

MODELADO DE LA ESTABILIDAD DE NAVES INDUSTRIALES CON ASENTAMIENTO LOCAL DE APOYOS

Noemí M. Subelza^a, Rossana C. Jaca^b y Luis A. Godoy^c

^aUniversidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina,
sube_09@outlook.com

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

^cCONICET y FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina,
lgodoy@com.uncor.edu

Palabras clave: Naves Industriales, Asentamiento Diferencial, Cerramiento Lateral Flexible, Rigidizadores, Elementos Finitos.

Resumen. El descenso diferencial de apoyos genera desplazamientos fuera del plano en los cerramientos laterales de naves industriales metálicas, pudiendo comprometer las condiciones de servicio. En este trabajo se estudia la respuesta estructural de cerramientos laterales flexibles de galpones metálicos con diferentes geometrías debido a asentamientos diferenciales, proponiendo configuraciones de rigidizadores a fin de reducir dichos desplazamientos. La modelación numérica se realiza por elementos finitos mediante el código de propósitos generales ABAQUS usando elementos de cáscara tanto para el cerramiento como para las correas y considerando no linealidad geométrica. Los resultados numéricos de una de las geometrías estudiadas se validan con los provenientes de un modelo físico a escala reducida. Para diferentes relaciones entre la altura del cerramiento y separación entre pórticos se plantean configuraciones alternativas de sección de correas y separación entre ellas, comparando con los desplazamientos admisibles para condiciones de servicio. En todos los modelos estudiados, correspondientes a diferentes relaciones geométricas de la placa de cerramiento, se observa un cambio en el patrón de deformaciones por la presencia de los elementos de rigidización lateral y una reducción de los desplazamientos al aumentar la inercia de las correas y disminuir su separación. En algunas de las geometrías estudiadas los desplazamientos fuera del plano permanecen mayores a los admisibles.

1 INTRODUCCION

En el diseño estructural usualmente no se tiene en cuenta la influencia que el asentamiento de suelo soporte pueda tener sobre la estructura. La interacción entre suelo y estructura puede ser muy significativa, especialmente en suelos altamente compresibles, causando daños en la estructura resistente principal y/o en elementos estructurales secundarios o equipamientos. Asentamientos diferenciales en las fundaciones modifican la forma de transmisión de cargas con redistribución de esfuerzos en la estructura principal y afectando también los elementos entre columnas como placas de cerramiento, en las que se producen desplazamientos fuera de su plano. Aunque el colapso rara vez ocurre, pueden aparecer problemas asociados a desplazamientos mayores a los aceptables que afecten las condiciones de servicio de la estructura. Los criterios que establecen los desplazamientos máximos admisibles dependen de la capacidad soporte del suelo y también del tipo de estructura existente.

La capacidad soporte última del suelo depende del tipo de suelo y de su condición, como también de la forma de aplicación de la carga. Uno de los factores que modifica el comportamiento de un tipo particular de suelo es la existencia de agua, que puede presentarse por diversos motivos como agua estacional, proveniente de riego o lluvias excesivas, o agua accidental por rotura de cañerías u otras fuentes ocasionales. El asentamiento de una construcción se puede evaluar en función del asentamiento total de la estructura, o bien por el asentamiento diferencial entre fundaciones adyacentes o entre el centro y las esquinas del edificio. Este último tipo de asentamiento es mucho más difícil de tolerar ya que puede hacer que la construcción se distorsione y que los cerramientos laterales sufran desplazamientos no contemplados. Por consiguiente, los asentamientos diferenciales tienen una importancia mucho mayor que los totales.

En este trabajo se estudian los desplazamientos laterales que se producen en los revestimientos laterales de los galpones agrícolas a causa de los asentamientos diferenciales de las fundaciones, incluyendo la estructura secundaria. Para ilustrar el comportamiento, se consideran galpones agrícolas que se encuentran en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén en Argentina. Las naves industriales a estudiar se emplazan en zonas de riego en las que el suelo podría experimentar una importante pérdida de capacidad portante y sus consecuentes asentamientos. Las deformaciones en los revestimientos laterales de las naves industriales, como consecuencia del asentamiento diferencial de las cimentaciones, pueden exceder a las permitidas, afectando el uso de la estructura en condiciones de servicio.

Trabajos anteriores de los autores mostraron que los desplazamientos de las paredes laterales eran superiores a las permitidas al no considerar la estructura secundaria de los revestimientos laterales (Fernández et al., 2011, 2015) y que, con las correas más usuales colocadas a distancias del tipo de las comúnmente usadas, tampoco se logra que dichos desplazamientos sean menores a los valores admisibles (Pedrozo et al., 2016). El objetivo de este trabajo es plantear diferentes distribuciones de correas en naves industriales de geometría variada que permitan limitar los desplazamientos fuera del plano del cerramiento lateral a valores inferiores a los tolerados por las normas.

En la bibliografía técnica se presentan trabajos sobre las consecuencias estructurales de asentamientos diferenciales en cáscaras axilsimétricas (Jonaidi et al., 1998), tanques de almacenamiento (Godoy and Sosa, 2002, 2003), torres de enfriamiento (Koluzza and Mateja, 1976), techos cilíndricos rebajados (Jonaidi and Ansourian, 1998). Otros trabajos están orientados al pandeo de cáscaras producidos por descensos en algunos sectores de la fundación como algunos publicados más recientemente por Gong et al. (2012, 2013), Cao and Zhao (2010) y Zhao et al. (2006). Darmawan (2009) presentó la evaluación de una estructura metálica que sufrió severos daños por asentamiento diferencial entre columnas. El

comportamiento de interacción no lineal entre el suelo y una estructura aporricada de dos pisos fue estudiado por [Agrawal and Hora \(2010\)](#) mediante un algoritmo computacional.

Este trabajo se plantea como una continuación de trabajos anteriores, en un caso se estudiaron en forma numérica galpones similares de diferentes dimensiones sin incluir las correas sobre el cerramiento lateral ([Fernández et al., 2011](#)). El otro estudio fue experimental modelando físicamente una nave industrial representativa de aquellas usadas con fines agrícolas o industriales mediante análisis dimensional y considerando semejanza geométrica y de material con el objeto de obtener una adecuada representación del comportamiento del prototipo incluyendo una propuesta de correa rigidizadora ([Pedrozo et al., 2016](#)). En el presente trabajo, en una primera etapa se valida el modelo numérico con el experimental planteado en el trabajo antes mencionado y posteriormente se proponen diferentes combinaciones de correas y separaciones entre ellas para cumplimentar con desplazamientos menores a los admisibles para condiciones de servicio.

En la Sección 2 se presentan aspectos generales sobre las normas aplicables y en la Sección 3 se describe el modelo físico usado para validar el modelo numérico que se desarrolla en la Sección 4. La validación del modelo numérico asociado a uno de los galpones estudiados se realiza en la Sección 5 y la Sección 6 plantea la rigidización de dicho galpón. La extensión del estudio a naves industriales con diferentes geometrías se presenta en las secciones 7 y 8.

2 CONSIDERACIONES SOBRE VALORES ADMISIBLES POR NORMAS

En la investigación actual y la precedente se considera verificar desplazamientos admisibles en el cerramiento lateral para condiciones de servicio, ya que los mismos pueden afectar el uso eficaz de la estructura (incluyendo el mal funcionamiento de máquinas o servicios), principalmente considerando el uso de las naves industriales para frigoríficos donde desplazamientos en el cerramiento lateral pueden afectar las condiciones de estanqueidad para frío. La norma argentina para Estructuras de Acero para Edificios ([CIRSOC 301, 2005](#)) no menciona valores límite para desplazamientos del revestimiento lateral. Los límites para los desplazamientos laterales de paredes flexibles se mencionan en los comentarios del Apéndice C “Serviceability considerations” de la norma norteamericana [ASCE 7 \(2010\)](#) y establecen que están en el orden de $1/600$ y $1/400$ de la altura del edificio H . Estos límites, en general, son suficientes para reducir el daño en elementos no estructurales o revestimientos. La principal actividad registrada en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén es la fruticultura en la que mantener la producción en frigoríficos es fundamental para una adecuada comercialización. Por esta razón es importante mantener los desplazamientos menores a los admisibles para asegurar la estanqueidad de las cámaras de frío. Para este uso se toma de referencia como límite el valor más riguroso correspondiente a $H/600$ y $H/400$ para otros usos.

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. 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. Las causas de asentamientos pueden ser por acción de cargas estáticas, cargas dinámicas o cambios en el contenido de humedad por fluctuaciones estacionales. La influencia de cedimientos diferenciales es mayor en estructuras con bajo grado de hiperestaticidad, como en este caso, ya que no tienen capacidad de transferir cargas.

La respuesta de los suelos es distinta según su composición, en base a diferentes normas los límites admisibles se establecen de 20 a 25 mm en suelos granulares y de 40 a 50 mm en suelos cohesivos. Se supone que la estructura metálica en estudio es hiperestática y fundada

con zapatas. Debido a que se van a establecer comparaciones con los trabajos anteriores se establece como valor límite de 25mm correspondiente a suelos granulares.

3 MODELO FÍSICO A ESCALA REDUCIDA

El modelo físico responde a una de las naves industriales modeladas por [Fernández et al. \(2011\)](#) identificada como modelo M1. La tipología estructural usada son naves industriales del tipo de las mostradas en la Figura 1 y cuyas dimensiones se presentan en la Tabla 1, donde se denomina l a la separación entre pórticos, h es la altura de columna, H es la altura de la cumbrera, y B es el ancho del pórtico.

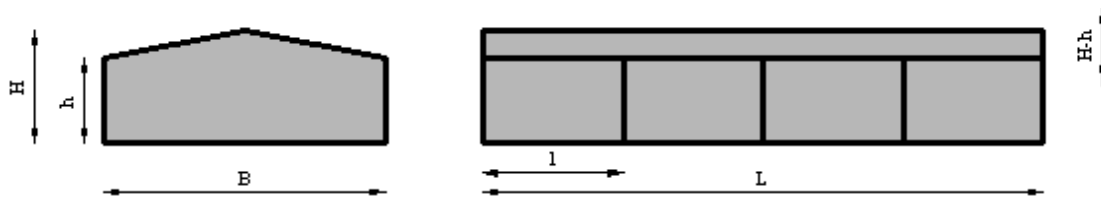


Figura 1: Nomenclatura adoptada en la descripción de los galpones a estudiar.

| Modelo | H (m) | h (m) | l (m) | B (m) |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| M1 | 6 | 4 | 5 | 15 |
| M2 | 7 | 5 | 5 | 15 |
| M3 | 8 | 6 | 5 | 15 |
| M4 | 9 | 7 | 5 | 15 |
| M5 | 10 | 8 | 5 | 15 |

Tabla 1: Dimensiones de modelos de galpones estudiados.

En el modelo ensayado (M1) se usó una correa típica de acero conformado en frío perfil C120×50×15×3.2 con una separación (s) de 0.90m y como cerramiento lateral una chapa de configuración trapezoidal T1010 ([Pedrozo et al., 2016](#)). Con el objetivo de evitar modelar la chapa trapezoidal de espesor $e=0.71\text{mm}$ con su forma real que es irregular, se calculó una sección rectangular de espesor constante equivalente obtenida igualando los momentos de inercia de la chapa real y la equivalente, tanto para el modelo físico como numérico. La configuración de la chapa de revestimiento T1010 y la equivalente se puede visualizar en la Figura 2, el espesor equivalente es de 9.6mm. En la investigación previa ([Fernández et al., 2011](#)) se observó que las deformaciones en el cerramiento lateral inducidas por el asentamiento diferencial de un apoyo se extienden por la lámina hasta el siguiente pórtico. Por esta razón, solamente se modela físicamente el sector del cerramiento lateral entre tres (3) pórticos sucesivos imponiendo un descenso en la columna central y en el modelo numérico se hace uso de la condición de simetría. La Figura 3 muestra un esquema con las dimensiones del prototipo ensayado, correspondiente al modelo identificado como M1 en la Tabla 1.

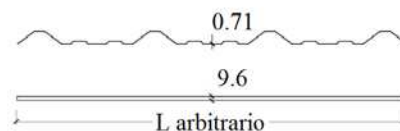


Figura 2: Equivalencia entre una chapa trapezoidal y una de sección rectangular.

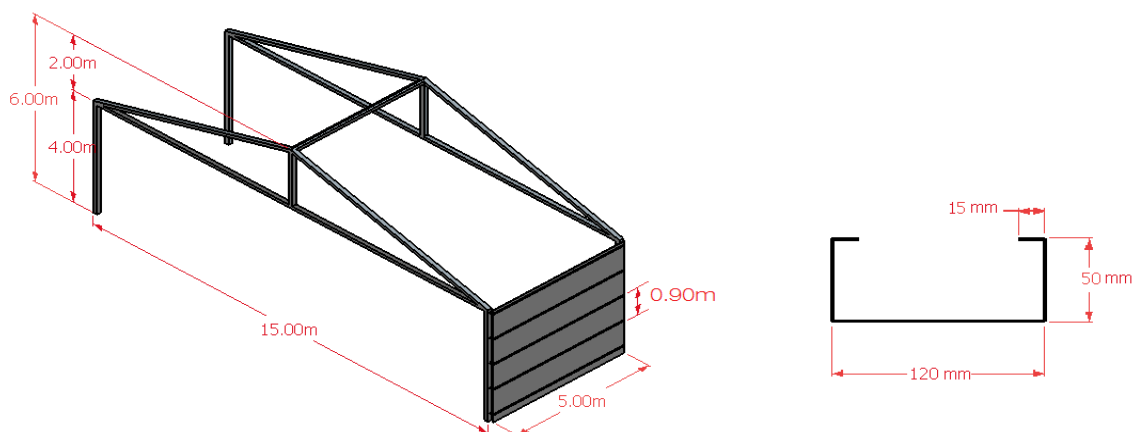


Figura 3: Geometría de prototipo correspondiente a Modelo M1 y correa.

El modelo *físico* se presenta en la Figura 4 indicando los materiales usados y dimensiones obtenidas. Para su obtención se implementó análisis dimensional estableciendo semejanza geométrica, para representar adecuadamente la geometría del prototipo, y además una semejanza del material constitutivo (Pedrozo et al., 2016). Los materiales usados son: aluminio de sección $(12 \times 12) \text{mm}^2$ para el pórtico con un módulo de elasticidad $E=70000 \text{ MPa}$ y módulo de Poisson $\mu=0.33$; acetato de espesor $0,216 \text{mm}$ para el cerramiento lateral y para las correas tipo C de dimensiones $6 \times 2 \text{mm}$. El módulo de elasticidad del acetato es $E= 2249.9 \text{ MPa}$ y su módulo de Poisson $\mu=0.4$. El modelo físico fue sometido a descensos de 0.33 , 0.66 , 1.33 y 1.66mm en la columna central (los valores correspondientes en el prototipo son 5 , 10 , 20 y 25mm) y posteriormente se midieron los desplazamientos laterales obtenidos en la placa. Se procede a modelar computacionalmente la estructura del galpón, calcular los desplazamientos y validarlos con los obtenidos del modelo físico. En la Figura 5 se muestra la placa deformada luego de imponer descenso a la columna central.

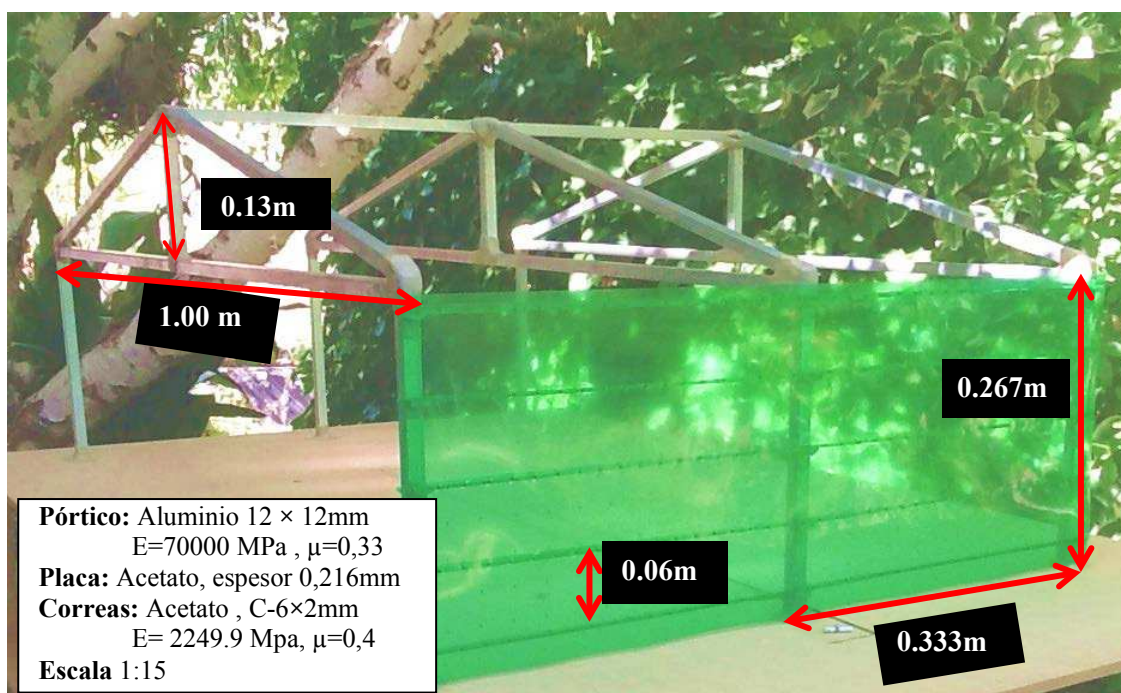


Figura 4: Modelo físico del galpón correspondiente al modelo M1 (factor de escala geométrica 1:15).

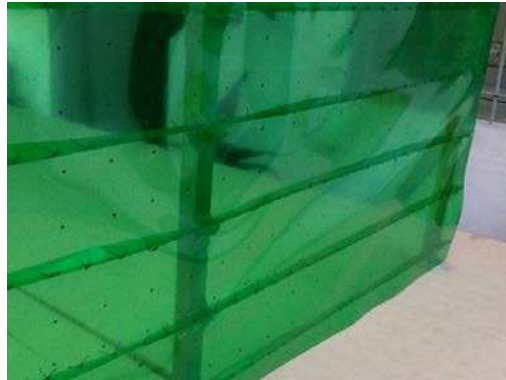


Figura 5: Modelo físico deformado

4 MODELO NUMÉRICO A ESCALA REAL

Los resultados medidos en el modelo físico son extrapolados al prototipo según la semejanza geométrica y posteriormente se compara con los obtenidos en el modelo numérico del prototipo asociado al modelo M1 mostrado en la Figura 3. La estructura se modela por elementos finitos mediante el programa de propósitos múltiples ABAQUS (2006). Se reduce al mínimo el trabajo computacional mediante el uso del concepto de simetría estructural. Se considera no linealidad geométrica para el análisis y que los desplazamientos obtenidos se extienden hasta el siguiente pórtico (Fernández et al., 2011). La modelación se realiza con elementos de cáscara rectangulares (tipo S4R5 con cinco grados de libertad por nodo) y triangulares (S3R5) de aproximación lineal, considerando tres partes principales del modelo: placa, correa y pórtico como se indica en la Figura 6(a). La correa de perfil C con dimensiones 120×50×15mm se representa con elementos de tipo cáscara también, con una separación de 0.90m y espesor de 3.2mm (Figura 6(b)).

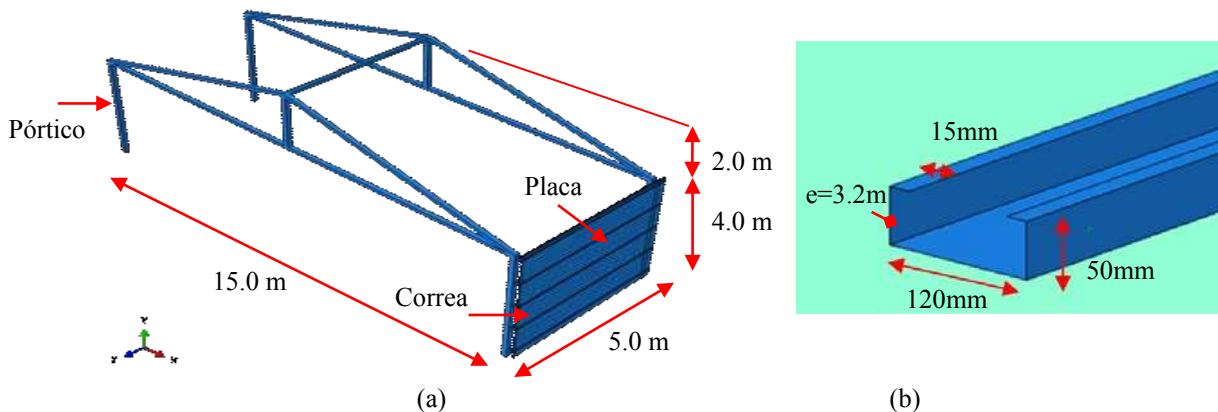


Figura 6: Modelo numérico M1, (a) Estructura final ensamblada, (b) Correa.

Se establece el contacto entre las partes ensambladas mediante uniones que permiten transmitir los esfuerzos. Los tipos de uniones son:

(a) Unión ala de la correa - columna

El ala de la correa que hace contacto con la columna (Figura 7) se une a la columna mediante soldadura que se representa con “amarre (Tie)” el cual fusiona estas dos regiones.

(b) Unión correa - placa

Las uniones típicas usadas entre correas y placa en galpones son tornillos autoperforantes, como se muestra en la Figura 8(a), estas uniones se materializaron en el modelo físico mediante hilo de coser. En el modelo numérico se escoge un tipo de unión llamado “beam”

(Figura 8(b)) en la cual se restringe todos los desplazamientos e impide los giros. Se colocan un total de 100 tornillos, distribuidos 20 unidades por correa, equiespaciados 0,26m. En la Figura 9 se muestran en color verde como quedan colocados finalmente los tornillos.

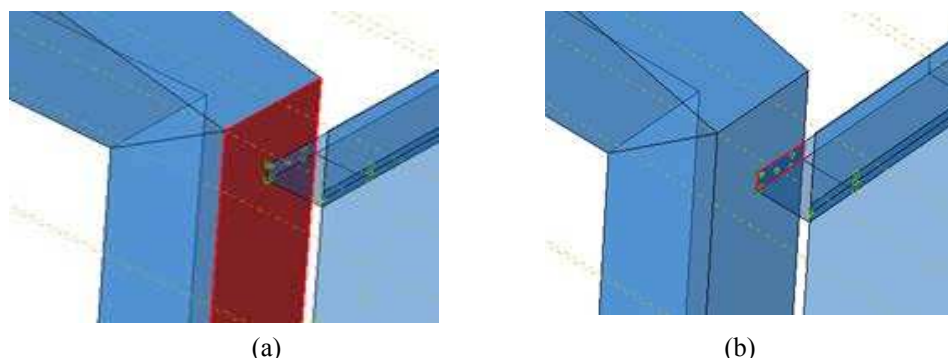


Figura 7: Unión ala de correa – columna mediante soldadura (Tipo Tie), (a) Superficie Master, (b) Superficie Slave.

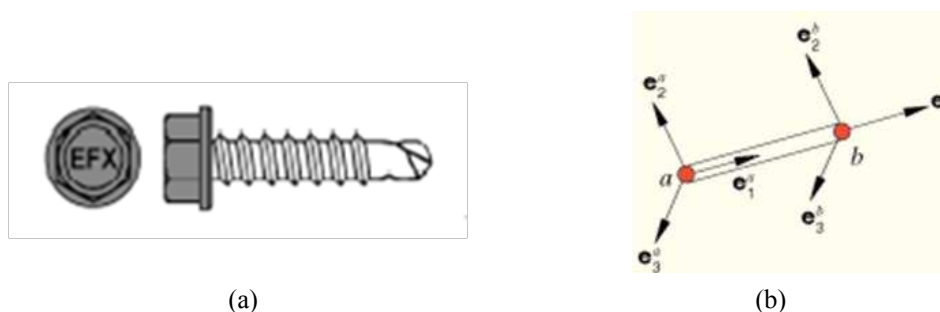


Figura 8: Uniones correa – placa, (a) Tornillo autoperforante, radio 5,5mm, (b) Unión tipo Beam.

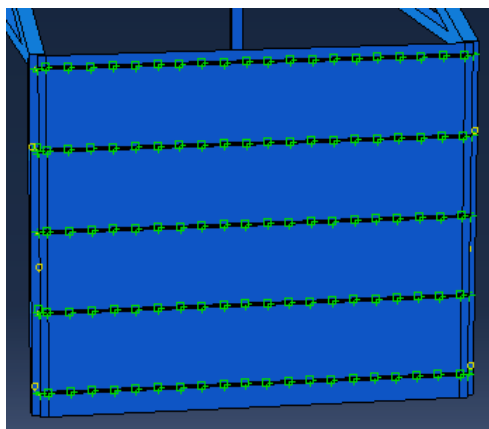


Figura 9: Tornillos colocados en unión correa - placa.

4.1 Condiciones de Contorno

Como condiciones de borde del modelo numérico se consideran tres grupos: Columnas, Simetría, y Perfil L; en la Figura 10 se muestran todas las condiciones de borde. Las indicadas como (a) y (b) corresponden a las columnas fija y móvil (que sufre el descenso impuesto), la mencionada como (c) se vincula con la condición de Simetría, y las indicadas como (d) y (e) se relacionan con la condición de los Perfiles L de apoyo de las correas y los tornillos autoperforantes respectivamente. A continuación se detallan cada una de ellas.

(a) Columnas fijas

Son las columnas que permanecen fijas en todo el proceso de descenso, son representadas restringiendo los tres grados de libertad traslacionales (U_1 , U_2 , U_3) y dos rotacionales (UR_1 ,

UR3), permitiendo el giro UR2 de la placa alrededor de la columna (Ver Fig. 10).

(b) Columna móvil

Es la columna central en la cual se va a imponer los diferentes valores de descenso con las siguientes restricciones: $U1=0$, $U3=0$ y $UR1=UR3=0$. Los descensos que se imponen en dirección vertical ($U2$) son 5, 10, 20 y 25mm. Nuevamente se permiten los giros de la placa en torno a la columna. En la Figura 10 se muestra en rojo la columna a la que se le impone el descenso.

(c) Simetría

Se consideran condiciones de simetría en correa y placa debido a que se ha observado en trabajos anteriores un comportamiento simétrico respecto de la columna que desciende. La condición de simetría se coloca en el plano de la columna central donde se impone el descenso. Esta simetría es respecto del plano medio de la estructura (Figura 4), y se aplica tanto a la placa como la correa en ese sector. En la Figura 11(a) se muestra en detalle donde se considera la condición de simetría en placa y correa.

Las condiciones de simetría se plantean según el plano que cortan al eje Z, esta condición es denominada por el software como ZSYMM. La primera letra de esta nomenclatura indica el eje al que es perpendicular el plano de simetría. En el mismo se restringen los siguientes grados de libertad: $U3=UR1=UR2=0$.

(d) Perfil L

El alma de las correas tipo C se apoya sobre un perfil L unido a la columna. Este perfil se fija a la columna previamente, y luego se fija a la correa mediante soldadura. En el modelo numérico se representa esta unión mediante la restricción de los desplazamientos en $U1$, $U2$ y $U3$ en los extremos de las correas. En la Figura 11(b) se muestra la porción de superficie del ala de la correa C unida al perfil L.

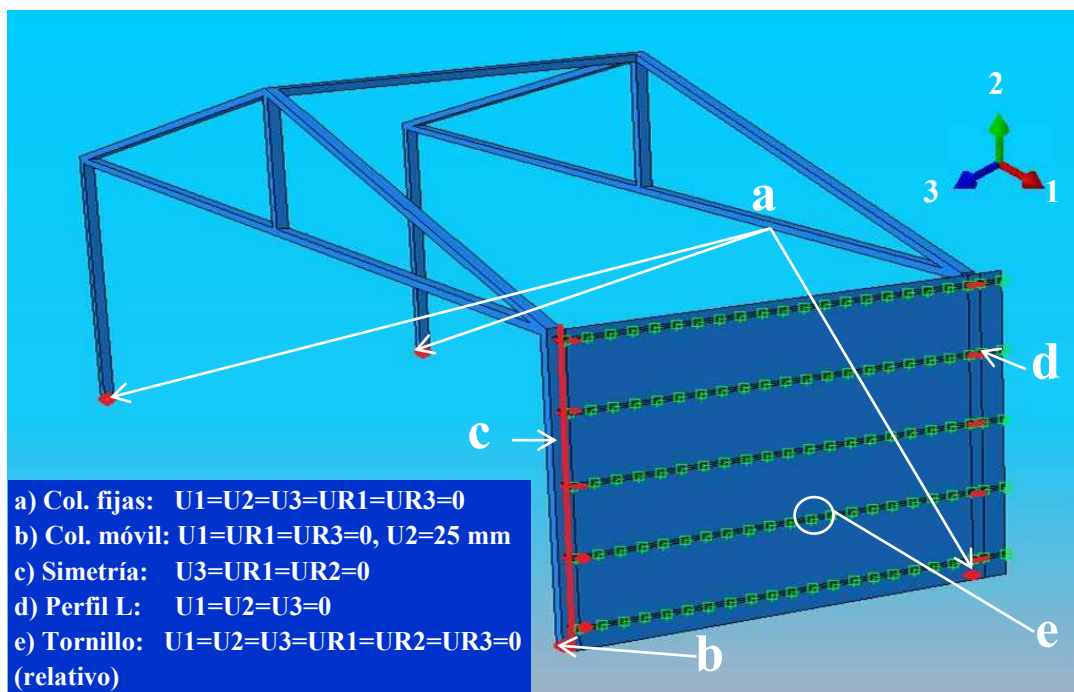


Figura 10: Condiciones de borde de la estructura.

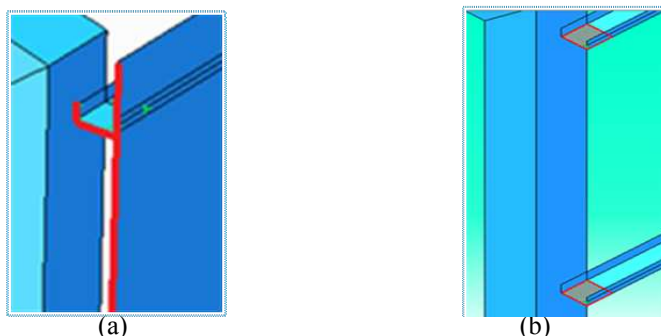


Figura 11: (a) Detalle de la condición de simetría en placa y correa, (b) Detalle de sector perfil C apoyado sobre Perfil L unido a columna.

4.2 Implementación del modelo numérico

Para encontrar el mallado óptimo se prueban distintas configuraciones, variando el tamaño de los elementos, el tipo de elementos usados (triangulares y rectangulares) y su orden de interpolación. Modelando con elementos lineales se realiza un análisis de convergencia observando que para elementos de lados menores a 0,08m se mantiene constante el valor de los desplazamientos, con un error del 2%. Con una malla algo más refinada se obtiene un error relativo menor a un 1% y una buena aproximación con el modelo físico, este valor del error relativo se cree suficiente ya que el destino de este estudio es analizar las condiciones de servicio de una nave industrial, lo cual no implica riesgo alguno para la vida humana. Los elementos usados para el pórtico son de 0,15m rectangulares S4R y triangulares S3 de aproximación lineal, y triangulares de aproximación lineal de cáscara S3 para la placa y correa con un tamaño de 0,08m aproximadamente, con este tamaño de elementos se logra colocar tres elementos entre tornillos, la cantidad de elementos necesarios fue superior a 33200. Previo al mallado de la estructura, particularmente en este modelo de nave industrial es necesario realizar particiones en las piezas antes de mallar debido a la necesidad de colocar las correas y tornillos en lugares particulares con continuidad de la malla.

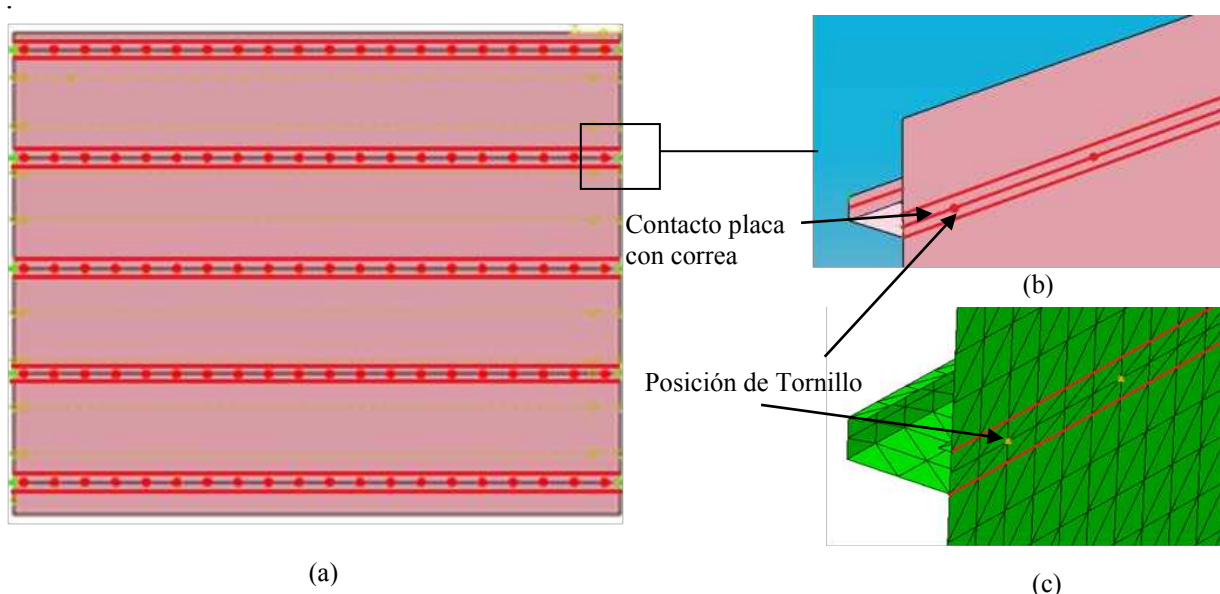


Figura 12: Particiones en placa, (a) Vista total, (b) Vista en perspectiva de las particiones, (c) Detalle con elementos triangulares.

Se realizan particiones en la placa para tener en cuenta cambios en la forma en que las partes interactúan entre sí y se plantea un mallado particular y refinado para cada parte considerando sus puntos particulares. La Figura 12(a) muestra una partición longitudinal por el eje que une los tornillos (Fig. 12 (b)) y a su vez este eje se divide en la posición exacta de cada tornillo; luego se realizan otras dos particiones más en la posición en que la placa hace contacto con las correas, en la Figura 12(c) se muestra en detalle los elementos. Para las correas se tiene en cuenta la influencia de los tornillos y del perfil L sobre el cual se apoya, por lo tanto se realizan particiones en el contacto con los perfiles y una partición longitudinal por el eje por donde pasa los tornillos al igual que en la placa, como se indica en la Figura 13. En el pórtico se plantean particiones en la altura de las correas y se consideran elementos rectangulares y triangulares de acuerdo a la geometría del pórtico, el mallado final de la estructura se muestra en la Figura 14.

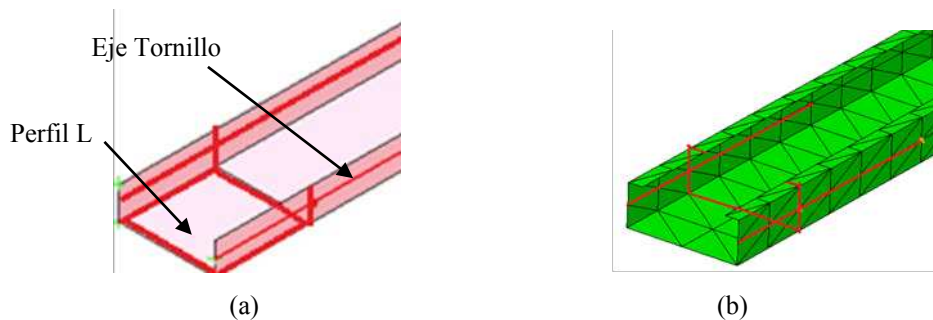


Figura 13: (a) Particiones en la correa. (b)Mallado final de la correa.

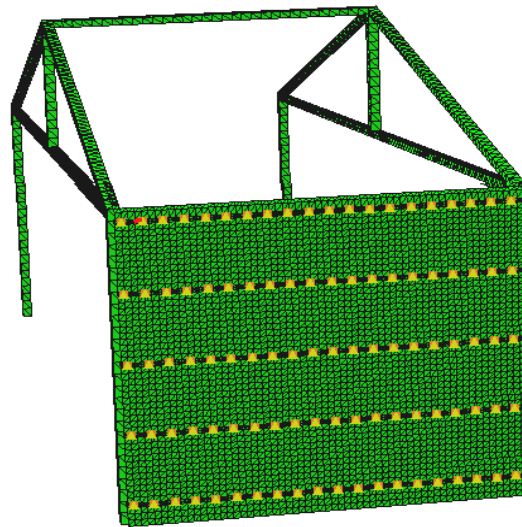


Figura 14: Mallado final del galpón en modelo numérico.

5 VALIDACION DEL MODELO NUMÉRICO CON H=6m (MODELO M1)

El estudio se realiza mediante un análisis estático no lineal geométrico, considerando como material constitutivo acero con módulo de elasticidad $E=210000\text{MPa}$ y un módulo de Poisson $\mu=0.3$. En una primera etapa se resuelve la estructura correspondiente al modelo M1 con los mismos descensos que el modelo físico para 5, 10, 20 y 25mm para validar el modelo computacional. Posteriormente, se modifica el tamaño de las correas usadas según la Figura 15 y la separación entre las mismas. En ambos modelos se disponen correas C1 separadas 0.90m, resultando un total de cinco correas en la altura de la placa del cerramiento lateral.

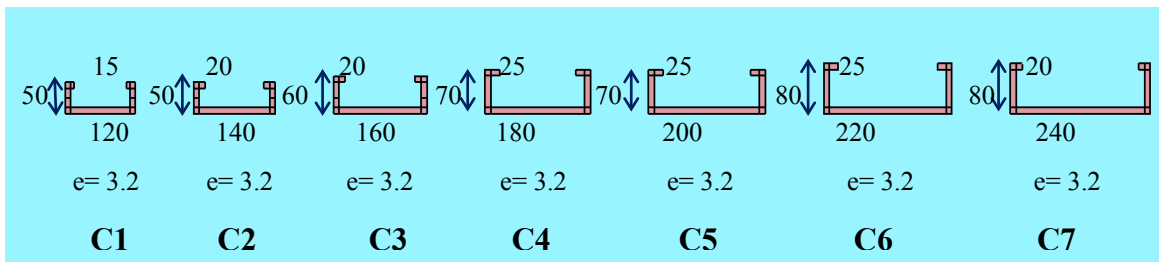


Figura 15: Dimensiones de correas utilizadas (mm), espesor 3.2mm.

Las simulaciones se realizan para descensos de apoyo impuestos en la base de la columna central, que se encuentra en el lado izquierdo de la Figura 16; se modela solamente la mitad derecha de la estructura entre tres pórticos consecutivos. Las aproximaciones para el descenso de 20 y 25mm mostraron buen acuerdo, en la Figura 16(a) y (b) se muestra la comparación del modelo experimental y numérico para el descenso de 25mm, en el cual se obtienen resultados satisfactorios con un error del 5%. La Figura 16 muestra un patrón de bandas de corte tanto en el modelo experimental como en el numérico que se alternan hacia el interior y exterior, los máximos y mínimos tienen un buen acuerdo. En el modelo numérico las deformaciones se extienden por toda la placa mientras que en el experimental están más concentradas en una zona próxima a donde se impone el descenso del apoyo.

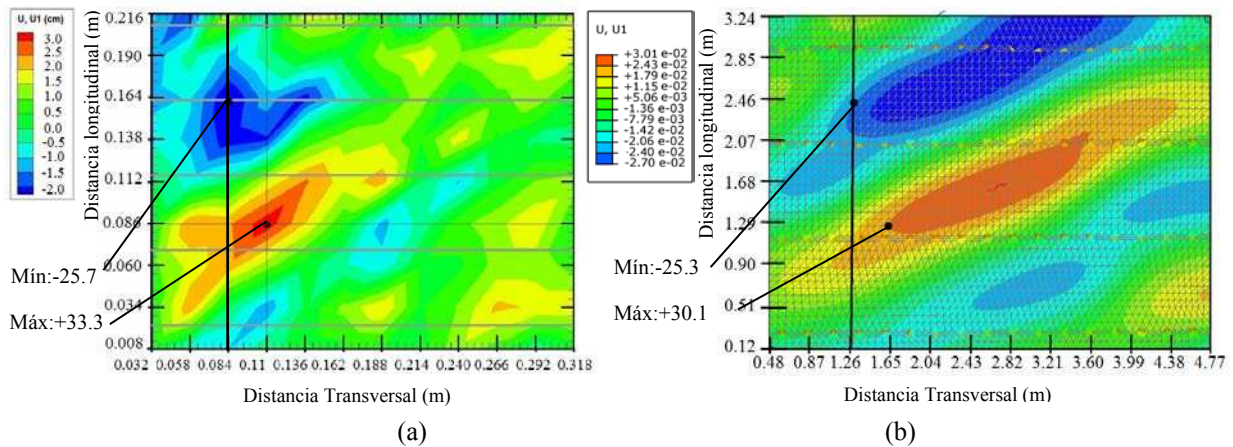


Figura 16: Desplazamientos Modelo M1 (mm), (a) Modelo experimental, (b) Modelo numérico.

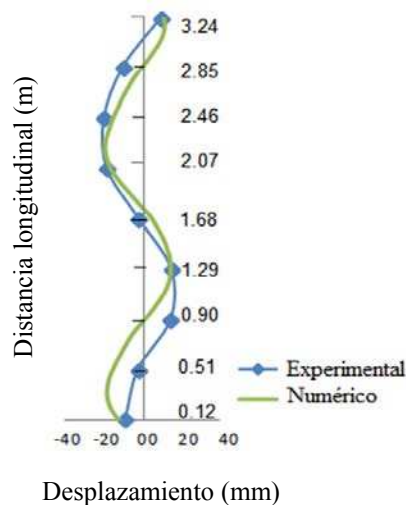


Figura 17: Desplazamientos fuera del plano en corte indicado en Figura 16 para Modelo M1 (mm).

Comparando la Figura 16 (a) y (b) se observa que se forma la misma cantidad de bandas de corte, tanto bandas de hundimiento como las que sobresalen al exterior. Estas bandas tienen una inclinación respecto a la horizontal semejante entre el modelo numérico y el modelo.

El modelo M1 presenta una altura de cumbrera (H) de 6m por lo que el desplazamiento lateral admisible resulta de valor 15mm (H/400) o 10mm (H/600), según las recomendaciones de la norma norteamericana [ASCE 7 \(2010\)](#). Los valores obtenidos para un descenso de suelo de 25mm y mostrados en la Figura 16 varían entre 33mm y 25.7mm hacia afuera y adentro de la placa respectivamente en el modelo físico y son algo menores en el modelo numérico. Cualquiera de los valores considerados es superior a los límites admisibles por lo que es necesario plantear una rigidización de la placa con correas de mayor inercia o correas dispuestas con una menor separación entre ellas.

Los modelos que siguen a continuación en el proceso de rigidización consideran en la modelación la placa del techo en la parte superior del galpón, que es una condición de borde que influye en los resultados. En el modelo anterior no se tuvo en cuenta porque el modelo físico no lo incluía.

6 RIGIDIZACIÓN DE MODELO M1

6.1 Influencia de la rigidez de correas

Una vez validados los desplazamientos se procede a aumentar las dimensiones de correas como primer paso, con el fin de analizar cómo el tamaño de las mismas influye en los desplazamientos laterales. En cada simulación se varía el tamaño de correa tipo C manteniendo la separación de 0,9m, se usan siete tamaños diferentes como se muestra en la Figura 15 donde se indica las dimensiones en mm y se ordenan de menor a mayor llamando a la correa de menor tamaño C1 y a la de mayor tamaño C7. Los tamaños de los perfiles C que se usan son los indicados en la norma [IRAM IAS U500-206-3\(2006\)](#).

Las simulaciones se realizan imponiendo el máximo descenso en la columna, que es de 25mm, debido a que es el estado más crítico considerando el asentamiento diferencial máximo permitido para suelos arenosos. Imponiendo este descenso máximo, quedan verificados los desplazamientos fuera del plano que se obtendrían para los descensos más pequeños, por ejemplo para 5mm, 10mm y 20mm.

En las figuras 18 a 21 se muestran los resultados de las simulaciones llevadas a cabo para cada tipo de correa. Se puede observar la evolución de los desplazamientos a medida que aumenta la inercia de las correas.

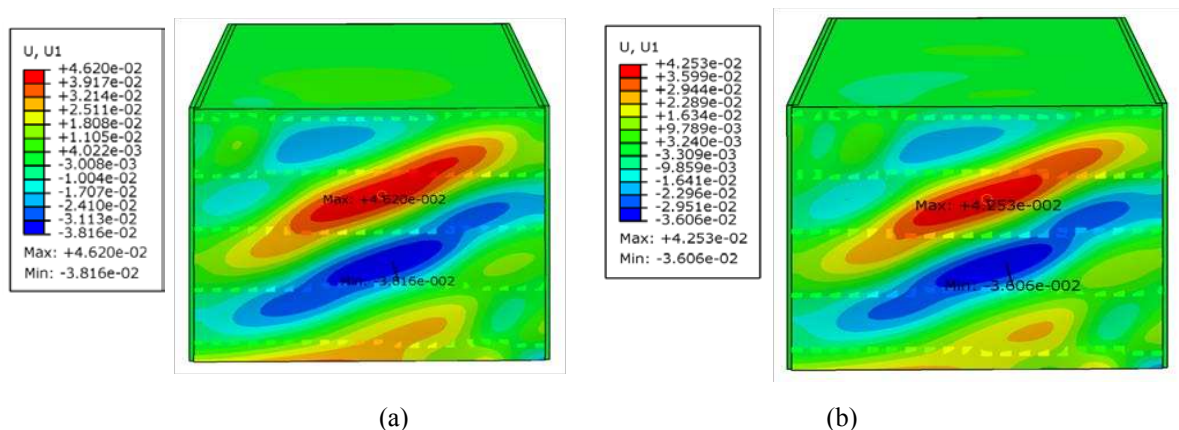


Figura 18: Modelo M1 con correas separadas 0.9m, desplazamientos en (m), (a) Tipo C1, (b) Tipo C2.

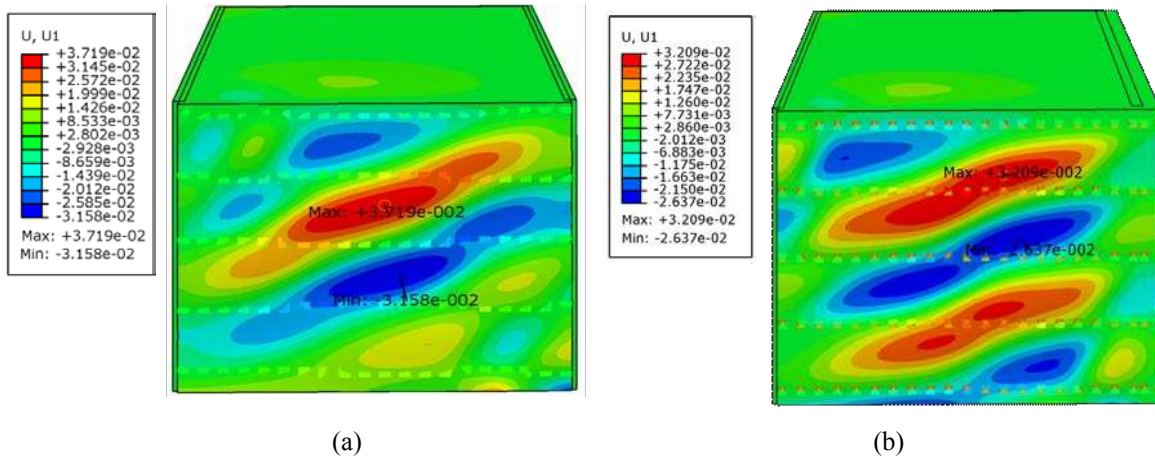


Figura 19: Modelo M1 con correas separadas 0.9m, desplazamientos en (m), (a) Tipo C3, (b) Tipo C4.

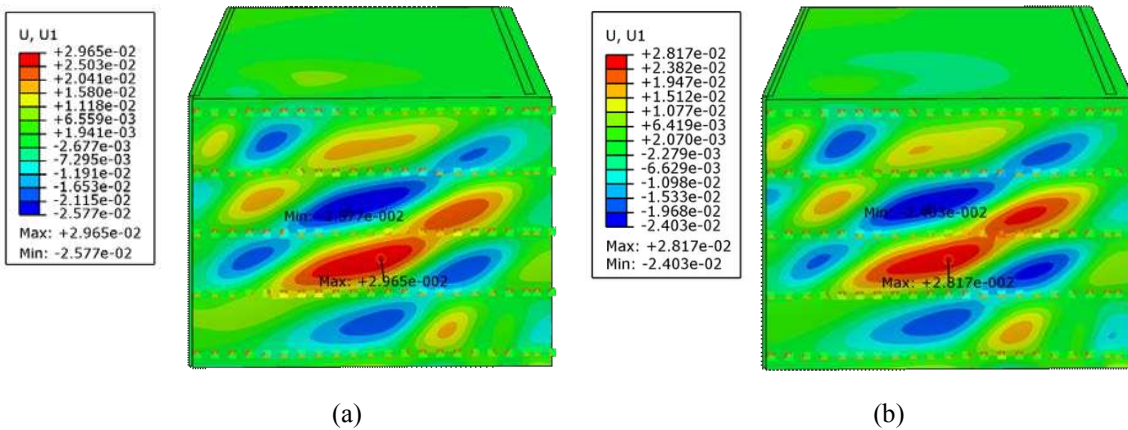


Figura 20: Modelo M1 con correas separadas 0.9m, desplazamientos en (m), (a) Tipo C5, (b) Tipo C6.

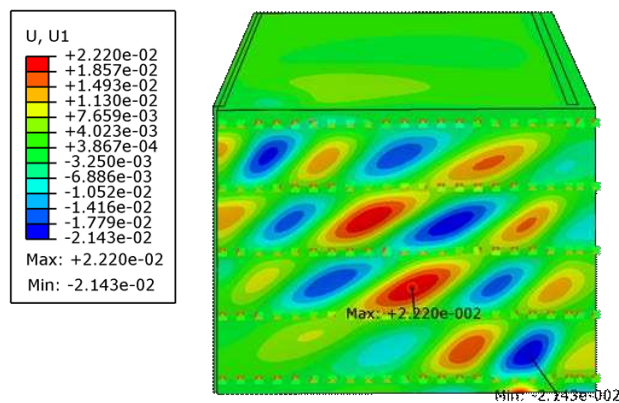


Figura 21: Modelo M1 con correas separadas 0.9m, desplazamientos en (m), Tipo C7.

Observando los resultados se encuentra que los desplazamientos laterales en la placa se reducen a medida que aumenta la rigidez de las correas. En todos los casos se observa un patrón de bandas de corte con desplazamientos que se alternan hacia adentro y afuera de la placa. A medida que aumenta la inercia de las correas, estas bandas se interrumpen por la presencia de las correas y los valores de desplazamientos máximos y mínimos se concentran en el sector entre correas.

Para las correas C2 y C3 (figuras 18(b) y 19(a)) no hay una gran disminución de los desplazamientos, estos se reducen hasta un 13% con respecto a valores máximos obtenidos

para la correa C1 (Figura 18(a)). A partir de la correa C4 se encuentran disminuciones significativas de 30% llegando hasta 47% para la correa C7, el cual tiene un valor correspondiente entre +22,2mm y -21,4mm. Este valor es la mitad que el obtenido inicialmente, pero aun superan el admisible de 15mm, o el más restrictivo de 10mm.

En la Tabla 2 se resumen los valores de desplazamiento del Modelo M1 con las diferentes correas usadas, donde en la última columna se muestran los porcentajes de reducciones de desplazamientos respecto a correa C1.

| Tipo Correas | Cantidad correas | Desplazamiento [mm] | | Diferencia respecto a C1 |
|--------------|------------------|---------------------|-------|--------------------------|
| C1 | 5 | 45.2 | -37.4 | |
| C2 | 5 | 44.0 | -36.5 | -3% |
| C3 | 5 | 38.1 | -33.4 | -13% |
| C4 | 5 | 32.1 | -26.3 | -29% |
| C5 | 5 | 29.6 | -25.7 | -33% |
| C6 | 5 | 28.2 | -24.0 | -37% |
| C7 | 5 | 22.2 | -21.4 | -47% |

Tabla 2: Desplazamientos fuera del plano para el Modelo M1.

Se observa una disminución significativa de los desplazamientos pero esto no alcanza para respetar los límites fijados por la norma, por lo tanto se procede a disminuir la separación de las correas, hasta encontrar valores de desplazamiento aceptable.

6.2 Influencia de separación entre correas

Al disponer 6 correas tipo C1 con una separación de 0,7m en el modelo M1, los desplazamientos no se reducen significativamente (Figura 22(a)), por esta razón para las correas C2 a C7 se procede a agregar dos unidades en la placa, teniendo un total de siete correas con una separación de 0,6m.

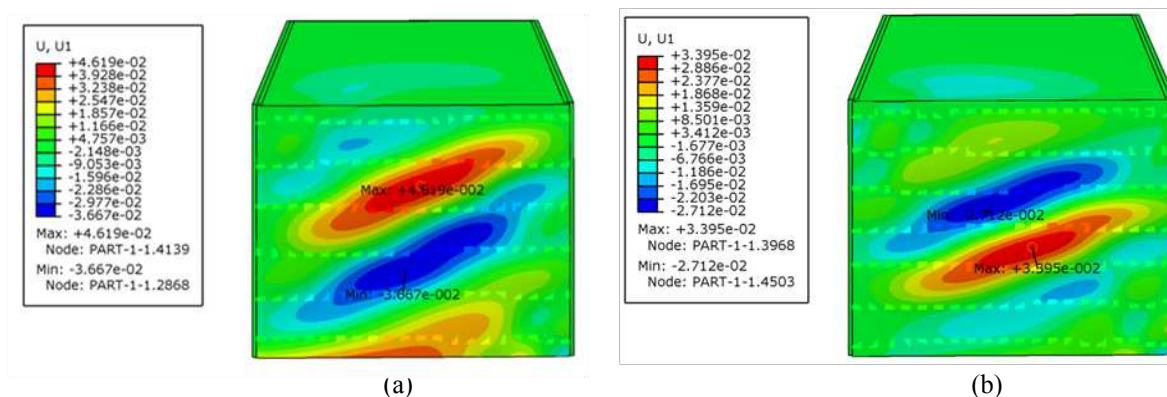


Figura 22: Modelo M1 con correas, desplazamientos en (m), (a) Tipo C1 separadas 0.7m, (b) Tipo C2 separadas 0.6m.

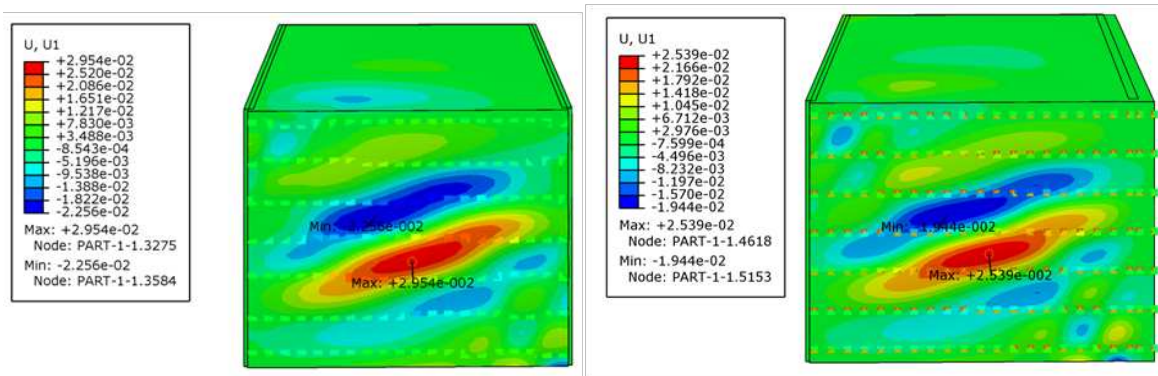


Figura 23: Modelo M1 con correas separadas 0.6m, desplazamientos en (m), (a) Tipo C3, (b) Tipo C4.

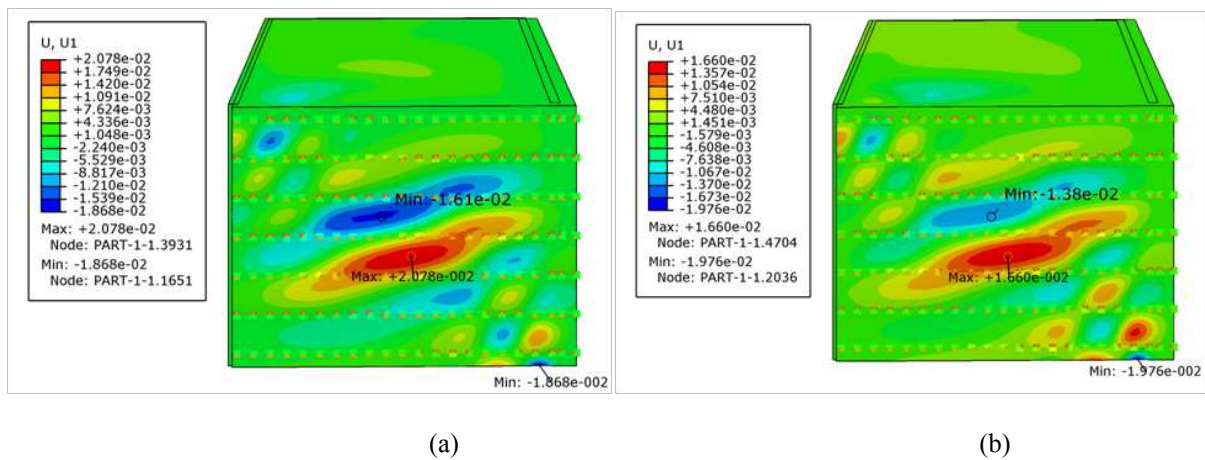


Figura 24: Modelo M1 con correas separadas 0.6m, desplazamientos en (m), (a) Tipo C5, (b) Tipo C6.

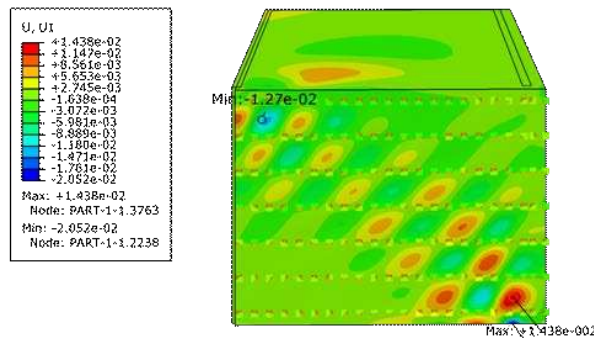


Figura 25: Modelo M1 con correas separadas 0.6m, desplazamientos en (m), Tipo C7.

Los resultados muestran que la disminución en la separación de las correas reducen los desplazamientos, y se cortan las bandas.

Para las correas C2 hasta C6 con separación de 0.6m (Figuras 22(b) a 25), se observa notoriamente la formación de mayor número de bandas, y su interrupción con la correas, especialmente para la correa C7 que es la de mayor tamaño. Hay una completa interrupción de las bandas de corte a la altura de las correas debido a la gran inercia y las bandas tienen un ángulo de inclinación de 30° aproximadamente.

Con respecto a los desplazamientos, para el modelo C1 (Figura 22(a)) en el que las correas están separadas 0,7m se obtuvieron valores entre +34.7mm y - 30.5mm, es decir se redujo en 21% con respecto al modelo C1 con 0.9 m de separación (Figura 18(a)), estos valores son

todavía muy superiores a los admisibles.

Para las correas C2 a C5 colocadas con una separación de 0.6m, los resultados de desplazamientos comienzan a reducir hasta un 56% para el caso de correa C5, como se observa en la Tabla 3, pero en todos los casos los valores son mayores a los admisibles. Para los correspondientes a correas C6 y C7 (Fig. 24 (a) y (b)) los resultados se redujeron entre 63% y 67%, obteniendo como valor mínimo de 12.7mm para el caso de C7 (ver Tabla 3), para estos dos tipos de correas y con esta configuración se verifica los resultados con el valor admisible menos restrictivo.

| Tipo de correa | Separación [m] | Desplazamientos [mm] | | Diferencia respecto a C1(s=0.9m) |
|----------------|----------------|----------------------|-------|----------------------------------|
| C1 | 0.7 | 34.7 | -30.5 | -21% |
| C2 | 0.6 | 37.8 | -22.4 | -28% |
| C3 | 0.6 | 32.1 | -23.0 | -34% |
| C4 | 0.6 | 25.3 | -19.4 | -46% |
| C5 | 0.6 | 20.7 | -16.1 | -56% |
| C6 | 0.6 | 16.6 | -13.8 | -63% |
| C7 | 0.6 | 14.3 | -12.7 | -67% |

Tabla 3: Desplazamientos para Modelo 1 con correas con diferente separación.

Considerando como valor admisible el límite menos riguroso de 15mm (ASCE, 2010) se verifican los desplazamientos laterales para C6 y C7, pero estas dimensiones de correas no son de uso práctico en las construcciones de galpones, por lo tanto se propone el uso de C5 el cual ha dado valores de desplazamientos +20.7mm y -16.1mm con una separación de 0.6m.

Como un análisis adicional se realizaron simulaciones con un tipo de chapa de mayor espesor para estudiar el efecto del tipo de chapa usada en el cerramiento sobre el valor de los desplazamientos. Con ese fin se considera el uso de chapas T980 con un espesor de 0,71mm, esta chapa presenta una mayor inercia a la de la chapa usada anteriormente. Para la modelación se calcula una sección representativa de la chapa T980 con espesor constante, obtenido igualando los momentos de inercia. Los cálculos dan un valor de espesor de 10.45mm para la chapa equivalente.

Los resultados muestran un similar comportamiento en los modelos estudiados anteriormente, es decir que el espesor de la placa no influye en el valor de desplazamiento ni en el comportamiento del modelo. La diferencia de valores máximos de desplazamiento es del orden del 5%, lo cual no influye en los resultados. Por esta razón se continúa el análisis con chapa T1010.

7 RESULTADOS CON H=10m (MODELO 5)

Considerando el modelo M5 de la Tabla 1, se realiza una evaluación similar a la del modelo M1. Este modelo tiene el doble de altura de la placa de cerramiento que el modelo M1, y se aplica la misma metodología de cálculo con el fin de ampliar las recomendaciones.

En un principio se modela este galpón considerando una estructura secundaria (correas), con la configuración inicial de correas de tipo C1, separadas a 0.9m y seguidamente se varían las características de las correas hasta encontrar una configuración para la cual los desplazamientos resultantes sean menores a los admisibles para un descenso de apoyos de

25mm. Considerando como límite de desplazamiento para modelo M5 el valor $H/400$ y como en este caso particular se toma $H=10m$, entonces el valor del límite resulta 25mm.

En la Tabla 4 se resumen los desplazamientos máximos y mínimos obtenidos para el modelo M5 con los distintos tipos de correa, además se muestra el porcentaje de disminución de los mismos a medida que aumentan los tamaños de correas comparando con los valores obtenidos para C1.

Se puede observar en la Tabla 4 que a partir de la correa C4 los desplazamientos se reducen en un 40%, con valores de +26.9mm y -25.3mm y resultan próximos al límite permitido de 25mm, es decir que para las correas C4, C5, C6 y C7 se verifican las deformaciones permitidas. A partir de C2, con una cantidad de 16 unidades separadas a 0.5m, hasta la correa C5 con la misma separación se verifican los desplazamientos admisibles.

| Tipo de Correa | Separación [m] | Desplazamientos [mm] | | Disminución respecto a C1 | |
|----------------|----------------|----------------------|---------|---------------------------|---------|
| | | Máximos | Mínimos | Máximos | Mínimos |
| C1 | 0.9 | 43.8 | -44.8 | Máximos | Mínimos |
| C2 | 0.9 | 41.9 | -35.9 | 4.38% | 19.82% |
| C3 | 0.9 | 34.9 | -31.1 | 20.39% | 30.60% |
| C4 | 0.9 | 26.9 | -25.3 | 38.64% | 43.54% |
| C5 | 0.9 | 24.5 | -27.1 | 44.11% | 39.52% |
| C6 | 0.9 | 25.4 | -22.2 | 42.06% | 50.46% |
| C7 | 0.9 | 24.2 | -23.4 | 44.80% | 47.78% |
| C1 | 0.5 | 36.4 | -30.5 | 16.97% | 31.93% |
| C2 | 0.5 | 28.6 | -24.5 | 34.76% | 45.32% |
| C3 | 0.5 | 23.5 | -20.6 | 46.40% | 54.03% |
| C4 | 0.5 | 15.9 | -15.2 | 63.73% | 66.08% |
| C5 | 0.5 | 14.2 | -11.9 | 67.61% | 73.44% |
| C6 | 0.6 | 13.66 | -13.7 | 68.84% | 69.43% |
| C7 | 0.6 | 11.4 | -13.0 | 74.00% | 70.99% |

Tabla 4: Desplazamientos para Modelo 5 con diferentes correas y separación variable.

Los resultados del modelo M5 con las correas que verifican los valores admisibles de deformaciones se muestran en las figuras 26 a 29, los valores de desplazamientos están entre +25mm y -25mm y se observa generalmente una disminución del ángulo de las bandas, llegando a ser menores a 20° a medida que disminuye la separación. Las bandas se van concentrando entre las correas a medida que aumenta su rigidez, en el caso de C7 con 13 unidades por placa las bandas se interrumpen completamente a la altura de las correas, como se puede observar en la Figura 29(b).

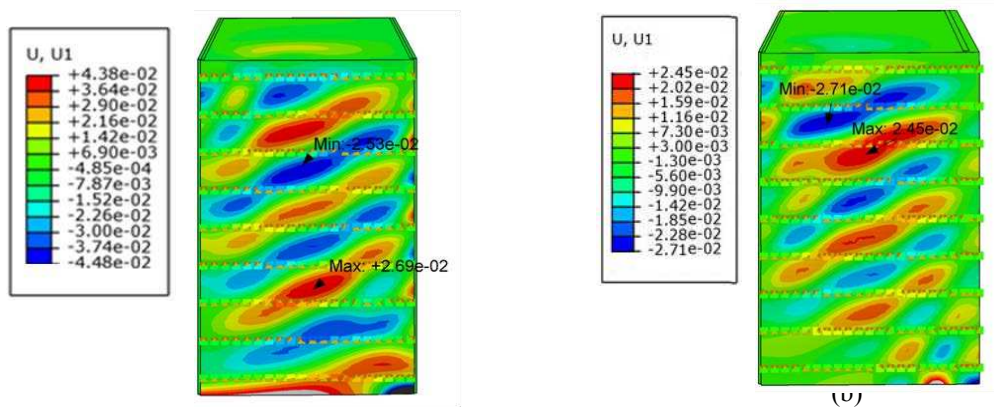


Figura 26: Modelo M5 con correas separadas 0.9m, desplazamientos en (m), (a) Tipo C4, (b) Tipo C5.

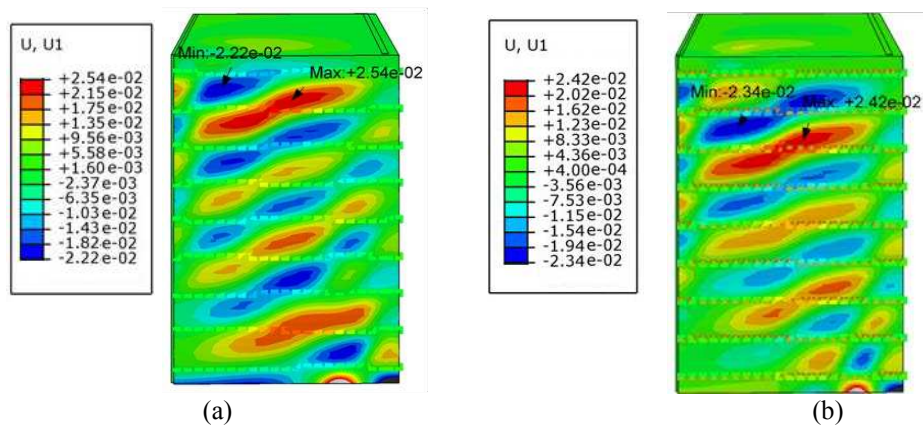


Figura 27: Modelo M5 con correas separadas 0.9m, desplazamientos en (m), (a) Tipo C6, (b) Tipo C7.

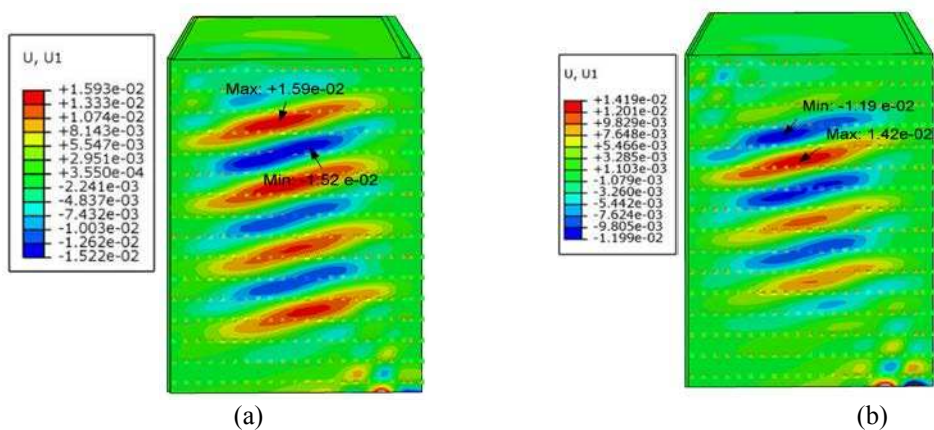


Figura 28: Modelo M5 con correas separadas 0.5m, desplazamientos en (m), (a) Tipo C4, (b) Tipo C5.

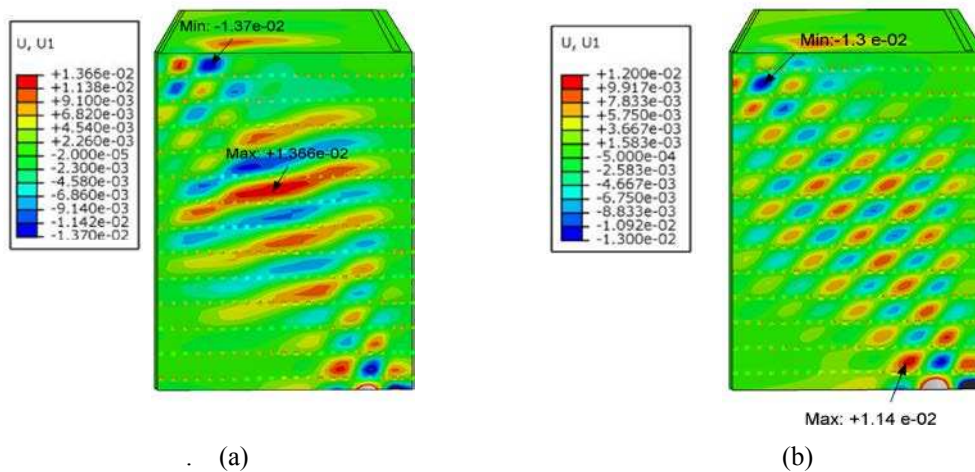


Figura 29: Modelo M5 con correas separadas 0.6m, desplazamientos en (m), (a) Tipo C6, (b) Tipo C7

Comparando el modelo de menor altura M1 ya estudiado con este modelo de mayor altura M5, se observa que la distancia de separación de las correas para la cual verifica los valores permitidos para el primer caso es 0.6m usando correa C5, y para el segundo caso es 0.9m con correa C4.

La altura del edificio influye en el comportamiento del modelo, a medida que aumenta la altura del galpón, disminuye el tamaño requerido de correa y la separación requerida es mayor, además aumenta el límite admisible para el de mayor altura.

8 RESULTADOS CON H=8m (MODELO 3)

El modelo M3 presenta una altura de placa lateral $h=6m$ y una altura total $H=8m$, como se presenta en la Tabla 1. Se analiza este modelo con igual metodología a la utilizada con los modelos anteriores, considerando las mismas separaciones entre correas y sus dimensiones, con el objeto de verificar que si los desplazamientos máximos obtenidos sean menores a los admisibles.

Se presenta la evaluación del modelo M3 con una separación de correas de 0.6m y correa tipo C4, según las recomendaciones anteriores. Los desplazamientos obtenidos se muestran en la Figura 30, exhibiendo un comportamiento de bandas de corte concentradas entre correas como en los modelos anteriores.

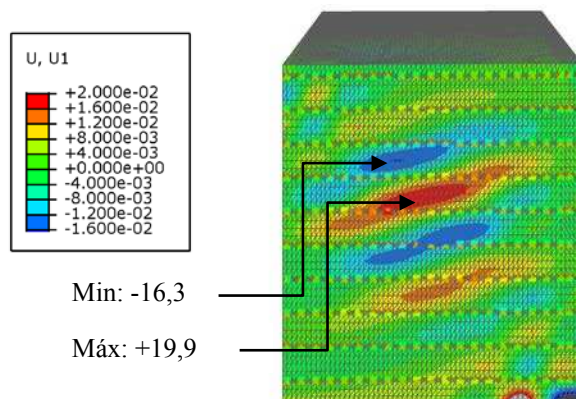


Figura 30: Modelo M3 con correas separadas 0.6m, desplazamientos en (m), Tipo C4.

El límite de desplazamiento es $H/400$, por lo que resulta un valor límite de desplazamiento lateral de 20mm. Los valores máximos de desplazamientos encontrados son +19,9mm y -16.3mm, por lo que se puede confirmar que los valores de desplazamientos están dentro de lo permitido.

9 CONCLUSIONES

En este trabajo se estudian los desplazamientos fuera del plano de cerramiento lateral flexible de naves industriales metálicas, bajo el efecto de descenso de uno de sus apoyos. El estudio se implementa mediante una modelación por elementos finitos de la estructura realizando un análisis no lineal geométrico. En el análisis se tiene en cuenta la caracterización de tipos de cerramientos, tipos y propiedades de correas metálicas, distribución más usual de correas, límites admisibles impuestos por las normas para los desplazamientos laterales, y también valores de asentamiento diferencial admisible para los suelos. La metodología numérica se valida con resultados de una modelación física de uno de los modelos estudiados realizado en un trabajo previo mediante análisis dimensional. Con el objeto de reducir los desplazamientos laterales de la placa de cerramiento lateral se plantea aumentar la rigidización de la placa mediante el aumento de la inercia de las correas y la disminución de la separación entre las mismas. Se generaliza el estudio a naves industriales de diferentes geometrías.

Se puede delinear las siguientes conclusiones de la primera etapa de validación:

- La modelización numérica del galpón considerando la estructura secundaria responde al comportamiento del modelo físico al imponerle el mecanismo de descenso.
- La formación de bandas de corte en el modelo físico no es regular atravesando toda la placa como en el modelo computacional, probablemente debido a la gran flexibilidad del acetato en el ensayo.
- Los desplazamientos máximos en el cerramiento se presentan en la parte media entre correas.
- Comparando con el modelo numérico sin correas (Fernández et al., 2011) se produce una importante reducción de los corrimientos y mayor uniformidad de la bandas de corte.
- Los resultados muestran, una importante reducción de los desplazamientos fuera del plano del cerramiento lateral flexible de la nave industrial al considerar el uso de la estructura secundaria.

De la etapa de rigidización aplicado a los modelos estudiados se concluye que:

- Las bandas de corte se interrumpen entre correas a medida que aumenta la rigidez y disminuye la separación de las mismas.
- Al aumentar la inercia de las correas se reducen significativamente los desplazamientos fuera del plano. La presencia de correas, le otorga una menor flexibilidad a las placas laterales.
- El aumento de espesor de la placa no afecta los valores de desplazamiento, por lo que se recomienda usar el espesor de placa 0.5mm como es lo usual en la práctica.
- Al aumentar la altura de la placa de cerramiento lateral, se observa que los valores de desplazamientos son muy similares a los obtenidos en el modelo de menor altura.
- En comparación con el modelo sin correas, los desplazamientos se reducen a la mitad debido a la presencia de correas.
- Para llevar los desplazamientos a valores menores a los admisibles se requiere el uso de correas tipo C4 o mayores con una longitud de alma de 180mm y separadas 0.6m a 0.7m.
- El modelo de menor altura requiere como mínimo correa tipo C5 separadas 0.6m mientras que el modelo de mayor altura puede usar correas tipo C4 separadas 0.9m o de tipo C2 con una separación de 0.5m.

- Se requiere mayor separación entre correas y menor tamaño de correa para el galpón de mayor altura que para el de menor altura.

Agradecimientos: Este trabajo fue realizado con subsidios de Universidad Nacional del Comahue, Universidad Nacional de Córdoba y CONICET.

REFERENCIAS

- ABAQUS, User's Manuals, Version 6.3, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. Rhode Island, 2006.
- Agrawal, R. and Hora, M.S., Effect of differential settlements on nonlinear interaction behaviour of plane frame-soil system. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(7):75-87, 2010.
- ASCE, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers, 2010.
- Cao, Q.S. and Zhao Y., Buckling strength of cylindrical steel tanks under harmonic settlement. *Thin-Walled Structures*, 48(6):391-400, 2010.
- CIRSOC 301, *Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Edificios*. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Buenos Aires, 2005.
- Darmawan, M.S., A case-study of structural assessment of steel structure subjected to differential settlement of foundation. *1st Int. Conf. on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering*, Solo, Indonesia, 312-320, 2009.
- Fernández, S., Jaca, R.C. y Godoy, L.A., Descenso de apoyos en el revestimiento lateral de naves industriales. *Mecánica Computacional*, 30: 857–874, 2011.
- Fernández, S., Jaca, R.C. and Godoy, L.A., Behavior of wall panels in industrial buildings caused by differential settlements. *Structural Engineering and Mechanics*, 56(3): 1-18, 2015.
- Godoy, L.A. and Sosa, E.M., Deflections of thin-walled storage tanks with roof due to localized support settlement. *Proc. 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.
- Gong, J., Cui, W. and Zeng, S., Buckling analysis of large scale oil tanks with a conical roof subjected to harmonic settlement. *Thin-Walled Structures*, 52(7):143-148, 2012.
- Gong, J., Tao, J., Zhao, J., Zeng, S. and Jin, T., Buckling analysis of open top tanks subjected to harmonic settlement. *Thin-Walled Structures*, 63, 37-43, 2013.
- Gong, J., Tao, J., Zhao, J., Zeng, S. and Jin T., Effect of top stiffening rings of open top tanks on critical harmonic settlement. *Thin-Walled Structures*, 65:62-71, 2013.
- IRAM IAS U500-206-3, *Perfiles abiertos de acero conformados en frío, para usos generales y estructurales*. Perfil C. 2006.
- Jonaidi, M. and Ansourian, P., Harmonic settlement effects on uniform and tapered tank shells. *Thin-Walled Structures*, 31:237-255, 1998.
- Jonaidi, M., Chaaya, M. and Ansourian, P., Cylindrical shells subjected to vertical edge deformation and internal pressure. *II International Conference on Thin-Walled Structures*, Singapore, 613–620, 1998.
- 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.
- Pedrozo, V., Jaca, R.C. y Godoy, L.A., Efecto del Descenso de Apoyos sobre el Revestimiento

Lateral de Naves Industriales Metálicas con Rigidizadores. 24 Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural 24 JAIE, Buenos Aires, Argentina, 2016.

Zhao, Y., Cao, Q.S. and Xie, X.Y., Floating roof steel tanks under harmonic settlement: FE parametric study and design criterion. *Journal of Zhejiang University, Science A*, 7(3):398-406, 2006.