

DESCENSO DE APOYOS EN EL REVESTIMIENTO LATERAL DE NAVES INDUSTRIALES

Suyai Fernández^a, Rossana C. Jaca^b y Luis A. Godoy^c

^a*Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina,
suyaifernandez@yahoo.com.ar*

^b*Grupo de Métodos Numéricos y Experimentales, Universidad Nacional del Comahue,
Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar*

^c*CONICET y FCEFN, Universidad Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina,
lgodoy@com.uncor.edu*

Keywords: Asentamiento Diferencial, Cerramiento Lateral Flexible, Galpones, Elementos Finitos.

Abstract. Este trabajo analiza el comportamiento mecánico de cerramientos laterales flexibles de naves industriales perturbadas por asentamientos diferenciales en sus fundaciones. Las naves industriales estudiadas son representativas de aquellas usadas en la actividad agrícola, en las que pueden presentarse asentamientos diferenciales de las fundaciones, asociados a la pérdida de la capacidad portante del suelo por el riego de las plantaciones. El estudio se realiza con el método de elementos finitos mediante el programa de propósitos múltiples ABAQUS, modelando galpones de diferentes configuraciones geométricas y evaluando distintas magnitudes del descenso vertical de los apoyos. Para obtener una adecuada representación del problema es necesario abordar la simulación numérica considerando no linealidad geométrica. Se presentan resultados de la modelación para diferentes casos, en primer lugar se trabaja sobre un modelo a escala reducida que permite validar la metodología numérica, comparando los resultados de la simulación con los obtenidos a través de un modelo físico. Posteriormente, se plantean modelos representativos de las tipologías geométricas más usuales presentes en la región del Alto Valle de Río Negro en Argentina, para analizar su comportamiento frente a estas solicitaciones. Se evalúan configuraciones de deformadas y la relación que se genera entre las magnitudes máximas del descenso y los desplazamientos perpendiculares al plano del cerramiento lateral. Los resultados muestran que se producen importantes desplazamientos fuera del plano de la superficie lateral si la estructura secundaria no es modelizada.

1 INTRODUCCION

Los asentamientos excesivos de fundaciones pueden producir daño en la estructura principal resistente, problemas en el mantenimiento de elementos no principales y/o problemas en los equipamientos. Aunque el colapso estructural rara vez ocurre, la mayoría de los problemas estructurales asociados a mal diseño de fundaciones está vinculado a descensos mayores a los admisibles. En algunos casos el criterio para evaluar los desplazamientos admisibles depende de la capacidad portante del suelo mientras que en otros es determinado por el corte en la base. La presencia de agua puede reducir la capacidad portante del suelo y este hecho puede ocurrir por variaciones estacionales o accidentales no tenidas en cuenta en el cálculo de la estructura y fundaciones. Dado que los asentamientos de apoyos varían en el tiempo, cuando aparecen los primeros indicios hay suficiente tiempo para tomar medidas correctivas.

La magnitud de los asentamientos depende de características del suelo como densidad, cantidad de vacíos, tamaño y formas de los granos, de la estructura, de la historia de carga del suelo, de la magnitud y forma de aplicación de la carga y del grado de confinamiento del suelo. Los asentamientos diferenciales son los de mayor importancia en la estabilidad de la estructura. Si se produjera un asentamiento uniforme, no sería peligroso porque el conjunto se mueve como cuerpo rígido, pero si se producen asentamientos diferenciales pueden aparecer fisuras o fallas, si los mismos son excesivos.

Este trabajo aborda el análisis del comportamiento estructural global del cerramiento lateral de naves industriales, frente al descenso diferencial de sus puntos de apoyo. El objetivo del estudio es entender el comportamiento estructural básico de este sistema constructivo vinculado a los desplazamientos fuera del plano de la envolvente metálica frente a este tipo de sollicitación cinemática, y proponer un modelo representativo del problema planteado, probando su validez.

Este análisis se fundamenta en que la actividad agrícola argentina de la zona del Alto Valle de Río Negro y Neuquén alberga numerosos galpones emplazados, por lo general en áreas de riego, en las que el suelo podría experimentar una importante pérdida de capacidad portante y sus consecuentes asentamientos. Las deformaciones inducidas en el cerramiento lateral debido a este efecto, podrían causar la pérdida de la condición de servicio del edificio.

Como antecedentes, existen trabajos de evaluación de comportamiento de cáscaras de revolución afectadas por el cedimiento de sus apoyos para torres de enfriamiento, tanques de almacenamiento y sobre techos de bóveda cilíndricos. Koluza y Mateja (1976) estudiaron la relación entre la amplitud del desplazamiento en el borde inferior de torres de enfriamiento con los esfuerzos resultantes y con los desplazamientos radiales en la parte central de la cáscara, demostrando los mismos son del orden de 3.6 a 5.5 veces. Croll y Billington (1979) investigaron los efectos de los desplazamientos verticales impuestos al nivel de fundación sobre suelos que no tienen rigidez axil-simétrica. En trabajos más recientes Sosa y Godoy (2002,2003) evaluaron el efecto de asentamientos localizados de apoyos sobre la pared de tanques de almacenamiento de petróleo y derivados de grandes dimensiones, mediante una metodología numérica y experimental. Mostraron que el comportamiento de los desplazamientos fuera del plano de la cáscara es no lineal geométrico.

A los fines de alcanzar los objetivos planteados, se propone una metodología de trabajo similar a la desarrollada por Sosa y Godoy. En una primera etapa se construye un modelo físico a pequeña escala de una nave industrial al cual se le induce el descenso de uno de sus puntos de apoyo, midiendo los desplazamientos normales al plano del revestimiento lateral, provocados por dicha acción. Por otro lado, se realiza una modelación computacional del

mismo galpón para luego validar la simulación con los valores medidos en el modelo físico. Una vez validado el modelo computacional, se construyen modelos numéricos de galpones en escala natural, representativos de aquellos emplazados en la zona del Alto Valle. Los diferentes modelos presentan diferencias geométricas, a fin de entender el efecto de la geometría sobre el comportamiento estructural del cerramiento lateral.

En la Sección 2 se describe el problema a estudiar en cuanto a la tipología estructural considerada y las normativas existentes vinculadas al revestimiento lateral metálico y los asentamientos de suelos. La Sección 3 presenta el estudio del modelo de escala reducida que permite comprender la mecánica básica de la respuesta del sistema y en la Sección 4 se analizan naves industriales en escala real, haciendo uso de la metodología verificada en la sección anterior. Finalmente, la Sección 5 presenta las conclusiones del trabajo.

2 CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA

2.1 Tipología estructural

Con el objetivo de lograr un estudio de aplicación práctica, se aborda una investigación de campo a los efectos de identificar los galpones más característicos del Alto Valle de Río Negro, realizando visitas a establecimientos y revisando planos de importantes empresas frutícolas de la zona. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los datos extraídos de estos documentos, cuya nomenclatura para las dimensiones características se muestra en la Figura 1.

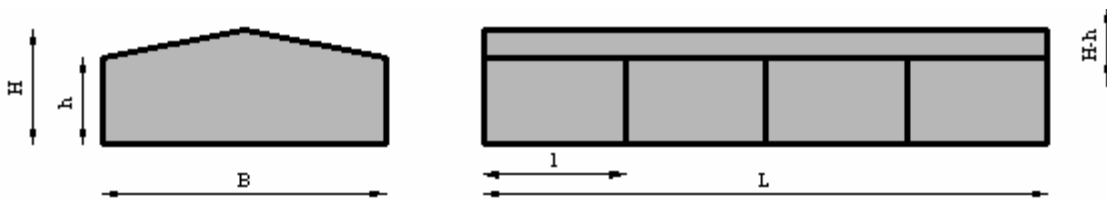


Figura 1: Nomenclatura adoptada en la descripción de los galpones a estudiar.

Caso	H [m]	h [m]	B [m]	L [m]	B/L [m]
1	8	6	25	35	0,7
2	10	8	45	80	0,6
3	-	-	20	40	0,5
4	-	-	50	100	0,5
5	-	-	20	60	0,3
6	7	5	45	70	0,65
7	7	5	-	-	-
8	6	4	10	20	0,5
9	8	6	45	65	0,7
10	10	7	25	65	0,4
11	6	4	45	75	0,6
12	-	-	25	40	0,6
13	9	7,5	30	45	0,65

Tabla 1: Dimensiones recopiladas en galpones del Alto Valle de Río Negro.

En general, se observa que:

- Los galpones más antiguos tienen techos parabólicos, mientras que los más modernos poseen techos a dos aguas.
- La distancia entre pórticos (I), es prácticamente la misma en los distintos galpones, de aproximadamente 5m.
- La altura del nivel de la cumbrera (H) oscila entre 6m y 10m.
- La altura del cerramiento lateral varía entre 4m y 8m, de los cuales aproximadamente un 70% se encuentra entre 4m y 6m de altura.
- El lado mayor de los galpones (L) varía entre 20m y 100m, siendo los más habituales los de 40m y 65m.
- El lado menor (B) de los galpones toma dimensiones entre 10m y 50m, siendo los más habituales los de 25m y 45m.
- La relación de lados en planta (B/L) más frecuente se encuentra entre 0,5 y 0,6.

Si bien el esquema estructural más frecuente presenta techo parabólico de chapa ondulada y cerramiento lateral de mampostería, tal como los que se muestra en la Figura 2, éstos son los galpones más antiguos de la zona y la nueva tendencia es construir galpones con techo a dos aguas de chapa trapezoidal y cerramiento lateral de paneles de chapa termoaislantes, tal como se ve en la Figura 3(a). Si bien este tipo de cerramientos no se encuentra en gran cantidad, es notable que sean un factor común en distintas empresas frutícolas que han ampliado su capacidad de producción con nuevos galpones. Por lo general, las estructuras de estos últimos están compuestas por reticulados de perfiles de acero tipo UPN, IPN y perfiles ángulo, como se muestra en la Figura 3(b). En menor medida, existen galpones con cerramiento de chapa sinusoidal o trapezoidal del tipo convencional, como se presenta en la Figura 4, pero no están destinados a la actividad frutícola. Se infiere que este sistema no es adecuado para esa actividad debido a la necesidad de aislamiento para la instalación de frigoríficos.



Figura 2: Galpón con cerramiento lateral de mampostería y techo parabólico de chapa ondulada, (Tatedetuti SA, Cipolletti).



(a)



(b)

Figura 3: Galpón con techo a dos aguas de chapa trapezoidal y revestimiento lateral de chapa, (Tres Ases, Cipolletti), (a) Vista general, (b) Estructura resistente interior.



Figura 4: Galpón con techo a dos aguas y cerramiento de chapa sinusoidal, (Expreso Río Negro, Gral. Roca).

En base a los datos recopilados se plantea estudiar como estructura tipo galpones de planta rectangular con techo a dos aguas, cuyas dimensiones resulten de las más representativas de los valores hallados, con techo y revestimiento lateral de paneles de chapa tipo U45 como se muestra en la Figura 5.

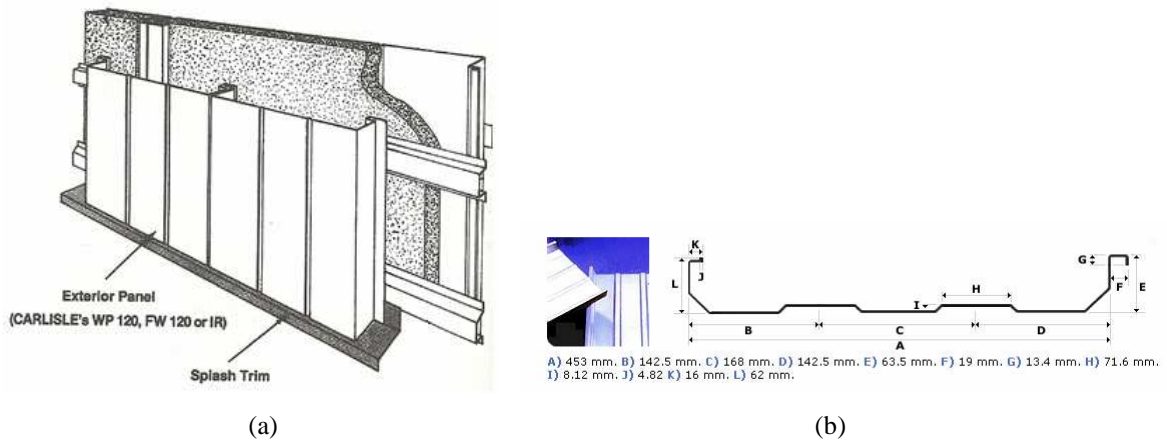


Figura 5: Chapa tipo U45 o KR18, (a) Sistema constructivo, (b) Sección transversal.

2.2 Normativas para revestimientos laterales de naves industriales

Los desplazamientos fuera del plano del revestimiento lateral pueden afectar las condiciones de servicio de la estructura, entendiéndose como tal un estado en el cual la función de un edificio, su aspecto y mantenimiento están preservados para un uso normal (CIRSOC 301, 2001). En este estudio se plantea un análisis bajo condiciones de servicio, ya que los desplazamientos laterales del cerramiento pueden afectar el uso eficaz de la estructura (incluyendo el mal funcionamiento de máquinas o servicios).

La norma argentina para Estructuras de Acero para Edificios (CIRSOC 301) establece valores límite de flecha total para elementos aislados, como columnas o vigas carril de puente grúa, para deformaciones verticales o desplazamientos horizontales con un valor mínimo de $l/150$, donde l es la distancia entre pórticos, pero no menciona valores límite para desplazamientos del revestimiento lateral. La norma aplicable a elementos de cerramiento flexible es la CIRSOC 303 (1991), cuyo alcance incluye las estructuras delgadas de acero tales como chapas delgadas conformadas en frío. Allí no se han encontrado disposiciones con respecto a este tipo de solicitaciones (descenso de apoyos) sobre el cerramiento.

Otras normativas consultadas (AISC, 2004; ASCE, 2002) indican que las condiciones de servicio límite deben ser fijadas a partir del conocimiento de la actividad a desarrollarse en el edificio, entre otras. En temporada alta de la producción frutícola, la exigente demanda del comercio exterior requiere el óptimo funcionamiento de los frigoríficos, puesto que el mínimo percance provocaría pérdidas económicas importantes.

Es por ello que cobran importancia las acciones preventivas, tales como la consideración de las condiciones de servicio en la etapa de proyecto. Considerando que la deformación de los paneles puede provocar la pérdida de aislación de los recintos frigoríficos, se deduce que el límite de deformación debe ser riguroso.

La norma ASCE recomienda tomar valores de entre $H/400$ y $H/600$, siendo H la altura del edificio, y dada la necesidad de preservar el normal funcionamiento del sistema de frío, se adopta como límite de deformación horizontal el valor $H/600$ que resulta de menor magnitud.

2.3 Asentamientos admisibles del suelo

En general, las deformaciones del suelo que interesa conocer y limitar son las verticales (asentamientos), ya que si son excesivas podrían provocar daño en las estructuras u otros componentes. El asentamiento total (ΔH) se puede expresar por la ecuación (1),

$$\Delta H = \Delta H_i + \Delta H_c + \Delta H_f \quad (1)$$

y se compone de los siguientes tipos de asentamientos:

- Asentamiento instantáneo (ΔH_i): Se produce casi simultáneamente con la aplicación de la carga, debido a reducción del volumen de vacíos. En suelos granulares, este efecto es dominante.
- Asentamiento por consolidación (ΔH_c): Se produce por la expulsión del agua de los poros del suelo a través del tiempo, este efecto provoca la variación volumétrica del suelo y es característico de suelos arcillosos. Los suelos granulares no presentan asientos diferidos en el tiempo debido a su alta permeabilidad, que permite disipación instantánea del exceso hidrostático.
- Asentamiento por fluencia lenta (ΔH_f): Se produce por cambio de forma de las partículas que conforman al suelo, y se puede despreciar por sus bajos valores.

Las causas de asentamientos pueden ser por acción de cargas estáticas, cargas dinámicas o cambios en el contenido de humedad por fluctuaciones estacionales. Los descensos de apoyos no están necesariamente vinculados a estructuras de gran peso sino que pueden producirse en estructuras livianas, donde lo más perjudicial es el asentamiento diferencial de los apoyos. Si la estructura es muy flexible, como en este caso, no tiene capacidad de transferir cargas y la influencia de cedimientos diferenciales es mayor. Estas consideraciones permiten inferir que este tipo de sollicitación cinemática puede generar importantes efectos en las naves industriales metálicas. Además, se produce una distorsión angular (β) expresada por ecuación (2) y mostrada en la Figura 6, entre los diferentes puntos de fundación que tiene consecuencias sobre el esquema estructural.

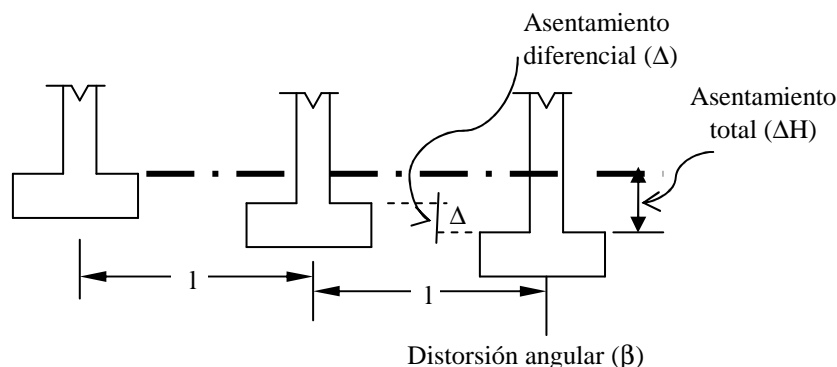


Figura 6: Esquema de asentamiento diferencial y distorsión angular.

$$\beta = \frac{\Delta H}{1} \quad (2)$$

El criterio más conocido para limitar las distorsiones angulares es el siguiente:

- $\beta = 1/500$; límite de seguridad frente a la fisuración.
- $\beta = 1/300$; aparición de fisuras en muros y tabiques.
- $\beta = 1/150$; fisuras y daños en elementos estructurales (inadmisible).

Evaluando valores admisibles de desplazamientos correspondientes a diferentes normas, en este estudio se considera un asentamiento límite de entre 20 a 25 mm en suelos granulares y de 40 a 50 mm en suelos cohesivos, ya que son los valores más aceptados según las diferentes reglamentaciones. Se asume que la estructura metálica en estudio es hiperestática y fundada con zapatas.

3 ANALISIS DEL MODELO DE ESCALA REDUCIDA

3.1 Modelo experimental

Con el objetivo de validar el modelo computacional que es utilizado para realizar el estudio propuesto, se construyó un modelo físico a escala en el que la estructura principal es representada por barras de madera y el cerramiento a través de placas de acetato. Las columnas se encuentran vinculadas mediante empotramientos en su base, con excepción de una de sus columnas centrales, a las que se le induce un descenso de 2mm a través de un mecanismo que simula el asentamiento diferencial del suelo. Finalmente, se miden los desplazamientos perpendiculares al plano, de una de las paredes adyacentes a la columna afectada.

Los resultados de este ensayo son comparados con los del modelo computacional que se presenta más adelante, para asegurar una adecuada representación del problema a través de los métodos numéricos. Para los ensayos no se hizo un análisis dimensional, sino que se pretende identificar el comportamiento cualitativo del sistema estructural y su apropiada representación mediante una modelación numérica, a los efectos de evaluar si es posible usar un modelo lineal geométrico o es necesario pasar a una simulación no lineal geométrica, como ocurre en el caso de cáscaras axilsimétricas.

Las dimensiones para la planta de la maqueta son ancho (B) de 200mm y largo (L) de 400mm, con una separación entre pórticos (l) de 100mm. La altura de la cumbrera (H) es de 85mm y la altura de la envolvente metálica (h) es de 65mm. En la Figura 7 se aprecia la maqueta terminada donde la columna central puede descender debido a la ranura calada en la mesa. Dicha maqueta podría representar un galpón de 10m × 20m medidos en planta, con una altura de techo mínima de 3m y una altura máxima de 4m, en una escala de 1:50.

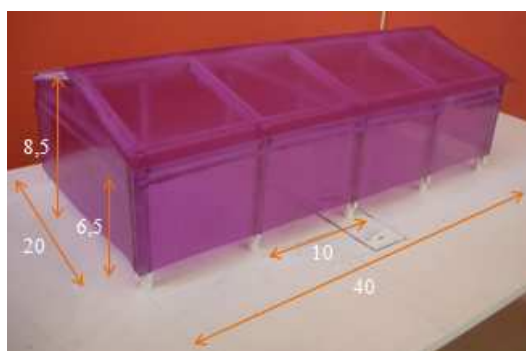


Figura 7: Modelo físico terminado, dimensiones en cm.

La Figura 8(a) muestra el dispositivo de medición, que consiste en un calibre digital, de precisión 0,005 mm, dispuesto sobre un soporte Bunsen. Se realizó una perforación en la mesa de soporte, en la proximidad de la columna central para imponer el descenso vertical mediante el dispositivo mostrado en la Figura 8(b). Sobre la lámina de acetato se colocó una cuadrícula que permite ubicar los puntos donde se realizan las mediciones y poder vincularlos con la malla computacional. Para hallar los parámetros mecánicos del acetato se realizaron ensayos resultando un módulo de Elasticidad $E = 3000 \text{ Mpa}$ y un módulo de Poisson de 0.4.



(a)



(b)

Figura 8: Vista general de la maqueta, (a) Dispositivo de medición instalado, (b) Dispositivo para inducir desplazamientos verticales en la columna central.

En la Figura 9 se presenta una vista frontal de la deformada de la placa de acetato debido al desplazamiento vertical de 2mm de la columna central del modelo experimental. En la misma figura se pueden notar los puntos cuyos desplazamientos son medidos, que equidistan 8 mm entre sí.

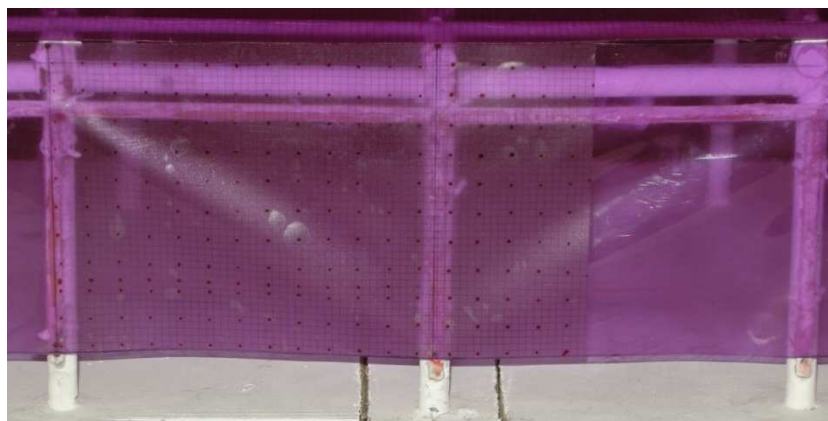


Figura 9: Deformada del modelo físico frente al descenso diferencial de apoyo central ($u_{\max}=2\text{mm}$).

3.2 Modelo computacional

Se ha confeccionado el modelo computacional con las mismas dimensiones y características mecánicas de los materiales empleados en el modelo experimental. Dada la simetría estructural del problema se representa sólo una mitad de la estructura para reducir el trabajo numérico.

La modelación por elementos finitos se hace mediante el código de propósitos generales ABAQUS (2002), representando el cerramiento lateral y techo a dos aguas con elementos cuadrilaterales de cáscara de cuatro nudos (S4R). En base a lo observado en el modelo físico y también en una modelación de la mitad de la estructura, resulta evidente que la influencia del descenso del apoyo se extiende por la cáscara hasta el siguiente pórtico y es despreciable más allá del mismo. Por este motivo se representa en el modelo una porción de la estructura entre dos pórticos consecutivos, donde uno es el central al cual se le imponen condiciones de simetría y en el otro pórtico se imponen condiciones de borde correspondientes a la vinculación de la chapa con el pórtico, tal como se muestra en la Figura 10.

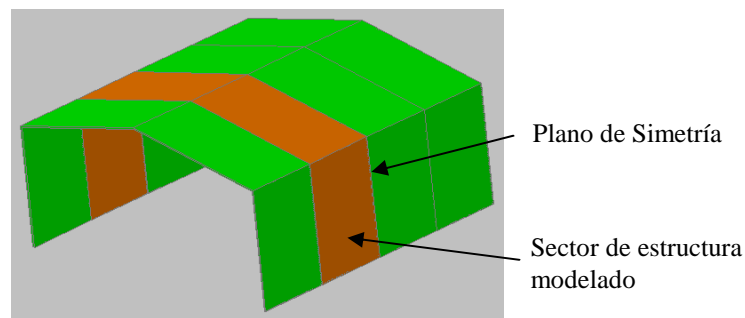


Figura 10: Porción de galpón usada para la modelación computacional.

La Figura 11 (a) muestra la porción de estructura usada en la modelación, representando un sector entre dos pórticos sucesivos correspondiente a lo indicado en la Figura 10. Las columnas del modelo físico ubicadas en el borde del sector estudiado son representadas restringiendo todos los grados de libertad traslacionales, y dos rotacionales, permitiendo los giros de la placa alrededor de la columna, en tres de ellas denominadas A, tal como se presenta en la Figura 11(b). A la cuarta columna (B) ubicada sobre el plano de simetrías se le impone un descenso de 2mm, al igual que en el modelo físico.

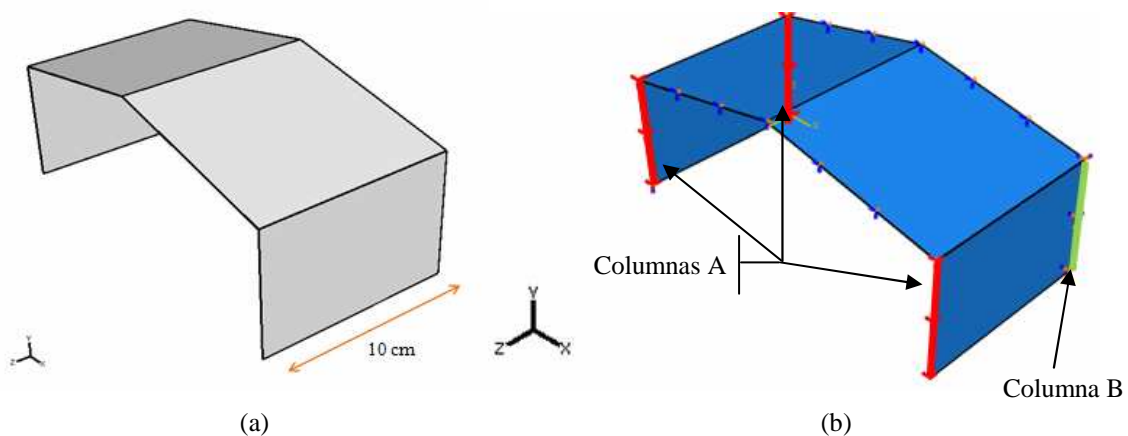


Figura 11: Modelo numérico, (a) Sector de estructura modelada, (b) Condiciones de borde.

Para el mallado de las placas se eligen elementos de cáscara cuadrilaterales de primer orden con 5 grados de libertad y de 0,9 cm de lado como máximo, este valor es equivalente a 45 cm

en un galpón real. La Figura 12 presenta la malla de elementos finitos, cuyo tamaño se define a partir de un análisis de convergencia, de manera que el error relativo no supere en 1%.

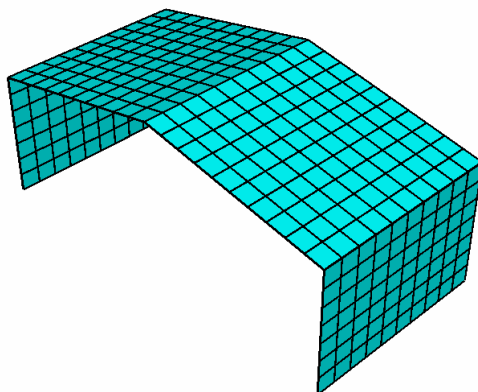


Figura 12: Modelo mallado con elementos rectangulares cuadrilaterales.

Se considera el comportamiento del material como lineal elástico ya que se estima que el acetato, del cual se compone la placa modelada, no llegará a su estado plástico bajo las cargas previstas. Si bien en los ensayos realizados (ASTM, 2002) a este material se ha detectado cierto comportamiento ortotrópico, la diferencia en ambos sentidos es pequeña, por lo que se lo simula como a un material isótropo, de módulo elástico de 3000 MPa y módulo de Poisson de 0,4.

El análisis sin considerar no linealidad geométrica no ha sido satisfactorio, ya que no se logró un buen acuerdo con los resultados obtenidos en el modelo físico resultando la deformada numérica considerablemente diferente de la observada en la maqueta. Resultados similares fueron hallados por Sosa y Godoy (2002, 2003) al evaluar la respuesta de tanques de almacenamiento de fluidos frente a este tipo de solicitación.

En los problemas no lineales, la respuesta del modelo es dependiente de la historia de carga. En ABAQUS, esta historia de carga se define a través de *Steps* (pasos). Se definen dos pasos, el *inicial* en el que se cargan todas las condiciones iniciales del problema relacionadas a las restricciones geométricas que incluyen las condiciones de simetría y las restricciones que representan a las columnas. En el paso siguiente (*step-1*), planteado como un análisis del tipo estático general con consideración de la no linealidad geométrica, se impone el descenso de los puntos en uno de los bordes de la placa. Para ello se activa la función NLGEOM disponible en este módulo. El análisis no lineal geométrico define una secuencia de eventos: el estado del modelo al final de un paso, provee las condiciones iniciales del siguiente.

Con este propósito se utilizó el método de Riks modificado (1972, 1979) disponible en el programa ABAQUS que permite obtener soluciones de equilibrio estático no lineales para problemas inestables, en el que la carga y/o desplazamiento pueden disminuir cuando la solución evoluciona. El método de Riks es un algoritmo que permite realizar un análisis carga-desplazamiento considerando no linealidad geométrica mostrando una trayectoria simple de equilibrio en el espacio carga-coordenadas generalizadas.

En concordancia con el ensayo realizado al modelo físico, se aplica un descenso en uno de los bordes verticales de la placa de 2 mm y se representa los desplazamientos perpendiculares al cerramiento, como se muestra en la Figura 13, a los efectos de comparar los valores hallados con los del ensayo. Las curvas de nivel resultantes de la modelación numérica se observan en detalle en la Figura 14 representando los desplazamientos perpendiculares en las placas (U1) con un desplazamiento máximo de 2,879 mm. Los valores negativos de U1 son aquellos desplazamientos hacia el interior del galpón.

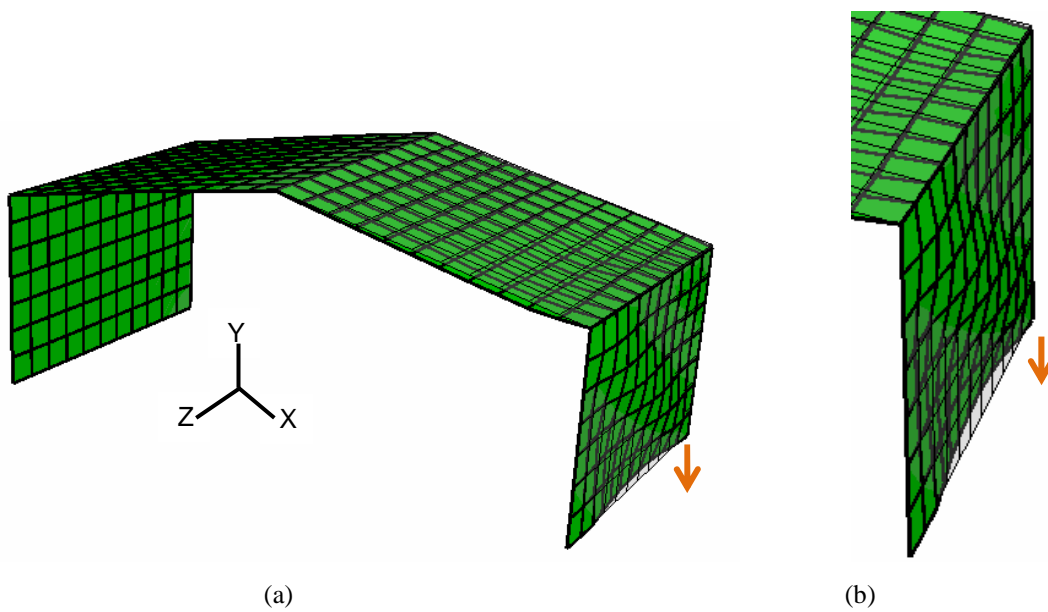


Figura 13: Deformada del modelo computacional, (a) Vista general, (b) Acercamiento de la deformada.

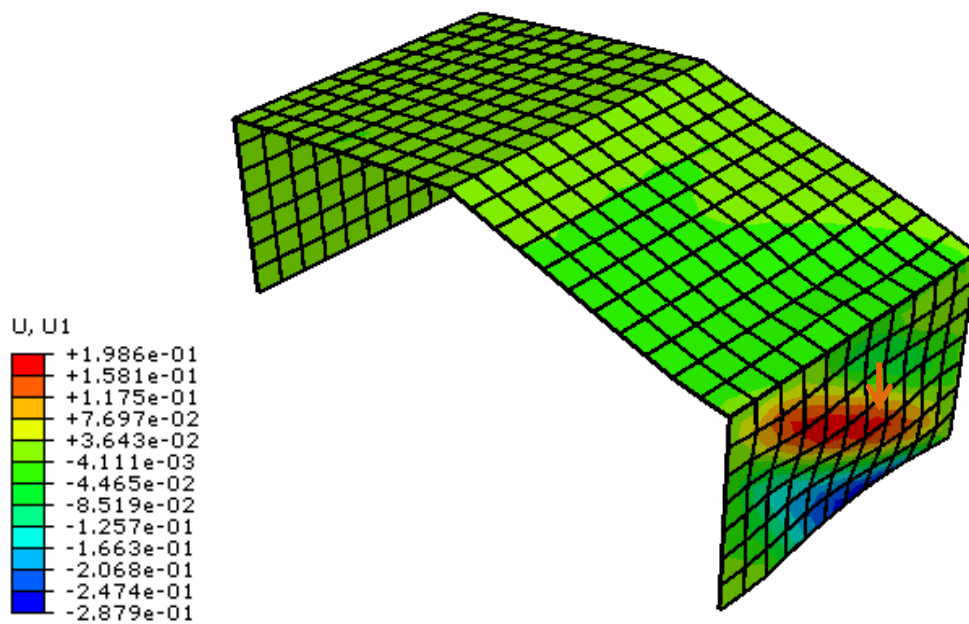


Figura 14: Desplazamientos perpendiculares a la cara estudiada de la placa (U1), expresados en cm.

3.3 Validación del modelo computacional

La validación propiamente dicha (Lecompte, 2003) consiste en construir una representación correcta del problema planteado. Este proceso de validación puede realizarse a través de comparaciones con otras soluciones numéricas, con soluciones analíticas, con resultados experimentales o con benchmarks (Dardati y Godoy, 2001). En este trabajo se usa como metodología de validación las comparaciones con los datos experimentales obtenidos en el modelo físico construido para tal fin. En la Figura 15 se observa la deformada de los modelos físico y computacional y puede apreciarse que ambos modelos son similares cualitativamente.

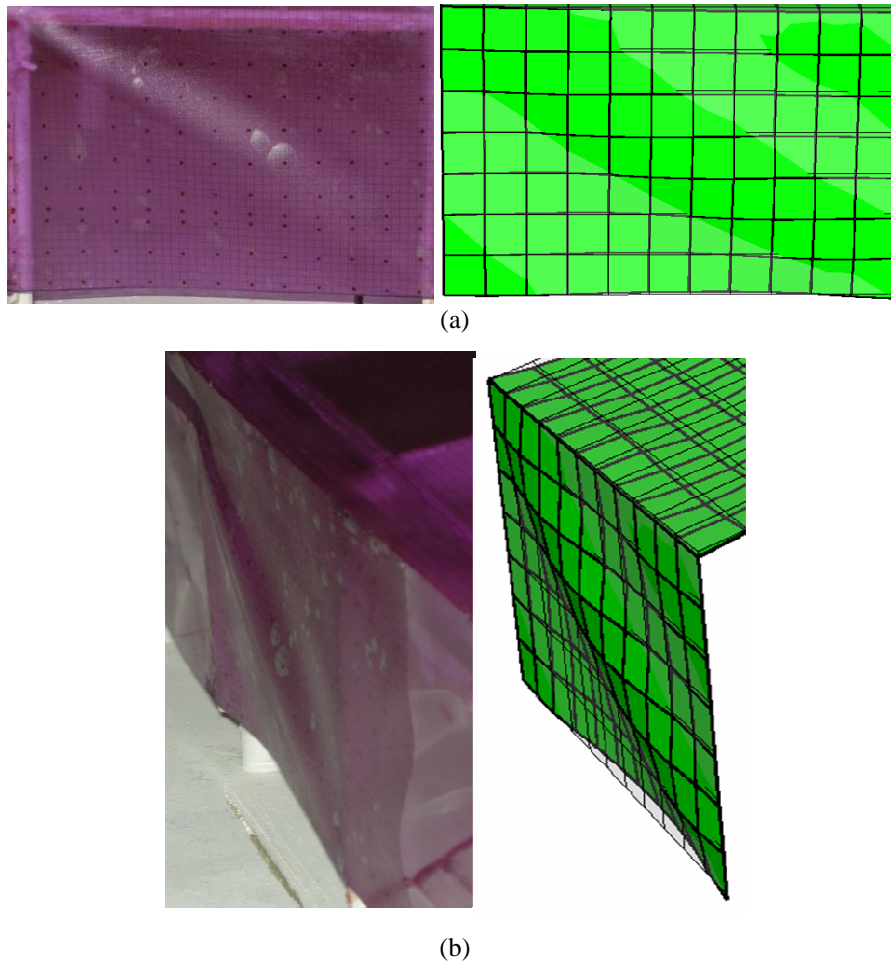


Figura 15: Comparación deformadas del modelo físico y numérico, (a) Vista frontal, (b) Vista lateral.

A los efectos de realizar una validación cuantitativa, se miden los desplazamientos verticales en diferentes puntos del modelo físico en una porción de la maqueta, indicadas en la Figura 16 con un recuadro, en relación al sistema de referencia que se muestra en la misma figura. En función de los ejes coordenados presentados en la Figura 16 se presentan cortes a lo largo del eje **Z**, en los que se muestran los resultados de ambos modelos. La Figura 17 presenta los resultados de las mediciones junto con los valores calculados numéricamente en diferentes cortes a lo largo del eje **Z**, en los que se muestra el desplazamiento normal a la placa (U1) a lo largo de la altura del galpón (según eje **Y**).

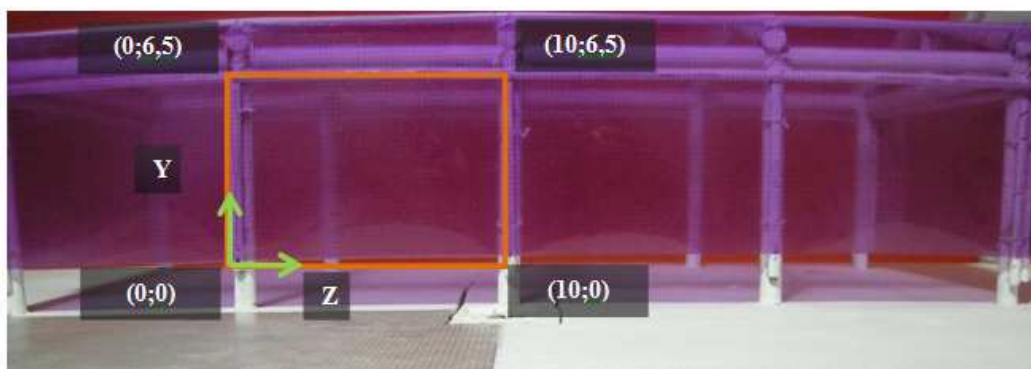


Figura 16: Sistema de referencia adoptado para la comparación de resultados, coordenadas de referencia expresadas en cm.

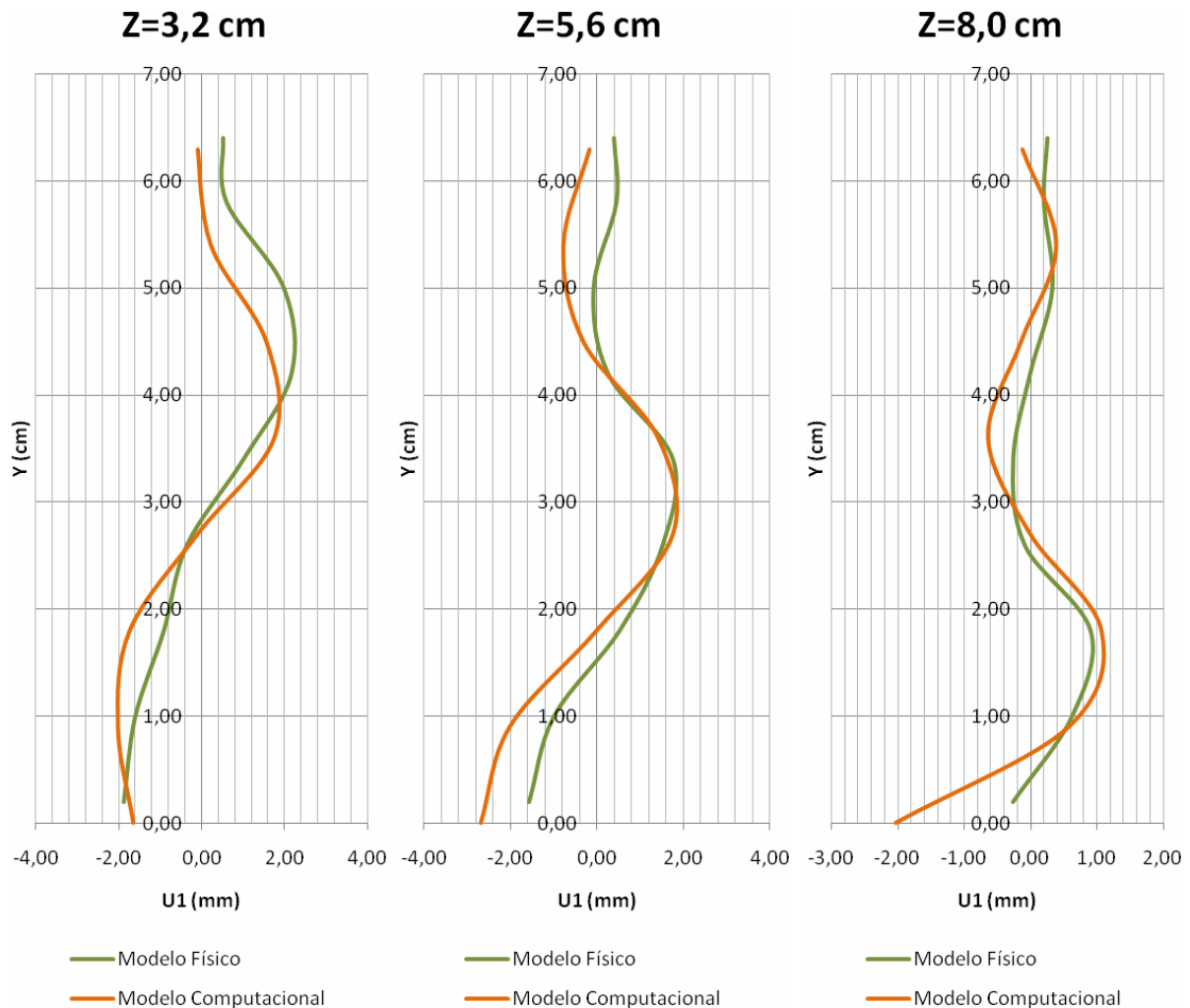


Figura 17: Desplazamientos $U1$ de los modelos computacional y físico, para $Z=3,2\text{ cm}$, $Z=5,6\text{ cm}$ y $Z=8,0\text{ cm}$.

Se observa un buen acuerdo entre los valores obtenidos en el modelo físico y en el modelo computacional, tanto cualitativamente como cuantitativamente. El modelo numérico logra captar el patrón de deformación que se exhibe en la cáscara del modelo físico con buena precisión. Para ello fue necesario incluir en las deformaciones la parte no lineal indicando que el comportamiento es fundamentalmente no lineal.

4 ANALISIS DE GALPONES EN ESCALA REAL

Con el propósito de observar el comportamiento estructural de las naves industriales frente al descenso de un apoyo, se investigaron una serie de modelos computacionales de galpones en escala real, introduciendo variaciones en las magnitudes geométricas características.

La modelación computacional de las naves industriales en escala real, es realizada de manera análoga al modelo computacional presentado previamente, abordando un análisis no lineal geométrico. Manteniendo las referencias de las magnitudes características indicadas en la Figura 1, se estudiaron los diferentes modelos presentados en la Tabla 2 a los que se imponen cedimientos variables (δv) en el apoyo central. Se consideran las dimensiones más representativas de las naves industriales existentes, en base a la recopilación de antecedentes realizada en la región. Se representan naves industriales con techo a dos aguas por ser las más

usadas en las construcciones mas recientes, como se detalló anteriormente.

Modelo	H (m)	h (m)	l (m)	B (m)	δv (mm)
M1	6	4	5	Variable 20 y 45	Variable 5 a 25
M2	7	5	5	Variable 20 y 45	Variable 5 a 25
M3	8	6	5	Variable 20, 25, 30, 45 y 50	Variable 5 a 25
M4	9	7	5	Variable 20 y 45	Variable 5 a 25
M5	10	8	5	Variable 20 y 45	Variable 5 a 25

Tabla 2: Geometría de los modelos computacionales.

Se considera que el cerramiento está compuesto de chapas plegadas de acero al carbono de baja aleación, construidas mediante un proceso de plegado, sin estructura secundaria. Este cerramiento es representado en el modelo con una placa de sección rectangular de espesor $e=0,05\text{cm}$, de manera que su módulo resistente sea equivalente al de la chapa de forma trapezoidal. Las características mecánicas del material son: modulo de Young $E = 202\text{GPa}$ y módulo de Poisson $\nu = 0.3$.

El suelo no se modeliza, sino que se lo asume como una condición de borde de la estructura, imprimiendo el descenso en una de las columnas. La magnitud del descenso es variable en cada modelo, pero como máximo es de 2,5 cm, en concordancia con los límites propuestos por las normas técnicas.

4.1 Resultados numéricos

En esta modelación se busca determinar el patrón de comportamiento del cerramiento lateral de las naves industriales bajo la imposición de desplazamientos prefijados en un apoyo y comparar los desplazamientos máximos perpendiculares el plano de la cáscara con los valores admisibles hallados en la normativa, a los fines de resguardar las condiciones de servicio.

En las figuras 18, 19, 20, 21 y 22 se presentan los resultados de los modelos M1, M2, M3, M4 y M5, todos con un ancho $B= 20\text{m}$ y altura variable del cerramiento lateral (h) entre 4 y 8m, con descenso de apoyos variables entre 5 y 25mm. La Figura 23 muestra una comparación para naves industriales de ancho $B= 45\text{m}$ y un asentamiento de 10mm, variando la altura h en 5 y 6m.

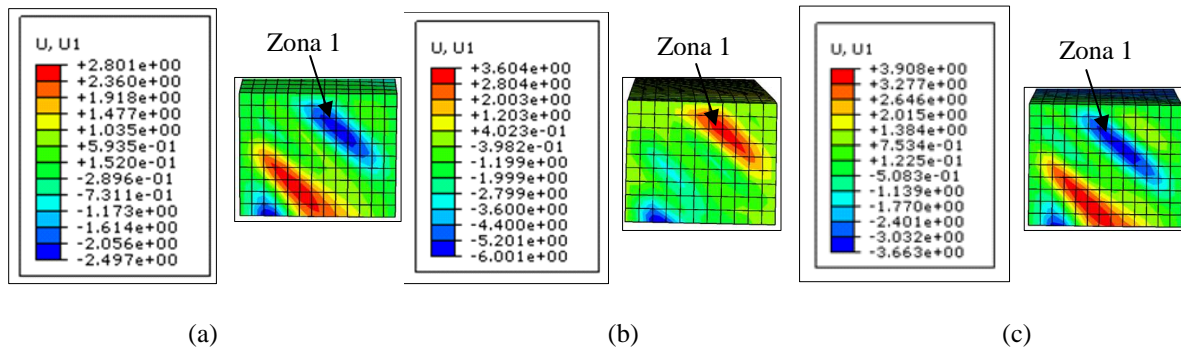


Figura 18: Desplazamientos perpendiculares al cerramiento del modelo M1 (B=20m, h=4m), en cm, (a) $\delta v= 5\text{mm}$, (b) $\delta v= 9\text{mm}$, (c) $\delta v= 10\text{mm}$

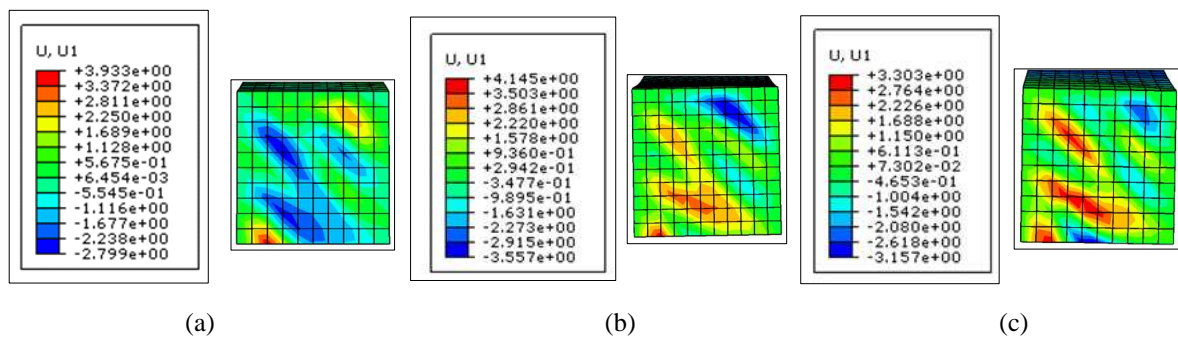


Figura 19: Desplazamientos perpendiculares al cerramiento del modelo M2 (B=20m, h=5m), en cm, (a) $\delta v= 7\text{mm}$, (b) $\delta v= 9\text{mm}$, (c) $\delta v= 10\text{mm}$

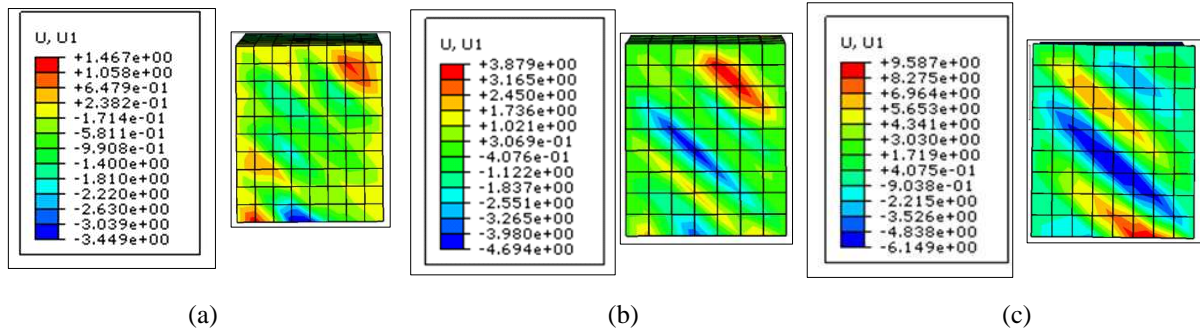


Figura 20: Desplazamientos perpendiculares al cerramiento del modelo M3 (B=20m, h=6m), en cm, (a) $\delta v= 5\text{mm}$, (b) $\delta v= 10\text{mm}$, (c) $\delta v= 25\text{mm}$

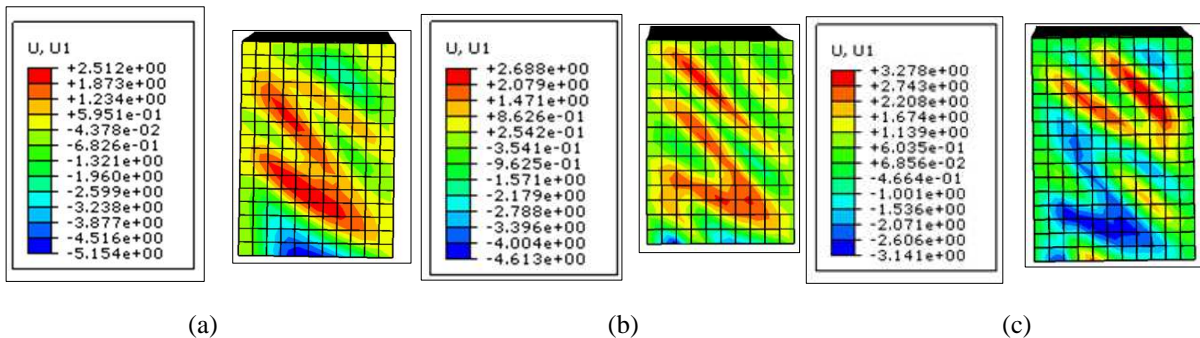


Figura 21: Desplazamientos perpendiculares al cerramiento del modelo M4 (B=20m, h=7m), en cm, (a) $\delta v= 5\text{mm}$, (b) $\delta v= 9\text{mm}$, (c) $\delta v= 10\text{mm}$.

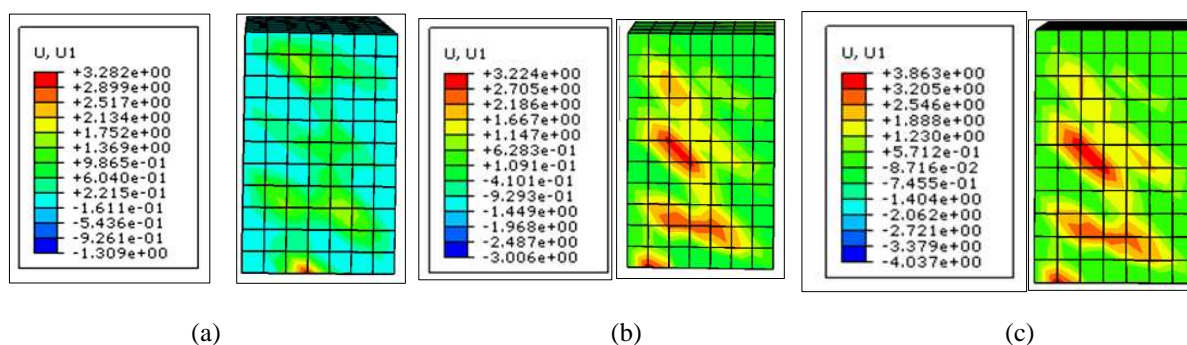


Figura 22: Desplazamientos perpendiculares al cerramiento del modelo M5 ($B=20\text{m}$, $h=8\text{m}$), en cm, (a) $\delta v=5\text{mm}$, (b) $\delta v=7\text{mm}$, (c) $\delta v=10\text{mm}$

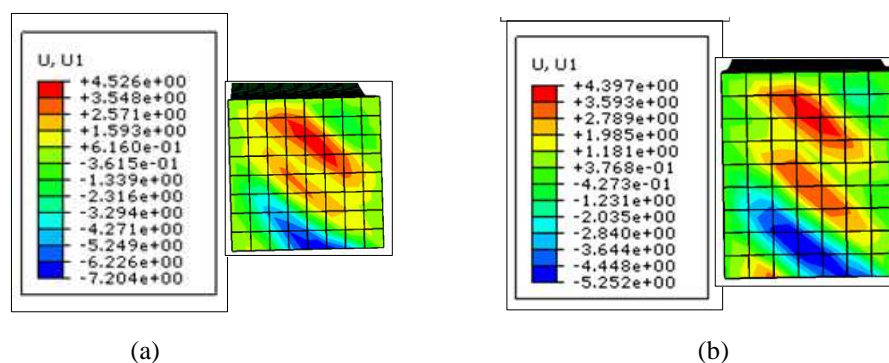


Figura 23: Comparación de los modelos M2 y M3 ($B=45\text{m}$, $\delta v=10\text{mm}$), en cm, (a) $h=5\text{m}$, (b) $h=6\text{m}$.

En general, se observa una tendencia a la formación de bandas inclinadas, en concordancia con la deformada obtenida con el modelo físico. Esta similitud se nota especialmente en las figuras 18, 19 y 20, ($0.8 \leq h/l \leq 1.2$), donde se observa un patrón de bandas inclinadas a 45° aproximadamente. Las figuras 21 y 22 presentan una altura (h) mayor y ya no es tan evidente este patrón de deformación.

En todos los casos estudiados, se observa un aumento de la magnitud de los desplazamientos perpendiculares a la placa, a medida que se incrementa el descenso del apoyo.

En la Figura 18 (a), (b) y (c) corresponde a un descenso de apoyo que aumenta de 5mm a 10mm y se pueden observar que en cada deformada se van alternando las zonas con deformaciones hacia el interior y exterior del galpón, con un comportamiento del tipo snap-through. Además, la variación de los desplazamientos máximos perpendiculares a la placa no son lineales con el asentamiento, los valores de $U1$ en la parte superior de la placa (zona 1) son: 25mm para $\delta v=5\text{mm}$ y 36mm para $\delta v=9\text{mm}$ y $\delta v=10\text{mm}$. En el resto de los modelos, se observa un comportamiento análogo al de la Figura 18, es decir, un comportamiento no lineal.

En todos los modelos que poseen la misma perturbación ($\delta v=10\text{mm}$) e igual ancho ($B=20\text{m}$) con diferentes valores de h , se observa que los valores de $U1$ se encuentran entre 33mm y 47mm. Sin embargo no es posible encontrar un patrón de comportamiento claro frente a la variación de h , puesto que se produce una marcada modificación de la deformada. En particular, la Figura 23 muestra las deformadas para galpones con el mismo ancho ($B=45\text{m}$) y altura variable (h) para un mismo $\delta v=10\text{mm}$, similar a lo analizado anteriormente. En este caso el patrón de comportamiento es similar y los valores máximos son algo mayores para la menor altura.

Tomando como referencia una de las naves industriales, la que tiene mayor altura total $H=10\text{m}$, resulta que el desplazamiento fuera del plano de la lámina lateral admisible según la

norma ASCE es

$$\frac{H}{600} = 1.67\text{cm} \quad (3)$$

Este valor es ampliamente superado en todos los modelos calculados, para asentamientos dentro de los valores admisibles.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió la respuesta del sistema estructural correspondiente a naves industriales metálicas con techo a dos aguas sometidos a un asentamiento diferencial de sus apoyos, evaluando principalmente el comportamiento de los desplazamientos normales al cerramiento lateral. Se han confeccionado modelos computacionales que representan el problema planteado, cuya validez ha sido probada a partir de la comparación entre un modelo físico y uno de tipo numérico.

Los resultados muestran que para obtener una adecuada representación de la respuesta estructural es preciso incluir en la modelación la no linealidad geométrica. La modelación de la nave industrial a través de una porción de ella, con asignación de condiciones de simetría, ha resultado satisfactoria para simplificar el modelo y proporcionar resultados afines al modelo físico ensayado. Los resultados obtenidos al comparar el modelo físico y el numérico a pequeña escala resultan aceptables y permitieron identificar el comportamiento no lineal de la respuesta, siendo ésta una metodología conveniente para posteriormente pasar a analizar estructuras de escala real y poder obtener conclusiones sobre su comportamiento,

Se concluye además que la rigidez de la estructura principal no influye de manera significativa en el comportamiento del cerramiento lateral, frente al descenso diferencial del suelo, ya que la influencia del descenso del apoyo se extiende por la cáscara hasta el pórtico consecutivo y a partir de allí el efecto es despreciable.

De las modelaciones computacionales representativas de aquellas naves industriales ubicadas en el Alto Valle, se concluye que:

- El patrón de comportamiento está formado, en general por bandas de corte a 45°, donde se alternan desplazamientos hacia adentro y afuera del galpón.
- Existe una relación directa no lineal entre los descensos diferenciales del suelo, y las deflexiones máximas perpendiculares al plano del cerramiento lateral flexible.
- Para distintas relaciones entre altura del marco y distancia entre pórticos, h/l , la deformada del cerramiento cambia, dificultando la identificación de un patrón de deformación frente a la variación de este parámetro. Para una misma relación h/l y descensos diferentes, la deformada se mantiene invariable, modificándose la magnitud de los desplazamientos perpendiculares a la placa.
- Las hipótesis simplificativas introducidas, tales como la ausencia de correas y la falta de arriostramientos en la parte inferior de la chapa, puede contribuir a que los desplazamientos laterales de la misma se ubiquen muy por encima de los admisibles. Por ello se recomienda, en estudios posteriores, considerar su efecto.
- Los distintos valores de B afectan la respuesta del cerramiento lateral, aunque no fue posible determinar un patrón de comportamiento frente a este parámetro.

REFERENCIAS

ABAQUS, User's Manuals, Version 6.3, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. Rhode Island, 2002.

- AISC, *Serviceability Design Considerations for Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction, 2004.
- ASCE, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers, 2002.
- ASTM D882 – 02, *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. American Section of the International Association for Testing Materials, EEUU., 2002.
- CIRSOC 301, *Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Edificios*. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Buenos Aires, 2000.
- CIRSOC 303, *Estructuras Livianas de Acero*. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Buenos Aires, 1991.
- Croll, J.G.A. and Billington, D.P., Cooling towers with non-axisymmetric foundation. *Research Report 79-SM-25*, Princeton University, 1-57, 1979.
- Dardati, P., y Godoy, L.A., Validación de modelos en Mecánica Computacional. *Mecánica Computacional*, 20: 663-670, 2001.
- Godoy, L.A. and Sosa, E.M., Deflections of thin-walled storage tanks with roof due to localized support settlement. *Proceedings of the II Int. Conf. On Advances in Structural Engineering and Mechanics*, Techno Press, Seoul, Korea, 2002.
- Godoy, L.A. and Sosa, E.M., Localized support settlements of thin-walled storage tanks. *Thin-Walled Structures*, 41:941-955, 2003.
- Koluza, R. and Mateja, O., Problems of the influence of irregular displacements of foundation on the state of stress and of a hyperboloidal cooling tower. *Bulletin of the International Association for Shells and Space Structures*, 17(3):47-79, 1976.
- Lecompte, K.L., Verificación y validación de modelos geoquímicos realizados con un software específico. *Problemas del conocimiento en Ingeniería y Geología*, 1: 65-76, 2003.
- Riks, E., An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems. *International Journal of Solids and Structures*, 15:529-551, 1979.
- Riks, E., The application of Newton's method to the problem of elastic stability. *Journal of Applied Mechanics*, 39:1060-1065, 1972.