



ESTUDIO COMPARATIVO DE CHIMENEAS INDUSTRIALES SEGÚN LA PROPUESTA DE ACTUALIZACIÓN DE LA NORMA CHILENA NCh 2369

Nicolás Briones M.¹ Minor Nozaki U.² Eduardo Nuñez C.³

RESUMEN:

El presente estudio consiste en la evaluación de la respuesta estructural de una chimenea industrial de acero, actualmente operativa en Celulosa Arauco, Complejo Horcones, comuna de Arauco. Se evalúa su comportamiento mediante la comparación de la Norma Chilena NCh2369.Of2003 y actualización propuesta en Anteproyecto del año 2018. Esto se realiza por medio de métodos lineales y no lineales incorporando la aplicación del registro sísmico del terremoto del Maule del año 2010, a través de software comercial. En base a los resultados obtenidos, la diferencia más relevante radica en la exigencia de la incorporación del viento normal en el Anteproyecto. Este, se define como un viento habitual que no puede ser despreciado en el evento sísmico y se diferencia del método analítico propuesto por la Norma Chilena NCh432 en que depende de una velocidad de viento promedio, considerando la velocidad básica del viento y una altura de referencia de 0.6H (m) de la chimenea. Dicha carga no es considerada en versiones anteriores de la norma sísmica, produciendo que las tensiones de compresión en el manto de chimeneas de acero, sobrepasen los valores admisibles en el caso de Anteproyecto de norma. En el caso de la versión actualmente vigente de NCh2369 en cambio, el viento normal no genera excedentes de tensión. De lo anterior, se debe tener especial consideración en las nuevas exigencias establecidas por Anteproyecto de NCh2369, pues pueden generar un diseño más conservador a lo que actualmente se realiza en la práctica de la Ingeniería Estructural nacional.

ABSTRACT:

The present study consists on the evaluation of the structural response of an industrial steel chimney, currently operating in Celulosa Arauco, Horcones Complex, Arauco commune. Its behavior is evaluated by comparing the Chilean Standard NCh2369.Of2003 and its update proposed in the 2018 draft. This is done through linear and non-linear methods incorporating the application of the seismic record of the Maule earthquake in 2010 on a commercial software. Based on the results obtained, the most relevant difference lies in the requirement of incorporating the normal wind in the draft. This is defined as a regular wind that cannot be undervalued in the seismic event and differs from the analytical method proposed by the Chilean Standard NCh432 that depends on an average wind speed, considering the basic wind speed and a reference height of 0.6H (m) on the chimney. This load is not considered in previous versions of the seismic norm, causing that compression stress in the mantle of steel chimneys to exceed the permissible values in the case of the Proposed Draft Standard. In the case of the current version of NCh2369 instead, the normal wind does not generate this levels of stress. Therefore, special consideration should be given to the new requirements established by the Draft of NCh2369, as they may generate a more conservative design than what is currently done in the practice of the national Structural Engineering.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, U. Católica de la Santísima Concepción, nbriones@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Macrosteeel - Soluciones Integrales de Ingeniería, Chacabuco 485, Concepción, minormozaki@gmail.com

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, U. Católica de la Santísima Concepción, enuñez@ucsc.cl

1 INTRODUCCIÓN

La propuesta de actualización de la Norma Chilena NCh2369 se aplica a estructuras e instalaciones industriales livianas o pesadas, tales como: sistemas de ductos y cañerías, a los equipos de proceso, mecánicos, eléctricos, de control e instrumentación y a sus anclajes. El campo de aplicación incluye las estructuras de bodegas y todos los recintos de vocación industrial. Actualmente, dicha norma se encuentra en proceso de discusión por el comité (Instituto de la Construcción, 2019) en el Instituto Nacional de Normalización (INN). Si bien, los requisitos necesarios para la evaluación de estructuras industriales tradicionales han sido estudiados previamente, no existen registros de análisis en el caso de chimeneas industriales, más aún en el diseño estructural propiamente tal.

La presente investigación aborda esta propuesta de actualización aplicada a chimeneas industriales de acero, considerando su aplicación a un proyecto real. Las chimeneas industriales se definen como conductos construidos para dar salida a la atmósfera a gases resultantes de una combustión o una reacción química debido a los procesos industriales. Corresponden a estructuras con una esbeltez mínima de 2 (H/D), cuyo comportamiento estructural se asemeja a una viga en cantiléver, es decir, con masa distribuida en toda su altura. Los esfuerzos que controlan su diseño son principalmente de flexión provocadas esencialmente por la acción de las cargas sísmicas y de viento.

El aporte de la investigación es conocer los cambios que interpone la actualización de la norma sísmica industrial y sus consecuencias en el diseño estructural nacional. Dichas consecuencias pueden afectar al cumplimiento de la estructura, debido a cambios más exigentes en las consideraciones de la norma. Se debe tener especial consideración en las nuevas exigencias establecidas por el Anteproyecto de NCh2369, pues pueden generar un diseño más conservador a lo que actualmente se realiza en la práctica de la Ingeniería Estructural nacional, con el uso de la Norma Chilena NCh2369.Of2003 para el diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.

Como objetivo general, se pretende evaluar el comportamiento sísmico de chimeneas industriales mediante la comparación de las Normas Chilenas NCh2369.Of2003 y Anteproyecto de NCh2369. El alcance de esta comparación contempla una revisión estructural de una Chimenea industrial ya existente de acero, por medio de métodos lineales y no lineales incorporando la aplicación del registro sísmico del terremoto del Maule del año 2010, a través de software comercial. No está en el alcance del presente estudio los efectos en uniones locales, estudios de soldaduras y vibraciones.

2 ANTECEDENTES

En 2018 se establece una investigación sobre la comparación de la normativa vigente y la propuesta de actualización, en donde se presenta el estudio de nueve chimeneas industriales de hormigón no existentes, sometidas a iguales condiciones locales y solicitaciones, variando las dimensiones en diámetro y altura.

La chimenea industrial del estudio de referencia (Categoría C2, según NCh2369.Of2003 y Anteproyecto) está ubicada en la comuna de Arauco, en la provincia de Concepción, Región del Biobío (zona sísmica III, $A_0 = 0.4g$). Su construcción fue realizada en el año 1989, es circular y compuesta en su totalidad de acero estructural (Figura 1a), incluyendo el manto soldado ($\xi = 0.02, R = 3$). El acero estructural del manto de la chimenea es calidad CSA G40.21 44W con corrosión admisible de 1.5 mm.

La chimenea industrial de 90 [m] de altura, se encuentra en funcionamiento y totalmente operativa para Celulosa Arauco, específicamente para la Caldera Recuperadora Línea 2, del área 252 del Complejo Horcones. Cuenta con una modificación estructural en su silla de anclaje producto del terremoto del año 2010 (Figura 1b), alrededor de los 16 pernos de 1'' y 0.68 m de longitud (calidad ASTM A36). Esta modificación estructural no se considera con el fin de modelar la estructura en su condición original. La ubicación de la Chimenea se encuentra en las coordenadas latitud $37^{\circ}12'26.75''S$, longitud $73^{\circ}13'38.41''O$ y puede ser visualizada mediante Google Earth.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Disposición general Chimenea industrial, (b) Modificación realizada a la silla de anclaje. Elaboración propia.

Las dimensiones del manto de la Chimenea están resumidas en la Tabla 1.



Tabla 1. Parametrización geométrica del manto de la chimenea en estudio.

Elemento	Alto [cm]	Diámetro [cm]	Espesor [mm]
Manto (0.48 m a 88 m)	8800	275	16
Manto (88 m a 90 m)	200	250	16

El estudio de suelos fue suministrado por Celulosa Arauco. En particular, el ensayo SPT indica que se tiene una arena fina saturada con N mayor que 20. Se correlaciona la velocidad de onda con la altura de estrato (Figura 2) en donde se obtiene un Vs30 igual a 273 [m/s] y un coeficiente de balasto Ks igual a 10.96 [kg/cm³], lo que corresponde a un suelo de Tipo III (T'[s]= 0.62, n=1.8) según el Anteproyecto de NCh 2369.

EXPLORACION DEL SUBSUELO										
SONDAJE No: 8		ARAUCO II		FECHA DE EJECUCION: 2-11 / 9-11						
Prof. (m)	Espesor (m)	Descripción del suelo	MN	M	Profundidad de (m)		N ₁	N ₂	N ₃	N
0.20	0.20	Capa vegetal.								
3.70	3.50	Arena fina, limpia, uniforme, granos cuarzosos. Humedad baja. Color gris café claro.	1	CN	1.08	1.53	3	6	8	14
			2	CN	2.14	2.59	4	7	8	15
			3	CN	3.20	3.65	5	7	9	16
14.90	11.20	Arena fina hasta con 20 % de arena media, limpia. Uniforme. Abundante partículas cuarzosas. Saturada. Color gris.	4	CN	4.23	4.68	5	10	15	25
			5	CN	5.18	5.63	6	11	17	28
			6	CN	6.26	6.71	8	12	17	29
			7	CN	7.16	7.61	14	26	31	57 x
			8	CN	8.19	8.64	12	21	26	47
			S/M	CN	9.37	9.82	10	18	22	40
			9	CN	10.34	10.79	12	14	23	37
			10	CN	11.21	11.66	8	18	21	39
			11	CN	12.23	12.68	16	31	39	70
			12	CN	13.19	13.64	8	12	13	25
20.30	5.40	Arena fina algo limosa. Conchuelas. Uniforme. Saturada. Color plomizo.	13	CN	14.22	14.67	5	20	32	52
			14	CN	15.21	15.66	10	26	38	64
			15	CN	16.15	16.60	3	7	23	30
			16	CN	17.19	17.64	11	16	29	45
			17	CN	18.22	18.67	5	9	12	21
S/M	CN	19.18	19.63	8	10	15	25			
21.50	1.20	Arena limosa de grano fino a medio, mal graduada. No plástica. Compacta. Saturada. Vetas de limo arenoso, conchuelas. Color gris verde oscuro.	18	CN	20.19	20.64	11	14	17	31
			S/M	CN	21.17	21.62	3	5	5	10
26.00	4.50	Limo arenoso de baja compresibilidad. Plasticidad baja. Conchuelas aisladas, vetas de arena fina muy limosas. Color gris verde oscuro.	19	SH	22.41	22.81				
			20	CN	22.35	23.80	4	5	6	11
			21	CN	24.33	24.78	3	4	5	9
			22	SH	25.33	25.73				

Figura 2. Exploración del subsuelo con ensayo SPT, suministrado por Celulosa Arauco.

La NCh2369.Of2003 y el anteproyecto de la norma, calculan de la misma forma el espectro de diseño para el análisis modal espectral, mediante la siguiente ecuación:

$$S_a = \frac{2.75 * A_o * I}{R} * \left(\frac{T'}{T}\right)^n * \left(\frac{0.05}{\xi}\right)^{0.04}$$

En que T es igual al periodo de vibración del modo considerado. No obstante, el valor de Sa no debe ser mayor que I * C_{máx} * g, en que C_{máx} se determina de la tabla 5.7 de la norma vigente y de la fórmula 5-12 del anteproyecto (se pide ver la cláusula C.5.3.3).

3 MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático es un elemento tridimensional que está configurado a través de elementos tipo Shell (Figura 3), formulados con tres o cuatro nodos y en cada uno se obtienen seis grados de libertad con deformación (tres traslaciones U_1 , U_2 y U_3 y tres rotaciones R_1 , R_2 y R_3). Además, dicho modelo es estable de forma independiente ante cargas perpendiculares y en el plano del elemento. Los elementos tipo Shell se utilizan principalmente para modelar, analizar y diseñar losas, muros o placas sometidas a flexión, corte y fuerza axial.

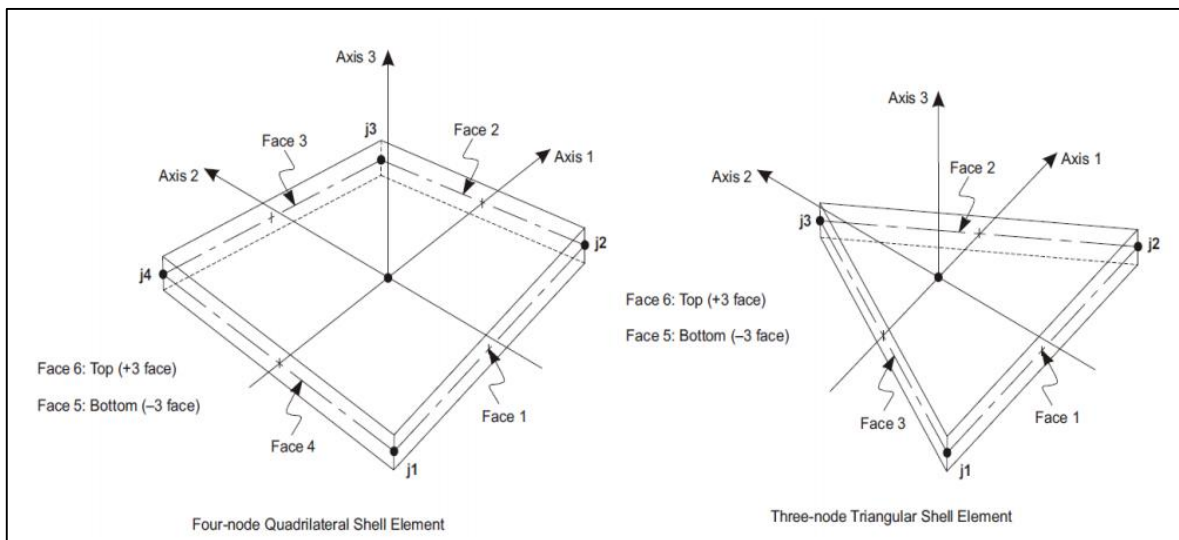


Figura 3: Modelo Shell. (Fuente: Manual CSI América, 2016).

4 METODOLOGÍA

La investigación considera lo estipulado en el capítulo 12.1 del Anteproyecto de la norma, además de lo considerado en el capítulo 5.4 y 5.8.1, que establece un análisis lineal dinámico modal espectral.

El análisis espectral se basa en la preparación de espectros que contemplen la no linealidad de la respuesta estructural, considerando los valores máximos de los factores sísmicos en el lugar y el tipo de suelo. De forma complementaria, se genera un análisis no lineal dinámico tiempo-historia según el capítulo 5.8.2. El análisis de respuesta en el tiempo se basa en un análisis paso a paso de la respuesta estructural para un mínimo de 3 registros históricos o sintéticos.

Se ingresa el registro sísmico correspondiente al terremoto del Maule del 27 de febrero del año 2010 (RENADIC, 2010), para una estación ubicada en Concepción, cuyo registro de aceleraciones de duración 141.7 segundos, se muestra en la Figura 4 y el resumen por dirección en la Tabla 2.

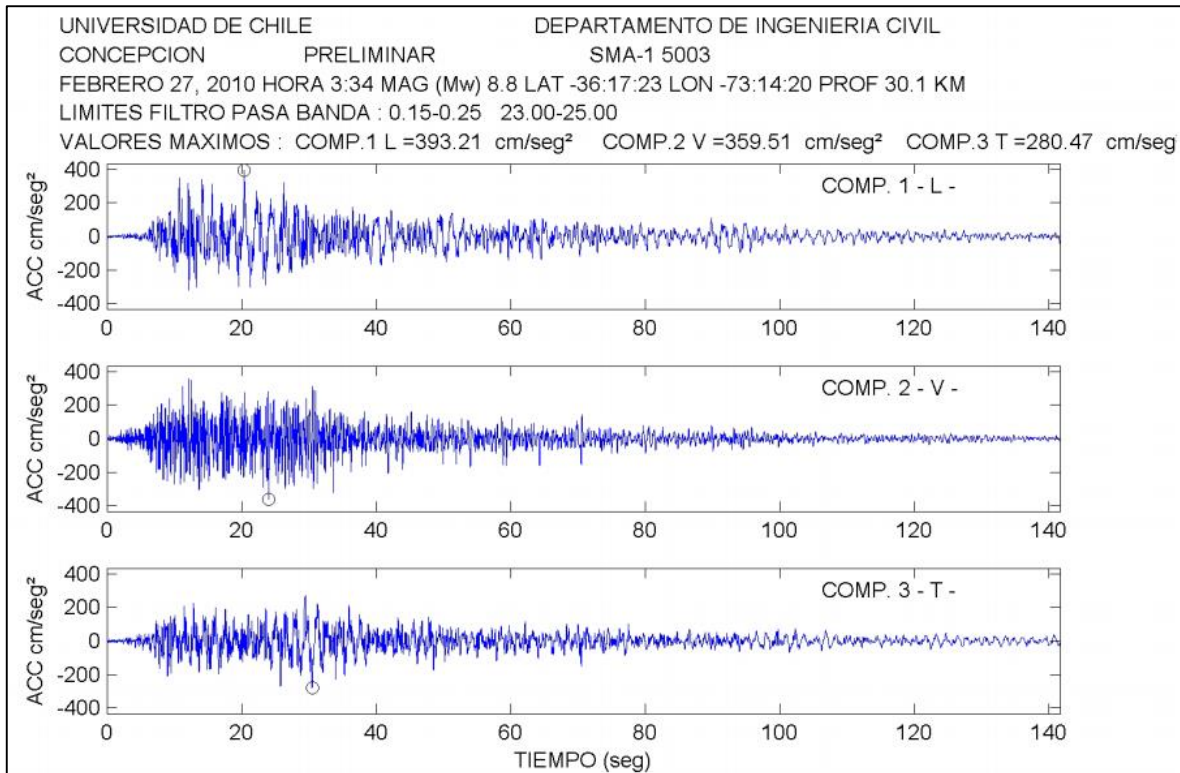


Figura 4. Registro de aceleraciones utilizado para el análisis Tiempo-Historia. (RENADIC, 2010).

Tabla 2. Resumen por dirección del registro de aceleraciones.

Dirección	Peak Aceleración	Instante de Tiempo
Este-Oeste	PGA=0.4g (393.2 cm/s ²)	20.4 [s]
Norte-Sur	PGA=0.4g (359.51 cm/s ²)	24 [s]
Vertical	PGA=0.29g (280.47 cm/s ²)	30.51 [s]

El modelo numérico de la chimenea industrial es creado en el Software comercial SAP 2000 versión 20, para los cuales se utilizaron los mismos criterios de análisis, materialidad y cargas.

La modelación planteada de elementos finitos contempla tres casos distintos. El primero considera las disposiciones de la norma vigente, el segundo contempla las disposiciones del anteproyecto de la norma y el tercero establece el registro de aceleraciones del terremoto del 2010, con la finalidad de comparar tensiones, deformaciones y corte basal, en función del comportamiento estructural obtenido por el modelo computacional.

En cuanto a la geometría de los modelos se modela el manto y la silla de anclaje, en sus condiciones reales. Los elementos de la silla de anclaje en primera instancia son reemplazados por condiciones de apoyo, considerando los 16 pernos de 1". Luego, en el modelo se incorpora la silla de anclaje para revisar si los resultados son consistentes.



En los modelos se considera no linealidad. Para ello, se hará uso de *Springs* debido a que es necesario considerar el efecto de la interacción estructura-fundación según Anteproyecto de norma. Estos se aplican a compresión en la base de la silla de anclaje, considerando el coeficiente de balasto del hormigón en la cara *Bottom* de la placa.

En el modelo tiempo-historia se considera la no linealidad del material. Los pernos de anclaje se modelan por medio de dos elementos tipo *Link* dispuestos en paralelo. El primero es del tipo *Multilinear Plastic* y representa a los pernos de anclaje que trabajan sólo a tracción y el segundo es del tipo *Gap*, que representa al pedestal trabajando a compresión. Los elementos tipo *Link* definen su respuesta por medio de una curva fuerza – deformación envolvente y una ley de degradación histerética, la que permite incorporar la degradación de resistencia y rigidez a medida que el elemento incursiona en ciclos de carga y descarga. Se escoge un modelo de histéresis cinemático, característico para elementos de acero, que viene implementado en SAP 2000 para elementos tipo *Link*.

Según Anteproyecto de norma, las combinaciones de carga sísmicas deberán incorporar la carga de viento normal, cuyo perfil de distribución de velocidades se define por la siguiente expresión:

$$V_{n(z)} = V_{p(z_{ref})} \left[\frac{z}{z_{(z_{ref})}} \right]^{0,2} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_{p(z_{ref})} = 0,2V \left(\frac{z_{ref}}{10} \right)^{0,2} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$q_{nb} = \frac{V^2}{16} \left[\frac{kg}{m^2} \right]$$

Donde,

$V_n(z)$: Velocidad del viento normal a lo largo de la Chimenea.

$V_p(0,6H)$: Velocidad del viento promedio anual a la altura de referencia.

$Z_{ref} = 0.6H$: Con H la altura total de la Chimenea en (m).

V (m/s) : Velocidad básica de acuerdo a la tabla 6 norma NCh432-2010.

q_{nb} (kg/m²) : Carga normal básica producida por el perfil de velocidades de viento.

Para obtener la máxima deformación producto de cargas sísmicas considerando la norma NCh2369.Of2003, su valor debe amplificarse por R . El Anteproyecto de norma establece que para periodos superiores o iguales a 2 segundos, la demanda establecida por el espectro de la norma NCh2369 se considera sub valorada, particularmente para el suelo tipo III. Para subsanar este punto, se ha propuesto utilizar el espectro establecido de la norma NCh2745 (Figura 5), calibrada para periodos largos. En este último caso, se ha propuesto un coeficiente de importancia $I = 1$, en atención a que los modos superiores de vibrar quedarán sobre

dimensionados con la norma NCh2745 (calibrada para periodos largos), y por lo tanto no se requiere un incremento adicional en la demanda sísmica asociada.

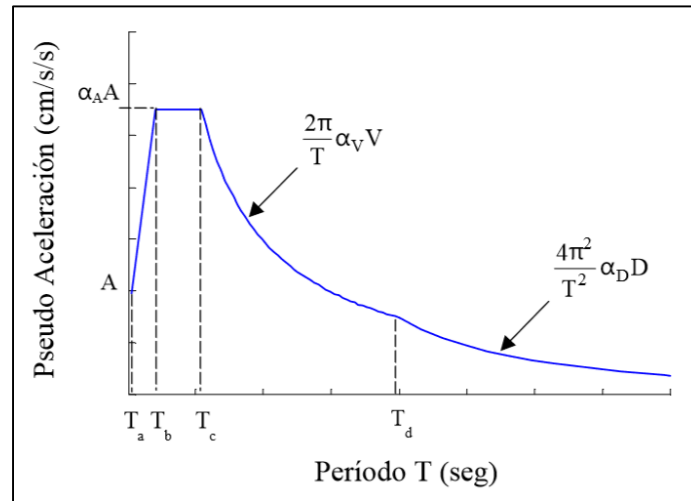


Figura 5. Definición del espectro de diseño de pseudo-aceleración. (NCh2745-2013).

Los resultados obtenidos mediante cada modelo se comparan verificando la tensión de compresión, deformaciones y corte basal mínimo, con el fin de estudiar la variación de resultados entre la NCh2369.Of2003 y el Anteproyecto de norma.

Los capítulos expuestos en las normas para la verificación de la tensión de compresión, deformaciones y corte basal mínimo se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de los capítulos expuestos en las normas para la verificación.

Verificación	NCh2369.Of2003	Anteproyecto
Tensión de Compresión	Capítulo 11.7	Capítulo 12.1.11
Deformaciones	Capítulo 6.3	Capítulo 12.1.8
Corte Basal Mínimo	Capítulo 5.4.5	Capítulo 5.4.5

5 RESULTADOS

En este capítulo se exponen las tensiones en compresión producidas para la combinación de carga que genera la mayor deformación en el manto de la chimenea, comparando con los valores admisibles impuestos en las normativas.

Se exponen los desplazamientos provocados por la acción sísmica y se realiza una comparación de los resultados con modelos Frame, utilizando la misma metodología. Para los desplazamientos admisibles máximos según NCh2369Of.2003 sus valores se amplifican por R y para el Anteproyecto de norma se utiliza el espectro elástico de la NCh2745 calibrada para periodos largos.

Se exponen los cortes basales mínimos de cada modelo para verificar su cumplimiento.



En la Tabla 4, se muestra un resumen de la totalidad de modelos considerados para la chimenea en estudio.

Tabla 4. Resumen de todos los modelos de la chimenea en estudio.

Modelo	Modelo Tipo	Análisis Tipo	Anclaje	Norma
1a	Shell	Modal Espectral	Con Silla	NCh2369.Of2003
1b	Shell	Modal Espectral	Articulado	NCh2369.Of2003
2a	Shell	Modal Espectral	Con Silla	Anteproyecto
2b	Shell	Modal Espectral	Articulado	Anteproyecto
3a	Shell	Estático	Con Silla	Anteproyecto
3b	Shell	Estático	Articulado	Anteproyecto
4a	Shell	Tiempo-Historia	Con Silla	Anteproyecto
4b	Shell	Tiempo-Historia	Articulado	Anteproyecto
5	Frame	Modal Espectral	Articulado	NCh2369.Of2003
6	Frame	Modal Espectral	Articulado	Anteproyecto
7	Frame	Estático	Articulado	Anteproyecto

La combinación de carga que genera la mayor tensión en compresión en el manto de la chimenea, utilizando la NCh2369.Of2003 es llamada *Comb1* y utilizando Anteproyecto de norma es llamada *Comb2*. Las combinaciones se definen como:

$$Comb1 = D + Eh + 0.3Ev$$

$$Comb2 = D + Eh + 0.3Ev + Vn + T$$

Donde,

- D : Carga Muerta.
- Eh : Carga Sísmica Horizontal.
- Ev : Carga Sísmica Vertical.
- Vn : Carga de Viento Normal.
- T : Carga de Temperatura.

5.1 TENSION DE COMPRESIÓN

Para la evaluación de la tensión de compresión en el manto de la estructura se consideran los esfuerzos internos de los elementos tipo Shell, donde la tensión del manto en compresión no debe exceder el valor admisible siguiente para la NCh2369.Of2003 y el Anteproyecto de norma:

$$\sigma_{adm} = 135 * F_y * \frac{e}{D}$$

Donde e corresponde al espesor de la plancha de acero del manto y D al diámetro de la chimenea, obteniendo el siguiente resultado:

$$\sigma_{adm} = 135 * 3093.5 * \frac{1.6}{275} = 2429.8 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

A continuación, se presenta la Figura 5.1.1 con el resultado de la tensión de compresión en el manto de la chimenea para el modelo 1a y en la Figura 5.1.2 para el modelo 1b:

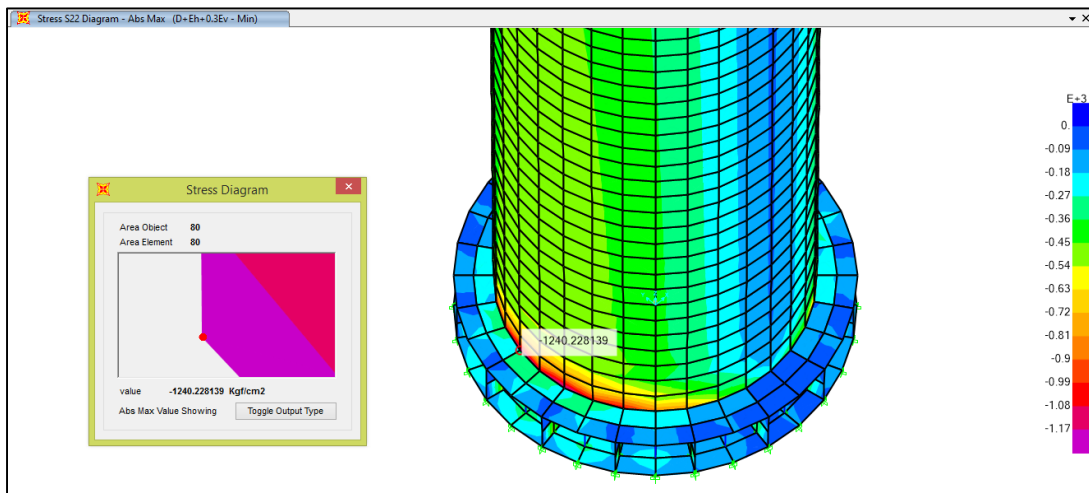


Figura 5.1.1. Tensión de compresión S22 en [kgf/cm²], para la comb1 del modelo 1a.



Figura 5.1.2. Tensión de compresión S22 en [kgf/cm²], para la comb1 del modelo 1b.

Por lo tanto, el análisis cumple los requisitos de resistencia impuestos para el modelo 1a, obteniendo un valor de S22=1240.23 [kgf/cm²] y para el modelo 1b un valor de S22=565.09 [kgf/cm²].

A continuación, se presenta la Figura 5.1.3 con el resultado de la tensión de compresión en el manto de la chimenea para el modelo 2a y en la Figura 5.1.4 para el modelo 2b:

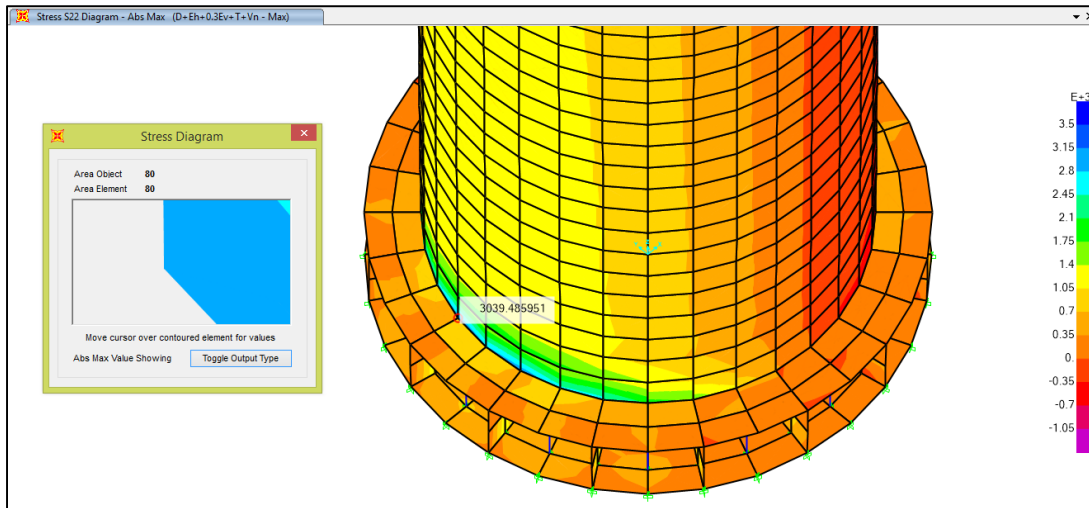


Figura 5.1.3. Tensión de compresión S_{22} en [kgf/cm²], para la comb2 del modelo 2a.

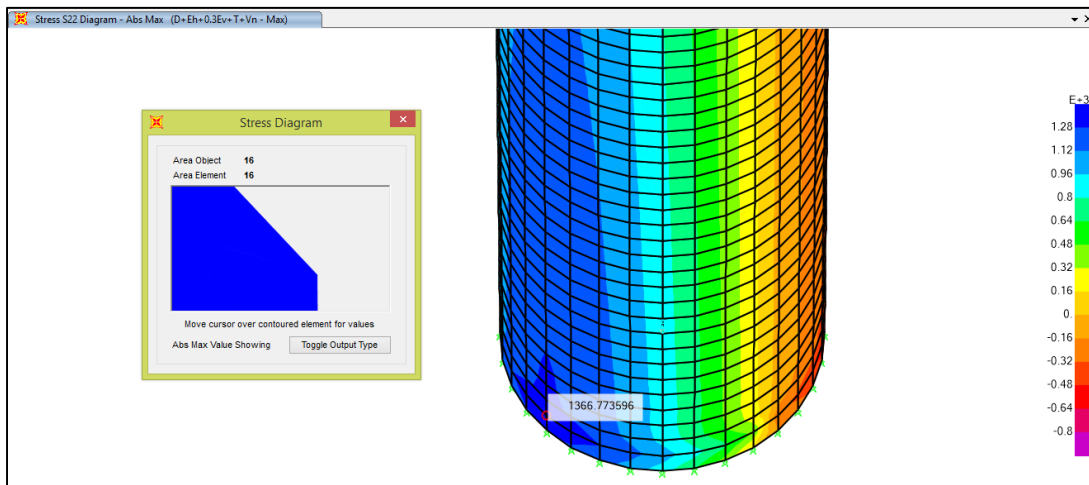


Figura 5.1.4. Tensión de compresión S_{22} en [kgf/cm²], para la comb2 del modelo 2b.

Por lo tanto, el análisis no cumple los requisitos de resistencia impuestos para el modelo 2a, obteniendo un valor de $S_{22}=3039.5$ [kgf/cm²] y para el modelo 2b si cumple, obteniendo un valor de $S_{22}=1366.8$ [kgf/cm²].

A continuación, se presenta la Figura 5.1.5 con el resultado de la tensión de compresión en el manto de la chimenea para el modelo 4a y en la Figura 5.1.6 para el modelo 4b:

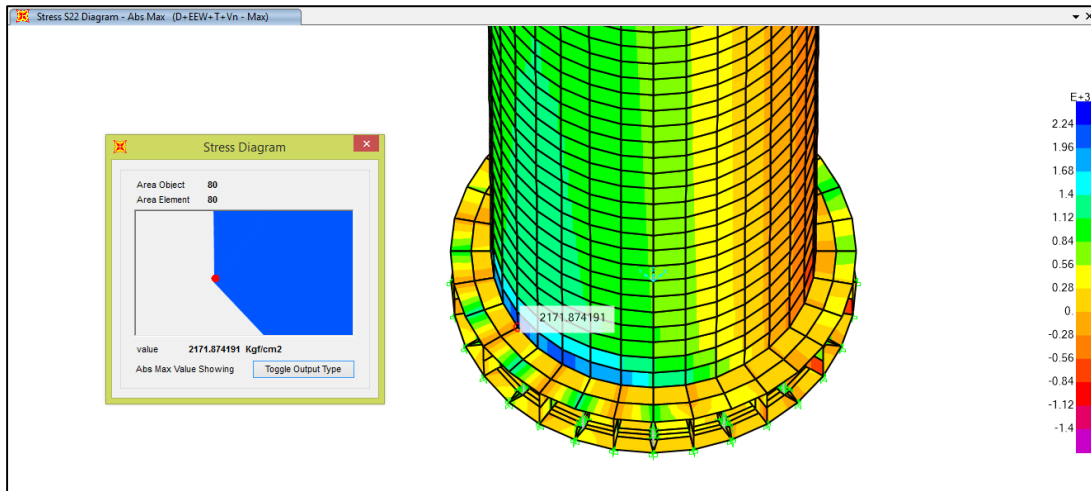


Figura 5.1.5. Tensión de compresión S22 en [kgf/cm²], para la comb2 del modelo 4a.

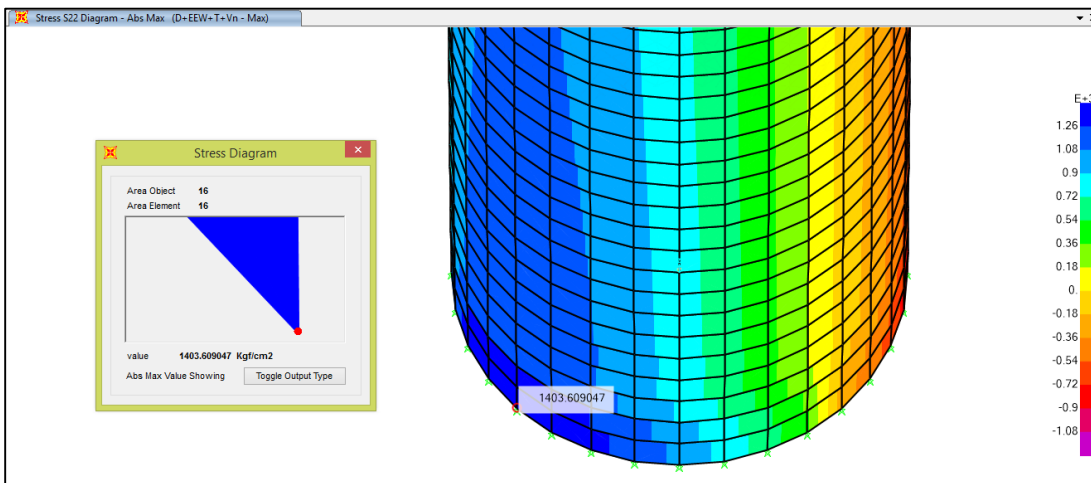


Figura 5.1.6. Tensión de compresión S22 en [kgf/cm²], para la comb2 del modelo 4b.

Por lo tanto, el análisis cumple los requisitos de resistencia impuestos para el modelo 4a, obteniendo un valor de S22=2171.9 [kgf/cm²] y para el modelo 4b un valor de S22=1403.6 [kgf/cm²].

A continuación, se presenta la Tabla 5 con el resumen de las tensiones en compresión S22 para los modelos Shell:

Tabla 5. Resumen tensiones de compresión de los modelos Shell en [kgf/cm²].

Modelo	S22	Estado	Modelo	S22	Estado
1a	1240.23	Cumple	1b	565.09	Cumple
2a	3095.49	No Cumple	2b	1366.77	Cumple
3a	3469.90	No Cumple	3b	1516.72	Cumple
4a	2171.87	Cumple	4b	1403.61	Cumple



Por lo tanto, se observa en la Tabla 5 como los modelos 1a, 1b, 4a y 4b cumplen con la tensión de compresión admisible en el manto de la chimenea industrial y como los modelos 2a, 2b, 3a y 3b no cumplen.

A continuación, se presenta la Tabla 6 con el porcentaje de colaboración de las cargas que producen mayor tensión de compresión, el sismo horizontal y el viento normal en las combinaciones de carga para los modelos Shell:

Tabla 6. Porcentaje [%] de colaboración de las cargas que producen mayor tensión de compresión, en combinaciones de carga para modelos Shell.

Modelo	Sismo Horizontal	Viento Normal	Total
1a	0.84 %	0 %	0.84 %
1b	0.82 %	0 %	0.82 %
2a	0.31 %	0.64 %	0.94 %
2b	0.29 %	0.60 %	0.89 %
3a	0.39 %	0.57 %	0.96 %
3b	0.37 %	0.55 %	0.91 %
4a	0.28 %	0.71 %	0.99 %
4b	0.25 %	0.66 %	0.91 %

Se observa en la Tabla 6 como la colaboración de la acción sísmica horizontal para la mayor tensión de compresión, es menor a la colaboración de la acción del viento normal. Además, obteniendo un promedio de todos los modelos, excepto los modelos 1a y 1b, se tiene que el aporte del sismo horizontal es de un 30% y en cambio el aporte del viento normal es de un 60% para la combinación de carga. Para los modelos 1a y 1b, debido a que la norma NCh2369.Of2003 no considera la acción del viento normal en sus combinaciones sísmicas, se tiene solamente el aporte del sismo horizontal.

5.2 DEFORMACIONES

La máxima deformación sísmica considerada en estructuras industriales de acero de acuerdo a la norma NCh2369.Of2003 y el Anteproyecto de norma es:

$$d^{m\acute{a}x} = d_{adm} = 0.015 * h = 135 [cm]$$

Donde,

h: Altura del piso o entre dos puntos ubicados sobre una misma vertical.

Para el Anteproyecto de norma la máxima deformación admisible debe ser menor a la deformación aceptada por el revestimiento dada por el fabricante.

A continuación, se presenta la Figura 5.1.7 con el resultado de la deformación para el modelo 2a y en la Figura 5.1.8 para el modelo 4a:

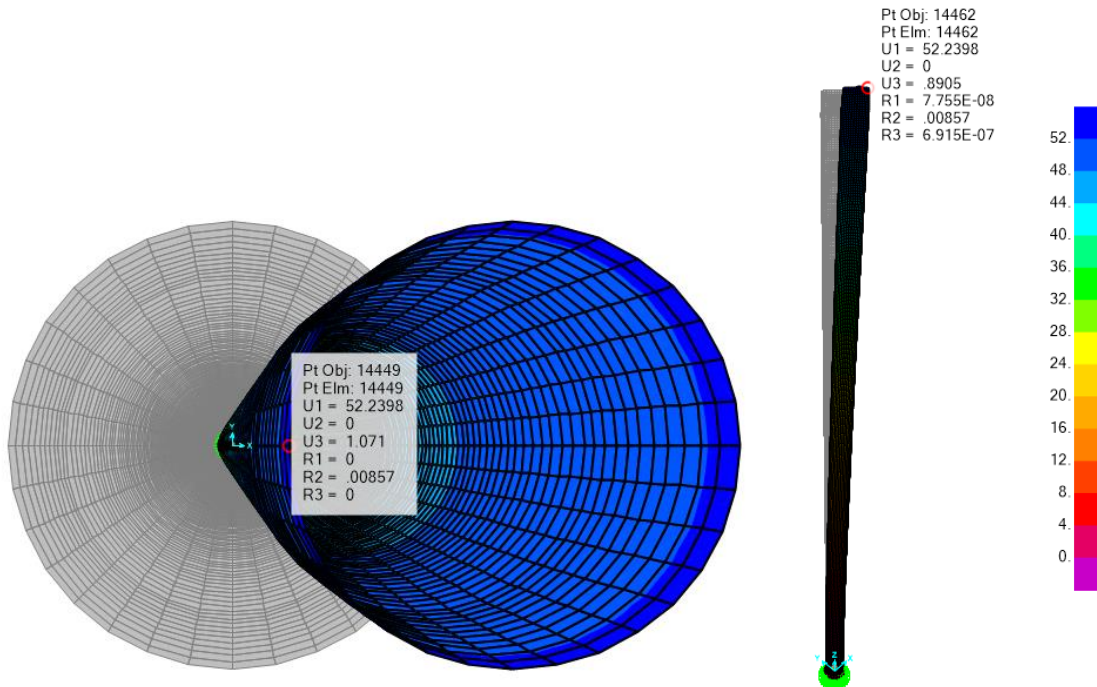


Figura 5.1.7. Deformación de la chimenea industrial debido a la acción sísmica [cm] del modelo 2a.

Por lo tanto, la acción sísmica aplicada al modelo 2a, sufre un desplazamiento menor a la máxima deformación considerada en chimeneas industriales de acuerdo al Anteproyecto de la norma.

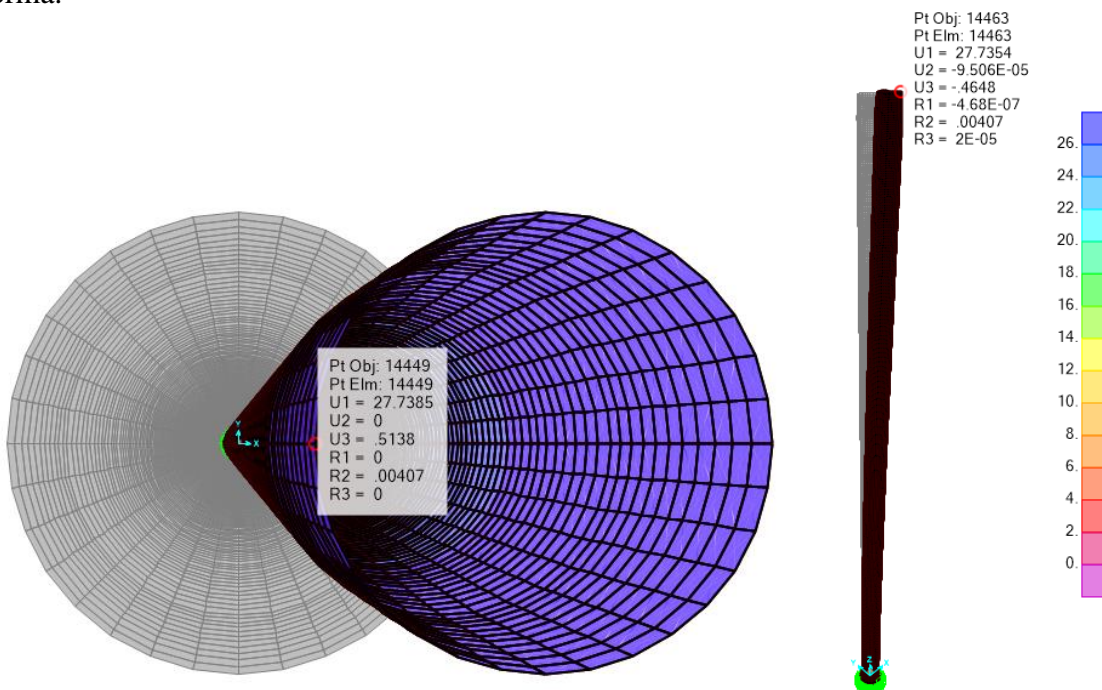


Figura 5.1.8. Deformación de la chimenea industrial debido a la acción sísmica [cm] del modelo 4a.

Por lo tanto, la acción sísmica aplicada al modelo 4a, sufre un desplazamiento menor a la máxima deformación considerada en chimeneas industriales de acuerdo al Anteproyecto de la norma.

A continuación, se presenta la Tabla 7 con el resumen de las deformaciones debido a la acción sísmica [cm] para los modelos Shell:

Tabla 7. Resumen deformaciones en [cm] por la acción sísmica de los modelos Shell.

Modelo	Deformación	Estado	Modelo	Deformación	Estado
1a	109.58	Cumple	1b	102.37	Cumple
2a	52.24	Cumple	2b	52.06	Cumple
3a	52.98	Cumple	3b	49.21	Cumple
4a	27.74	Cumple	4b	26.55	Cumple

Por lo tanto, se observa en la Tabla 7 como todos los modelos, tanto con silla y sin silla de anclaje, cumplen con la deformación admisible impuesto en las normas por acción sísmica.

Para corroborar los resultados de las deformaciones producidas en los modelos Shell, se compara con un modelo más simple, un modelo Frame articulado (Figura 5.1.9) que representa a la chimenea industrial de 90 [m] con las mismas características de diseño.

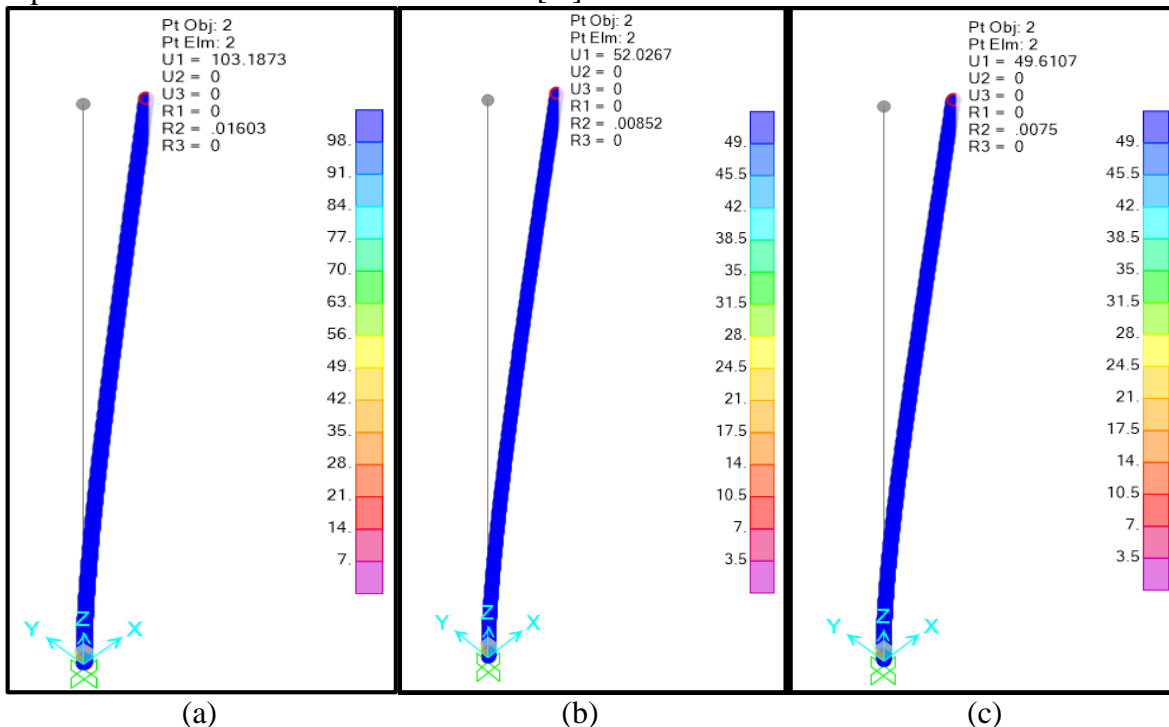


Figura 5.1.9. (a) Deformación de la chimenea industrial debido a la acción sísmica [cm] del modelo 5, (b) Deformación de la chimenea industrial debido a la acción sísmica [cm] del modelo 6, (c) Deformación de la chimenea industrial debido a la acción sísmica [cm] del modelo 7.



Por lo tanto, la acción sísmica aplicada a los modelos 5, 6 y 7, sufren desplazamientos menores a la máxima deformación considerada en chimeneas industriales de acuerdo a ambas normas.

A continuación, se presenta la Tabla 8 con el resumen de las deformaciones debido a la acción sísmica [cm] para los modelos Frame:

Tabla 8. Resumen deformaciones en [cm] por la acción sísmica de los modelos Frame.

Modelo	Deformación	Estado
5	103.19	Cumple
6	52.03	Cumple
7	49.61	Cumple

Por lo tanto, se observa en la Tabla 8 como todos los modelos Frame, cumplen con la deformación admisible impuesto en las normas por acción sísmica.

5.3 CORTE BASAL MÍNIMO

El esfuerzo de corte basal Q_0 , debe cumplir con el valor de corte basal mínimo Q_{min} impuesto en la NCh2369.Of2003 y Anteproyecto, que corresponde a la expresión siguiente para ambas normativas:

$$Q_{min} = 0.25 * I * \frac{A_0}{g} * P$$

A continuación, se presenta la Tabla 9 con el resumen del corte basal mínimo debido a la acción sísmica [kgf] para los modelos Shell:

Tabla 9. Resumen corte basal mínimo en [kgf] por la acción sísmica, modelos Shell.

Modelo	Corte Basal	Estado	Modelo	Corte Basal	Estado
1a	11395.92	Cumple	1b	9964.35	Cumple
2a	11329.86	Cumple	2b	9912.53	Cumple
3a	9875.72	Cumple	3b	9728.81	Cumple
4a	7342.25	Cumple	4b	5985.94	Cumple

A continuación, se presenta la Tabla 10 con el resumen del corte basal mínimo debido a la acción sísmica [kgf] para los modelos Frame:

Tabla 10. Resumen corte basal mínimo en [kgf] por la acción sísmica, modelos Frame.

Modelo	Corte Basal	Estado
5	10001.83	Cumple
6	9977.33	Cumple
7	9697.17	Cumple

Por lo tanto, se observa en la Tabla 9 y 10 que todos los modelos Shell y Frame, cumplen con el corte basal mínimo impuesto en las normas.

6 COMPARACIÓN

La Figura 6.1 muestra la tensión de compresión para los modelos Shell. Indica que para los modelos con silla de anclaje, la tensión es mayor que en los modelos sin silla de anclaje. Además, se puede apreciar que el modelo estático (Modelo 3), resulta ser más conservador que los demás modelos. Los modelos 1 y 2 presentan variación en sus resultados debido a que el modelo 1 no considera la acción del viento normal en la Comb1. El modelo 1 y 4 cumplen con los valores admisibles, mientras que los modelos 2 y 3 no cumplen con la tensión de compresión admisible en el manto de la chimenea industrial.

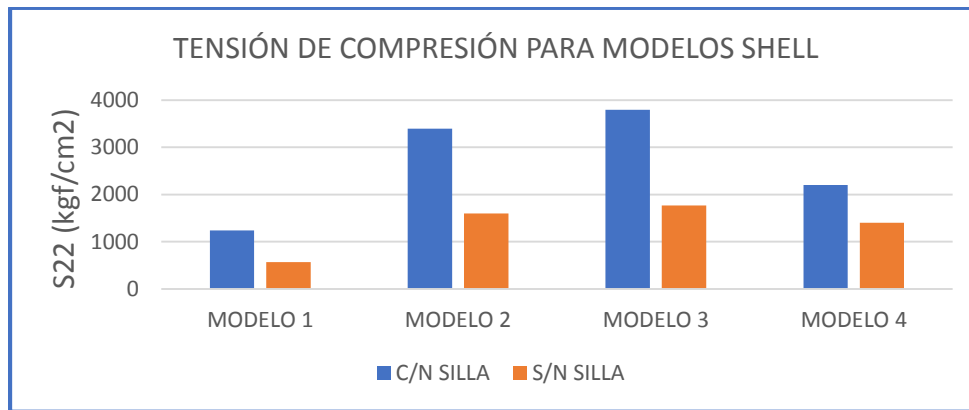
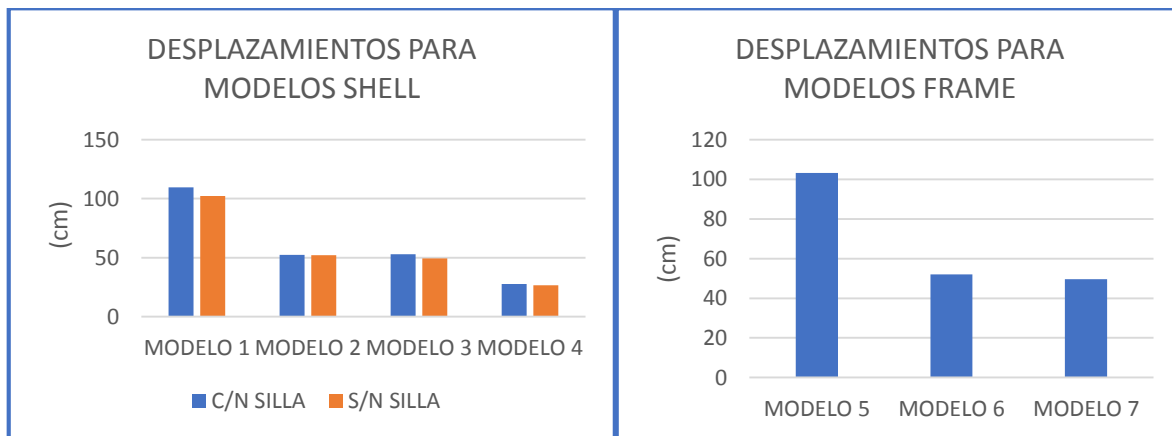


Figura 6.1. Comparación de tensiones de compresión para modelos Shell.

La Figura 6.2 muestra los desplazamientos efectuados en los modelos por la acción sísmica. Indica que todos los modelos cumplen con los valores admisibles impuestos en las normas. Se puede apreciar que se presenta una gran variación en los resultados de desplazamiento entre la normativa vigente al amplificar por R y el anteproyecto de norma al utilizar el espectro elástico de la NCh2745. Se presenta una pequeña variación entre los modelos con silla y sin silla de anclaje. Además, se observa como los modelos Frame, que son más fáciles de interpretar, muestran un resultado muy similar a los modelos Shell, comparando el modelo 1 con el modelo 5 (modelos dinámicos), el modelo 2 con el modelo 6 (modelos dinámicos) y el modelo 3 con el modelo 7 (modelos estáticos).



(a)

(b)

Figura 6.2. (a) Comparación de desplazamientos para modelos Shell, (b) Comparación de desplazamientos para modelos Frame.

La Figura 6.3 (a) muestra los cortes basales mínimos de los modelos Shell y (b) de los modelos Frame. Indica la gran similitud en los resultados de los modelos Frame y Shell. Además, se aprecia como el corte basal no se ve en mayor parte afectado por la variación entre un modelo con silla de anclaje y uno con apoyos simples. Se observa como el modelo tiempo-historia tiene un corte basal más bajo, debido al terremoto del 2010.

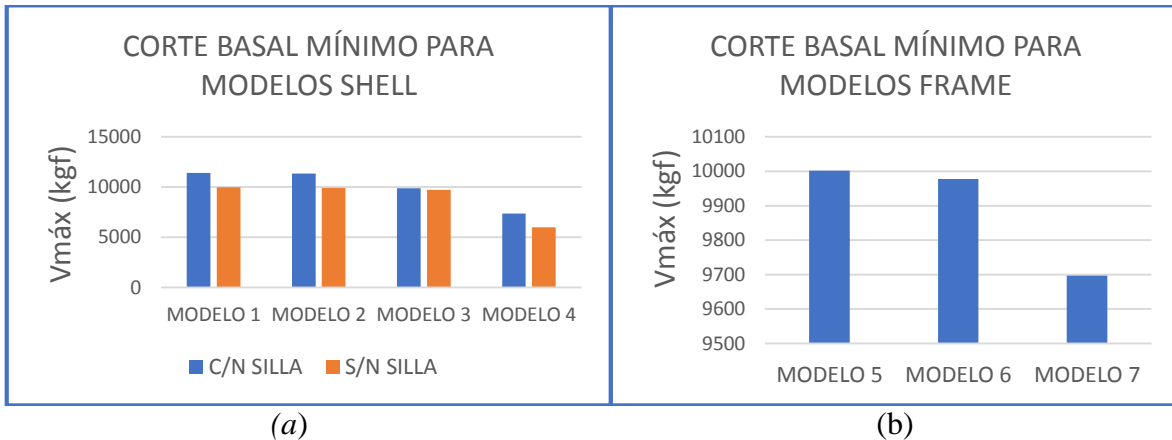


Figura 6.3. (a) Comparación de corte basal mínimo de modelos Shell, (b) Comparación de corte basal mínimo de modelos Frame.

La Figura 6.4 muestra como el cortante mínimo debido a la acción sísmica, produce los desplazamientos en los modelos Shell y la Figura 6.5 muestra como el cortante mínimo debido a la acción sísmica, produce los desplazamientos en los modelos Frame. Se aprecia como los modelos 2 y 3 tienen desplazamientos similares debidos al cortante sísmico y al uso del Anteproyecto de norma. Además, se logra apreciar como el modelo 1 produce más desplazamiento producto del cortante sísmico, debido a que se amplificó por R. En los modelos Frame y Shell se observa como a mayor cortante sísmico, mayor es el desplazamiento.

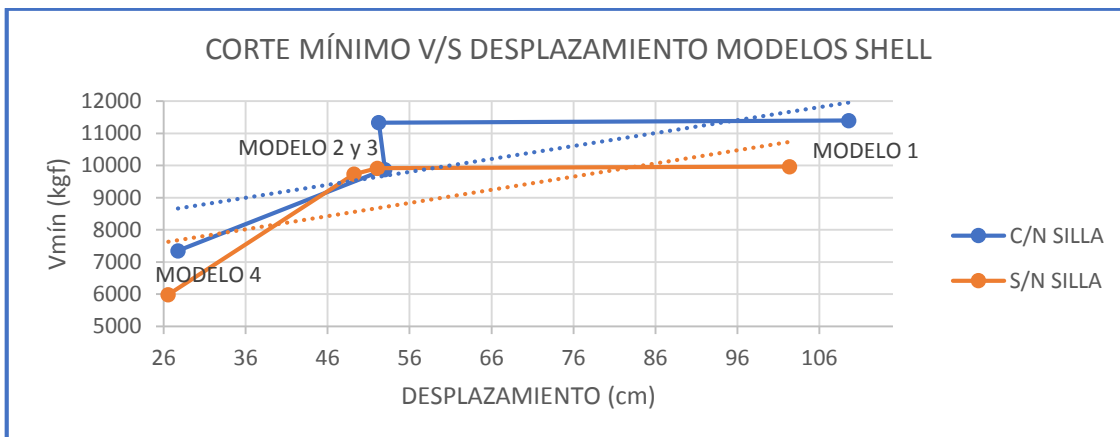


Figura 6.4. Comparación de corte y desplazamiento en modelos Shell.

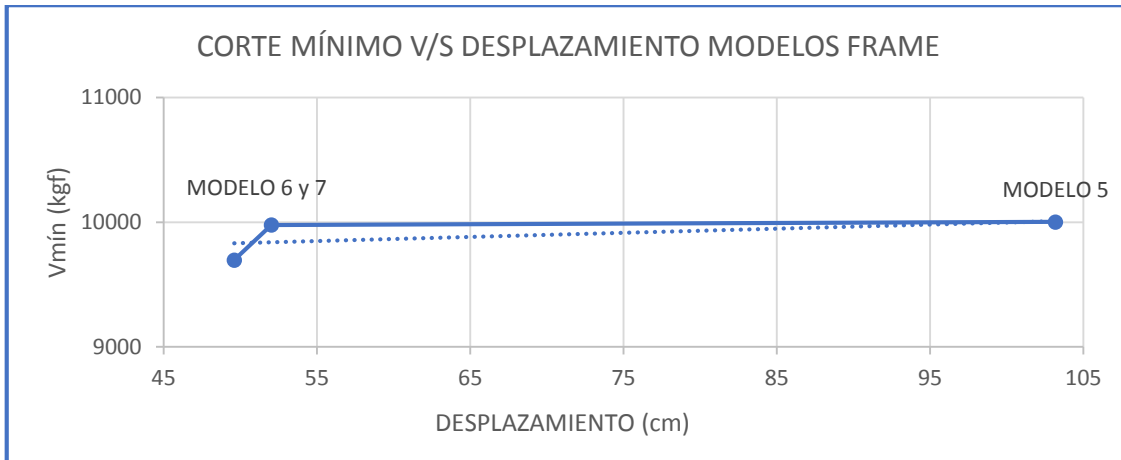
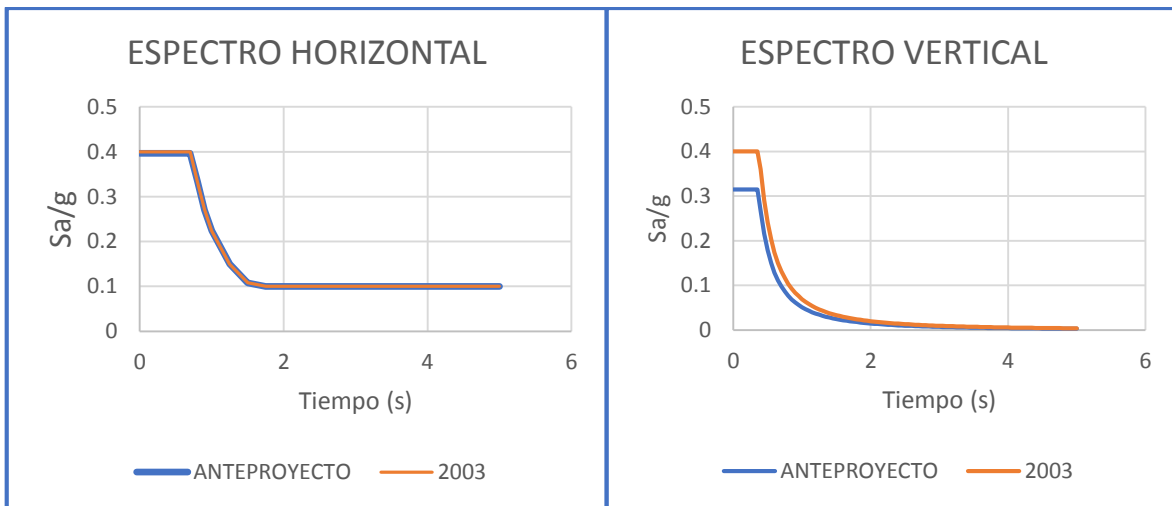


Figura 6.5. Comparación de corte y desplazamiento en modelos Frame.

La figura 6.6 muestra como el espectro sísmico horizontal se asemeja tanto entre ambas normativas, debido a que el espectro de diseño es el mismo y la única diferencia es la obtención del coeficiente sísmico $C_{m\acute{a}x}$, el que se determina de la tabla 5.7 de la norma vigente y de la fórmula 5-12 del anteproyecto, obteniendo sólo una diferencia decimal en el resultado. El coeficiente sísmico $C_{m\acute{i}n}$ es el mismo y se determina del subcapítulo 5.3.3.2 para ambas normativas. No obstante, se observa cómo se diferencian los espectros verticales en la ordenada espectral al utilizar una norma en específico, el que se determina del subcapítulo 5.5.2 de la norma vigente y de la fórmula 5-14 del anteproyecto pero, como la acción sísmica vertical no es relevante en una chimenea industrial de 90 [m], los resultados de los modelos no se ven tan afectados.



(a)

(b)

Figura 6.6. (a) Comparación de espectro horizontal entre normas, (b) Comparación de espectro vertical entre normas.

7 CONCLUSIONES

El diseño estructural de la chimenea industrial analizada en la presente investigación es controlada por la acción del viento normal para los modelos 2, 3 y 4 con Anteproyecto, siendo más relevante que las solicitaciones sísmicas, resultado esperable en estructuras de este tipo. Lo anterior se basa en la condición de aplicación de la acción del viento normal la cual es proporcional a la superficie expuesta de la chimenea, a diferencia de la carga sísmica cuya acción es proporcional a la distribución de masas que propone la estructuración de la chimenea. Tal como se expuso, la acción del viento normal controla los modelos en un 60 %, mientras que la acción sísmica en un 30 %.

Debido a la gran altura de la chimenea, la acción sísmica y la acción del viento evaluadas en modelos 2 y 3 con silla de anclaje, estos no cumplieron los valores admisibles de tensión en compresión en el manto según las normativas. Al comparar con los modelos sin silla de anclaje, en donde estas se sustituyen por apoyos articulados, en la condición ideal, las tensiones de compresión en el manto son menores al valor admisible impuesto por la NCh2369Of.2003 y anteproyecto de norma, cumpliendo con los criterios de resistencia considerados. De igual modo, en modelos 1 y 4 se cumplen los valores admisibles, en el caso con silla de anclaje y con apoyos articulados, ya que en modelo 1 la norma vigente no exige que las combinaciones sísmicas incorporen la carga de viento normal y en modelo 4, la acción del terremoto del año 2010 no produce una tensión de compresión excesiva para el manto de la chimenea.

Al comparar los resultados entre la NCh2369.Of2003 y el Anteproyecto de norma se observa la gran diferencia en las tensiones de compresión en el manto de la chimenea industrial. Este efecto radica esencialmente en la composición de las combinaciones de carga sísmicas del Anteproyecto de la NCh 2369, donde se exige la incorporación de la carga de viento normal.

Al evaluar la deformación admisible máxima, todos los modelos cumplieron con este valor siendo menores a la deformación exigida por las normativas. Cabe destacar que la amplificación de las cargas sísmicas consideradas por la expresión (6-1) del cálculo de las deformaciones presente en la NCh2369.Of2003, genera solicitaciones mayores que la consideración de un espectro elástico establecido en la norma NCh2745 para satisfacer las exigencias del cálculo de deformaciones en el Anteproyecto de norma. De lo anterior se concluye que la normativa vigente sigue siendo más conservadora en el cálculo de las deformaciones sísmicas, amplificado su valor por R.

Al comparar los cortes basales mínimos de los modelos, se concluye que el terremoto del año 2010 presenta una acción sísmica más baja netamente por la gran esbeltez de la chimenea, debido a que produce un cortante mucho menor, resultando tensiones de compresión y desplazamientos inferiores a los demás modelos.

Al comparar el espectro horizontal entre la NCh2369.Of2003 y el Anteproyecto de norma se observa que existe una diferencia mínima, debido a que ambas normativas calculan de la misma forma el espectro de diseño para el análisis modal espectral mediante la ecuación



definida en la fórmula 5-5 que se presenta en ambas normativas. Además, la obtención del coeficiente sísmico $C_{m\acute{a}x}$ se determina de la tabla 5.7 de la norma vigente y de la fórmula 5-12 del anteproyecto de norma, obteniendo sólo una diferencia decimal en el resultado. El coeficiente sísmico $C_{m\acute{i}n}$ es el mismo y se determina del subcapítulo 5.3.3.2 para ambas normativas.

Es relevante destacar que el diseño estructural de una chimenea industrial se haga a través del modelo tridimensional que está configurado a través de elementos tipo Shell, en donde el diseño conste de un mallado fino, debido a que así se obtendrán resultados más veraces. Se debe tener consideración en la flexibilidad propia de chimeneas industriales, las que tienden a ser estructuras esbeltas. Esto puede generar que la carga sísmica sea la mínima que propone la normativa. No obstante lo anterior, las diferencias entre los requisitos de evaluación del diseño estructural de las normativas comparadas, con la exigencia de incorporar la carga de viento normal en las combinaciones sísmicas, provoca que la acción del viento controle frente a la acción sísmica. Este planteamiento se propone efectuarlo para futuras investigaciones de chimeneas.

8 REFERENCIAS

Instituto de la Construcción, 2019, “En INN, profesionales inician la discusión de comentarios sobre la actualización de la NCh 2369”, Instituto de la Construcción, Santiago, Chile (disponible en <https://www.iconstruccion.cl/en-inn-profesionales-inician-la-discusion-de-comentarios-sobre-la-actualizacion-de-la-nch-2369/>).

Instituto Nacional de Normalización (2003). NCh 2369 of 2003: Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.

Instituto Nacional de Normalización (2018). Anteproyecto NCh2369: Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.

Instituto Nacional de Normalización (2013). NCh 2745 of 2013: Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica.

Manual CSI América, 2016, “*CSI Analysis Reference Manual*” (disponible en <http://docs.csiamerica.com/manuals/etabs/Analysis%20Reference.pdf/>).

RENADIC, 2010, Registro del Terremoto de Maule, 27 febrero 2010, Registro Concepción (disponible en http://www.terremotosuchile.cl/red_archivos/RENAMAULE2010R2.pdf/).