acción del sismo horizontal en las partículas del material almacenado, se puede representar mediante una presión adicional sobre las paredes ($\Delta_{ph,s}$) (BS EN1998-4 (2006)). Esta presión sísmica, se aplica sobre las paredes que se encuentran en contacto con el material almacenado correspondiente a la región definida entre la losa o cono de descarga y la superficie equivalente. La presión sísmica horizontal para silos circulares se obtiene de:

$$\Delta_{ph,s} = \Delta_{ph,so} \cdot \cos \theta \quad (\text{II-14})$$

$$\Delta_{ph,so}(z) = \alpha(z) \cdot \gamma \cdot \min(r_s^*; 3x) \quad (\text{II-15})$$

$$r_s^* = \min(h_b; d_c / 2) \quad (\text{II-16})$$

Donde, θ es el ángulo definido entre la línea radial que define el punto analizado y la dirección del sismo considerado, $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$; $\Delta_{ph,so}$ es la presión de referencia, cuyo valor debe ser calculado en función de la altura del muro del silo definida a una distancia “x” desde el fondo de la losa de descarga o cúspide del cono de descarga; $\alpha(z)$ es el coeficiente sísmico a la profundidad z desde la superficie equivalente del contenido. También es posible utilizar el coeficiente sísmico correspondiente al centro de masa del contenido. Este coeficiente se puede obtener del espectro de pseudo-aceleraciones para el

período de la estructura del silo incluyendo el material que contiene; En la ecuación (II-15) , γ es el peso específico del material almacenado realizando la consideración sísmica de utilizar el 80% del total de la masa efectiva; h_b es la altura del material almacenado entre el fondo de losa o cono de descarga hasta la superficie equivalente y d_c es el diámetro del silo.

Para la región definida entre superficie de transición (identificada con el número 2 en la Figura II-2) y la superficie equivalente del material (identificada con el número 1 en la Figura II-2), el cálculo de $\Delta_{ph,so}$ se realiza utilizando la expresión (II-15). En tanto, para la región que se ubica entre la cúspide del cono y la región de transición el cálculo $\Delta_{ph,so}$ se realiza utilizando la siguiente corrección.

$$\Delta_{ph_{so}}(z) = \alpha(z) \cdot \gamma \cdot \min(r_s^*; 3x) / \cos \beta \quad (\text{II-17})$$

Donde, β es el ángulo de inclinación de los muros del cono de descarga, medido con respecto a la vertical.

II.5.3 **Ánalysis elástico dinámico**

En el punto 3.2.3.1 de la norma BS EN 1998-1 (2004) se detalla el procedimiento para realizar un análisis tiempo-historia. Los principales aspectos relativos a este tipo de análisis son:

- Al utilizar un modelo tridimensional el movimiento sísmico debe consistir de tres registros de aceleraciones simultáneos. El mismo registro no puede ser usado simultáneamente en ambas direcciones horizontales.
- Dependiendo de la aplicación y la disponibilidad de información respecto a la amenaza sísmica, es posible utilizar un registro artificial de aceleraciones.
- Es posible generar un registro artificial de aceleraciones que corresponda con el espectro elástico de respuesta utilizando un amortiguamiento del 5%.
- La duración mínima del registro debe ser de 10 s
- El conjunto de registro artificiales generados debe seguir las siguientes reglas:
 1. Deben usarse un mínimo de 3 registros de aceleraciones.
 2. Los valores de la aceleración del registro correspondientes con el coeficiente máximo del espectro compatible no deben ser inferiores a los valores entregados por la norma para el sitio.
 3. En el rango de períodos entre $0.2T_s$ y $2T_s$, donde T_s es el período fundamental de la estructura en la dirección en la que se aplica el acelerograma, los valores del espectro promedio de respuesta de los registros no deben ser inferiores al 90% del valor del espectro de diseño utilizado en un análisis modal espectral.

Por último, en relación al comportamiento del contenido debido al efecto de un sismo, en el punto 3.3 (4) BS EN1998-4 (2006), indica que la acción sísmica global y los efectos sobre la estructura pueden ser calculados asumiendo que las partículas del contenido se mueven en conjunto con las paredes del silo, asignando en el modelo las masas efectivas y

los centros de gravedad correspondientes. Esta simplificación puede ser utilizada a falta de un análisis en el que se modelen de forma precisa las características del contenido tales como su masa, rigidez y las propiedades geométricas.

III. DESCRIPCIÓN CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio se basa en estructuras reales de silos diseñadas a finales del año 2015 para la construcción de una planta de molienda de cemento ubicada en la Comuna de Quilicura, Región Metropolitana, la que actualmente se encuentran en etapa de construcción. Las estructuras corresponden a dos silos de aproximadamente 10000 ton de capacidad cada uno con cono invertido de descarga. Uno de los silos almacena el material en una cámara (silo monocámara), mientras que el segundo cuenta con muros interiores que dividen el cilindro de almacenamiento en tres cámaras que le permiten almacenar distintos materiales (silo tricámara). En la Figura III-1 se muestra una vista general de ambos silos.

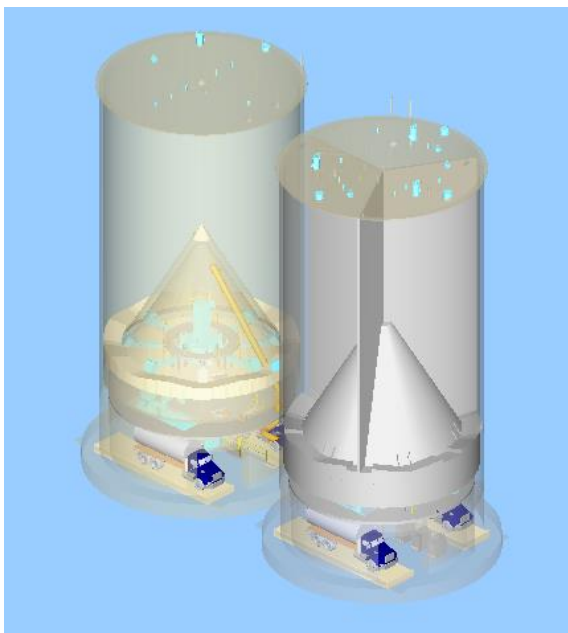


Figura III-1: Vista general estructuras de silos monocámara y tricámara

En esta investigación se analiza el silo monocámara (silo izquierdo de la Figura III-1) cuya estructura principal está constituida por un muro cilíndrico de 38 m de altura por sobre el terreno y de 18 m de diámetro interior. El cilindro está dividido interiormente por un cono invertido de descarga que separa la zona superior de la zona inferior. En la zona superior se almacena el cemento y en la zona inferior, se ubican las plataformas de trabajo. Estas plataformas están constituidas por vigas de acero que se apoyan en las paredes del cono y en el muro inferior del silo mediante ménsulas de acero.

El muro inferior de hormigón armado tiene 0.95 m de espesor. Por otra parte, el muro superior tiene 0.35 m de espesor y postensado horizontal.

Finalmente, la estructura del cono invertido de descarga está formada por una losa cónica de hormigón armado de 0.4 m de espesor con perforaciones de 1.45 m x 1.35 m separadas a 45 grados entre sí, por donde se descarga el material a la zona inferior del silo. El cono invertido de descarga está simplemente apoyado en el muro inferior y dilatado lateralmente del muro superior.

En la Figura III-2 se muestra una sección en elevación del silo monocámara en donde es posible identificar las plataformas de trabajo (EL 536.008 y EL 532.090) y el área de almacenamiento de material (zona superior cono invertido de descarga).

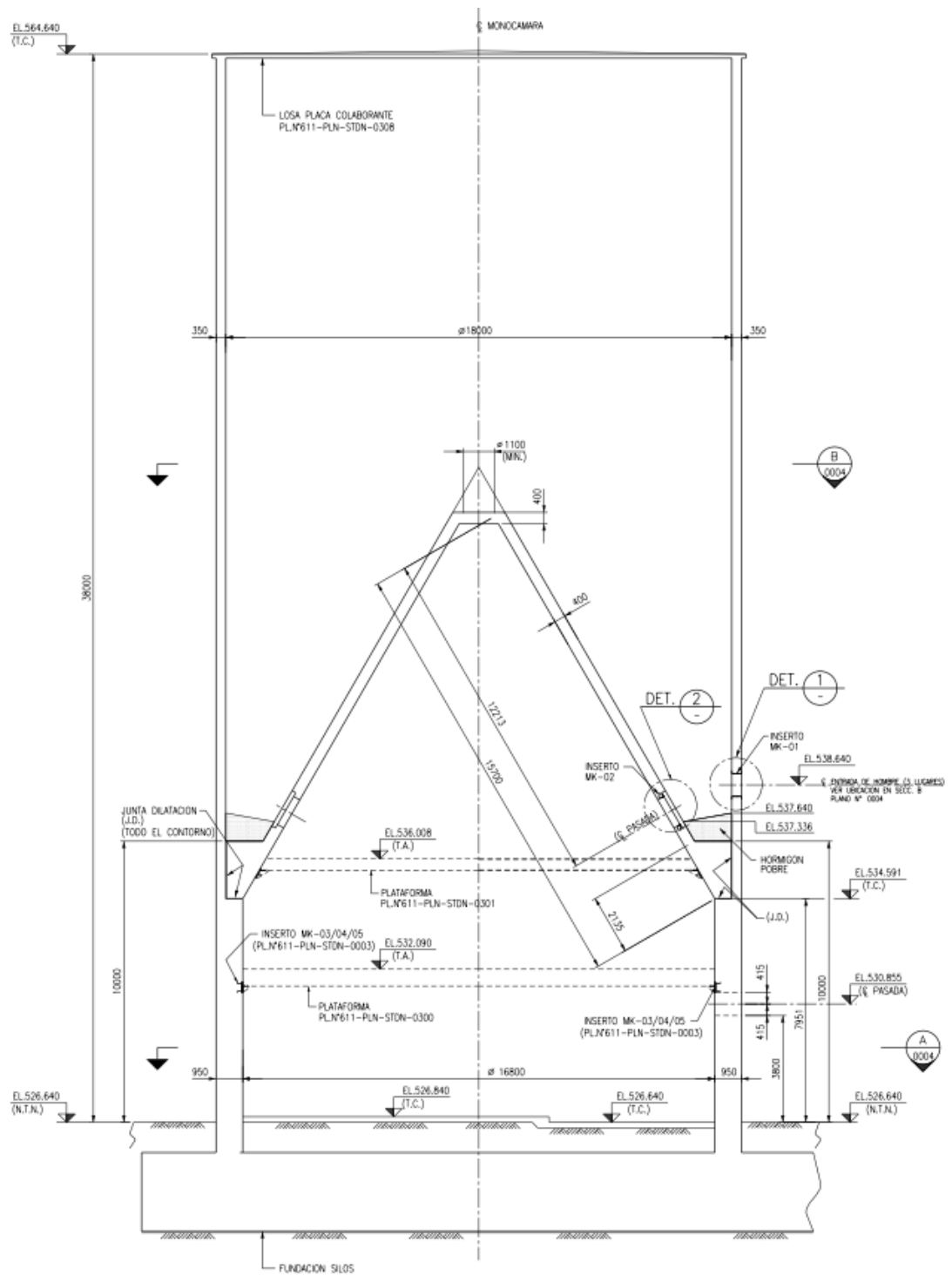


Figura III-2: Sección eje silo monocámara

La Figura III-3 muestra una sección transversal del silo monocámara a nivel del muro inferior. Las aberturas ubicadas en ambos extremos corresponden a la zona destinada al tránsito de camiones para su carga con el material almacenado.

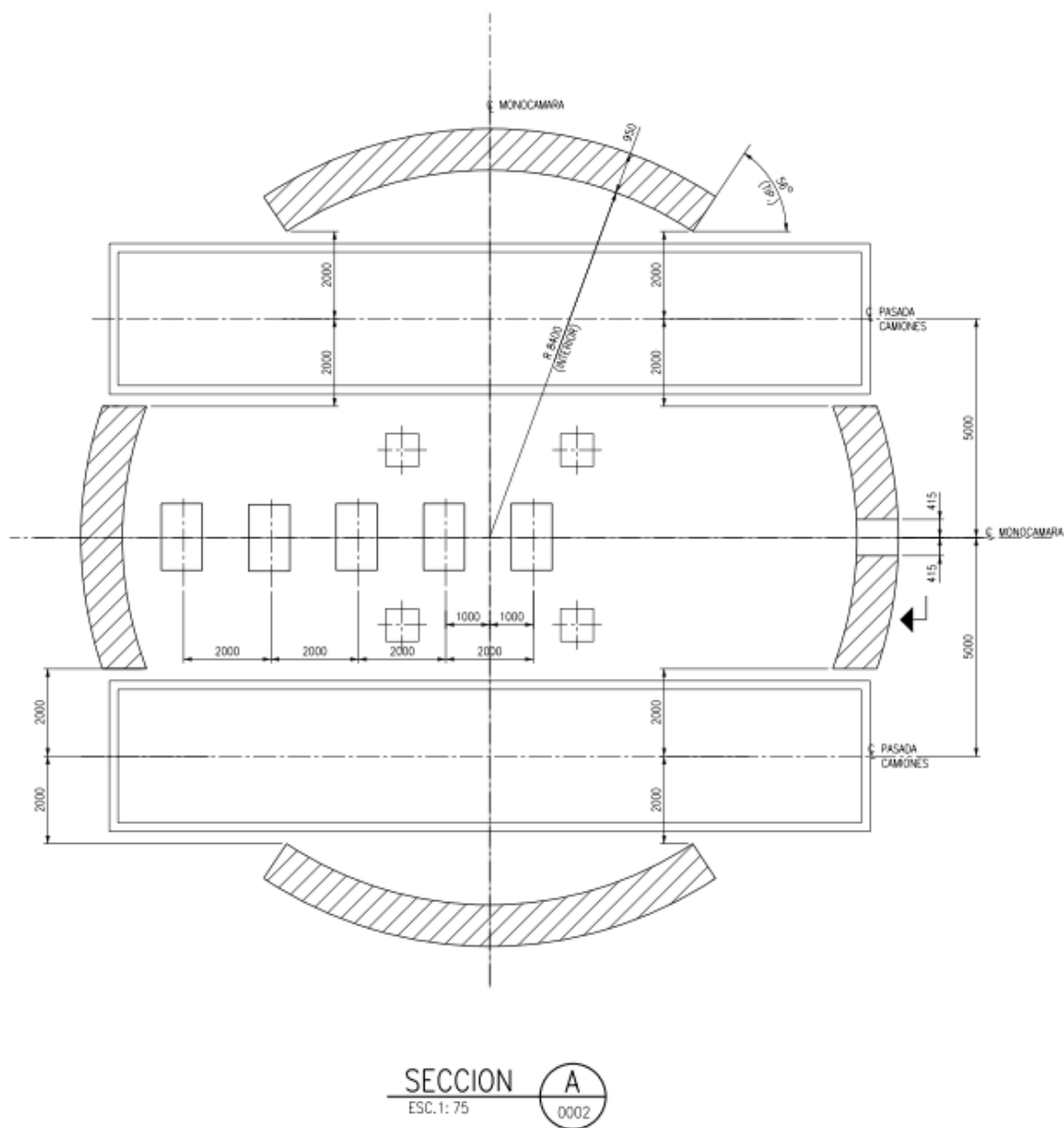


Figura III-3: Sección transversal silo monocámara

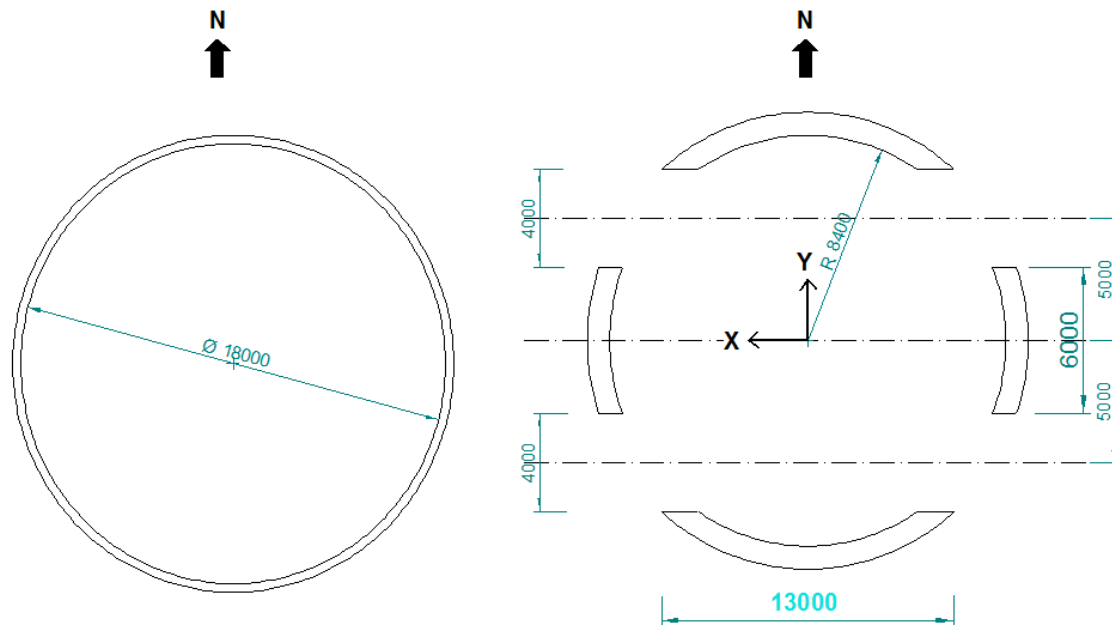


Figura III-6: Sección transversal silo estudio

El material utilizado para las paredes y losa plana de descarga corresponde a un hormigón de calidad H-40 con un módulo de elasticidad $E_c = 2.82 \cdot 10^5 \text{ Kgf/cm}^2$ y peso específico $\gamma_h = 2.5 \text{ tonf/m}^3$. Para el material almacenado se consideraron las características del cemento dadas por la norma BS EN 1991-4 (2006), las cuales se muestran en la Tabla III-1.

Tabla III-1: Parámetros del Cemento (Tabla 3.1 BS EN 1991-4 (2006))

Type of particulate solid ^{d, e}	Unit weight ^b		Angle of repose ϕ_r	Angle of internal friction ϕ_i			Lateral pressure ratio K		Wall friction coefficient ^c μ ($\mu = \tan \phi_w$)				Patch load solid reference factor C_{op}
	γ_l	γ_u		ϕ_{im}	a_ϕ	K_m	a_K	Wall type D1	Wall type D2	Wall type D3	a_μ		
	Lower	Upper	Mean	Factor	Mean	Factor	Mean	Mean	Mean	Factor			
	kN/m ³	kN/m ³	degrees	degrees									
Cement	13.0	16.0	36	30	1.22	0.54	1.20	0.41	0.46	0.51	1.07	0.5	

IV. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Las características del modelo de elementos finitos desarrollado para modelar el caso de estudio se describe en este capítulo. El programa utilizado corresponde a SAP 2000 y se considera una estructura con comportamiento lineal elástico. Las unidades consideradas en el modelo estructural son tonelada-fuerza (Tonf), metro (m) y segundos (s). En primer lugar se describe el modelo de elementos finitos utilizado y luego se resumen las cargas estáticas del contenido asignadas al modelo.

IV.1 Modelo estructural

El silo se modeló tridimensionalmente utilizando elementos tipo placa (“Shell thick”) para los muros y para la losa plana de descarga del silo. Se discretizó el cilindro considerando una división en planta en 60 partes (6°) y en elevación con un espaciamiento máximo de 0.5 (m). De esta forma se obtienen elementos tipo placa de aproximadamente 0.94 (m) de ancho y 0.5 (m) de alto. La base de los muros se empotraron en el suelo y no se consideró la interacción suelo-estructura. El modelo elaborado en SAP2000 se muestra en la Figura IV-1, en la que se ve una vista tridimensional completa del modelo y la parte inferior del silo con la losa plana de descarga.

La losa plana de descarga se subdividió angularmente y se conectó a las paredes del silo mediante nodos comunes. Con el fin de representar las restricciones al desplazamiento en todas las direcciones pero no la restricción al giro de los apoyos de la losa plana de descarga, se modeló la losa dilatada a los muros del silo y se conectaron los nodos

comunes mediante restricciones (“constrains”) tipo “Weld” que representan dichas limitaciones.

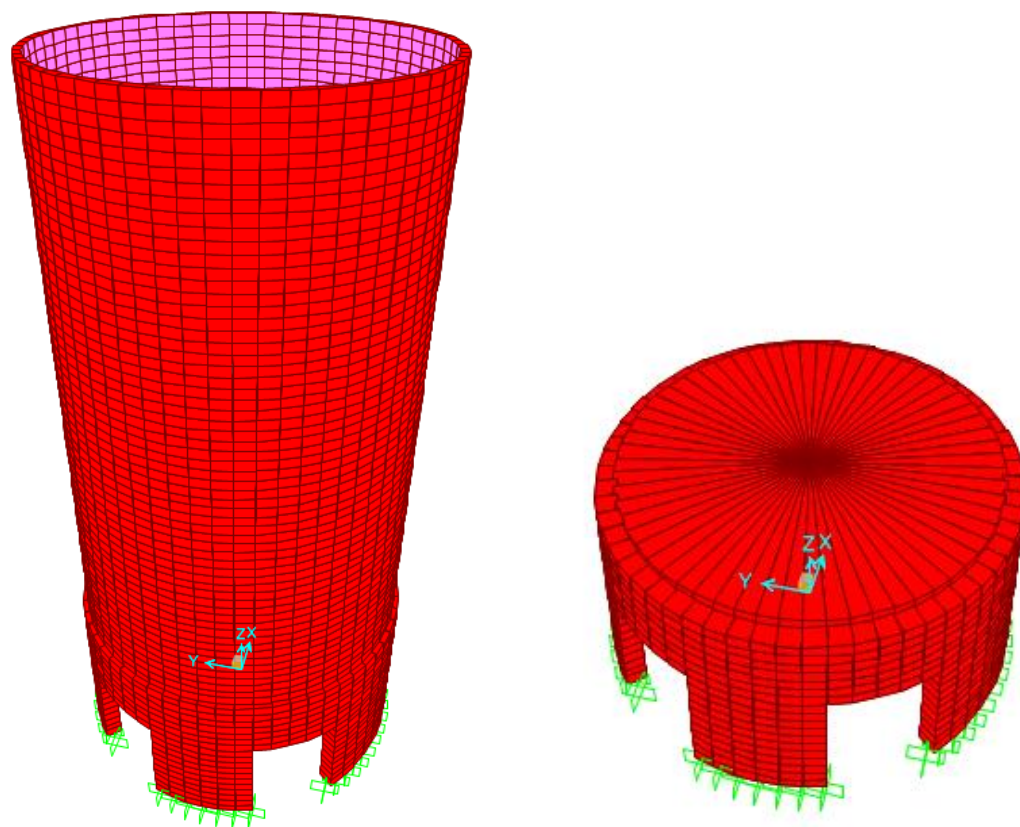


Figura IV-1 Vista 3D modelo computacional silo monocámara

IV.2 Cargas permanentes

Las cargas permanentes que afectan a las paredes y losa de descarga del silo corresponden a las presiones definidas en la sección II.3 debido al cemento almacenado. Considerando que este estudio se enfoca en el análisis sísmico de la estructura, no se analizan las cargas de vaciado de material, ya que estas no se combinan con las cargas sísmicas por contenido,

de acuerdo a las recomendaciones de la norma BS EN1998-4 (2006). En vista que los parámetros para caracterizar el contenido corresponden a valores promedio, se definen tres estados de carga para la carga de llenado de material (Tabla II-3).

La revancha de material utilizada es de 2 (m), esta corresponde a la distancia libre mínima que existe entre el material almacenado y el techo del silo (Figura III-5). A partir de este valor se establece la altura de la superficie equivalente de material almacenado. De esta forma, las cargas del contenido se calculan considerando los valores de z (nivel de llenado) desde la superficie equivalente del material hasta el punto de análisis (ver Figura II-2).

A continuación se resumen las presiones normales y verticales en el muro del cilindro, además de las presiones verticales en la losa de descarga para los tres casos descritos en la sección II.3

Caso 1: Máxima presión normal sobre los muros del silo

Las cargas del contenido en función del nivel del material almacenado, para el caso en que se obtiene la máxima presión normal sobre los muros del silo se resumen en la Tabla IV-1.

La tabla muestra la presión normal sobre las paredes del muro (P_{hf_1}), la tensión vertical de fricción sobre las paredes del muro (P_{wf_1}) y la presión vertical en el fondo del silo (P_{vft_1}) para el caso 1

Tabla IV-1: Cargas de contenido para la máxima presión normal sobre los muros del silo

Máxima Presión Normal sobre Muros Silo			
z m	Phf₁ tf/m²	Pwf₁ tf/m²	Pvft₁ tf/m²
1	1.02	0.49	1.58
2	1.98	0.94	3.05
3	2.87	1.37	4.42
4	3.7	1.76	5.71
5	4.47	2.13	6.91
6	5.2	2.48	8.02
7	5.88	2.8	9.07
8	6.51	3.1	10.04
9	7.1	3.38	10.95
10	7.65	3.65	11.8
11	8.16	3.89	12.6
12	8.64	4.12	13.34
13	9.09	4.33	14.03
14	9.51	4.53	14.68
15	9.9	4.72	15.28
16	10.27	4.89	15.84
17	10.61	5.06	16.37
18	10.93	5.21	16.86
19	11.22	5.35	17.32
20	11.5	5.48	17.75
21	11.76	5.6	18.15
22	12	5.72	18.52
23	12.23	5.83	18.87

Caso 2: Máxima presión de fricción sobre los muros del silo

Las cargas del contenido en función de la altura del material almacenado para el caso en que se obtiene la máxima presión de fricción sobre los muros del silo se resumen en la Tabla IV-2.

Tabla IV-2: Cargas de contenido para la máxima fricción sobre los muros del silo

Máxima Fricción sobre Muros Silo			
z	Phf₂	Pwf₂	Pvft₂
m	tf/m²	tf/m²	tf/m²
1	1.02	0.55	1.57
2	1.96	1.07	3.02
3	2.83	1.54	4.36
4	3.63	1.98	5.6
5	4.37	2.39	6.75
6	5.06	2.76	7.81
7	5.69	3.11	8.78
8	6.28	3.43	9.69
9	6.82	3.72	10.53
10	7.32	4	11.3
11	7.79	4.25	12.02
12	8.21	4.48	12.68
13	8.61	4.7	13.29
14	8.98	4.9	13.85
15	9.31	5.08	14.37
16	9.63	5.25	14.86
17	9.92	5.41	15.3
18	10.18	5.56	15.72
19	10.43	5.69	16.1
20	10.66	5.82	16.45
21	10.87	5.93	16.78
22	11.07	6.04	17.08
23	11.25	6.14	17.36

Caso 3: Máxima carga vertical en el fondo del silo

Las cargas del contenido en función de la altura del material almacenado para el caso en que se obtiene la máxima carga vertical en el fondo del silo se resumen en la Tabla IV-3.

Tabla IV-3: Cargas de contenido para la máxima carga vertical en el fondo del silo

Máxima Carga Vertical en el Fondo Silo			
z m	Phf₃ tf/m²	Pwf₃ tf/m²	Pvft₃ tf/m²
1	0.72	0.34	1.59
2	1.4	0.67	3.11
3	2.05	0.98	4.56
4	2.67	1.27	5.94
5	3.27	1.56	7.26
6	3.83	1.83	8.51
7	4.37	2.08	9.71
8	4.88	2.33	10.85
9	5.37	2.56	11.94
10	5.84	2.78	12.98
11	6.29	3	13.97
12	6.71	3.2	14.91
13	7.11	3.39	15.81
14	7.5	3.57	16.67
15	7.87	3.75	17.48
16	8.22	3.92	18.26
17	8.55	4.08	19.01
18	8.87	4.23	19.72
19	9.18	4.37	20.39
20	9.47	4.51	21.04
21	9.74	4.64	21.65
22	10.01	4.77	22.24
23	10.26	4.89	22.79

Las cargas del contenido para los tres casos estudiados en función de la altura (medida desde la superficie equivalente del contenido hasta la losa plana de descarga) se muestra en las figuras Figura IV-2, Figura IV-3 y Figura IV-4.

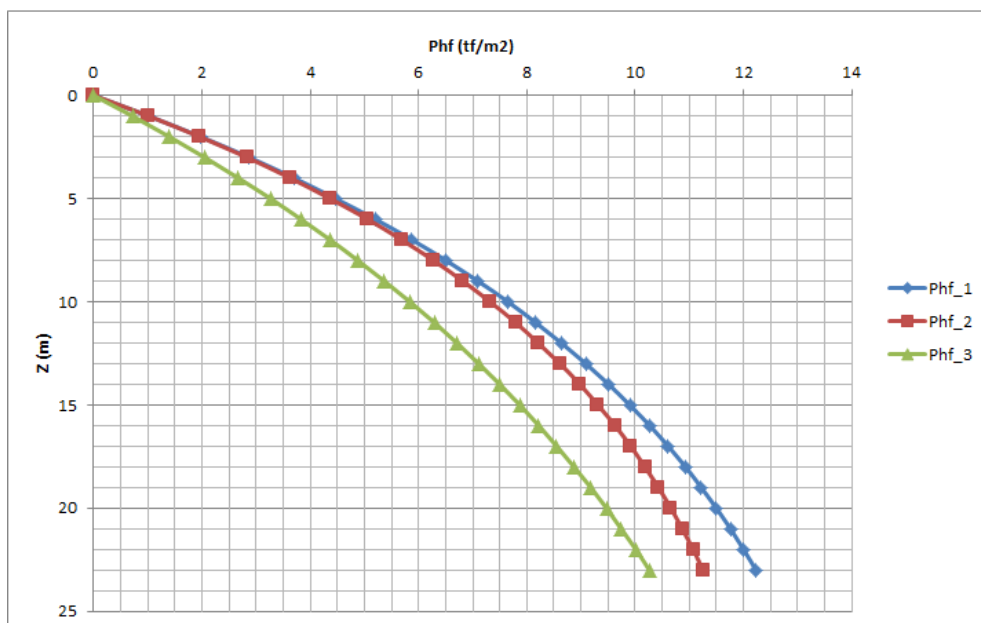


Figura IV-2: Variación presión normal sobre los muros del silo (Phf v/s z)

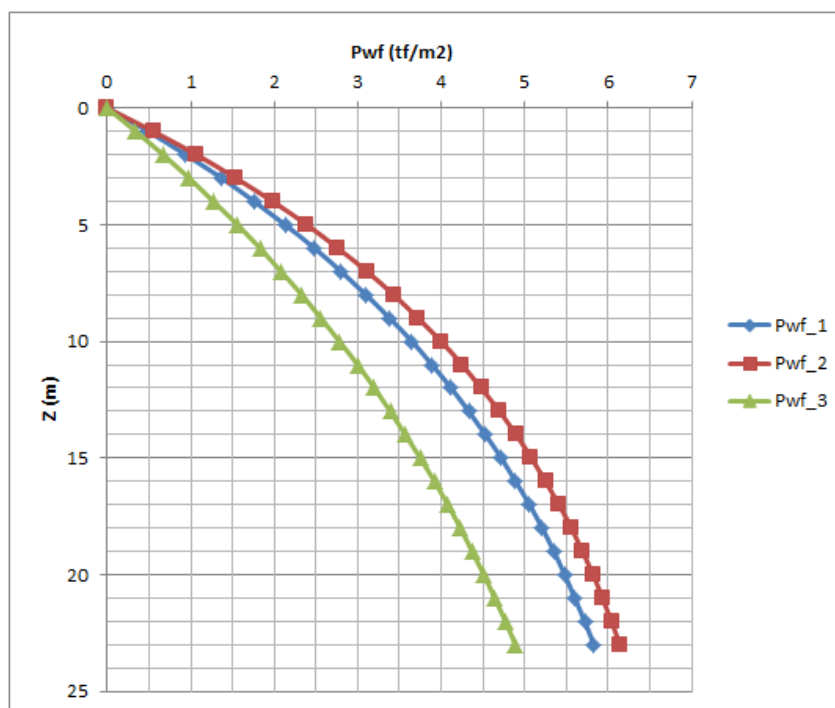


Figura IV-3: Variación carga fricción sobre los muros del silo (Pwf v/s z)

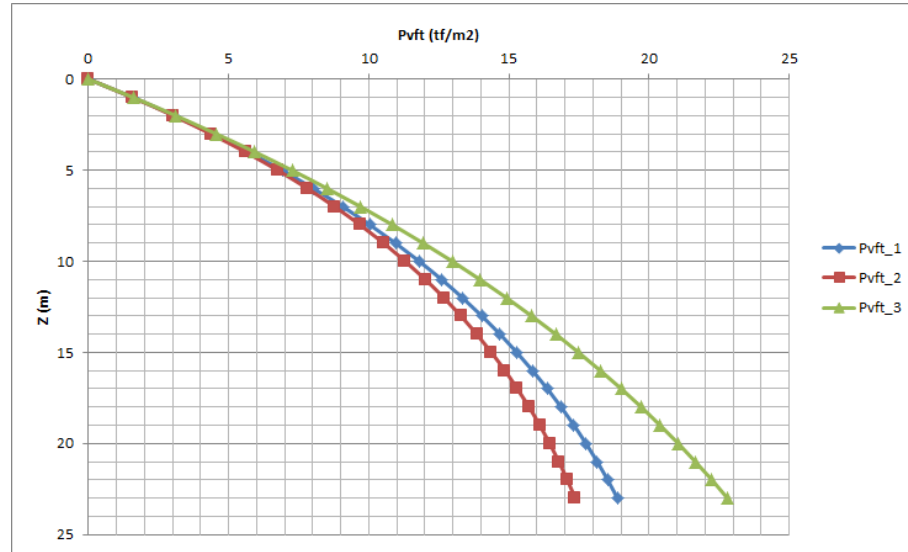


Figura IV-4: Variación carga vertical en el fondo del silo (Pvft v/s z)

Otra de las cargas permanentes presentes en el modelo corresponde a las cargas de peso propio de la estructura. Esta carga es estimada por el programa de análisis SAP2000 según los antecedentes descritos en el punto III.

V. ANÁLISIS SÍSMICO

En esta sección se realizan los dos análisis sísmicos a la estructura: un análisis elástico estático y un análisis tiempo-historia. Se consideraran sólo los efectos del sismo horizontal analizando los esfuerzos que genera el contenido sobre los muros del silo. Los efectos del sismo vertical son despreciados. Se estudia el caso particular del sismo en la dirección “y” (ver Figura III-6), debido a que además de observar los efectos en los muros superiores, resulta interesante ver los esfuerzos que se generan en los muros inferiores de menor sección transversal producto de los accesos que se generan para el tránsito de camiones.

Para el cálculo de las cargas sísmicas se utilizan las indicaciones de la norma BS EN1998-4 (2006) y los valores entregados por la norma NCh2369 (2003) para una zona sísmica II, suelo tipo II , categoría I y Amortiguamiento $\xi = 5\%$. En ambos análisis se utiliza un factor de reducción $R=1$, de manera de poder comparar los resultados del análisis elástico estático con los obtenidos del análisis tiempo-historia.

En primer lugar se detallan las cargas sísmicas correspondientes al análisis elástico estático y se obtiene la demanda sísmica en el silo. A continuación, se resume la demanda sísmica debido al análisis tiempo historia lineal. Finalmente, en este capítulo se comparan los resultados de ambos análisis.

V.1 Análisis elástico estático

V.1.1 Cargas sísmicas

De acuerdo a la norma BS EN1998-4 (2006) el efecto del sismo sobre la estructura soportante puede ser calculado asumiendo que las partículas del contenido se mueven en conjunto con las paredes del silo modelando la masa efectiva del contenido en el centro de masa respectivo y utilizando una masa efectiva correspondiente al 80% de la masa total del contenido. En primer lugar se obtienen los períodos naturales del silo en ambas direcciones, asignando la masa sísmica del contenido en un nodo representativo ubicado en el eje del cilindro a la altura del centro de masa del contenido del silo. Este nodo fue unido a los nodos de los muros ,ubicados al mismo nivel, mediante “Constrains tipo Body” en SAP2000, el cual restringe los desplazamientos en todas las direcciones, a excepción de los giros. Con el fin de utilizar el 80% de la masa efectiva y mantener el mismo nivel de carga que existe en el caso estático, se utilizó un peso específico del contenido multiplicado por un factor de 0.8.

El peso sísmico del contenido con una altura de material (h_b) de 23 (m); un peso específico (γ_{\max}) de 1632 (tonf/m³) y un diámetro del silo (d_c) de 18 (m) es:

$$P_{sism} = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot h_b \cdot 0.8 \cdot \gamma_{\max} = 7641.4 \cdot (tonf) \quad (V-1)$$

De esta forma, la masa sísmica del contenido es igual a:

$$M_{sism} = \frac{P_{sism}}{g} = 779 \left(\frac{tonf}{\frac{m}{s^2}} \right) \quad (V-2)$$

La masa sísmica del contenido asignada en el centro del silo se muestra en la Figura V-1.

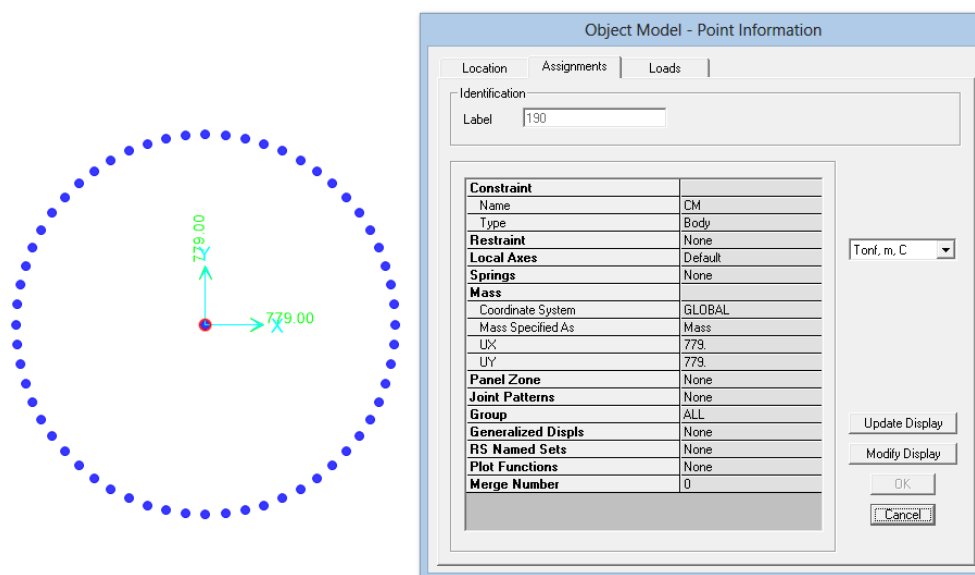


Figura V-1: Masa sísmica utilizada para el análisis elástico estático (modelo SAP2000)

El peso y masa sísmica de la estructura del silo es determinada por el programa de análisis SAP2000 según los antecedentes descritos en el punto III. El valor del peso sísmico de la estructura obtenido del programa se muestra en la tabla Tabla V-1.

Tabla V-1: Peso sísmico estructura del silo

TABLE: Base Reactions							
OutputCase	CaseType	GlobalFX	GlobalFY	GlobalFZ	GlobalMX	GlobalMY	GlobalMZ
Text	Text	Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m	Tonf-m
D	LinStatic	6.019E-12	-4.967E-11	3030.0678	3.395E-09	4.561E-09	1.899E-10

El peso sísmico total del silo es de 10671.5 (tonf). Con las masas definidas para el modelo, se realizó el análisis modal de manera de obtener los períodos naturales de la estructura junto con el contenido en ambas direcciones de análisis. Los valores obtenidos se indican en la tabla Tabla V-2 y las deformadas para los modos correspondientes se muestran en la Figura V-2. En estas deformadas se amplificaron por 100 los desplazamientos.

Tabla V-2: Periodos naturales del silo, análisis elástico estático (modelo SAP2000)

TABLE: Modal Participating Mass Ratios									
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0.271643	1.093E-18	0.925577	7.953E-17	1.093E-18	0.925577	7.953E-17
MODAL	Mode	2	0.252086	0.903179	4.307E-19	9.857E-15	0.903179	0.925577	9.936E-15
MODAL	Mode	3	0.134449	6.638E-17	2.076E-17	0.071578	0.903179	0.925577	0.071578
MODAL	Mode	4	0.134398	3.103E-16	1.98E-08	7.36E-16	0.903179	0.925577	0.071578
MODAL	Mode	5	0.134397	4.723E-08	1.705E-16	2.358E-16	0.903179	0.925577	0.071578
MODAL	Mode	6	0.107469	1.006E-16	1.245E-17	7.551E-18	0.903179	0.925577	0.071578
MODAL	Mode	7	0.107469	1.697E-15	3.354E-17	3.666E-09	0.903179	0.925577	0.071578
MODAL	Mode	8	0.093643	4.601E-16	1.52E-17	2.785E-15	0.903179	0.925577	0.071578
MODAL	Mode	9	0.093643	1.12E-15	3.304E-17	6.721E-09	0.903179	0.925577	0.071578
MODAL	Mode	10	0.061126	9.565E-16	9.489E-09	1.763E-16	0.903179	0.925577	0.071578

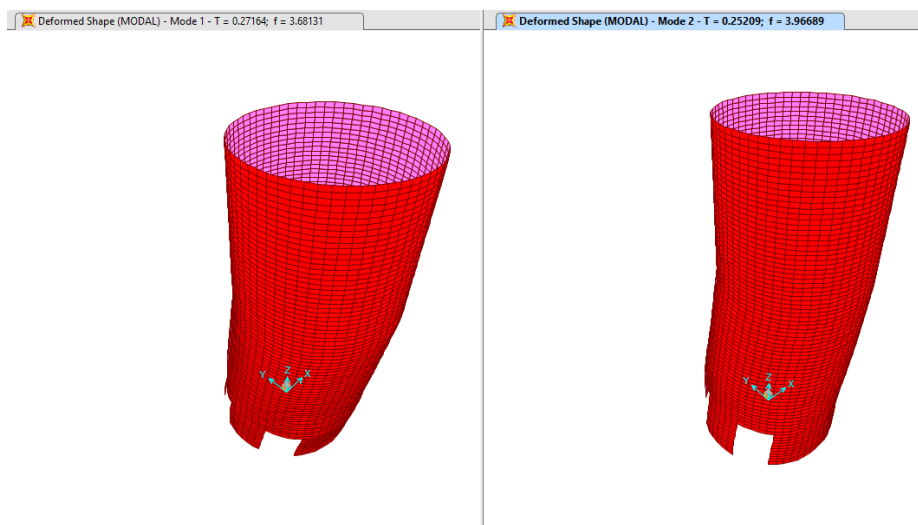


Figura V-2: Deformadas modos 1 y 2, análisis elástico estático (modelo SAP2000)

El período de la estructura en la dirección “y” (T_y) es de 0.27 (s) correspondiente al modo 1 y el período en la dirección “x” (T_x) es de 0.25 (s) correspondiente al modo 2. Además, con la asignación de masas realizada se requiere de 1 modo en la dirección “y” para concentrar a lo menos el 90% de la suma de las masas, en tanto que para la dirección “x” se requiere de 2 modos.

Al considerar el espectro de diseño de la norma NCh2369 (2003), Figura V-3, el coeficiente sísmico en la dirección “y” (C_y) corresponde al coeficiente sísmico máximo y su valor es de 0.495 (g).

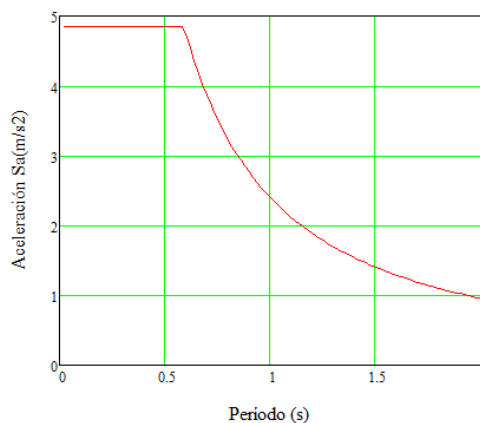


Figura V-3: Espectro de diseño Nch2369 (Zona 2, Suelo Tipo II, Categoría I, $R=1, \xi=5\%$)

Finalmente, utilizando la fórmula (II-14) de la norma BS EN1998-4 (2006) indicada en el capítulo II.5.2 Análisis elástico estático , junto con el coeficiente sísmico de 0.495 g, se obtienen las presiones sísmicas por contenido mostradas en las Figura V-4 (P_y).

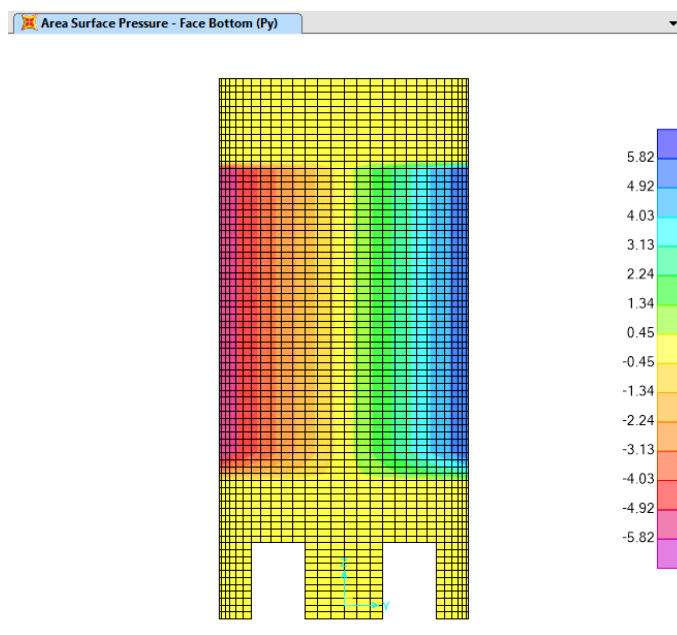


Figura V-4: Presiones sísmicas por contenido sísmico en dirección “y”- P_y (modelo SAP2000)

Es importante señalar, que en el caso del análisis elástico estático el peso sísmico del contenido utilizado se encuentra implícito en la fórmula (II-15) de la norma BS EN1998-4 (2006) que define las presiones sísmicas por contenido. Por lo tanto, si consideramos la fórmula simplificada (V-3) para definir las presiones sísmicas totales por contenido:

$$P_{y_tot} = C_y \cdot P_{sism_est} \quad (V-3)$$

Se tiene que, el peso sísmico del contenido para el análisis elástico estático (P_{sism_est}) es igual a:

$$P_{sism_est} = \frac{P_y}{C_y} \quad (V-4)$$

Utilizando la fórmula (V-4) y los valores de la tabla Tabla V-3 se tiene que el peso sísmico del contenido utilizado por análisis elástico estático ($P_{\text{sism_est}}$) es igual a 7625.8 (tonf). Este resultado presenta una diferencia de 2 ‰ con respecto al valor utilizado en la fórmula (V-1) para la definición de la masa sísmica total por contenido.

Tabla V-3: Reacciones basales para la presión sísmica del contenido (modelo SAP2000)

TABLE: Base Reactions							
OutputCase	CaseType	GlobalFX	GlobalFY	GlobalFZ	GlobalMX	GlobalMY	GlobalMZ
Text	Text	Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m	Tonf-m
Py	LinStatic	2.06E-11	-3774.76	9.9E-10	78297.62	2.64E-09	-7E-09

Por último, considerando que la estructura se mueve junto con el material almacenado, de acuerdo a lo indicado por la norma BS EN1998-4 (2006), se aplicó una aceleración de 0.495g a los muros y losa correspondiente al coeficiente sísmico obtenido para el período fundamental de la estructura junto con su contenido. Esta carga se representó en el modelo como una carga de área tipo gravity (Ey_{gr}) en la dirección "y", y fue asignada como un factor del peso propio del elemento. El efecto total del sismo está representado en el modelo por el estado de carga $Sy = Py + Ey_{gr}$

V.1.2 Resultados análisis elástico estático

A continuación se detallan los resultados del modelo que fueron elegidos para mostrar los efectos del sismo en la estructura. Los resultados que se muestran son: corte basal, desplazamiento de techo, deformadas y esfuerzos en el manto.

a) Corte basal

El corte basal obtenido para el sismo en la dirección “y” es de 5111 (tonf), éste equivale a un 47.9% del peso total de la estructura del silo con el contenido. El 71% de este corte basal corresponde al efecto del contenido (Py), mientras que el 29% corresponde al efecto de la estructura (Ey_gr). En la Tabla V-4 se muestran los cortes basales obtenidos del modelo SAP2000.

Tabla V-4: Corte basal análisis elástico estático (Modelo SAP2000)

TABLE: Base Reactions										
OutputCase	CaseType	GlobalFX	GlobalFY	GlobalFZ	GlobalMX	GlobalMY	GlobalMZ	GlobalX	GlobalY	GlobalZ
Text	Text	Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m	Tonf-m	m	m	m
Py	LinStatic	2.041E-11	-3611.4272	9.427E-10	74909.75523	2.526E-09	-6.661E-09	0	0	0
Ey_gr	LinStatic	4.294E-13	-1499.8835	2.6E-10	21085.91302	7.196E-10	-1.87E-09	0	0	0
Sy	LinStatic	1.982E-11	-5111.3108	1.208E-09	95995.66825	3.255E-09	-8.524E-09	0	0	0

b) Desplazamiento de techo

Para obtener el desplazamiento de techo máximo se utiliza el nodo 11596 correspondiente al nodo ubicado a 90° con respecto al eje “x” a una elevación $z = 38$ (m). En la Figura V-5 se muestra el nodo utilizado.

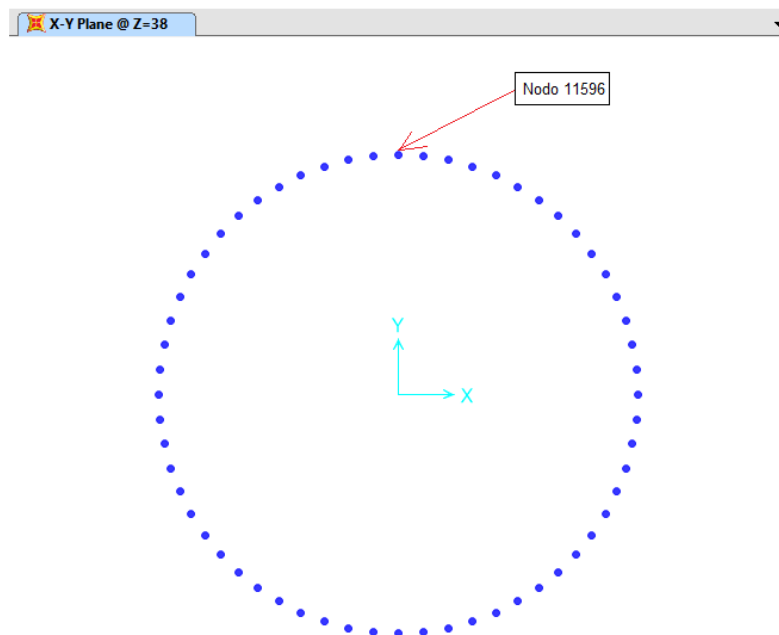


Figura V-5: Nodo utilizado para determinar el desplazamiento techo (Modelo SAP2000)

El desplazamiento de techo máximo debido al sismo en la dirección “y” es de 0.0186 (m). Este desplazamiento corresponde a una deriva de techo de 0.5%. Donde la deriva se obtuvo dividiendo el desplazamiento de techo con una altura de 39 (m).

c) Deformada

La Figura V-6 muestra la deformada del techo del cilindro obtenida en SAP2000. En esta deformada se amplificaron por 300 los desplazamientos. Los nodos azules corresponden a la posición deformada del cilindro y los nodos plomos a la posición sin deformar. La Figura V-7 muestra la deformada en elevación junto con un gráfico de deformaciones v/s altura, correspondiente a los nodos ubicados a las distintas elevaciones del silo bajo el nodo representativo del desplazamiento de techo.

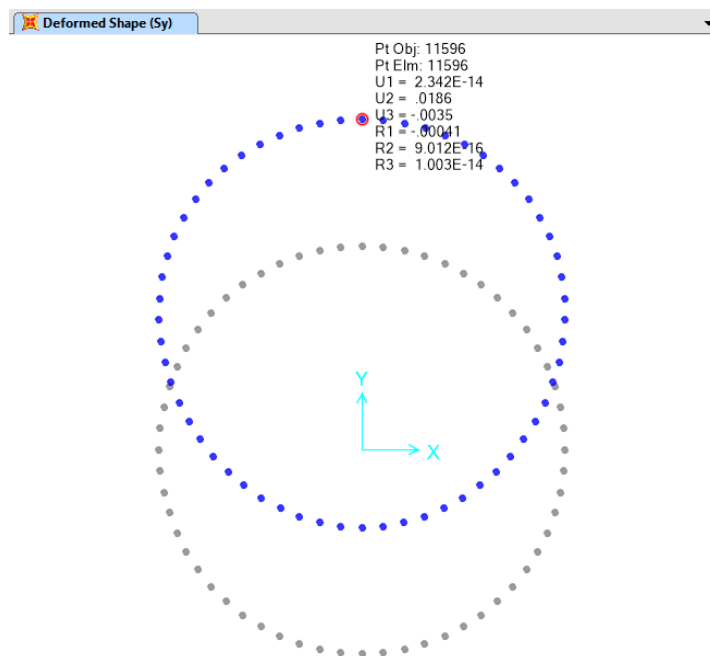


Figura V-6: Deformada techo análisis elástico estático (modelo SAP2000)

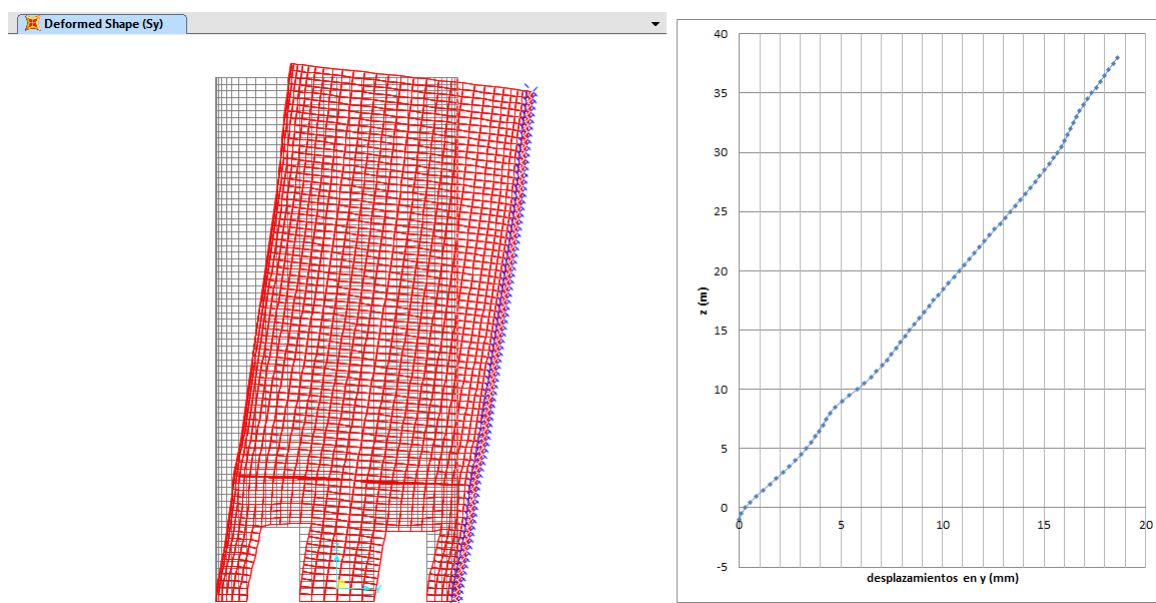


Figura V-7: Deformada en elevación análisis elástico estático (modelo SAP2000)

d) Esfuerzo en el manto

Para analizar los esfuerzos en el manto del silo, se muestra sólo uno de los lados del cilindro (considerando la simetría de esfuerzos que se generan). La Figura V-8 muestra el corte realizado al cilindro en donde el Norte coincide con la dirección del eje “y”.

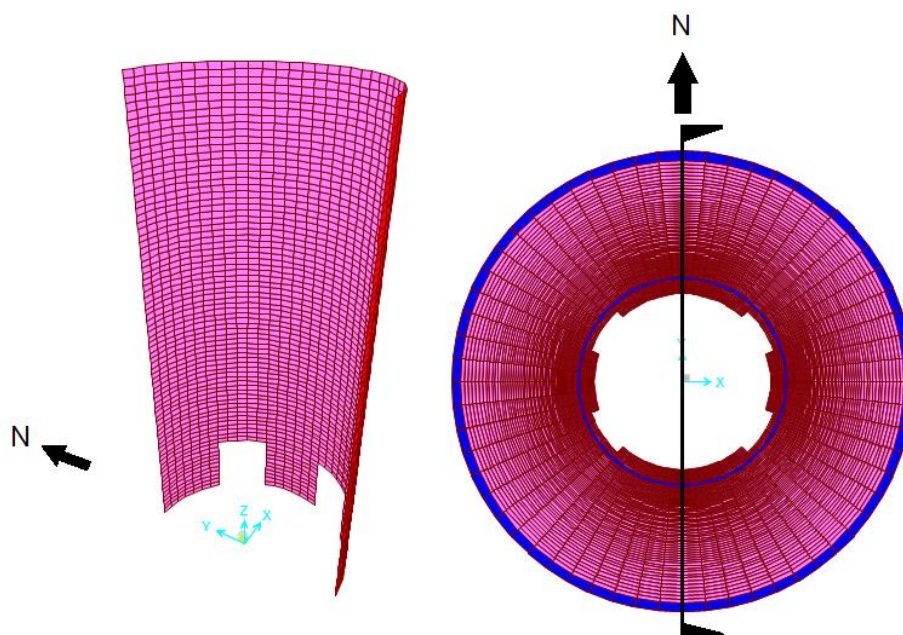


Figura V-8: Vista para análisis esfuerzos silo (Modelo SAP2000)

La Figura V-9 muestra las fuerzas que actúan horizontalmente traccionando o comprimiendo la sección transversal del silo (F_{11} -tonf/m) en la dirección anular y los momentos de flexión (M_{11} -tonf-m/m) respectivos.

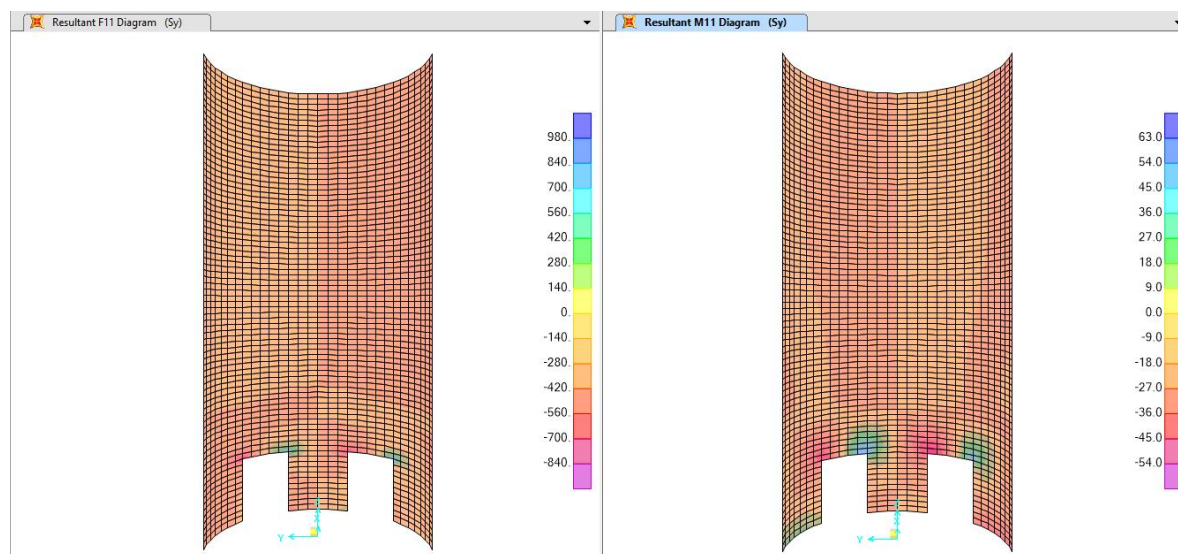


Figura V-9: Fuerzas F11 (tonf/m) y Momentos M11 (tonf-m/m) análisis elástico estático- (modelo SAP2000)

La Figura V-10 muestra las fuerzas que actúan en dirección vertical, correspondientes a fuerzas de tracción o compresión (F22- tonf/m) sobre los muros del silo y los momentos de flexión (M22- tonf-m/m) respectivos.

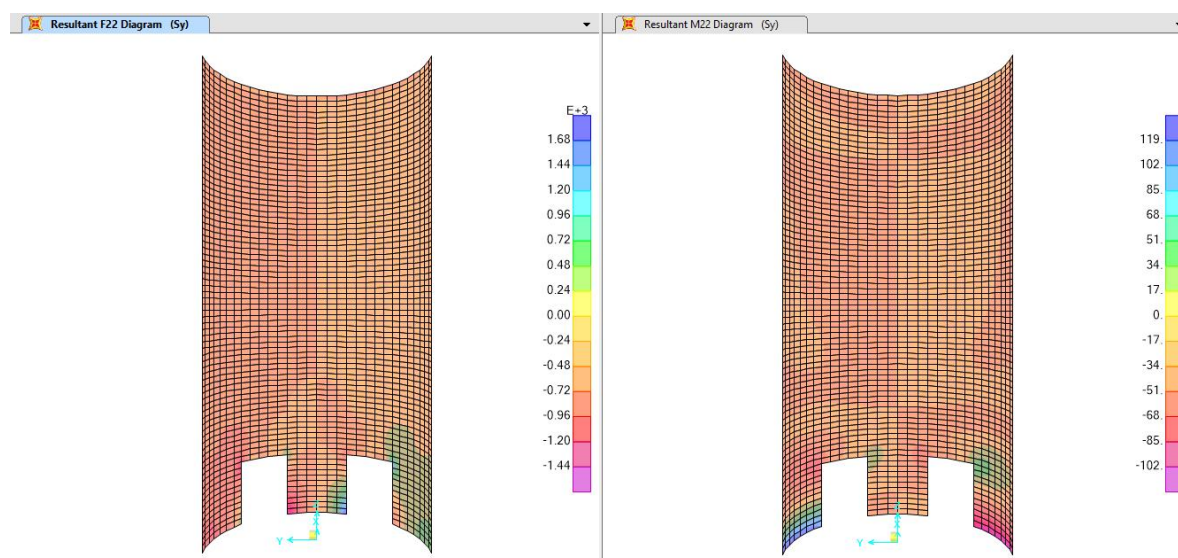


Figura V-10: Fuerzas F22 (tonf/m) y Momentos M22(tonf-m/m) análisis elástico estático- (modelo SAP2000)

La Figura V-11 presenta los cortes que se generan en la sección transversal del silo en dirección radial, correspondientes a las fuerzas V23 (tonf/m) del modelo SAP2000.

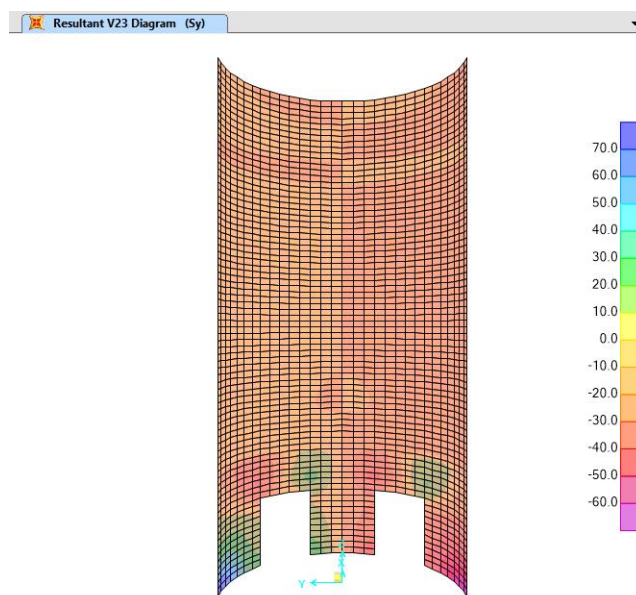


Figura V-11: Corte V23 (tonf/m) análisis elástico estático - (modelo SAP2000)

Finalmente, en la Figura V-12 se presentan los cortes que se generan a lo largo de la sección del muro del silo en dirección anular correspondientes a las fuerzas F12 (tonf/m) del modelo SAP2000.

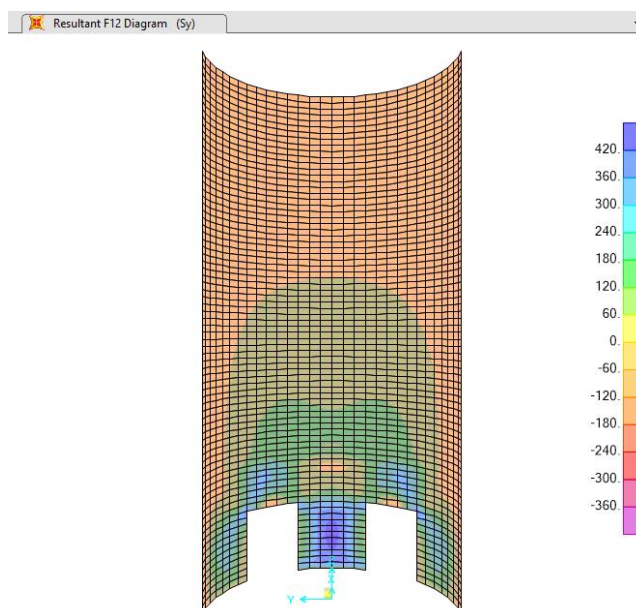


Figura V-12: Corte F12 (tonf/m) análisis elástico estático - (modelo SAP2000)

Al analizar los esfuerzos que genera el sismo en la dirección “y” en los muros del silo, se distinguen dos zonas de análisis. La primera corresponde a la zona ubicada desde la elevación de 8 (m) consistente en los muros superiores del silo de espesor de 0.35 (m) y la segunda zona, que se ubica por debajo y corresponde a los muros de espesor de 0.95 (m).

En la primera zona, se observa que los esfuerzos críticos se producen en la región de transición con los muros inferiores. En la Tabla V-5 se muestran los máximos y mínimos obtenidos del modelo SAP2000. Otra observación importante, es que al analizar los esfuerzos F11 en toda la región superior es posible distinguir claramente una zona de tracción ubicada al Norte del eje “x” y una zona de compresión ubicada al Sur del eje “x”. Estas fuerzas se corresponden con momentos de flexión M11 negativos que traccionan la cara externa del muro en casi la totalidad de la región Norte, mientras que para la zona Sur

se presentan momentos de flexión M11 positivos que traccionan la cara interna del muro en casi la totalidad de la región (ver Figura V-9).

Tabla V-5: Esfuerzos zona crítica muros superiores silo- análisis elástico estático - (modelo SAP2000)

Valor	F11	F22	F12	M11	M22	V23
	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf-m/m	Tonf-m/m	Tonf/m
max	26.104	226.611	160.827	1.844	7.322	9.214
min	-26.104	-226.611	3.160	-1.844	-7.322	-9.214

En la segunda zona, se observa que los esfuerzos críticos para los muros del silo se producen en la base, lugar en donde se empotra la estructura con el suelo. Dado que el silo presenta aberturas, es posible distinguir dos tipos de muros inferiores de acuerdo a su geometría. Los muros Este y Oeste del Silo de aproximadamente 6 (m) de longitud y los muros Norte y Sur de aproximadamente 13 (m) de longitud (ver Figura III-6). En la Tabla V-6 se muestran los valores máximos y mínimos obtenidos del modelo SAP2000. Una observación importante que se obtiene al analizar los esfuerzos en los muros inferiores, es la enorme concentración de esfuerzos de compresión (F11) y corte longitudinal (F12) que se producen en el muro Este, el cual dada su rigidez en relación a la dirección del sismo se comporta principalmente como un muro de corte.

Tabla V-6: Esfuerzos zona crítica muros inferiores silo- análisis elástico estático - (modelo SAP2000)

Muro	Valor	F11	F22	F12	M11	M22	V23
		Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf-m/m	Tonf-m/m	Tonf/m
Norte	max	97.232	486.158	178.607	22.295	112.115	63.605
Norte	min	-143.698	-588.177	4.376	11.626	74.278	20.272
Sur	max	143.698	588.177	178.607	-11.626	-74.278	-20.272
Sur	min	-97.232	-486.158	4.376	-22.295	-112.115	-63.605
Este	max	308.807	1544.037	376.902	3.692	23.734	28.824
Este	min	-308.807	-1544.037	151.146	-3.692	-23.734	-28.824

V.2 Análisis tiempo-historia

V.2.1 Cargas sísmicas

En este capítulo se realiza un análisis tiempo- historia simplificado de la estructura en el cual no se modelan las propiedades de rigidez y geométricas del contenido. De acuerdo a lo indicado por la norma BS EN1998-4 (2006) en el punto 3.3 (4), el efecto del sismo sobre la estructura soportante puede ser calculado asumiendo que las partículas del contenido se mueven en conjunto con las paredes del silo utilizando una masa efectiva correspondiente al 80% del total de la masa del contenido. Con este fin, se propone asignar las masas efectivas del contenido a los nodos de las paredes del silo considerando el volumen tributario que le corresponde a cada nodo.

De acuerdo a la discretización realizada del silo, considerando división en planta en 60 partes ($\theta=6^\circ$) y un espaciamiento en elevación (h) de 0.5 (m) el volumen tributario que le corresponde a cada nodo es:

$$V_{trib_nodo} = \left(\frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \right) \cdot \left(\frac{\theta}{360^\circ} \right) \cdot h = 2.12 m^3 \quad (V-5)$$

Considerando el peso específico del contenido (γ_{max}) de 1.632 (tonf/m³) y el volumen tributario de los nodos (V_{trib_nodo}) tenemos que la masa sísmica asignada a cada nodo es:

$$M_{sism_nodo} = \left(V_{trib_nodo} \cdot 0.8 \cdot \gamma_{max} \right) \frac{1}{g} = 0.28 \cdot \left(\frac{tonf}{\frac{m}{s^2}} \right) \quad (V-6)$$

Las masas sísmicas del contenido asignadas al modelo se muestran en la Figura V-13

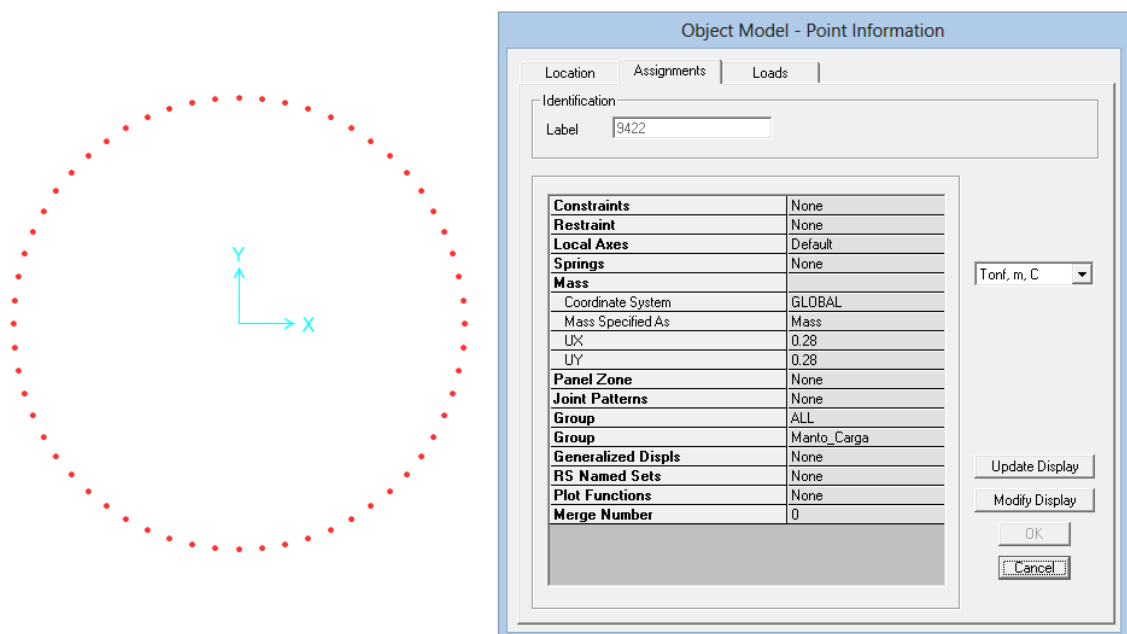


Figura V-13 Masas sísmicas análisis tiempo-historia (modelo SAP2000)

El peso sísmico del contenido y estructura son los mismos utilizados en el análisis elástico estático. Los valores totales obtenidos se encuentran indicados en la sección V.1.1. Con las masas definidas para el modelo, se realiza el análisis modal de la estructura de manera de obtener los períodos naturales de la estructura junto con el contenido en ambas direcciones. Los valores de los períodos naturales se indican en la tabla Tabla V-7 y las deformadas para los modos correspondientes se muestran en la **Figura V-14**. Además, se muestran las deformadas de los modos 1 y 2, con el fin de mostrar las diferencias que existen con respecto a las deformadas de los mismos modos para el análisis elástico estático. En estas deformadas, al igual que en el análisis elástico estático, los desplazamientos se amplificaron por 100.

Tabla V-7: Periodos naturales del silo, análisis tiempo-historia (modelo SAP2000)

TABLE: Modal Participating Mass Ratios												
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX		UY		UZ		SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode		1	0.5584	1.047E-18	3.378E-19	2.39E-20	1.047E-18	3.378E-19	2.39E-20		
MODAL	Mode		2	0.543839	5.475E-17	1.786E-16	0.000019	5.58E-17	1.79E-16	0.000019		
MODAL	Mode		3	0.386271	3.46E-16	0.005561	5.56E-17	4.018E-16	0.005561	0.000019		
MODAL	Mode		4	0.385551	0.005202	4.189E-17	5.289E-17	0.005202	0.005561	0.000019		
MODAL	Mode		5	0.316562	0.766993	1.506E-14	4.915E-16	0.772195	0.005561	0.000019		
MODAL	Mode		6	0.316387	1.518E-14	0.808453	6.616E-15	0.772195	0.814015	0.000019		
MODAL	Mode		7	0.2442	6.183E-16	2.414E-16	4.101E-16	0.772195	0.814015	0.000019		
MODAL	Mode		8	0.244105	1.181E-14	4.913E-15	4.444E-06	0.772195	0.814015	0.000023		
MODAL	Mode		9	0.190126	5.263E-15	0.000597	2.554E-15	0.772195	0.814612	0.000023		
MODAL	Mode		10	0.189802	0.000166	4.445E-14	8.668E-14	0.772361	0.814612	0.000023		
MODAL	Mode		11	0.16559	6.404E-16	4.207E-14	8.009E-15	0.772361	0.814612	0.000023		
MODAL	Mode		12	0.165223	6.369E-15	3.316E-14	0.000017	0.772361	0.814612	0.000041		
MODAL	Mode		13	0.163366	9.45E-15	2.035E-06	1.614E-14	0.772361	0.814614	0.000041		
MODAL	Mode		14	0.163354	0.000016	3.847E-16	4.2E-15	0.772376	0.814614	0.000041		
MODAL	Mode		15	0.157998	1.268E-14	6.302E-17	1.513E-14	0.772376	0.814614	0.000041		
MODAL	Mode		16	0.143215	3.621E-15	9.337E-17	5.613E-14	0.772376	0.814614	0.000041		
MODAL	Mode		17	0.142559	5.128E-16	1.347E-14	0.00012	0.772376	0.814614	0.000161		
MODAL	Mode		18	0.134446	7.938E-16	8.943E-15	0.071486	0.772376	0.814614	0.071646		
MODAL	Mode		19	0.131705	3.59E-15	0.000035	9.752E-15	0.772376	0.814649	0.071646		
MODAL	Mode		20	0.13167	0.000016	1.809E-15	9.321E-14	0.772393	0.814649	0.071646		
MODAL	Mode		21	0.114812	1.266E-14	2.736E-14	4.407E-07	0.772393	0.814649	0.071647		
MODAL	Mode		22	0.114811	1.204E-13	1.17E-15	4.676E-14	0.772393	0.814649	0.071647		
MODAL	Mode		23	0.108857	5.866E-13	9.689E-14	1.177E-13	0.772393	0.814649	0.071647		
MODAL	Mode		24	0.108853	7.567E-14	1.74E-14	0.000012	0.772393	0.814649	0.071659		
MODAL	Mode		25	0.102579	2.762E-13	0.100245	1.885E-13	0.772393	0.914894	0.071659		
MODAL	Mode		26	0.102394	0.000762	1.91E-15	6.137E-14	0.773155	0.914894	0.071659		
MODAL	Mode		27	0.102377	9.299E-14	0.031602	2.411E-14	0.773155	0.946496	0.071659		
MODAL	Mode		28	0.101144	2.194E-13	4.181E-13	2.119E-06	0.773155	0.946496	0.071662		
MODAL	Mode		29	0.101142	2.984E-13	3.473E-13	1.373E-14	0.773155	0.946496	0.071662		
MODAL	Mode		30	0.098227	5.527E-06	8.258E-17	6.653E-16	0.77316	0.946496	0.071662		
MODAL	Mode		31	0.098113	1.646E-17	0.004008	1.766E-13	0.77316	0.950504	0.071662		
MODAL	Mode		32	0.092726	0.148286	3.941E-14	9.847E-14	0.921446	0.950504	0.071662		

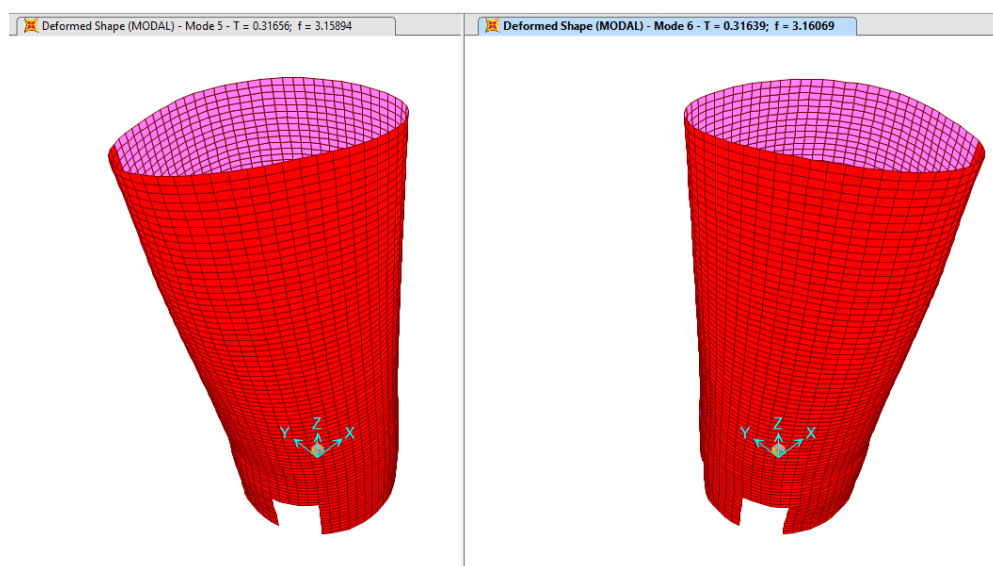


Figura V-14: Deformadas modos principales (modos 5 y 6), análisis tiempo-historia (modelo SAP2000)

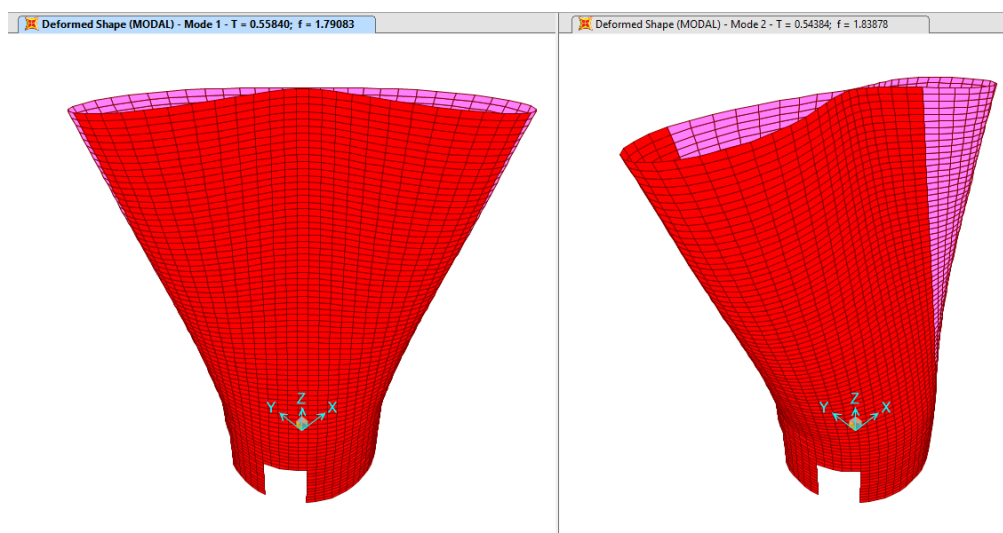


Figura V-15: Deformadas modos 1 y 2, análisis tiempo-historia (modelo SAP2000)

El período fundamental de la estructura en la dirección “y” (T_y) es de 0.316 (s) correspondiente al modo 6 y el período fundamental en la dirección “x” (T_x) es de 0.317

(s) correspondiente al modo 5. Además, con la asignación de masas en los nodos del muro realizada para el análisis tiempo-historia, se requiere de 25 modos en la dirección “y” para concentrar a lo menos el 90% de la suma de las masas, en tanto que para la dirección “x” se requiere de 32 modos.

Finalmente, para representar el movimiento sísmico, y poder comparar los resultados con los del análisis elástico estático se utiliza un registro artificial compatible con el espectro de diseño de la norma NCh2369 (2003). Específicamente se utiliza un registro compatible con el espectro de diseño para una zona sísmica II, suelo tipo II, categoría I, amortiguamiento $\xi = 5\%$ y $R=1$. En la Figura V-16 se muestra el registro de aceleraciones utilizado para el sismo en la dirección “y”. La Figura V-17 muestra la comparación entre el espectro de diseño de la NCh2369Of.2003 y el espectro de respuesta correspondiente al registro de aceleraciones utilizadas.

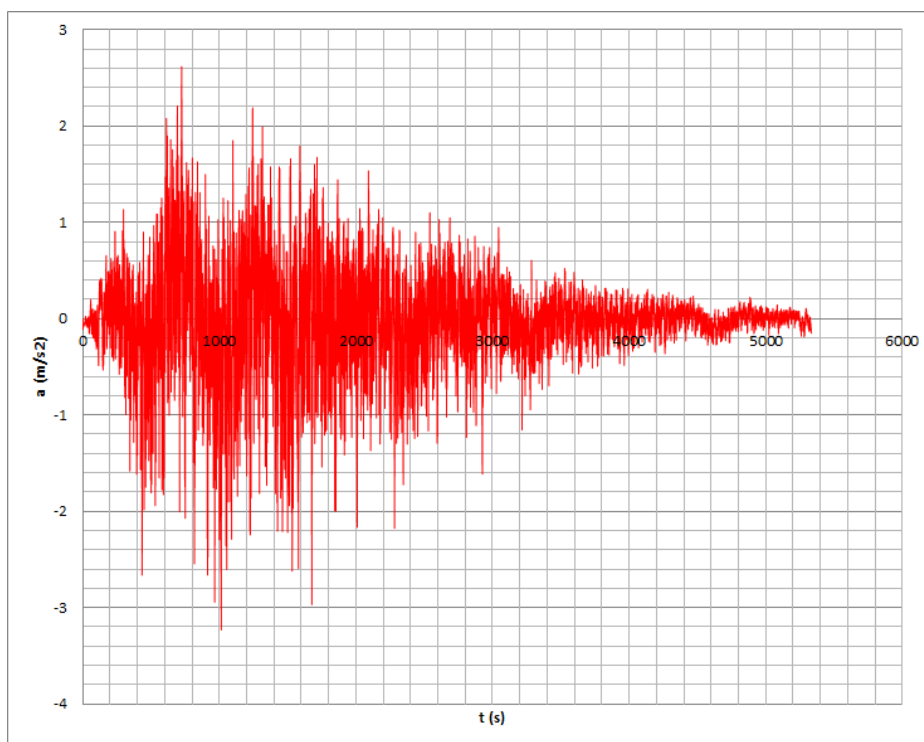


Figura V-16 Registro de aceleraciones análisis tiempo-historia

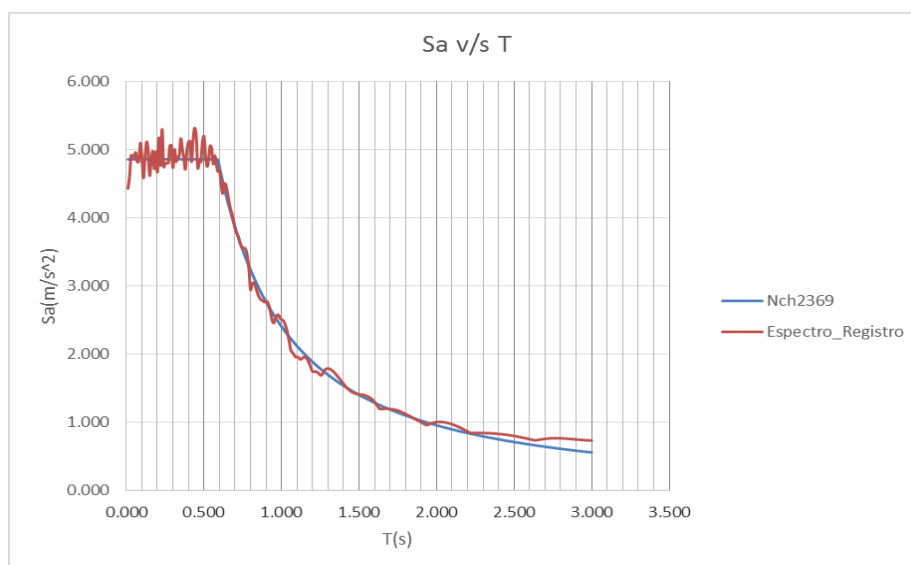


Figura V-17 Espectro Nch2369 Of.2003 v/s Espectro de registro análisis tiempo-historia

V.2.2 Resultados análisis tiempo-historia

A continuación se detallan los resultados obtenidos del análisis tiempo-historia. Se detallan los mismos resultados que los obtenidos para el análisis elástico estático (corte basal, desplazamiento de techo, deformadas, esfuerzos en el manto). Para el caso de las deformadas los esfuerzos en el manto, se muestran los resultados correspondientes al instante en el que se genera el desplazamiento máximo de techo.

a) Corte basal

El corte basal máximo obtenido para el sismo en la dirección “y” es de 4540 (tonf), éste equivale a un 42.5% del peso de la estructura del silo más contenido, y se produce en el tiempo de 25.775 (s). En la Figura V-18 se muestra un gráfico del corte basal en “y” (tonf) v/s tiempo (s) obtenido del modelo SAP2000.

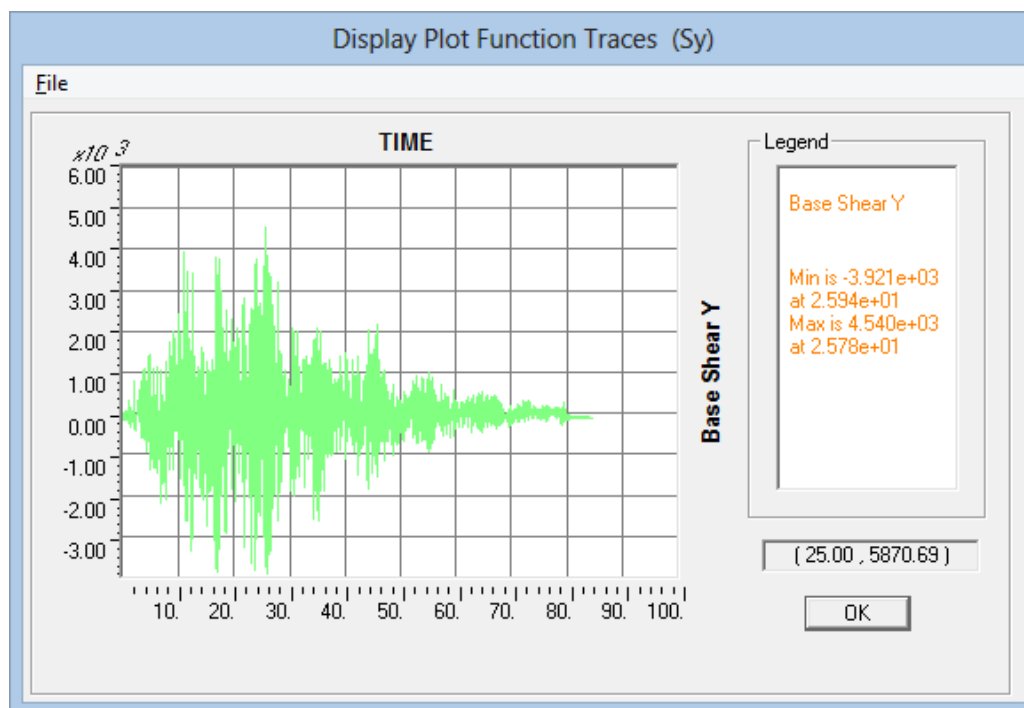


Figura V-18: Corte basal en “y” (tonf) v/s tiempo (s) análisis tiempo-historia (modelo SAP2000)

b) Desplazamiento de techo

Para obtener el desplazamiento de techo máximo se utiliza el mismo nodo que en el análisis elástico estático (nodo 11596, ver Figura V-5). El desplazamiento de techo máximo obtenido para el sismo en la dirección “y” es de 0.0226 (m), el cual se produjo en el instante de tiempo de 17.065(s). Este desplazamiento corresponde a una deriva de techo de 0.6 ‰. En la Figura V-19 se muestra un gráfico del desplazamiento del nodo de techo en función del tiempo obtenido del modelo SAP2000.

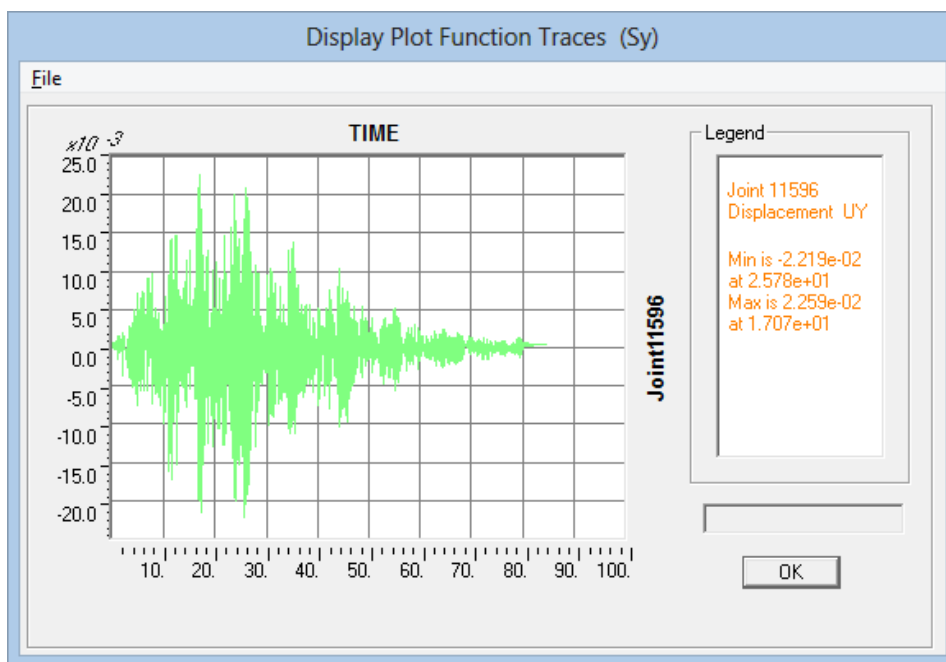


Figura V-19 Desplazamiento en “y” (m) v/s tiempo (s) análisis tiempo-historia (modelo SAP2000)

c) Deformada

A continuación se muestra la deformada de techo obtenida en el modelo SAP2000. Se utilizó el mismo factor de escala que en el análisis elástico estático (300) de manera de poder comparar los resultados posteriormente. La Figura V-20 muestra una deformada de techo en planta para el instante de tiempo de desplazamiento máximo en “y” ($t=17.065$ s). La Figura V-21 muestra la deformada en elevación junto con un gráfico de deformaciones v/s altura, correspondiente a los nodos ubicados a las distintas elevaciones del silo bajo el nodo representativo del desplazamiento de techo. Los nodos rojos corresponden a la posición deformada del cilindro y los nodos plomos a la posición sin deformar.

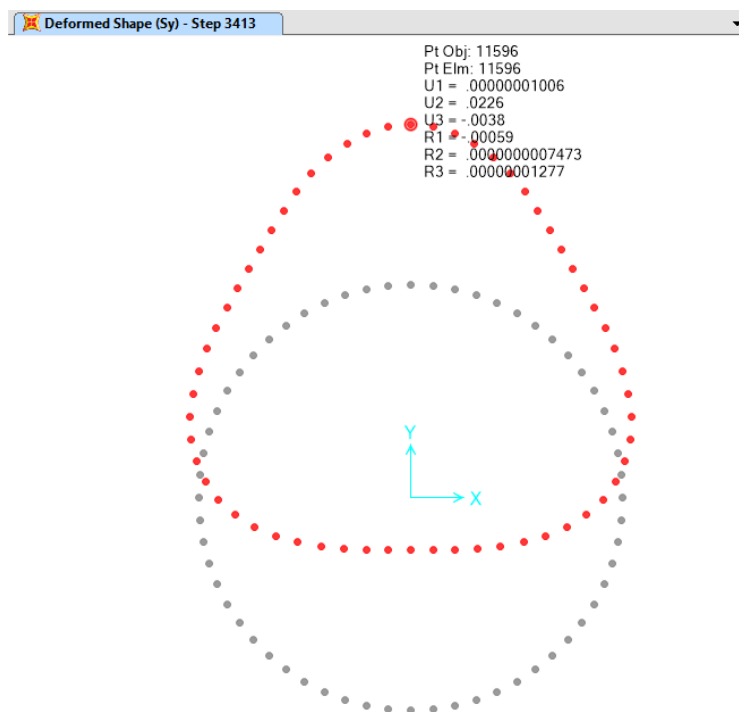


Figura V-20 Deformada techo análisis tiempo-historia $t = 17.065$ (s) (modelo SAP2000)

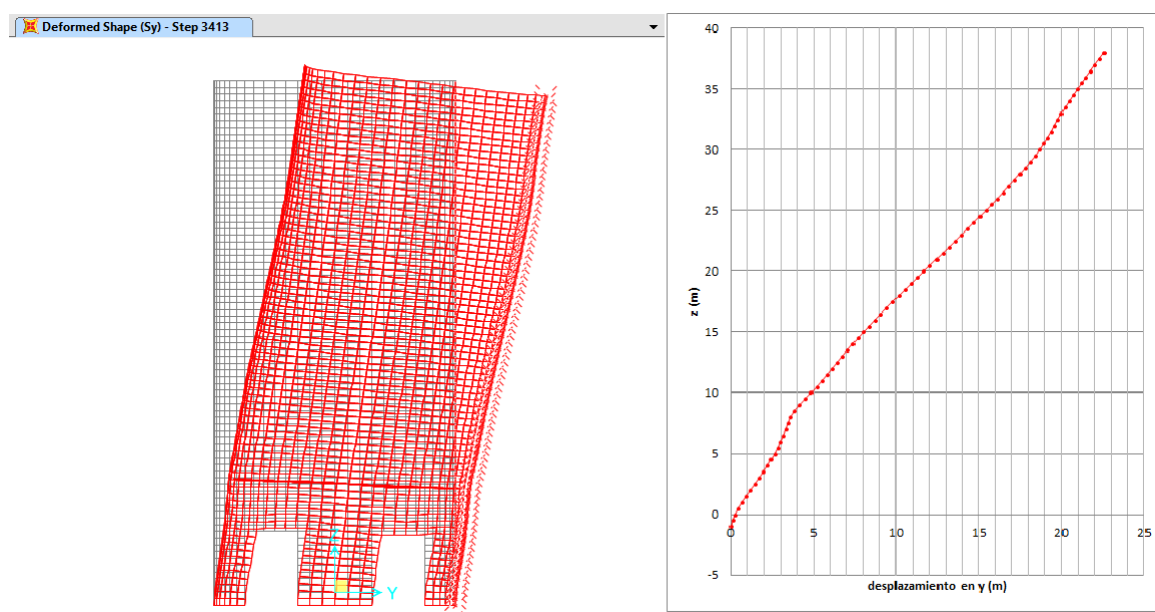


Figura V-21 Deformada en elevación análisis elástico estático $t = 17.065$ (s) (modelo SAP2000)

d) Esfuerzo en el manto

Para cuantificar los efectos del sismo en el manto del silo se muestran, al igual que en el análisis elástico estático, las fuerzas en sólo uno de los lados del cilindro (ver Figura V-8).

Los valores indicados corresponden al tiempo $t = 17.065$ (s), en el que se genera el desplazamiento de techo máximo.

La Figura V-22 muestra las fuerzas que actúan horizontalmente traccionando o comprimiendo la sección transversal del silo (F_{11} -tonf/m) en la dirección anular y los momentos de flexión (M_{11} -tonf-m/m) respectivos.

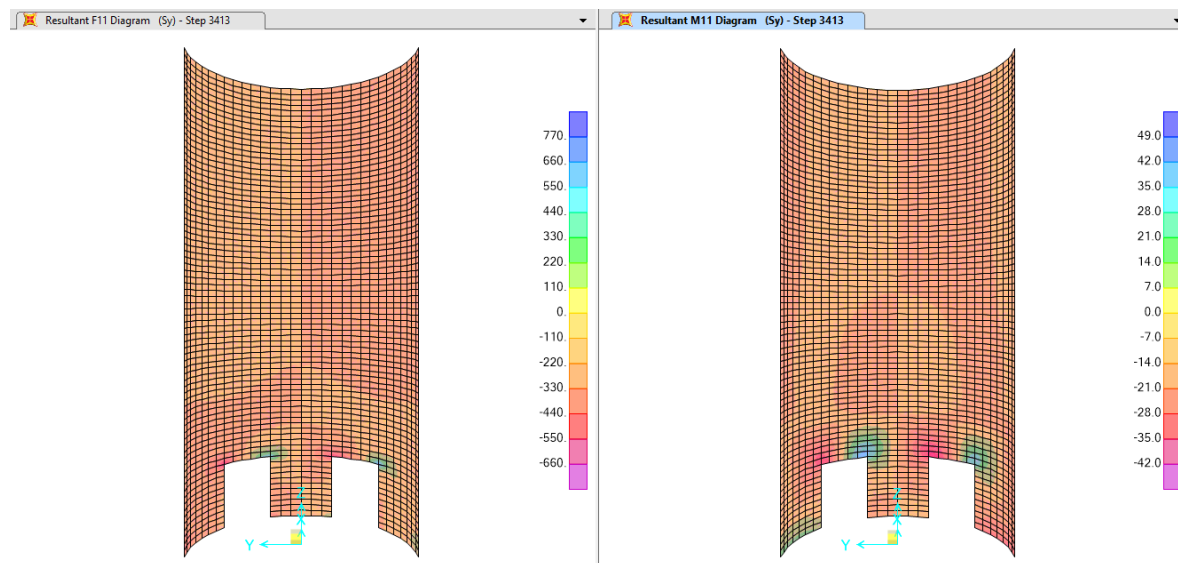


Figura V-22 Fuerzas F_{11} (tonf/m) y Momentos M_{11} (tonf-m/m) análisis tiempo-historia $t=17.065$ (s)-(modelo SAP2000)

La Figura V-23 muestra las fuerzas que actúan en dirección vertical, correspondientes a fuerzas de tracción o compresión (F22- tonf/m) sobre los muros del silo y los momentos de flexión (M22- tonf-m/m) respectivos.

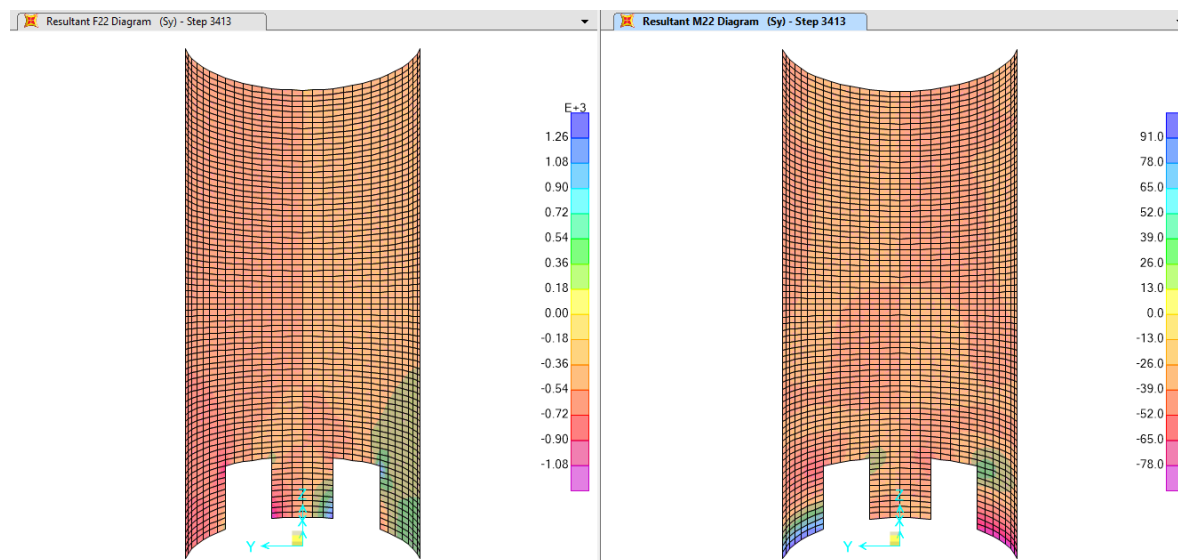


Figura V-23 Fuerzas F22 (tonf/m) y Momentos M22(tonf-m/m) análisis tiempo-historia $t=17.065$ (s)-(modelo SAP2000)

La Figura V-24 presenta los cortes que se generan en la sección transversal del silo en dirección radial, correspondientes a las fuerzas V23 (tonf/m) del modelo SAP2000.

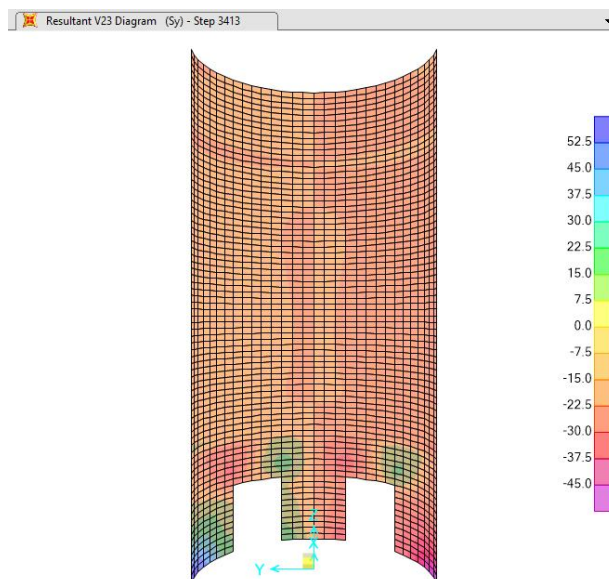


Figura V-24 Corte V23 (tonf/m) análisis tiempo-historia $t=17.065$ (s) - (modelo SAP2000)

Finalmente, en la Figura V-25 se presentan los cortes que se generan a lo largo de la sección del muro del silo en dirección anular correspondientes a las fuerzas F12 (tonf/m) del modelo SAP2000.

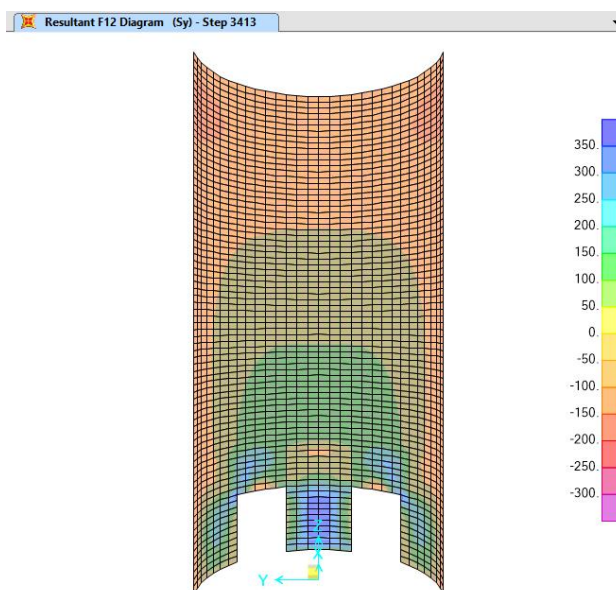


Figura V-25 Corte F12 (tonf/m) análisis tiempo-historia $t=17.065$ (s) - (modelo SAP2000)

Al igual que en el análisis elástico estático, se distinguen dos zonas de análisis y de esfuerzos críticos en los muros. La primera zona corresponde a los muros superiores del silo y se ubicada desde la elevación de 8 (m) hasta el techo del silo. La segunda zona correspondientes a los muros inferiores del silo se ubica por debajo de la elevación de 8 (m). En la primera zona, se observa que los esfuerzos críticos se producen en la región de transición con los muros inferiores. En la Tabla V-8 se muestran los valores máximos y mínimos obtenidos del modelo SAP2000. Además, al analizar los esfuerzos F11 en toda la región superior se observa una zona de tracción ubicada al Norte del eje “x” y una zona de compresión ubicada al Sur del eje “x”. Estas fuerzas se corresponden con momentos de flexión M11 positivos que traccionan la cara interna del muro en casi la totalidad de la región Norte, mientras que para la zona Sur se presentan momentos de flexión M11 negativos que traccionan la cara externa del muro en casi la totalidad de la región (ver Figura V-22).

Tabla V-8: Esfuerzos zona crítica muros superiores silo- análisis tiempo-historia-(modelo SAP2000)

Valor	F11	F22	F12	M11	M22	V23
	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf-m/m	Tonf-m/m	Tonf/m
max	37.232	252.569	136.514	1.647	7.473	9.955
min	-37.232	-252.569	2.920	-1.647	-7.473	-9.954

En la zona inferior, se observa que los esfuerzos críticos para los muros del silo se producen en la base, lugar en donde se empotra la estructura con el suelo. Dado que el silo presenta aberturas, es posible distinguir dos tipos de muros inferiores de acuerdo a su geometría. Los muros Este y Oeste del Silo de aproximadamente 6 (m) de longitud y los

muros Norte y Sur de aproximadamente 13 (m) de longitud (ver Figura III-6). En la Tabla V-9 se muestran los valores máximos y mínimos obtenidos del modelo SAP2000. Al igual como se indicó en el análisis elástico estático, se observa que el muro Este tiene un comportamiento de muro de corte dada su rigidez en relación a la dirección del sismo.

Tabla V-9: Esfuerzos zona crítica muros inferiores silo- análisis tiempo-historia-(modelo SAP2000)

Muro	Valor	F11	F22	F12	M11	M22	V23
		Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf-m/m	Tonf-m/m	Tonf/m
Norte	max	140.505	588.600	133.017	17.687	88.815	50.304
Norte	min	-126.795	-541.817	3.460	10.550	64.900	15.960
Sur	max	126.795	541.817	133.016	-17.687	-88.815	-50.304
Sur	min	-140.505	-588.599	3.460	-13.680	-65.450	-15.820
Este	max	283.915	1419.574	293.954	3.432	22.090	25.692
Este	min	-283.914	-1419.572	149.55	-3.432	-22.090	-25.692

V.3 Comparación de resultados entre análisis elástico estático y análisis tiempo-historia

En esta sección se comparan los resultados obtenidos del análisis elástico estático con los del análisis tiempo-historia. Los resultados de deformadas y esfuerzos en el manto del análisis elástico estático, se compararán con los del análisis tiempo-historia para el instante de tiempo en el que se genera el mayor desplazamiento de techo.

a) Corte basal

El corte basal para el sismo en la dirección “y” para el análisis elástico estático es de 5111 (tonf), mientras que el máximo obtenido para el análisis tiempo-historia es de 4540 (tonf). Se observa una diferencia de 571 (tonf) lo que corresponde a una disminución de aproximadamente 11.2% con respecto al análisis elástico estático. Si se compara el corte máximo del análisis estático con el máximo de 3858 (tonf) para el instante de tiempo en el que ocurre el mayor desplazamiento de techo ($t= 17.065$ (s)), la diferencia es de 1253.3 (tonf) correspondiente a una disminución del 24.5 %. Los valores que se obtienen para el análisis elástico estático resultan siempre mayores, ya que este análisis es conservador y sólo considera un modo de vibración de la estructura a diferencia del análisis tiempo-historia. En la Figura V-26 se muestra un gráfico en el que se acota el corte basal obtenido para el análisis tiempo-historia al máximo resultante de un análisis elástico estático.

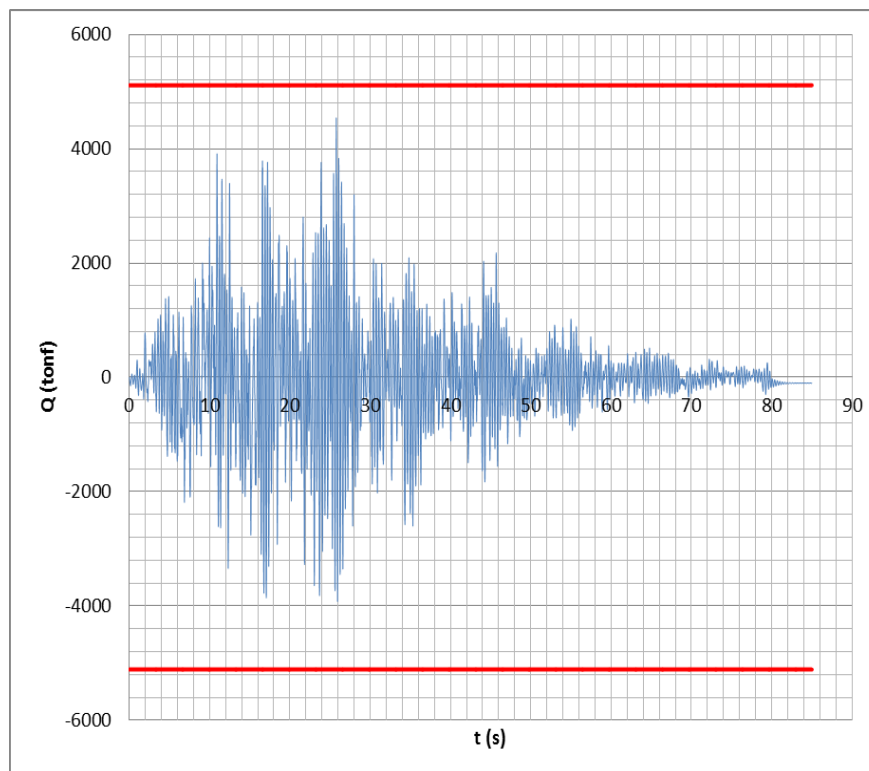


Figura V-26: Corte basal en “y” (tonf) v/s tiempo (s)-(Comparación con respecto a máximo corte basal análisis elástico estático)

b) Desplazamiento de techo

Al comparar los desplazamiento de techo para el sismo en la dirección “y” se observa que el desplazamiento máximo obtenido para el nodo 11596 es de 0.0186 (m) para el análisis elástico estático y de 0.0226 (m) para el análisis tiempo-historia. Es decir, el desplazamiento del análisis tiempo-historia es 21.5% mayor que el del análisis elástico estático. Este desplazamiento mayor se explica principalmente por la deformada que se genera en el análisis tiempo-historia producto de la forma en que se asignaron las masas del contenido a los nodos del muro. Al asignar las masas en la dirección “y” y acelerar la

estructura mediante un registro de aceleraciones en la dirección “y”, las masas del contenido se aceleran sólo en la dirección respectiva y no se representa el desplazamiento radial del contenido definido por la ecuación cosenoidal de la norma BS EN1998-4 (2006) (ver (II-15)). La Figura V-27 muestra un gráfico en el que se acota el desplazamiento de techo obtenido para el análisis tiempo-historia al máximo resultante de un análisis elástico estático.

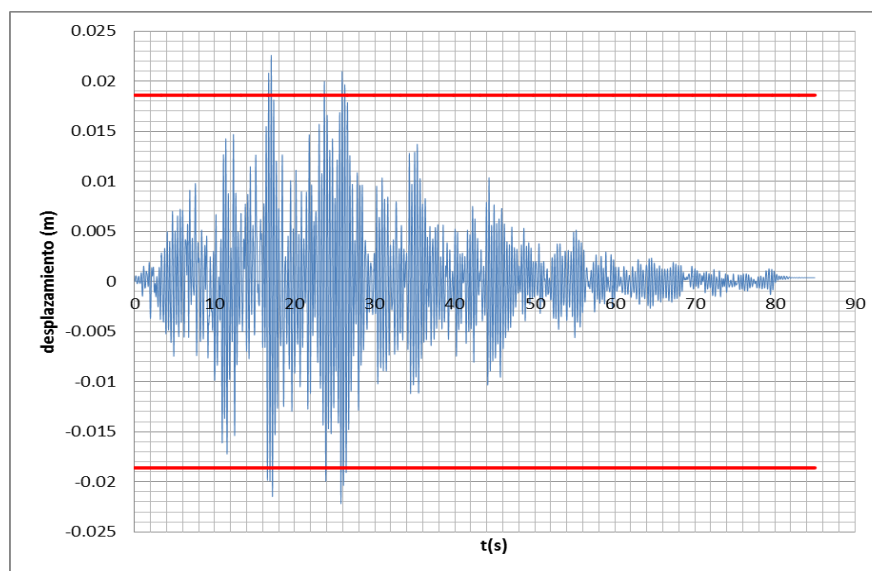


Figura V-27: Desplazamiento en “y” (tonf) v/s tiempo (s)-(Comparación con respecto a máximo desplazamiento análisis elástico estático)

c) Deformada

La Figura V-28 muestra la comparación de las deformadas de techo en planta para el análisis estático y para el análisis tiempo-historia. La Figura V-29 compara las deformación horizontal v/s altura de los nodos ubicados a las distintas elevaciones del silo bajo el nodo representativo del desplazamiento de techo. Como se indicó anteriormente, la

diferencia de las deformadas se debe que no se modela el contenido para el análisis tiempo-historia y sólo se asignan las masas del contenido a los nodos del muro. Por esta razón, el desplazamiento del contenido producto del sismo no se representa adecuadamente en el análisis tiempo-historia.

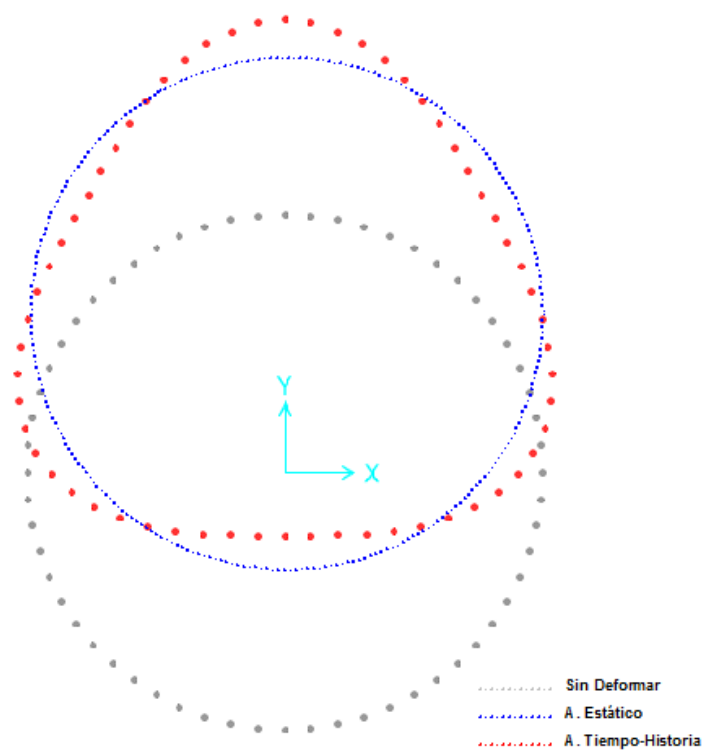


Figura V-28: Deformada de techo (comparación de resultados-Modelo SAP2000)

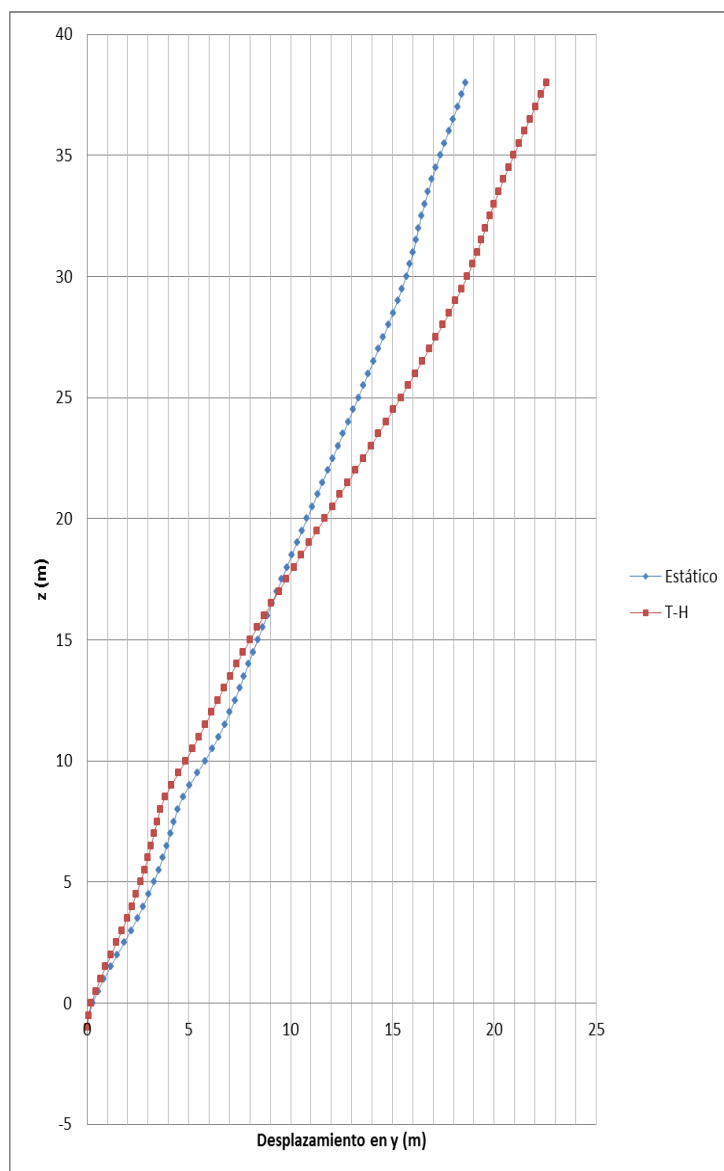


Figura V-29: Deformada en elevación (comparación de resultados-Modelo SAP2000)

d) Esfuerzo en el manto

Para analizar los esfuerzos en el manto del silo debido al sismo en la dirección “y”, en primer lugar se muestran y comparan las regiones en donde los esfuerzos son positivos y donde son negativos para ambos análisis. A continuación, se analizan específicamente los esfuerzos generados en el muro superior del silo acotando los máximos y mínimos de cada

modelo y comparando los resultados obtenidos en cada análisis. Finalmente, se comparan los esfuerzos obtenidos para ambos análisis en las zonas críticas definidas para los muros del silo en las secciones V.1 y V.2. Para representar los esfuerzos en el manto se utilizan las vistas indicadas en la Figura V-8.

A continuación, se distinguen las regiones del muro del silo en la que los esfuerzos son positivos (color azul), de las regiones en que los esfuerzos son negativos (color púrpura) para ambos análisis. En la Figura V-30 se muestran las fuerzas F11 y M11, en la Figura V-31 se muestran las fuerzas F22 y M22 y en la Figura V-32 se muestran las fuerzas V23.

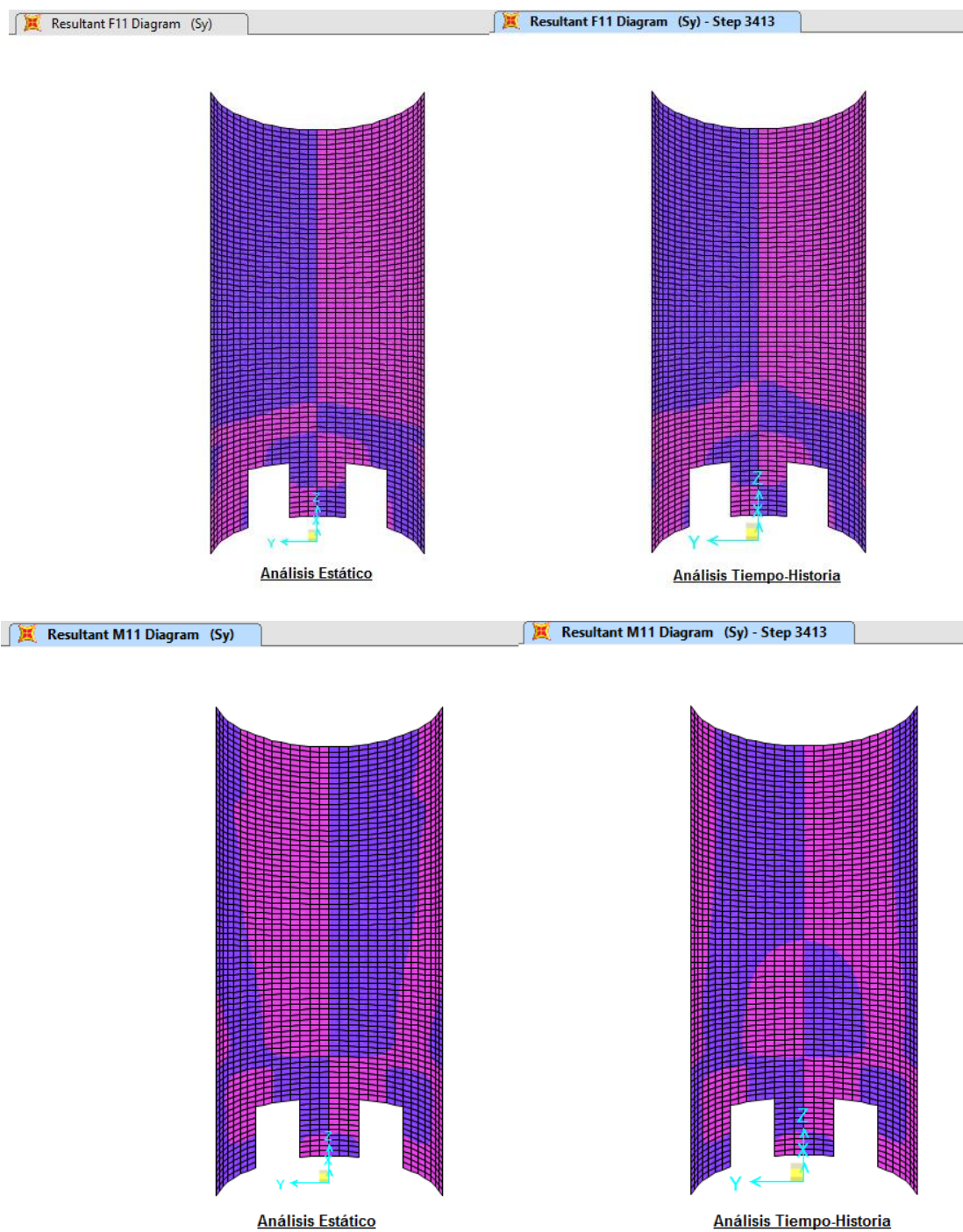


Figura V-30: Regiones Fuerzas F11 (tonf/m) y M11 (tonf-m/m)- (modelo SAP2000)

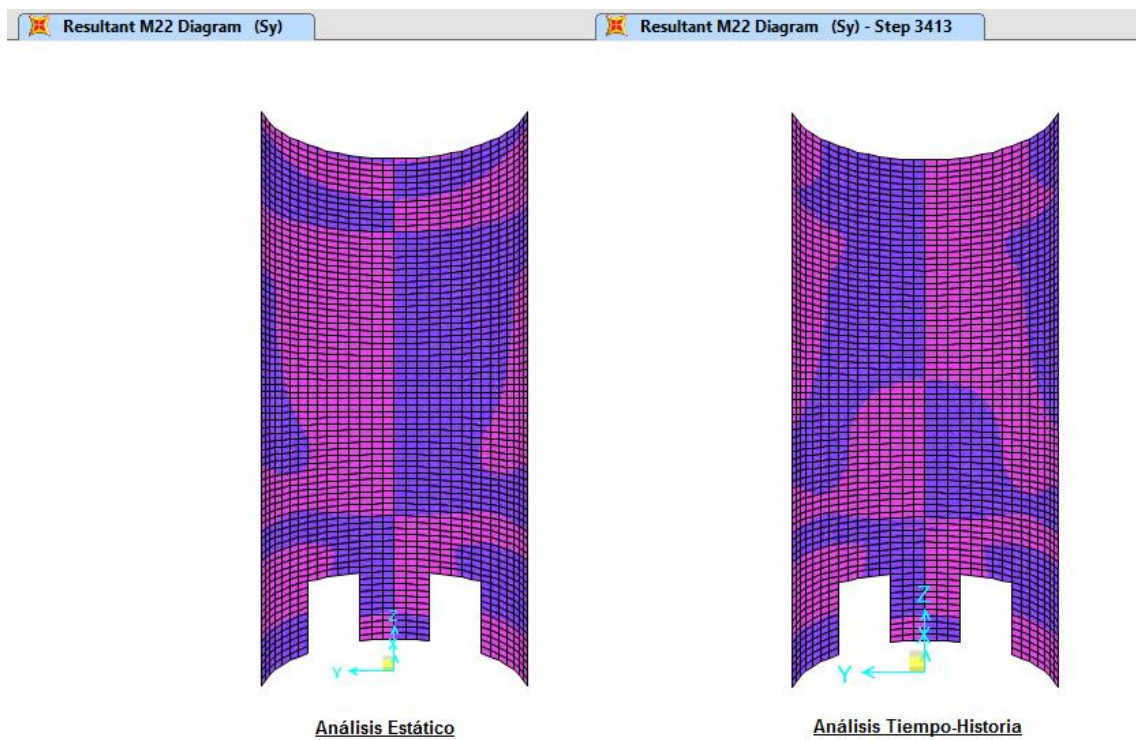
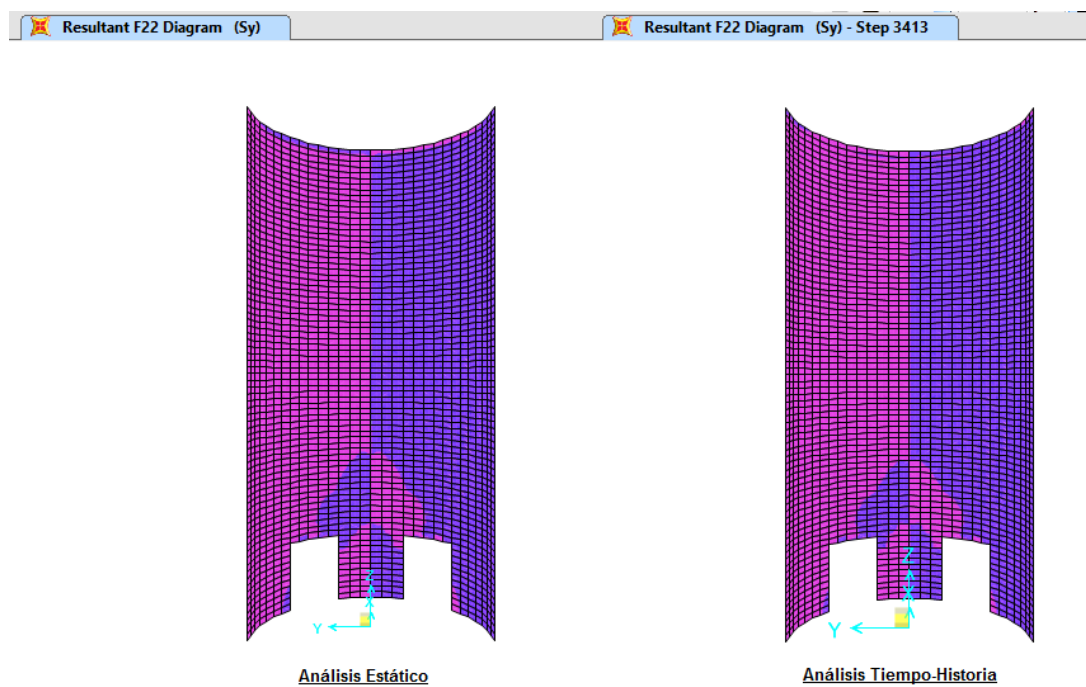


Figura V-31: Regiones Fuerzas F22 (tonf/m) y M22 (tonf-m/m)- (modelo SAP2000)

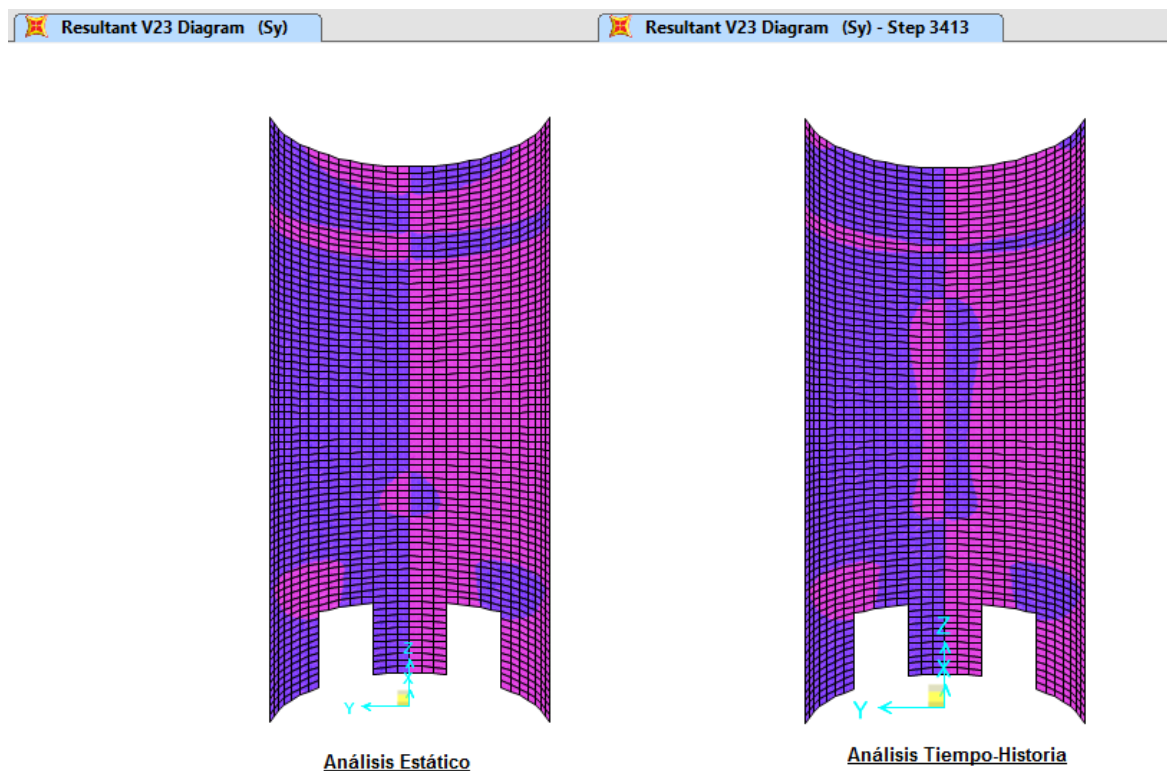


Figura V-32: Regiones Fuerzas V23 (tonf/m)-(modelo SAP200)

Al observar la Figura V-30 y la Figura V-31 es posible percibir que las principales diferencias entre ambos tipos de análisis se producen en la dirección de los esfuerzos de flexión horizontales (M_{11}) y verticales (M_{22}) que se generan en el muro superior del silo. Esta desigualdad en el flujo de los esfuerzos es el reflejo de las enormes diferencias existentes entre las deformadas de ambos análisis (ver Figura V-28 y Figura V-29).

A continuación, se muestran los esfuerzos generados en el muro superior del silo acotados a los límites máximos y mínimos y comparando los resultados obtenidos en cada análisis.

En la Figura V-33 se muestran las fuerzas F_{11} y M_{11} , en la Figura V-34 se muestran las

fuerzas F22 y M22, en la Figura V-35 se muestra la fuerzas V23 y en la Figura V-36 se muestra la fuerzas F12.

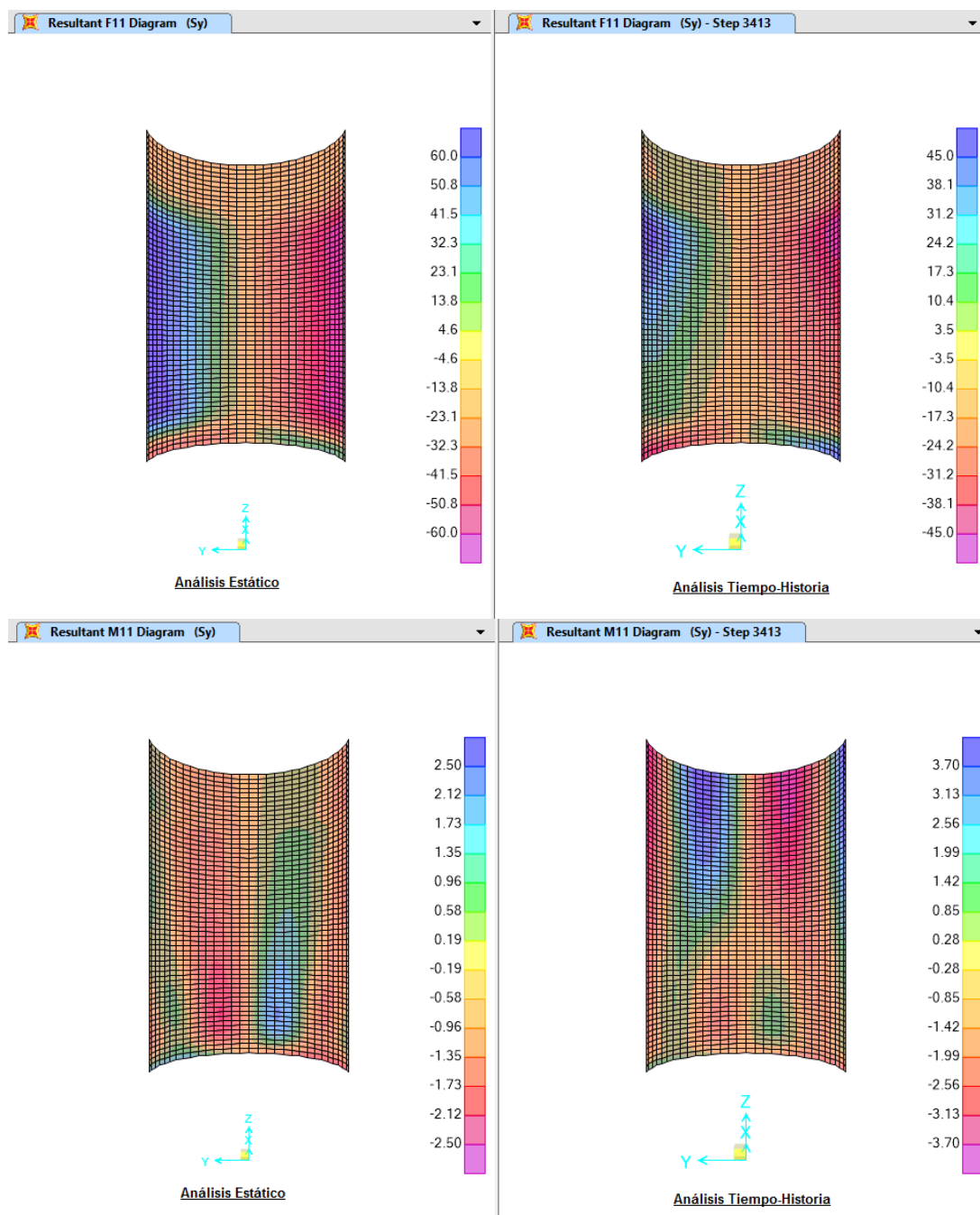


Figura V-33: Fuerzas F11 (tonf/m) y M11 (tonf-m/m) muro superior- (modelo SAP2000)

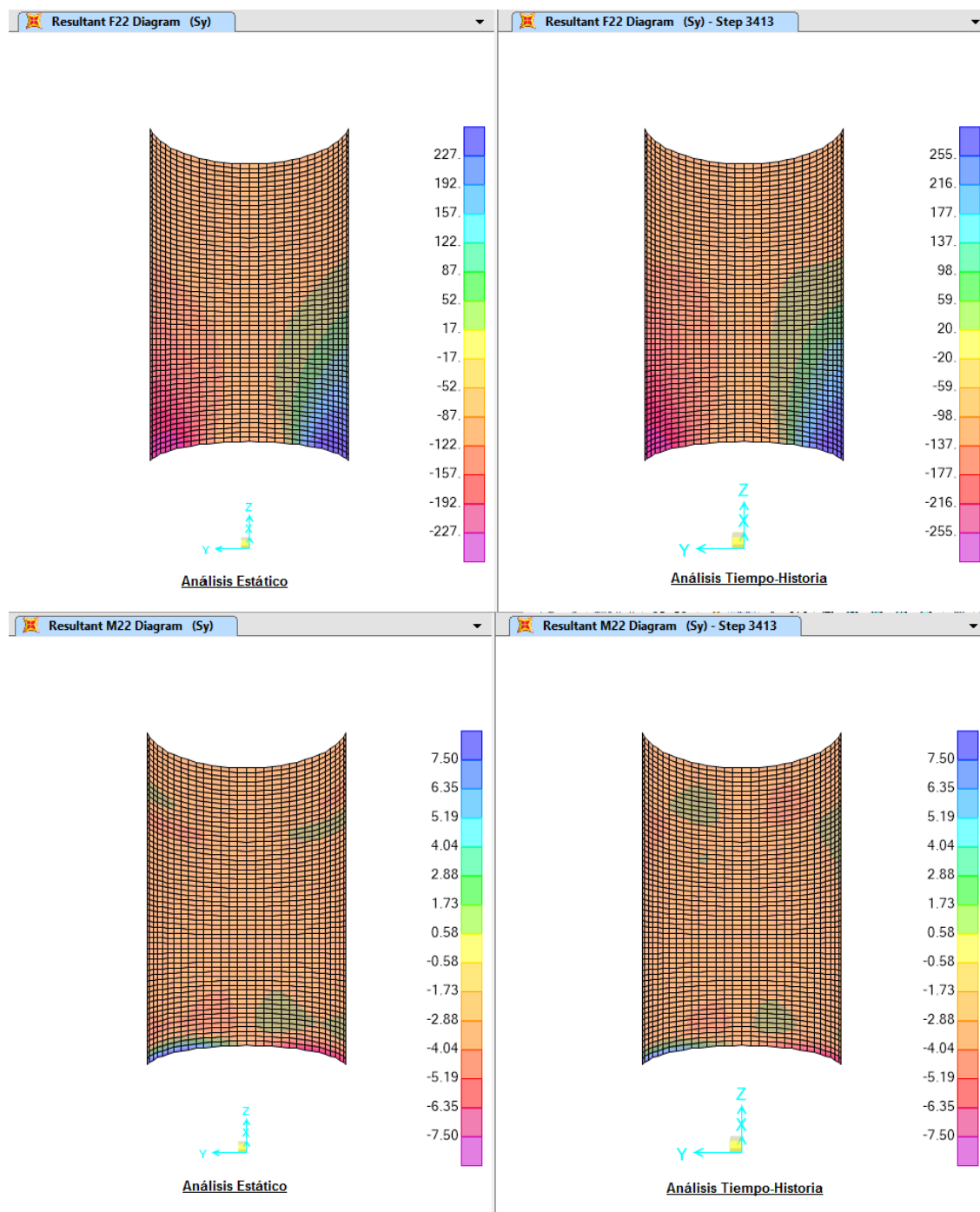


Figura V-34: Fuerzas F22 (tonf/m) y M22 (tonf-m/m) muro superior - (modelo SAP2000)

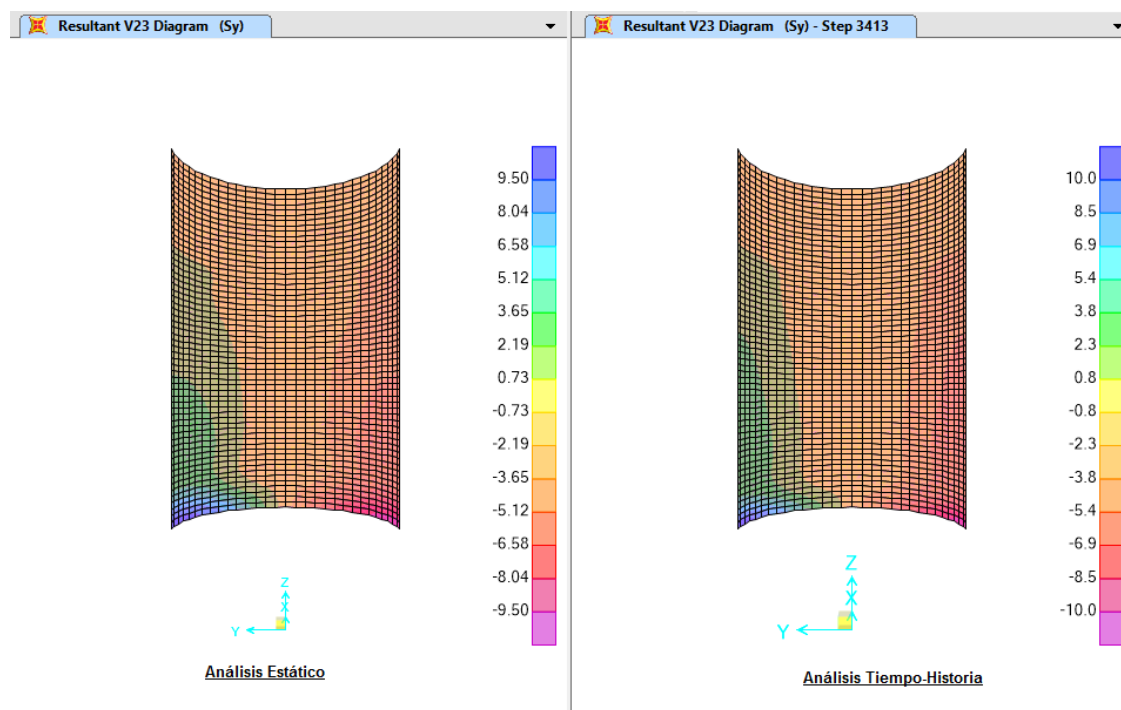


Figura V-35: Fuerza V23 muro superior (tonf/m)- (modelo SAP2000)

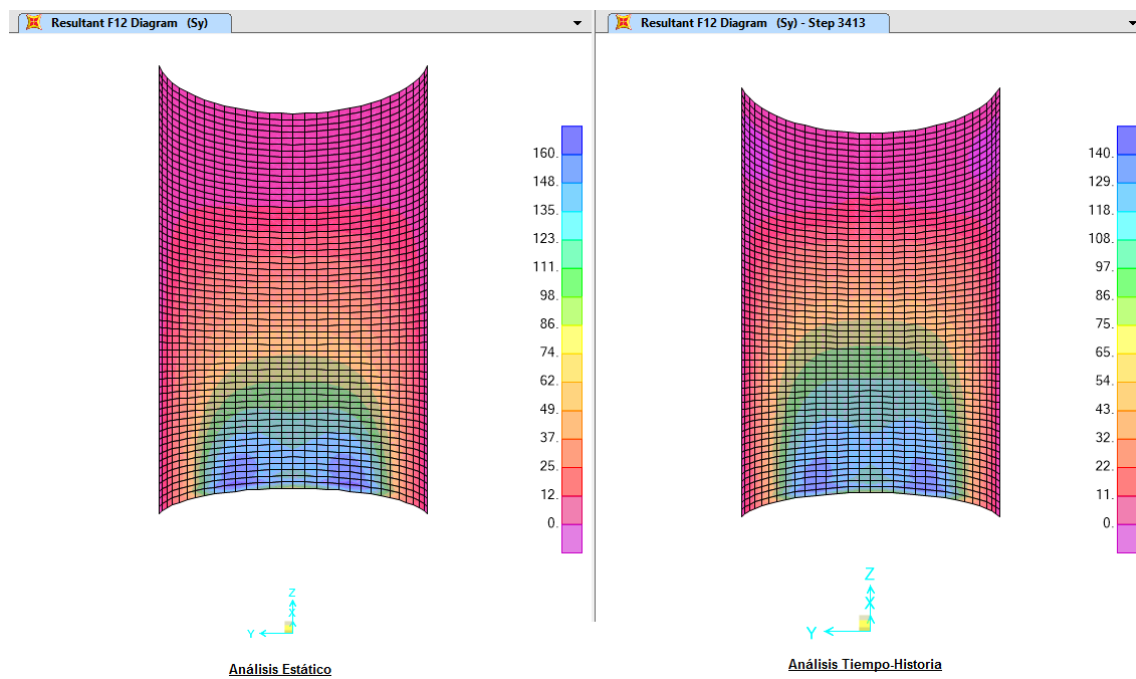


Figura V-36: Fuerza F12 muro superior (tonf/m)-(modelo SAP2000)

Al comparar los esfuerzos obtenidos en ambos análisis (Figura V-33, Figura V-34, Figura V-35 y Figura V-36) se observa que no existen grandes diferencias en los límites superiores e inferiores de las distintas fuerzas que se producen en los muros superiores del silo. Sin embargo, como se muestra en la Figura V-30 y la Figura V-31 el flujo de las fuerzas de momento M11 y M22 en los muros superiores se encuentra invertido en el análisis tiempo-historia si se comparan con los esfuerzos obtenidos en el análisis elástico estático. Es decir, para los momentos M11 y M22 los esfuerzos positivos se ubican al Norte del eje "x" en el análisis tiempo-historia, en tanto que para el análisis elástico estático los esfuerzos en esta región son negativos. Este cambio en el sentido de los momentos se refleja en la deformada obtenida en el análisis tiempo-historia (ver Figura V-28).

Finalmente, en la Tabla V-10 se muestran los esfuerzos máximos y mínimos obtenidos para ambos análisis en la zona crítica del muro superior del silo correspondiente a la región de transición con los muros inferiores.

Tabla V-10: Esfuerzos máximos y mínimos zona crítica muro superior silo

		Estático	T-H	% (T-H/Estático)	Δ
F11	max	26.104	37.232	142.63%	42.63%
Tonf/m	min	-26.104	-37.232	142.63%	42.63%
M11	max	1.844	1.647	89.34%	-10.66%
Tonf-m/m	min	-1.844	-1.647	89.34%	-10.66%
F22	max	226.611	252.569	111.45%	11.45%
Tonf/m	min	-226.611	-252.569	111.45%	11.45%
M22	max	7.322	7.473	102.05%	2.05%
Tonf-m/m	min	-7.322	-7.473	102.05%	2.05%
V23	max	9.214	9.955	108.04%	8.04%
Tonf/m	min	-9.214	-9.954	108.03%	8.03%
F12	max	160.827	136.514	84.88%	-15.12%
Tonf/m	min	3.160	2.920	92.41%	-7.59%

Al comparar los valores máximos y mínimo de los esfuerzos obtenidos para ambos análisis en la región crítica de los muros superiores del silo, se observa que en general no existen grandes diferencias a excepción de los fuerzas anulares (F11) de los muros superiores (ver Tabla V-10).

Por último, es interesante observar que al analizar el flujo de los esfuerzos (Figura V-30, Figura V-31 y Figura V-32) junto con las fuerzas obtenidas en la base del muro superior (ver Tabla V-10), es posible advertir que los resultados son similares en ambos análisis. Para clarificar lo expuesto, se muestran los resultados obtenidos para el muro inferior acotados a sus límites máximos y mínimos respectivos. En la Figura V-37 se muestran las fuerzas F11 y M11, en la Figura V-38 se muestran las fuerzas F22 y M22, en la Figura V-39 se muestran las fuerzas V23 y en la Figura V-40 se muestran las fuerzas F12.

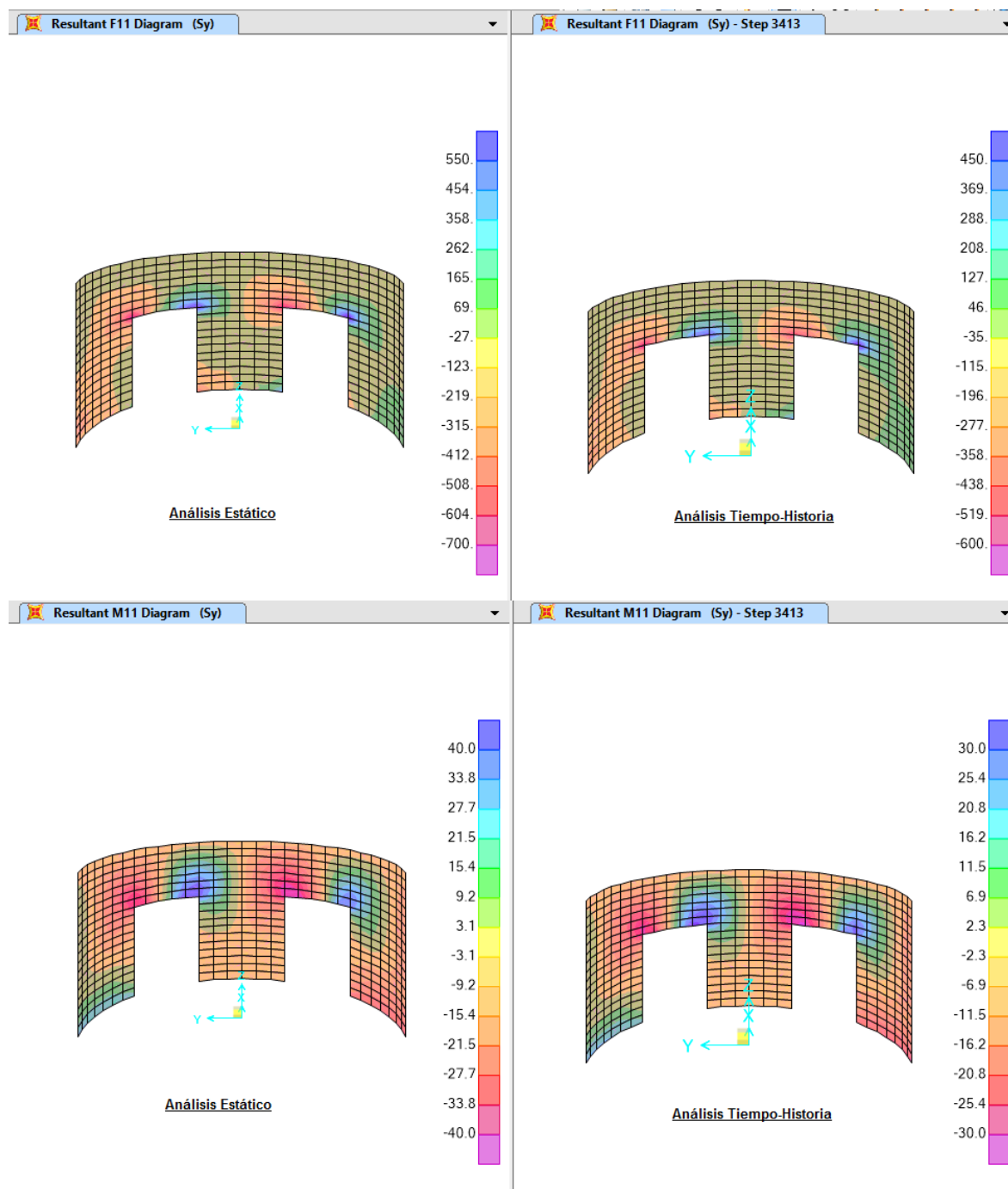


Figura V-37: Fuerzas F11 (tonf/m) y M11 (tonf-m/m) muro inferior- (modelo SAP2000)

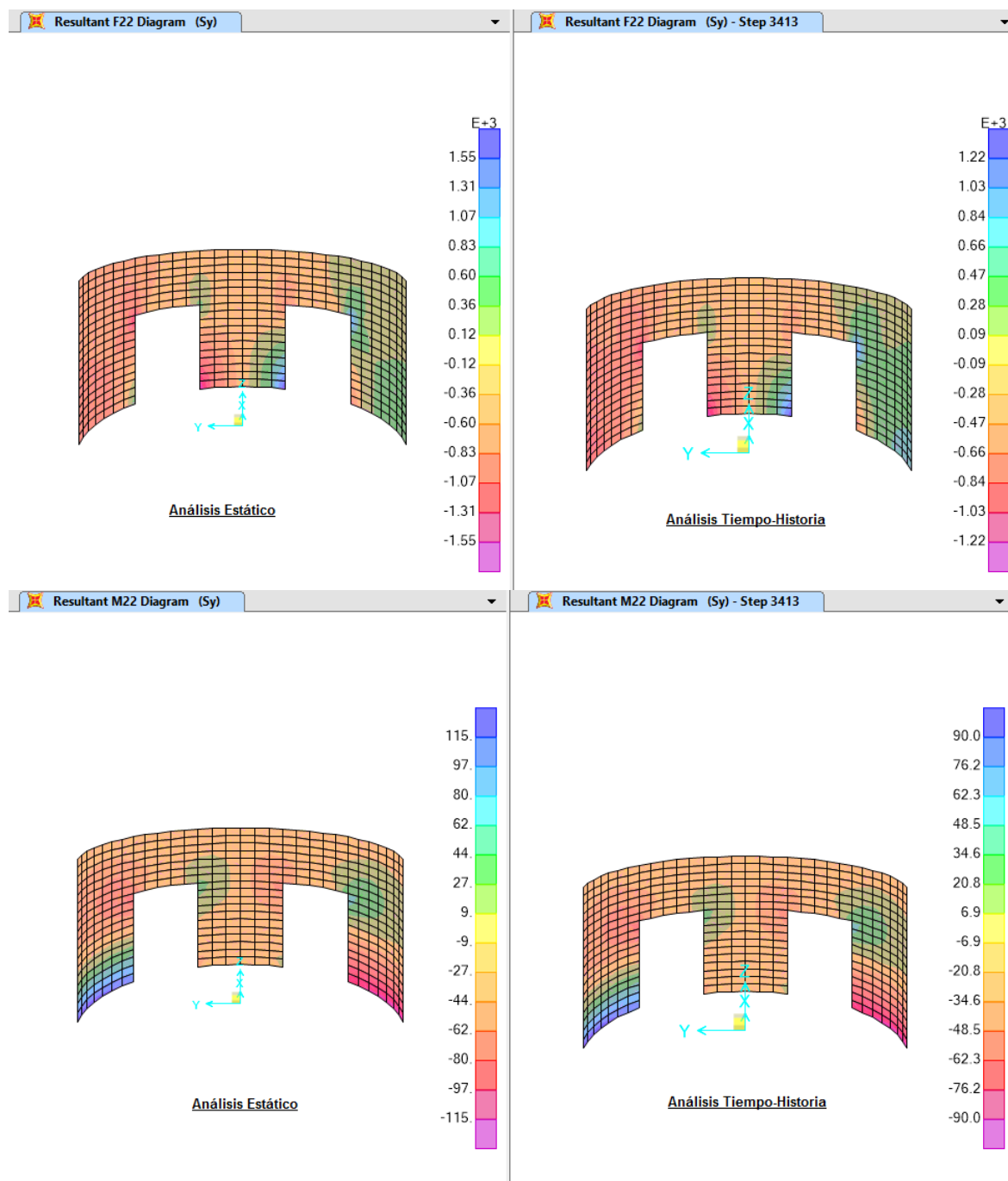


Figura V-38: Fuerzas F22 (tonf/m) y M22 (tonf-m/m) muro inferior - (modelo SAP2000)

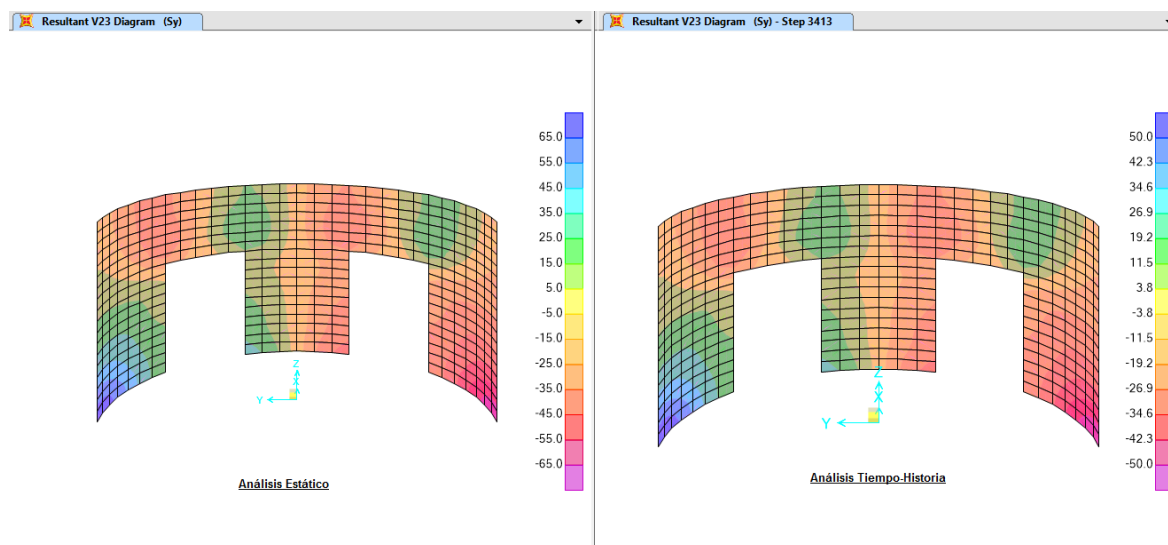


Figura V-39: Fuerzas V23 muro inferior (tonf/m) - (modelo SAP2000)

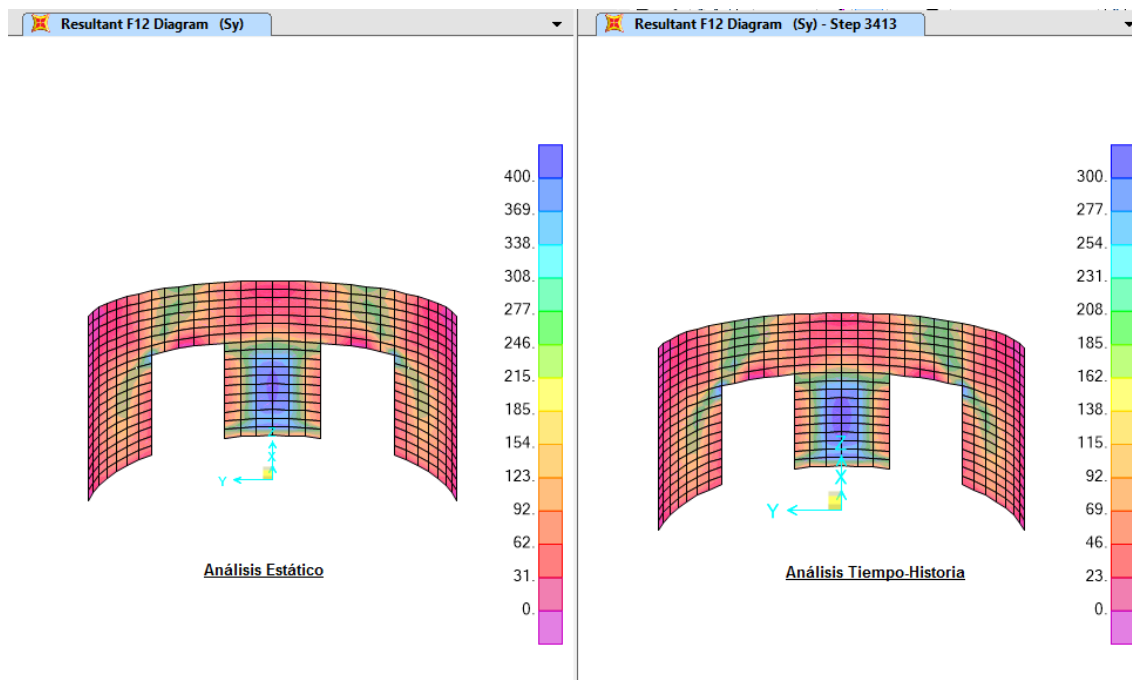


Figura V-40: Fuerzas F12 muro inferior (tonf/m) - (modelo SAP2000)

Finalmente, se muestran los esfuerzos máximos y mínimos obtenidos para ambos análisis en la zona crítica de los muros inferiores del silo correspondiente a la base, lugar en donde se empotra la estructura con el suelo. En la Tabla V-11 se comparan los resultados para el muro inferior Norte, en la Tabla V-12 se comparan los resultados para el muro inferior Sur y en la Tabla V-13 se comparan los resultados para el muro inferior Este .

Tabla V-11: Esfuerzos máximos y mínimos zona crítica muros inferior Norte

		Estático	T-H	% (T-H/Estático)	Δ
F11	max	97.232	140.505	144.50%	44.50%
Tonf/m	min	-143.698	-126.795	88.24%	-11.76%
M11	max	22.295	17.687	79.33%	-20.67%
Tonf-m/m	min	11.626	10.550	90.74%	-9.26%
F22	max	486.158	588.600	121.07%	21.07%
Tonf/m	min	-588.177	-541.817	92.12%	-7.88%
M22	max	112.115	88.815	79.22%	-20.78%
Tonf-m/m	min	74.278	64.900	87.37%	-12.63%
V23	max	63.605	50.304	79.09%	-20.91%
Tonf/m	min	20.272	15.960	78.73%	-21.27%
F12	max	178.607	133.017	74.47%	-25.53%
Tonf/m	min	4.376	3.460	79.07%	-20.93%

Tabla V-12: Esfuerzos máximos y mínimos zona crítica muros inferior Sur

		Estático	T-H	% (T-H/Estático)	Δ
F11	max	143.698	126.795	88.24%	-11.76%
Tonf/m	min	-97.232	-140.505	144.50%	44.50%
M11	max	-11.626	-17.687	152.13%	52.13%
Tonf-m/m	min	-22.295	-13.680	61.36%	-38.64%
F22	max	588.177	541.817	92.12%	-7.88%
Tonf/m	min	-486.158	-588.599	121.07%	21.07%
M22	max	-74.278	-88.815	119.57%	19.57%
Tonf-m/m	min	-112.115	-65.450	58.38%	-41.62%
V23	max	-20.272	-50.304	248.15%	148.15%
Tonf/m	min	-63.605	-15.820	24.87%	-75.13%
F12	max	178.607	133.016	74.47%	-25.53%
Tonf/m	min	4.376	3.460	79.07%	-20.93%

Tabla V-13: Esfuerzos máximos y mínimos zona crítica muros inferior Este

		Estático	T-H	% (T-H/Estático)	Δ
F11	max	308.807	283.915	91.94%	-8.06%
Tonf/m	min	-308.807	-283.914	91.94%	-8.06%
M11	max	3.692	3.432	92.96%	-7.04%
Tonf-m/m	min	-3.692	-3.432	92.96%	-7.04%
F22	max	1544.037	1419.574	91.94%	-8.06%
Tonf/m	min	-1544.037	-1419.572	91.94%	-8.06%
M22	max	23.734	22.090	93.07%	-6.93%
Tonf-m/m	min	-23.734	-22.090	93.07%	-6.93%
V23	max	28.824	25.692	89.13%	-10.87%
Tonf/m	min	-28.824	-25.692	89.13%	-10.87%
F12	max	376.902	293.954	77.99%	-22.01%
Tonf/m	min	151.146	149.550	98.94%	-1.06%

Al comparar los esfuerzos obtenidos en ambos análisis para los muros inferiores (Figura V-37, Figura V-38, Figura V-39, Figura V-40) se observa que los resultados son similares. Por otro lado cuando se analizan los resultados obtenidos para las zonas críticas de los muros se observa que las mayores diferencias se producen en los esfuerzos que se generan en los muros Norte y Sur (Tabla V-11 y Tabla V-12). Sin embargo, si se consideran los esfuerzos principales para el diseño de los muros inferiores del silo (F22 y F12) estas diferencias alcanzan un valor de aproximadamente un 20% inferior a lo obtenido de un análisis elástico estático.

VI. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

El presente trabajo tiene por objetivo comparar los resultados de un análisis elástico estático con los de un análisis dinámico simplificado que permita reproducir los efectos sísmicos del contenido en un silo. En este análisis simplificado no se modelan las propiedades del contenido tales como su rigidez y propiedades geométricas.

El análisis dinámico utilizado corresponde a un análisis tiempo-historia en el que se utiliza un registro artificial compatible con el espectro de diseño de la norma NCh2369(2003). Específicamente se utiliza un registro compatible con el espectro de diseño para una zona sísmica II, suelo tipo II, categoría I, amortiguamiento $\xi = 5\%$ y $R=1$.

Los resultados de un análisis tiempo-historia se comparan con los resultados obtenidos de un análisis elástico estático definido de acuerdo a la norma BS EN1998-4 (2006). Los resultados elegidos para mostrar los efectos del sismo en la estructura son: periodos y modos de la estructura, corte basal, desplazamiento de techo, deformadas y esfuerzos en el manto. Los periodos de la estructura considerada para el análisis elástico estático son menores y sus modos de vibrar son distintos a los obtenidos con el modelo considerado para el análisis tiempo-historia. Esta diferencia se debe principalmente a que para el modelo del análisis elástico estático, la masa total del contenido se concentra en el eje del cilindro a la altura del centro de masa del contenido, en cambio en el modelo del análisis tiempo-historia la masa del contenido se distribuye en toda la región en donde se almacena el material asignando masas a cada uno de los nodos del muro ubicados en los distintos niveles.

El corte basal obtenido para el análisis tiempo-historia es 11.2% menor que el obtenido para el análisis elástico estático. Esta disminución se produce debido a que en el análisis elástico estático conservadoramente sólo se considera un modo de vibrar de la estructura, a diferencia del análisis tiempo-historia en el que se consideran los distintos modos de vibrar de la estructura en función de la asignación de masas del modelo.

En relación al desplazamiento máximo de techo y la deformada respectiva, los resultados obtenidos para el análisis tiempo-historia son un 21.5 % mayores a los obtenidos para el análisis elástico estático. Este resultado se explica por las diferencias de la deformada y por que en el análisis tiempo-historia se asignaron las masas del contenido a los nodos del muro y la aceleración de la estructura se consideró mediante un registro de aceleraciones en la dirección “y”. Producto de esta modelación, las masas del contenido en el análisis tiempo-historia sólo se aceleran sólo en la dirección de análisis y no se representa el desplazamiento radial del contenido definido por la ecuación cosenoidal de la norma BS EN1998-4 (2006).

Finalmente, los esfuerzos en el manto superior del silo que predice el análisis tiempo-historia, presentan diferencias a los esfuerzos obtenidos de un análisis elástico estático. En primer lugar, se identificó que la dirección de los momentos de flexión horizontales (M11) y verticales (M22) del análisis tiempo-historia se invierten a los del análisis elástico estático. Es decir, los momentos M11 y M22 positivos se ubican al Norte del eje “x” en el análisis tiempo-historia, en tanto que para el análisis elástico estático los esfuerzos en esta región son negativos. En segundo lugar, para el análisis tiempo-historia se obtuvieron fuerzas anulares en el muro superior (F11) 42.63% superiores a las obtenidas para el

análisis elástico estático. Ambas diferencias se explican debido a la diferencia en la en ambos análisis.

Adicionalmente, los esfuerzos obtenidos en ambos análisis en los muros inferiores son similares. Por otro lado, cuando se analizan los resultados obtenidos para las zonas críticas de los muros se observa que las mayores diferencias se producen en los esfuerzos F11, M11, M22 y V23 que se generan en los muros Norte y Sur. Sin embargo, si se consideran los esfuerzos principales para el diseño de los muros inferiores del silo (F22 y F12), los resultados obtenidos en el análisis tiempo-historia son aproximadamente un 20 % superior para los esfuerzos F22 y un 25% inferior para los esfuerzos F12, con respecto a los esfuerzos obtenidos de un análisis elástico estático.

En relación al modelo adoptado para el análisis tiempo-historia se identifica que la propuesta de asignación de masas al modelo no es la más adecuada si se analizan los resultados obtenidos para el muro superior del silo (deformada, flujo de fuerzas y esfuerzos en el manto). En efecto, la deformada obtenida para el análisis tiempo-historia se aleja de lo esperado producto que la aceleración del contenido se considera sólo en la dirección del sismo. En un terremoto, se espera que la deformada tenga una forma ovalada (Figura V-6) de tipo cosenoidal con valores máximos que se ubican en un ángulo de 0° y 180° , con respecto a la dirección del sismo, de acuerdo a lo mostrado por la fórmula (II-14) de la norma BS EN1998-4 (2006).

Por otro lado, si se analizan los resultados obtenidos para el muro inferior, se observa que el flujo de las fuerzas en ambos modelos es similar y los valores máximo y mínimo obtenidos para los distintos esfuerzos también son similares en ambos modelos.

Se concluye que las diferencias obtenidas en los resultados del análisis estático y tiempo-historia se deben principalmente a que en el modelo para el análisis tiempo-historia no se consideran las propiedades geométricas y la rigidez del material almacenado, y solamente se asignan las masas a cada uno de los nodos en la dirección del sismo estudiado. Esta simplificación para el análisis tiempo-historia, junto con el registro de aceleraciones en una dirección resulta en la aceleración del contenido exclusivamente en la dirección del sismo.

Como conclusión general, es válido señalar que la simplificación en la modelación del contenido en el análisis tiempo-historia es adecuada si se desean estimar resultados generales tales como corte basal, desplazamiento máximo de techo y esfuerzos generales en los muros inferiores del silo. Sin embargo, esta simplificación no predice adecuadamente los efectos del sismo en el muro superior del silo.

VII BIBLIOGRAFIA

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (2006) BS EN 1991-4:2006. Actions on Structures. Part 4: Silos and tanks. London, British Standards Institution.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (2006) BS EN 1998-4:2006. Design of Structures for Earthquake resistance. Part 4: Silos, Tanks and Pipelines. London, British Standards Institution.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (2004) BS EN 1998-1:2004. Design of Structures for Earthquake resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. London, British Standards Institution.

ACI COMMITTEE 313 (1997) Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos And Stacking Tubes for Storing Granular Material (ACI 313-97) American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1997

INSITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (2003) NCh2369Of.2003.Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales. Santiago, Instituto Nacional de Normalización.

IBAU HAMBURG A HOVER&BOECKER COMPANY (2008) Central Cones Silos from the Structural Point of View, Hamburg.

IBAU HAMBURG A HOVER&BOECKER COMPANY (2006) Multi-Compartment Silos with Central Cone Compact Terminals for the Cement Industry, Hamburg.

COMPUTER AND STRUCTURES, INC. (2012), SAP2000 v.15.2.1, California.

COMPUTERS AND STRUTURES INC. (2009), SAP2000® Basic Analysis Reference Manual Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures, California.

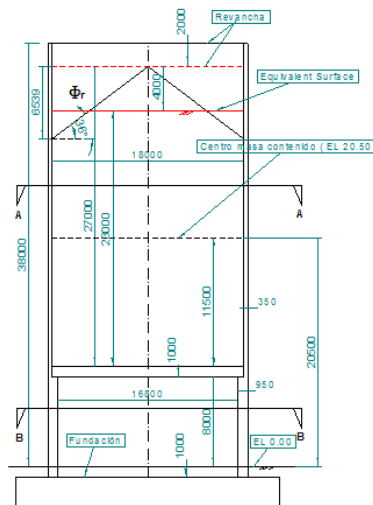
VIII ANEXOS

ANEXO A : CARGAS DEL CONTENIDO (ESTÁTICO)

CARGAS SILO (Cargas del Contenido)

Cálculo Superficie Equivalente Contenido

$d_c := 18\text{m}$	Diámetro Interior Silo
$\phi_r := 36\text{deg}$	Ángulo de reposo del Material
$h_{\text{almac}} := 29\text{m}$	Altura Zona Almacenamiento Material
$rev_{\text{mat}} := 2\text{m}$	Revancha Material Zona Almacenamiento
$h_{\text{mat}} := h_{\text{almac}} - rev_{\text{mat}} = 27\text{m}$	Altura Material hasta la cúspide Cono
$h_{\text{cono}} := \frac{d_c}{2} \cdot \tan(\phi_r) = 6.539\text{m}$	Altura Cono Material
$A_{\text{silo}} := \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} = 254.469\text{m}^2$	Área Sección Transversal Silo
$Vol_{\text{cono}} := \frac{1}{3} \cdot A_{\text{silo}} \cdot h_{\text{cono}} = 554.648\text{m}^3$	Volúmen Cono Material
$h_0 := \frac{Vol_{\text{cono}}}{A_{\text{silo}}} = 2180\text{mm}$	Profundidad Bajo la superficie equivalente
$h_c := h_{\text{mat}} - (h_{\text{cono}} - h_0) = 22.641\text{m}$	Altura Material Silo sobre la Zona de Transición



1. PROPIEDADES MATERIALES:

Table E.1: Particulate solids properties

Type of particulate solid ^{d, e}	Unit weight ^b		Angle of repose	Angle of internal friction		Lateral pressure ratio		Wall friction coefficient ^c				Patch load solid reference factor C_{op}
	γ		ϕ_r	ϕ_i		K		μ ($\mu = \tan \phi_w$)				
	γ_l	γ_u	ϕ_r	ϕ_{im}	a_ϕ	K_m	a_K	Wall type D1	Wall type D2	Wall type D3	a_μ	
	Lower	Upper		Mean	Factor	Mean	Factor	Mean	Mean	Mean	Factor	
	kN/m ³		degrees	degrees								
Default material ^a	6.0	22.0	40	35	1.3	0.50	1.5	0.32	0.39	0.50	1.40	1.0
Aggregate	17.0	18.0	36	31	1.16	0.52	1.15	0.39	0.49	0.59	1.12	0.4
Alumina	10.0	12.0	36	30	1.22	0.54	1.20	0.41	0.46	0.51	1.07	0.5
Animal feed mix	5.0	6.0	39	36	1.08	0.45	1.10	0.22	0.30	0.43	1.28	1.0
Animal feed pellets	6.5	8.0	37	35	1.06	0.47	1.07	0.23	0.28	0.37	1.20	0.7
Barley	7.0	8.0	31	28	1.14	0.59	1.11	0.24	0.33	0.48	1.16	0.5
Cement	13.0	16.0	36	30	1.22	0.54	1.20	0.41	0.46	0.51	1.07	0.5
Cement clinker	15.0	18.0	47	40	1.20	0.38	1.31	0.46	0.56	0.62	1.07	0.7
Coal	7.0	10.0	36	31	1.16	0.52	1.15	0.44	0.49	0.59	1.12	0.6
Coal, powdered	6.0	8.0	34	27	1.26	0.58	1.20	0.41	0.51	0.56	1.07	0.5
Coke	6.5	8.0	36	31	1.16	0.52	1.15	0.49	0.54	0.59	1.12	0.6
Flyash	8.0	15.0	41	35	1.16	0.46	1.20	0.51	0.62	0.72	1.07	0.5
Flour	6.5	7.0	45	42	1.06	0.36	1.11	0.24	0.33	0.48	1.16	0.6
Iron ore pellets	19.0	22.0	36	31	1.16	0.52	1.15	0.49	0.54	0.59	1.12	0.5
Lime, hydrated	6.0	8.0	34	27	1.26	0.58	1.20	0.36	0.41	0.51	1.07	0.6
Limestone powder	11.0	13.0	36	30	1.22	0.54	1.20	0.41	0.51	0.56	1.07	0.5
Maize	7.0	8.0	35	31	1.14	0.53	1.14	0.22	0.36	0.53	1.24	0.9
Phosphate	16.0	22.0	34	29	1.18	0.56	1.15	0.39	0.49	0.54	1.12	0.5
Potatoes	6.0	8.0	34	30	1.12	0.54	1.11	0.33	0.38	0.48	1.16	0.5
Sand	14.0	16.0	39	36	1.09	0.45	1.11	0.38	0.48	0.57	1.16	0.4
Slag clinkers	10.5	12.0	39	36	1.09	0.45	1.11	0.48	0.57	0.67	1.16	0.6
Soya beans	7.0	8.0	29	25	1.16	0.63	1.11	0.24	0.38	0.48	1.16	0.5
Sugar	8.0	9.5	38	32	1.19	0.50	1.20	0.46	0.51	0.56	1.07	0.4
Sugarbeet pellets	6.5	7.0	36	31	1.16	0.52	1.15	0.35	0.44	0.54	1.12	0.5
Wheat	7.5	9.0	34	30	1.12	0.54	1.11	0.24	0.38	0.57	1.16	0.5

NOTE Where this table does not contain the material to be stored, testing should be undertaken.

Coefficiente Empuje Lateral Material:

$$K_m := 0.54 \quad \text{Promedio}$$

$$a_k := 1.20$$

$$K_{up} := a_k \cdot K_m = 0.65 \quad \text{Upper}$$

$$K_{low} := \frac{K_m}{a_k} = 0.45 \quad \text{Lower}$$

Coefficiente Fricción entre el Material y las Paredes del Silo:

$$\text{Wall}_{surf} := \text{"D3"} \quad \text{Wall Surface (Tabla 4.1 EN1991-4:2006)}$$

$$\mu_m := 0.51 \quad \text{Promedio}$$

$$a_\mu := 1.07$$

$\mu_{up} := a_{\mu} \cdot \mu_m = 0.55$ Upper

$\mu_{low} := \frac{\mu_m}{a_{\mu}} = 0.48$ Lower

Ángulo de Fricción interna del Material:

$\phi_{im} := 30\text{deg}$ Promedio

$a_{\phi} := 1.22$

$\phi_{i_up} := a_{\phi} \cdot \phi_{im} = 36.6\text{-deg}$ Upper

$\phi_{i_low} := \frac{\phi_{im}}{a_{\phi}} = 24.59\text{-deg}$ Lower

Ángulo de Reposo del Material:

$\phi_r := 36\text{deg}$

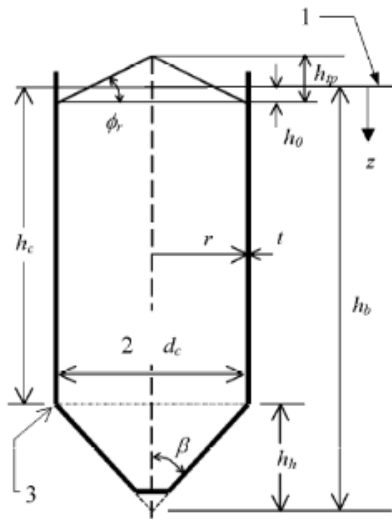
Peso Especifico del Material:

$\gamma_{max} := 16 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 1.63 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$

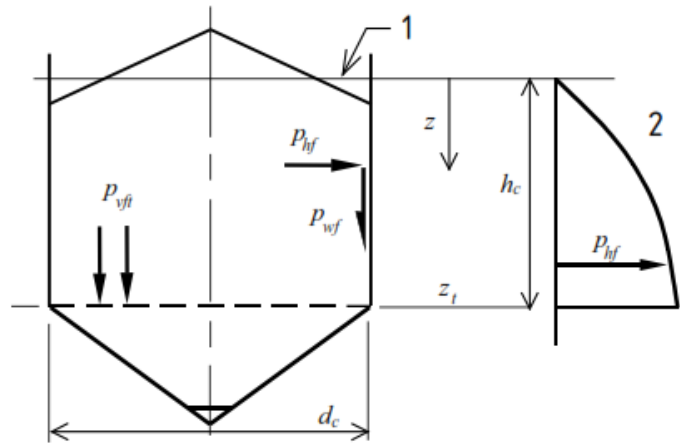
Factor de Referencia (Patch Load Solid):

$C_{op} := 0.5$

2. CALCULO DE CARGAS SOBRE LAS PAREDES DEL SILO (SECTION 5 EN1991-4:2006)



- 1 Equivalent surface
- 2 Inside dimension
- 3 Transition
- 4 Surface profile for full condition
- 5 Silo centre line



Key

- 1 Equivalent surface
- 2 Pressures in vertical segment

$d_c := 18\text{m}$

Diámetro Silo

$h_c := 23\text{m}$

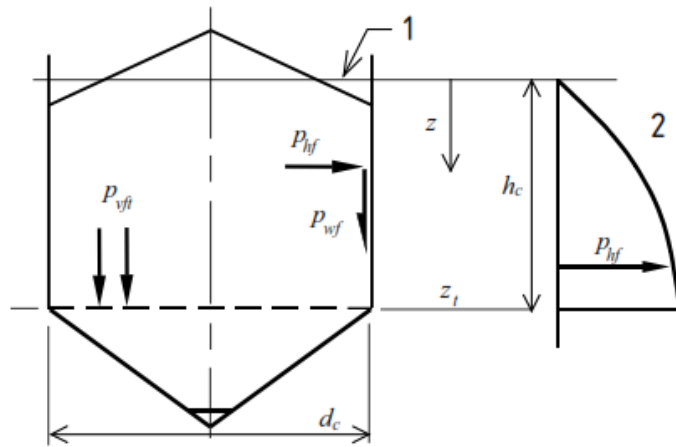
Altura Material Silo sobre la Zona de Transición

$\frac{h_c}{d_c} = 1$

Esbeltez Silo (Se considera **Silo Esbelto con fondo Aereado** 5.1 (3) EN1991-4:2006)

2.1 CARGAS DE LLENADO SOBRE LAS PAREDES DEL SILO (5.2.1 EN1991-4:2006)

2.1.1 SYMMETRICAL FILLING LOAD (5.2.1.1 EN1991-4:2006)



Key

- 1 Equivalent surface
- 2 Pressures in vertical segment

Discretización en altura desde la zona de zona de transición hasta el fondo de Llenado:

$n := 23$

$z_i := \begin{cases} \text{for } k \in 1..n \\ m_k \leftarrow \frac{h_c}{n} \cdot (k) \\ m \end{cases}$

	1
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12
13	13
14	14
15	15
16	...

número de divisiones en altura

$$A_{\text{silos}} := \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} = 254.47 \text{ m}^2$$

Área Sección Transversal Silo

$$U_{\text{silos}} := \pi \cdot d_c = 56.55 \text{ m}$$

Perímetro Sección Transversal Silo

CASO 1: MÁXIMA PRESIÓN SOBRE LAS PAREDES DEL SILO (μ_{low} , K_{up} , $\phi_{i_{\text{low}}}$)

$$z_{o_{\text{max_phf}}} := \frac{1}{K_{\text{up}} \cdot \mu_{\text{low}}} \cdot \frac{A_{\text{silos}}}{U_{\text{silos}}} = 14.57 \text{ m}$$

(Expres. (5.5) EN1991-4:2006)

$$P_{ho_{\text{max_phf}}} := \gamma_{\text{max}} \cdot K_{\text{up}} \cdot z_{o_{\text{max_phf}}} = 15.4 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

(Expres. (5.4) EN1991-4:2006)

$$Y_{j_{\text{max_phf}}} := 1 - e^{\frac{-z_i}{z_{o_{\text{max_phf}}}}}$$

(Expres. (5.6) EN1991-4:2006)

$$P_{hf_{\text{max}}} := P_{ho_{\text{max_phf}}} \cdot Y_{j_{\text{max_phf}}} = \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

Presión Máxima Sobre Muros Silo
(Expres. (5.1) EN1991-4:2006)

	1
1	1.02
2	1.98
3	2.87
4	3.7
5	4.47
6	5.2
7	5.88
8	6.51
9	7.1
10	7.65
11	8.16
12	8.64
13	9.09
14	9.51
15	9.9
16	...

$$P_{wf_{\text{max_phf}}} := \mu_{\text{low}} \cdot P_{ho_{\text{max_phf}}} \cdot Y_{j_{\text{max_phf}}} = \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

Tracción Fricción Sobre Muros Silo
(Expres. (5.2) EN1991-4:2006)

	1
1	0.49
2	0.94
3	1.37
4	1.76
5	2.13
6	2.48
7	2.8
8	3.1
9	3.38
10	3.65
11	3.89
12	4.12
13	4.33
14	4.53
15	4.72
16	...

$$n_{zSk_max_phf} := \mu_{low} \cdot P_{ho_max_phf} \cdot (z_i - z_{o_max_phf} \cdot Y_{j_max_phf}) =$$

	1
1	0.25
2	0.96
3	2.12
4	3.69
5	5.64
6	7.94
7	10.59
8	13.54
9	16.78
10	20.3
11	24.07
12	28.08
13	32.3
14	36.74
15	41.37
16	...

 $\frac{\text{tonf}}{\text{m}}$

Carga Normal por Unidad de Largo del Perímetro debido a la Fricción (Expres. (5.7) EN1991-4:2006)

$$P_{vft_max_phf} := \frac{P_{ho_max_phf}}{K_{up}} \cdot Y_{j_max_phf} =$$

	1
1	1.58
2	3.05
3	4.42
4	5.71
5	6.91
6	8.02
7	9.07
8	10.04
9	10.95
10	11.8
11	12.6
12	13.34
13	14.03
14	14.68
15	15.28
16	...

 $\frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$

Carga Máxima Vertical sobre la Tolva o Fondo Silo (Expres. (5.3) EN1991-4:2006)

CASO 2: MÁXIMA FRICCIÓN SOBRE LAS PAREDES DEL SILO (μ_{up} , K_{up} , ϕ_{i_low})

$$z_{o_max_pwf} := \frac{1}{K_{up} \cdot \mu_{up}} \cdot \frac{A_{silo}}{U_{silo}} = 12.73 \text{ m}$$

(Expres. (5.5) EN1991-4:2006)

$$P_{ho_max_pwf} := \gamma_{max} \cdot K_{up} \cdot z_{o_max_pwf} = 13.45 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

(Expres. (5.4) EN1991-4:2006)

$$Y_{j_max_pwf} := 1 - e^{\frac{-z_i}{z_{o_max_pwf}}}$$

(Expres. (5.6) EN1991-4:2006)

	1	
1	1.02	
2	1.96	
3	2.83	
4	3.63	
5	4.37	
6	5.06	
7	5.69	
$P_{hf_max_pwf} := P_{ho_max_pwf} \cdot Y_{j_max_pwf} =$	8	6.28
	9	6.82
	10	7.32
	11	7.79
	12	8.21
	13	8.61
	14	8.98
	15	9.31
	16	...

$\frac{tonf}{m^2}$

Presión Sobre Muros Silo
(Expres. (5.1) EN1991-4:2006)

	1	
1	0.55	
2	1.07	
3	1.54	
4	1.98	
5	2.39	
6	2.76	
7	3.11	
$P_{wf_max} := \mu_{up} \cdot P_{ho_max_pwf} \cdot Y_{j_max_pwf} =$	8	3.43
	9	3.72
	10	4
	11	4.25
	12	4.48
	13	4.7
	14	4.9
	15	5.08
	16	...

$\frac{tonf}{m^2}$

Tracción Máxima Fricción Sobre Muros Silo
(Expres. (5.2) EN1991-4:2006)

$$q_{zSk_max_pwf} := \mu_{up} \cdot P_{ho_max_pwf} \cdot (z_i - z_{o_max_pwf} \cdot Y_{j_max_pwf}) =$$

	1
1	0.28
2	1.1
3	2.4
4	4.17
5	6.35
6	8.93
7	11.86
8	15.13
9	18.71
10	22.57
11	26.69
12	31.06
13	35.65
14	40.45
15	45.44
16	...

 $\frac{\text{tonf}}{\text{m}}$

Carga Normal por Unidad de Largo del Perímetro debido a la Fricción (Expres. (5.7) EN1991-4:2006)

$$P_{vft_max_pwf} := \frac{P_{ho_max_pwf}}{K_{up}} \cdot Y_{j_max_pwf} =$$

	1
1	1.57
2	3.02
3	4.36
4	5.6
5	6.75
6	7.81
7	8.78
8	9.69
9	10.53
10	11.3
11	12.02
12	12.68
13	13.29
14	13.85
15	14.37
16	...

 $\frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$

Carga Vertical sobre la Tolva o Fondo Silo (Expres. (5.3) EN1991-4:2006)

CASO 3: MÁXIMA CARGA VERTICAL SOBRE EL FONDO DEL SILO (μ_{low} , K_{low} , Φ_{i_up})

$$z_{o_max_pvft} := \frac{1}{K_{low} \cdot \mu_{low}} \cdot \frac{A_{silo}}{U_{silo}} = 20.98 \text{ m}$$

(Expres. (5.5) EN1991-4:2006)

$$P_{ho_max_pvft} := \gamma_{max} \cdot K_{low} \cdot z_{o_max_pvft} = 15.4 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

(Expres. (5.4) EN1991-4:2006)

$$Y_{j_max_pvft} := 1 - e^{\frac{-z_i}{z_{o_max_pvft}}}$$

(Expres. (5.6) EN1991-4:2006)

$$P_{hf_max_pvft} := P_{ho_max_pvft} \cdot Y_{j_max_pvft} =$$

	1
1	0.72
2	1.4
3	2.05
4	2.67
5	3.27
6	3.83
7	4.37
8	4.88
9	5.37
10	5.84
11	6.29
12	6.71
13	7.11
14	7.5
15	7.87
16	...

$\frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$

Presión Sobre Muros Silo
(Expres. (5.1) EN1991-4:2006)

$$P_{wf_max_pvft} := \mu_{low} P_{ho_max_pvft} \cdot Y_{j_max_pvft} =$$

	1
1	0.34
2	0.67
3	0.98
4	1.27
5	1.56
6	1.83
7	2.08
8	2.33
9	2.56
10	2.78
11	3
12	3.2
13	3.39
14	3.57
15	3.75
16	...

$\frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$

$$n_{zSk_max_pvft} := \mu_{low} \cdot P_{ho_max_pvft} \cdot (z_i - z_{o_max_pvft} \cdot Y_{j_max_pvft}) =$$

	1
1	0.17
2	0.68
3	1.5
4	2.63
5	4.05
6	5.74
7	7.69
8	9.9
9	12.35
10	15.02
11	17.91
12	21.01
13	24.3
14	27.79
15	31.45
16	...

$\frac{\text{tonf}}{\text{m}}$

Carga Normal por Unidad de Largo del Perímetro debido a la Fricción (Expres. (5.7) EN1991-4:2006)

$$P_{vft_max} := \frac{P_{ho_max_pvft}}{K_{low}} \cdot Y_{j_max_pvft} =$$

	1
1	1.59
2	3.11
3	4.56
4	5.94
5	7.26
6	8.51
7	9.71
8	10.85
9	11.94
10	12.98
11	13.97
12	14.91
13	15.81
14	16.67
15	17.48
16	...

$\frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$

Carga Máxima Vertical sobre la Tolva o Fondo Silo (Expres. (5.3) EN1991-4:2006)

ANEXO B : CARGAS DEL CONTENIDO (SÍSMICO)

$h_b := 23\text{m}$	Altura del Silo con Material (Desde la zona de Transición a la Superficie Equivalente)	
$d_c := 18\text{m}$	Diámetro del Silo	
$\gamma_{\max} := 16 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 1.632 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$	Peso Específico del Material	
$P_{\text{cont}} := \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot h_b \cdot \gamma_{\max} = 9549.09 \cdot \text{tonf}$	Peso Contenido	
$P_{\text{sism}} := 0.8 \cdot P_{\text{cont}} = 7639.27 \cdot \text{tonf}$	Peso Sísmico (0.8 del peso efectivo)	
$M_{\text{sism}} := \frac{P_{\text{sism}}}{g} = 778.989 \cdot \frac{\text{tonf}}{\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$	Masa sísmica	

Asignando la masa sísmica del contenido en el centro de masa del Silo. Entonces obtenemos los períodos:

$T_x := 0.25\text{s}$	Período en la dirección x
$T_y := 0.27\text{s}$	Período en la dirección y

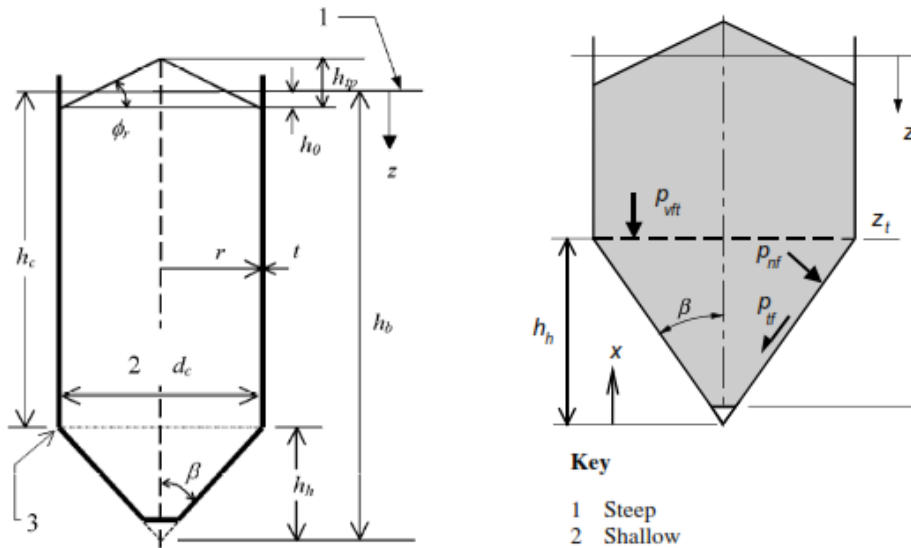
Se observa que ambos períodos se encuentran en el máximo coeficiente dado por el espectro de Pseudo-aceleraciones de diseño dado por la Norma NCh2369Of.2003. De esta forma, las cargas sísmicas por contenido obtenidas para cada nivel estan dadas por los siguientes valores.

$C_y := \frac{S_a(T_y)}{g} = 0.495$	Coeficiente Sísmico en y
-------------------------------------	--------------------------

Discretización Círculo:

$$n := 60$$

$\theta_i := \begin{cases} \text{for } k \in 1..n \\ m_k \leftarrow \frac{360\text{deg}}{n} \cdot (k) \\ m \end{cases}$	Ángulo entre la zona del muro analizada y la componente horizontal del sismo.
---	---



- 1 Equivalent surface
- 2 Inside dimension
- 3 Transition
- 4 Surface profile for full condition
- 5 Silo centre line

- Key**
- 1 Steep
 - 2 Shallow

CARGAS SÍSMICAS SOBRE LAS PAREDES DEL SILO (3.3 EN1998-4:2006)

$h_h := 23m$

Altura de análisis desde la losa de fondo (Superficie Equivalente)

$r_s := \min\left(h_b, \frac{d_c}{2}\right) = 9m$

$h_c := 23m$

Altura Material Silo sobre la Zona de Transición

Considerando un altura de análisis por sobre la cúspide del cono invertido de descarga $X=h_n$, entonces las cargas sísmicas por nivel son las siguientes:

$\Delta_{ph_so} := C_y \cdot 0.8 \gamma_{max} \cdot \min(r_s, 3 \cdot h_h) = 5.815 \cdot \frac{tonf}{m^2}$

$$\Delta_{ph_s_wall} := \Delta_{ph_so} \cdot \cos(\theta_i) =$$

	1
1	5.783
2	5.688
3	5.53
4	5.312
5	5.036
6	4.704
7	4.321
8	3.891
9	3.418
10	2.907
11	2.365
12	1.797
13	1.209
14	0.608
15	0
16	...

$\frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$ **Presión Normal Sísmica Paredes Silo por Nivel**

$$h_h := 1\text{m}$$

Altura de análisis desde la losa de fondo
(Fondo Silo)

Considerando un altura de análisis por sobre la cúspide del cono invertido de descarga $X=h_n$, entonces las cargas sísmicas por nivel son las siguientes:

$$\Delta_{ph_so} := C_y \cdot 0.8 \gamma_{\max} \cdot \min(r_s, 3 \cdot h_h) = 1.938 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta_{ph_s_wall} := \Delta_{ph_so} \cdot \cos(\theta_i) =$$

	1
1	1.928
2	1.896
3	1.843
4	1.771
5	1.679
6	1.568
7	1.44
8	1.297
9	1.139
10	0.969
11	0.788
12	0.599
13	0.403
14	0.203
15	0
16	...

$\frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$ **Presión Normal Sísmica Paredes Silo por Nivel**