

VI CONGRESO IBÉRICO de AgrolIngeniería

5 a 7 de Septiembre | 2011
Universidade de Évora | Portugal



Análisis estructural 3D de los invernaderos multitúnel del sudeste de España. Parte 1: elementos verticales.

J. Vázquez-Cabrera¹, A. Carreño-Ortega¹, J. Pérez-Alonso¹, A.J. Callejón-Ferre¹, E. Sánchez²

¹ Universidad de Almería, Dpto. Ingeniería Rural, Ctra. Sacramento s/n, 04120, Almería (Spain). E-mail: fjvazquez@ual.es

² Universidad Politécnica de Madrid, Dpto. de Ciencia y Tecnología Aplicada, Ciudad Universitaria s/n, 28040, Madrid (Spain)

Resumen

Este trabajo analiza la capacidad estructural de los elementos verticales que componen el pórtico resistente más limitativo de la variante de invernadero multitúnel más utilizada en el sudeste de España. Se estudia la influencia de la longitud y anchura del invernadero en la distribución de tensiones que se produce en dichos elementos. Se ha realizado un modelo tridimensional de elementos finitos con el programa ROBOT MILLENNIUM en su versión 20.1 en el que se ha representado la estructura de barras que conforma el invernadero. Se han analizado los resultados de tensiones normales máximas de 16 estructuras con geometría de túnel similar, pero de diferente anchura y longitud, de tal forma que la superficie en planta oscila entre los 600 m² y los 38.400 m². El cálculo de las acciones existentes sobre los invernaderos se ha realizado según la norma UNE-EN 13031-1. Los resultados numéricos obtenidos han sido estudiados para determinar la influencia de las dimensiones del invernadero en la distribución de tensiones. Aunque se observan significativas reducciones en las tensiones con la adición de túneles, no se puede generalizar la influencia del aumento de las dimensiones del invernadero en los cambios tensionales del mismo. Los resultados obtenidos se consideran de gran utilidad para la optimización de las estructuras de los invernaderos multitúnel así como para garantizar la seguridad mecánica de las mismas.

Palabras Clave: Invernadero, multitúnel, método de elementos finitos (MEF), pilar, pendolón.

Abstract

This work analyses the structural capacity of the vertical elements which are the dimensioning variable of the multispans greenhouses most commonly used in the southeast of Spain. An analysis was performed in order to study the influence of the greenhouse width and length on the normal stress state produced in its vertical elements. A finite element three-dimensional model was performed with the software ROBOT MILLENNIUM version 20.1 where the greenhouses bar structures were represented. The maximum stress values of 16 structures, with similar geometries, were analyzed. These geometries were obtained varying both width and length, thus the plant surface ranges from 600 m² up to 38400 m². The calculation of the loads present on greenhouses was performed according to the European Standard EN 13031-1. Numeric results were processed aiming to determine the influence of the greenhouse design dimensions on the stress state. Although significant stress reductions were observed due to tunnel addition, the influence of the increase of greenhouse dimensions on the structures stress changes shall not be generalized. The results obtained are regarded as very useful both for the design optimization and mechanical safety of multispans greenhouses structures.

Keywords: Greenhouse, multispans, finite element method (FEM), column, vertical brace.

1. INTRODUCCIÓN.

Son muchos los autores que han puesto de manifiesto que invernaderos en la cuenca Mediterránea se construyen en ausencia de proyecto de construcción, únicamente basándose en la experiencia y conocimiento local de las empresas constructoras [1-5]. Todos ellos, coinciden en la necesidad de diseñar los invernaderos de acuerdo a normativas en vigor o, en su defecto, con respecto a las condiciones climáticas de la zona, fundamentalmente atendiendo a las cargas de viento y nieve.

En Europa la norma UNE-EN 13031-1 [6] define los principios generales y requisitos de resistencia mecánica y estabilidad, estado de servicio y durabilidad para el proyecto y construcción de invernaderos industriales destinados a la producción comercial. Esta norma ha sido empleada para estudiar las condiciones de colapso estructural de invernaderos de clase A en Italia [7], así como para evaluar la estabilidad estructural del invernadero multitúnel más empleado en Almería [8].

Por otra parte, los invernaderos se construyen con dimensiones variables, normalmente adaptándose a la superficie de la parcela disponible. En el sureste de España, la superficie media de los invernaderos es de 1,28 ha, con superficies máximas de 3,25 ha y mínimas de 500 m² [9]. Esto supone una gran variabilidad en las dimensiones del invernadero que no es tomada en cuenta en la fase de diseño estructural. En general, los fabricantes de invernaderos limitan su cálculo a un tipo de dimensiones fijas y la variación de dimensiones es resuelta añadiendo o suprimiendo túneles y/o pórticos. Han sido desarrolladas investigaciones orientadas a conocer la capacidad mecánica de diferentes geometrías de invernadero [4,5], sin embargo, no existe trabajo alguno que estudie la relación existente entre las dimensiones del invernadero y su capacidad estructural.

El objetivo de este trabajo es estudiar mediante el método de los elementos finitos cual es la influencia de las dimensiones del invernadero (ancho y largo) en el estado de tensiones de los elementos verticales (pilares y pendolones) que componen el pórtico resistente más limitativo del modelo de invernadero multitúnel más habitual en el sudeste de España.

2. MATERIAL Y MÉTODOS.

La investigación comienza con la identificación y caracterización de la geometría de invernadero multitúnel más habitual en el sudeste de España. Las dimensiones de los invernaderos se encuentran estandarizadas, con ligeras diferencias entre constructores. Las dimensiones de los túneles más frecuentemente utilizadas son: luz 8 m, altura de pilares 4,5 m y altura de cumbrera 6,0 m. Los pórticos están constituidos por tres o más túneles. El pórtico resistente se dispone con una separación de 5 m encontrándose a 2,5 m del pórtico flotante (Fig. 1).

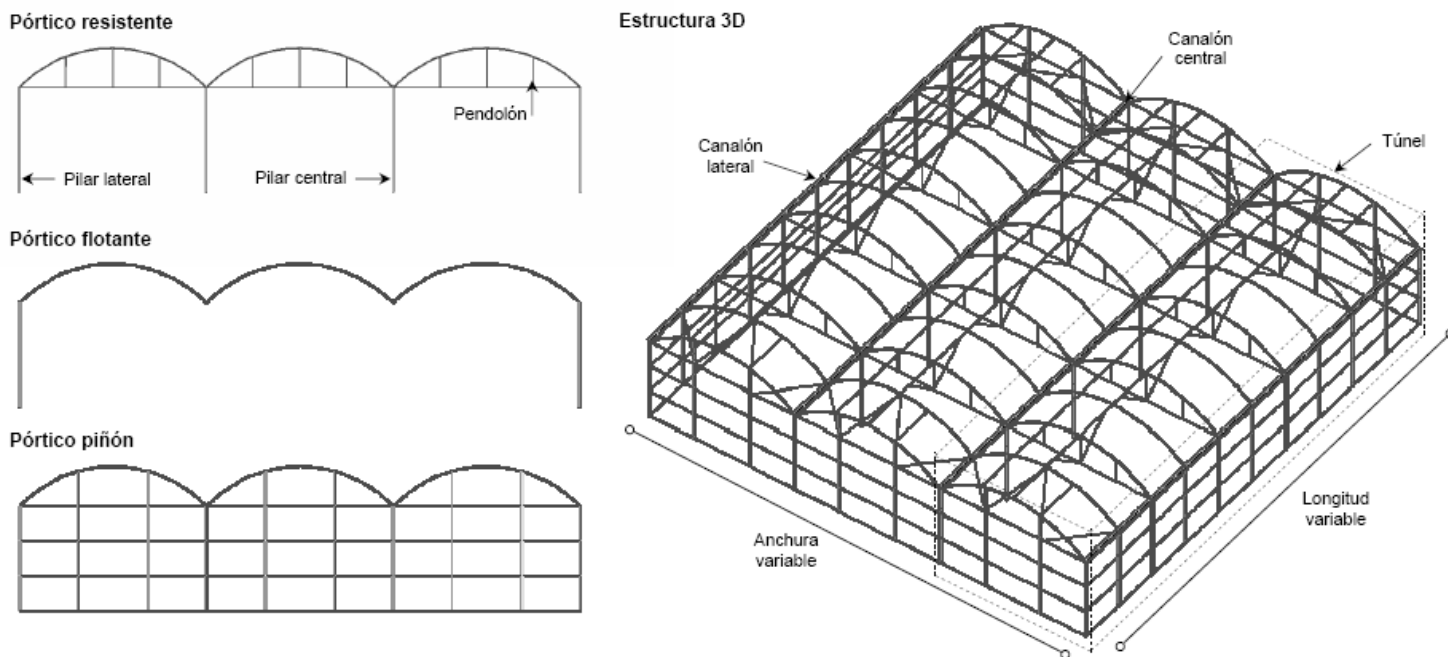


Figura 1. Alzados de los tres pórticos tipo y vista tridimensional de las estructuras estudiadas.

Se han definido tridimensionalmente 16 estructuras de invernadero. Estas son caracterizadas por tener 3, 6, 12 y 24 túneles y longitudes de 25, 50, 100 y 200 m. Por tanto, las superficies varían entre los 600 m² (3 túneles de 25 m de longitud) y los 38.400 m² (24 túneles de 200 m de longitud).

La definición de la estructura se ha realizado teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Todos los pilares que componen la estructura se consideran empotrados en su base y articulados en cabeza.
- Todos los nudos de cubierta de la estructura se consideran articulados, con libertad de giro en el espacio.
- Los arcos se consideran doblemente articulados en sus apoyos (extremo superior de los pilares).
- La sección transversal de los arcos se considera constante.
- En el plano perpendicular a los arcos, se ha considerado el arriostramiento que producen los elementos horizontales (correas, ya sean cenitales o laterales, y canalón).
- Se han empleado los perfiles de acero comerciales base utilizados en los invernaderos multitúnel en el sudeste de España (pilares: 80x80x2 mm, arcos: 60x1,5 mm, tirantes y montantes: 32x1,5 mm, canalón: longitud 430 mm y espesor 1,8 mm).
- Se ha empleado como material estructural acero S275JR.

Las valores característicos de la acciones han sido definidas de acuerdo a las normas UNE-EN 13031-1 [6], UNE 76209IN [10] y ENV 1991-1 [11] (Tabla 1). Dado que la mayor concentración de invernaderos en España se sitúa a lo largo de la costa mediterránea [12], en las comunidades de Andalucía, Murcia y Valencia, se han ubicado las estructuras en suelos de categoría II, Zona Eólica X y en ausencia de colinas aisladas o escarpaduras, atendiendo a lo establecido en la norma UNE 76209IN sobre acciones del viento [10].

Tabla 1. Acciones de cálculo.

Acción	UNE-EN 13031-1
Permanente	Estimación automática por el programa atendiendo perfilería empleada
Viento	Velocidad referencia 27 m/s según UNE 76209IN Coeficientes aerodinámicos para presión neta según anexo B
Nieve	Carga característica 0,20 kN/m ² Coeficiente térmico 1 Coeficientes de forma 0,8
Productos	Cosechas de tomates y pepinos: 0,15 kN/m ² Se han considerado las reacciones horizontales que el emparrillado ocasiona sobre pilares de pórticos piñón

Prácticamente la totalidad de los invernaderos de la cuenca mediterránea emplean plástico como material de cerramiento [1-3]. Según UNE-EN 13031-1 [6], dichos invernaderos son clasificados como de clase B debiéndose comprobar su capacidad estructural a estado límite último. Para tal fin, las combinaciones de carga a estudiar se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Combinación de acciones estudiadas.

Hipótesis	Combinación de acciones, coeficientes parciales y de combinación
a1	Peso propio · 1,2 + Viento · 1,2 + Nieve · 1,2 · 0,5 + Cultivo · 1,2 · 1,0
a2	Peso propio · 1,2 + Nieve · 1,2 + Cultivo · 1,2 · 1,0
a3	Peso propio · 1,2 + Viento · 1,2 · 1,0 + Cultivo · 1,2
b1	Peso propio · 1,2 + Viento · 1,2

Las tensiones de los elementos de las estructuras tridimensionales han sido calculadas mediante el programa de elementos finitos ROBOT MILLENNIUM v. 20.1 [13]. Los elementos finitos han sido definidos como elementos lineales de 2 nodos, de 0,15 m de longitud.

De los resultados obtenidos para cada elemento estructural de las distintas estructuras estudiadas se consideran solamente los correspondientes a las tensiones normales máximas. En base a ellas, se estudia la influencia de las dimensiones de la estructura en el estado tensional de los pilares y pendolones que componen el pórtico resistente más limitativo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. Pilares.

3.1.1. Pilar lateral.

En la Fig. 2 se muestran las tensiones máximas registradas en pilares laterales de pórtico resistente para las hipótesis de viento en dirección 0° y 90°. Las tensiones máximas se han registrado para dirección de viento 0° en los pórticos situados en el punto medio de los invernaderos mientras que para dirección de viento 90°, en los pórticos resistentes contiguos a los pórticos piñón donde inicie la carga de viento.

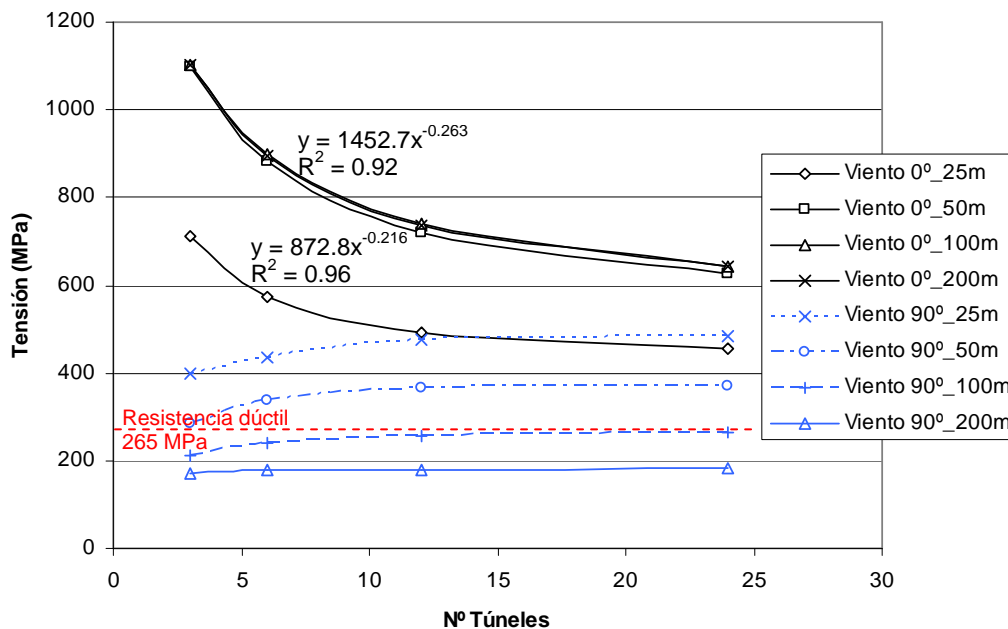


Figura 2. Tensiones máximas registradas en los pilares laterales de pórtico resistente para las hipótesis de viento en dirección 0° y 90°.

Las tensiones máximas en pilares laterales se alcanzan en la hipótesis de dirección de viento 0°, salvo invernaderos con número de túneles superior a 14 unidades y profundidad de 25 m, para los que resulta más limitativa la hipótesis de dirección de viento 90°. Las tensiones máximas en la hipótesis de dirección de viento 0° son similares para invernaderos de 50, 100 y 200 m, existiendo una relación entre el número de túneles (t) y las tensiones máximas (T) de acuerdo a la ecuación (1) con un valor de R^2 de 0,92. Para una profundidad de 25 m la ecuación de ajuste viene dada por (2), con un valor de R^2 de 0,96.

$$T = 1452.7 t^{-0.263} \quad (1)$$

$$T = 872.8 t^{-0.216} \quad (2)$$

En la hipótesis de dirección de viento 0° , un aumento del número de túneles conlleva una reducción importante en las tensiones registradas. Las tensiones alcanzadas en invernaderos de 50, 100 y 200 m, resultan considerablemente más reducidas que las obtenidas en invernaderos de 25 m. Para invernaderos de profundidad superior a 50 m, las tensiones alcanzan unos valores máximos de $1.101,54 \pm 1,94$ MPa, en invernaderos de 3 túneles, y unos valores mínimos de $635,84 \pm 8,06$ MPa, en invernaderos de 24 túneles. Invernaderos de profundidad 25 m, alcanzan unos valores máximos de tensión máxima de 688,00 MPa, en invernaderos de 3 túneles, y unos valores mínimos de 438,77 MPa, en invernaderos de 24 túneles. En general, los valores de tensión que presentan invernaderos de 25 m de profundidad, por término medio, son un 33% inferiores a los registrados por invernaderos de 50, 100 y 200 m. Este fenómeno es justificado debido a la rigidización que los pórticos piñón ocasionan sobre los pórticos ubicados en la zona media del invernadero, cuando la estructura presenta profundidades inferiores a 50 m. El valor medio de las tensiones máximas registradas en invernaderos de 200 m, resulta ser un 3,00% superior al registrado por invernaderos de 50 m de profundidad, pudiendo ser empleado el estado de tensiones de invernaderos de 50 m como de referencia para estudiar las restantes profundidades analizadas. En todo caso, un aumento del número de túneles conlleva significativas caídas en las tensiones máximas registradas. La disminución de las tensiones como consecuencia del aumento del número de túneles, se atribuye al efecto de estabilización asociado a una disminución de la esbeltez de la estructura en el plano del pórtico.

Para la hipótesis de viento de dirección 90° , invernaderos de 24 túneles y 25 m de profundidad, alcanzan unas tensiones máximas de 483,68 MPa, un 9,28% superiores a las registradas con dirección de viento 0° .

3.1.2. Pilar central.

En la Fig. 3 se muestran las tensiones máximas registradas en pilares centrales de pórtico resistente para las hipótesis de viento en dirección 0° y 90° . Las tensiones máximas se han registrado para dirección de viento 0° en los pórticos situados en el punto medio de los invernaderos, mientras que para dirección de viento 90° en los pórticos resistentes contiguos a los pórticos piñón donde inicie la carga de viento.

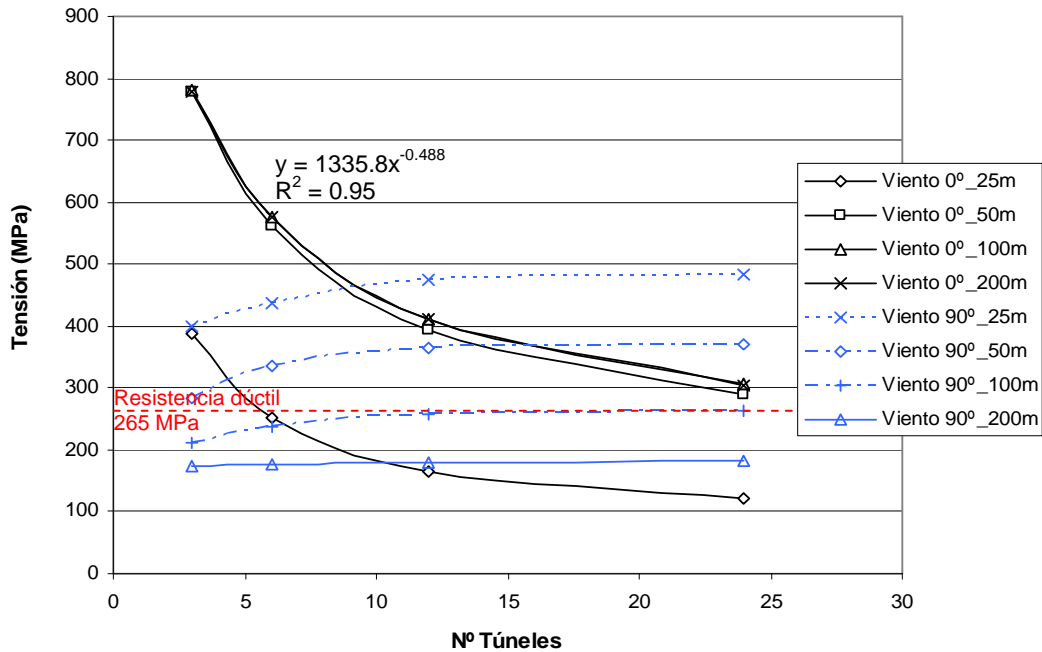


Figura 3. Tensiones máximas registradas en los pilares centrales de pórtico resistente para la hipótesis de viento en dirección 0° y 90°.

Las tensiones máximas se alcanzan en dirección de viento 0° o 90° dependiendo de las dimensiones del invernadero. Así, invernaderos de 100 y 200 m de profundidad, e invernaderos de 50 m con número de túneles inferior a 15 unidades, alcanzan las tensiones máximas para dirección de viento de viento 0°. Para dicha dirección de viento, la relación entre el número de túneles y las tensiones máximas en invernaderos de 50, 100 y 200 m de profundidad se ajusta a la ecuación (3). La tensión máxima se registra para invernaderos de 3 túneles ($779,76 \pm 1,58$ MPa) y la mínima para invernaderos de 24 túneles ($294,57 \pm 8,68$ MPa). En general, se puede afirmar que pilares centrales se comportan de forma similar que pilares laterales, pero con valores de tensión más reducidos. Las tensiones máximas registradas en pilares centrales son un 40,68% inferiores a las registradas por pilares laterales para profundidades de invernadero superiores a 50 m y un 60,69% para profundidades de 25 m.

$$T = 1335.8 t^{-0.488} (R^2 = 0.95) \quad (3)$$

Invernaderos de 50 m y número de túneles superior a 15 unidades así como invernaderos de 25 m, alcanzan las tensiones máximas para la hipótesis de dirección de viento 90°. Para dicha dirección de viento, un aumento del número de túneles conlleva ligeros incrementos en las tensiones máximas registradas, pudiendo ser empleadas las tensiones obtenidas para invernaderos de 6 túneles como de referencia para estudiar el estado de tensiones de invernaderos de 12 y 24 túneles. Las tensiones máximas registradas en invernaderos de 24 túneles (222,60 MPa) son un 7,38% superiores a las registradas en invernaderos de 6 túneles (207,30 MPa). El ligero incremento de las tensiones que se produce con la adición de túneles es debido a la mayor superficie de fachada expuesta frente a la acción del viento en dirección 90° y la peculiaridad que la geometría de invernadero estudiada presenta, al no encontrarse estabilizada. Este aspecto, hace la estructura más vulnerable frente a la acción del viento con el aumento del número de túneles. Por otro lado, un aumento de la

profundidad del invernadero conlleva importantes reducciones en las tensiones máximas registradas, siendo necesario estudiar la profundidad definitiva de la estructura para el diseño de dichos elementos. Este resultado se atribuye al efecto de estabilización asociado a una disminución de la esbeltez de la estructura en el plano perpendicular al pórtico.

3.2. Montantes.

En la Fig. 4 se muestran las tensiones máximas registradas en montantes de pórtico resistente para las hipótesis de viento en dirección 0° y 90°. Los valores límite de tensión se producen en diferentes pórticos dependiendo de las dimensiones del invernadero.

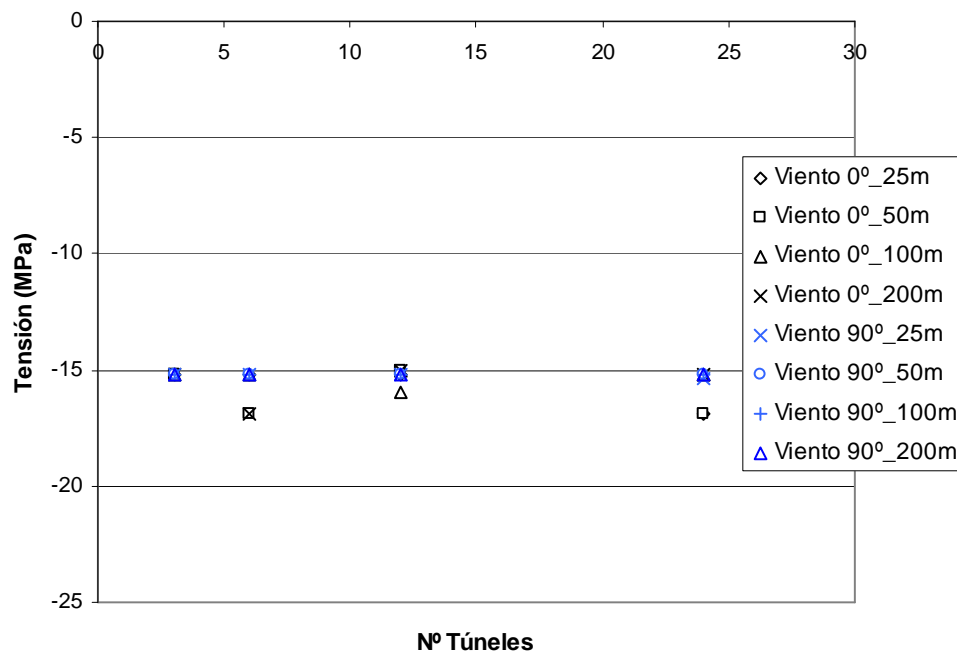


Figura 4. Tensiones máximas registradas en montantes de pórtico resistente en las hipótesis de viento en dirección 0° y 90°.

Las tensiones máximas alcanzan valores similares en ambas hipótesis, registrándose valores medios de compresión de $-15,64 \pm 0,58$ MPa para dirección de viento 0°, y de $-15,42 \pm 0,76$ MPa para dirección de viento 90°. Se considera que dichos elementos pueden ser estandarizados para el conjunto de las estructuras de invernadero, tendiendo de esta forma, de acuerdo con [3], hacia la construcción de invernaderos estandarizados más seguros y económicos.

En general, la determinación de las tensiones máximas por elemento constructivo nos ha permitido evaluar la idoneidad de los perfiles empleados, dando a conocer las importantes carencias en capacidad estructural que presentan los pilares laterales y centrales de pórtico resistente, que alcanzan unos valores de tensión del orden de 4,15 y 2,94 veces, respectivamente, superiores a los máximos admisibles por el material empleado. Resultados semejantes fueron obtenidos por [5] quienes con la cuantificación de las tensiones evalúan la

idoneidad de los pilares de una estructura multitúnel ubicada en Turquía, mostrando que los valores de tensión son 5,90 veces superiores a los máximos admisibles por el perfil seleccionado. Asimismo, coinciden, aunque con valores de sobretensión más reducidos, con los obtenidos por [8], quienes estudian el estado de tensiones de la estructura multitúnel más habitual en Almería (España), concluyendo que los pilares laterales presentaban un incremento de tensión valorado en un 47,00% superior al máximo admisible.

4. CONCLUSIONES.

De los resultados obtenidos se puede afirmar que el aumento de la anchura y la longitud del invernadero conllevan significativas variaciones en las tensiones máximas alcanzadas en pilares laterales y centrales de pórtico resistente. Sin embargo, montantes de cercha presentan unos valores de tensión del mismo orden para el conjunto de las estructuras.

Las tensiones alcanzadas con los perfiles seleccionados en pilares (80x80x2 mm), son muy superiores a las máximas admisibles por el acero a utilizar según UNE-EN 13031-1 (S275JR). Se recomienda el empleo de perfiles de mayor sección o la incorporación de nuevos elementos estructurales para garantizar la correcta capacidad estructural de la geometría estudiada. En montantes, se hace posible optimizar el perfil seleccionado (32x1,5 mm).

Para el dimensionado de aquellos elementos que alcanzan las tensiones límite bajo dirección de viento 0°, el estado de tensiones de invernaderos de 50 m puede emplearse como de referencia para el diseño de invernaderos de mayor profundidad, debiendo ser estudiada, para dicha profundidad, la anchura definitiva del invernadero a proyectar. Por otro lado, para el dimensionado de elementos estructurales que alcancen las tensiones máximas para dirección de viento 90°, invernaderos de 6 túneles pueden utilizarse como de referencia para representar el estado de tensiones de invernaderos de mayor anchura, debiendo ser estudiada la profundidad definitiva del invernadero a estudiar. Dichos resultados pueden ser empleados para el diseño de estructuras de gran tamaño, agilizando el proceso de cálculo, desde las etapas previas de modelización de la estructura, hasta posteriores de definición de cargas y de cálculo propiamente dichas.

Pese a que los resultados obtenidos son particulares de una geometría de invernadero y unas condiciones de carga establecidas por UNE-EN 13031-1 para el litoral mediterráneo español, se considera que pueden ser empleados como referencia para predecir el comportamiento de geometrías similares sometidas a dispares condiciones de carga.

5. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Briassoulis D., Waaijenber J., Gratraud J., Von Eslner B. (1997). *Mechanical Properties of Covering Material for Greenhouses: Part 1, General Overview. J. Agric. Eng. Res.* Vol. 67, 81-96.
- [2] Grafiadellis M (1999). *The greenhouse structures in Mediterranean regions - problems and trends". In Protected cultivation in the Mediterranean region = Cultures protégées dans la region méditerranéenne (Cahiers Options Méditerranéennes). Colloque sur les Cultures Protégées dans la Région Méditerranéenne. Agadir: Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. Vol. 31.*
- [3] Von Elsner B., Briassoulis D., Waaijenberg D., Mistriotis A., Von Zabeltitz C., Gratraud J., Russo G., Suay-Cortes R. (2000a) *Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries, part I: design requirements. J Agric Eng Res.* Vol. 75(1), 1-16.
- [4] Kendirli B. (2005) *Structural análisis of greenhouses: A case study in Turkey. Build Environ.* Vol. 41(7), 864-871.
- [5] Yasemin-Emekli N., Kendirli B., Kurunc A. (2010) *Structural analysis and functional characteristics of greenhouses in the Mediterranean region of Turkey. African Journal of Biotechnology.* Vol. 9(21), 3131-3139.
- [6] UNE-EN 13031-1 (2002). *Invernaderos: proyectos y construcción. Parte 1: Invernaderos para la producción comercial. European Committee for standardization CEN. Brussels, Belgium.*
- [7] Castellano S., Candura A., Scarascia-Mugnozza G. (2005) *Greenhouse structures SLS analysis: experimental results and normative aspect. Acta Hort. (ISHS).* Vol. 691, 701-708.
- [8] Callejón A., Carreño A., Pérez J., Vázquez J., Galera L. (2009) *Structural improvements in multispan greenhouses for verification the European standard UNE-EN 13031-1. XXXIII CIOSTA-CIGR V Conference 2009: Technology and management to ensure sustainable agriculture, agro-systems, forestry and safety. 17-19 Junio, Reggio Calabria, Italy.*
- [9] Fernández C., Pérez J. (2004). *Caracterización de los invernaderos de la provincia de Almería.* Ed. Cajamar Almería, Spain.
- [10] UNE 76209IN (2002). *Acción de viento en invernaderos comerciales. AENOR. p. 11, Madrid, Spain.*
- [11] ENV 1991-1 (2002). *Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures-Part 1: Basis of desing. European Committee for standardization CEN. Brussels, Belgium.*
- [12] Von Elsner B., Briassoulis D., Waaijenberg D., Mistriotis A., Von Zabeltitz C., Gratraud J., Russo G., Suay-Cortes R. (2000b) *Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries, Part II: Typical Designs. J Agric Eng Res.* Vol. 75(2), 111-126.
- [13] Internet website
<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?siteID=123112&id=11818169>.