

VI CONGRESO IBÉRICO de AgroIngeniería

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



Análisis estructural 3D de los invernaderos multitúnel del sudeste de España. Parte 2: elementos horizontales.

A. Carreño-Ortega¹, J. Vázquez-Cabrera¹, 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), elvira.sanchez.espinosa@upm.es

Resumen

Este trabajo analiza la capacidad estructural de los elementos horizontales que componen el pórtico resistente más limitativo de la variante de invernadero multitúnel más utilizada en el sudeste de España. Se analiza la influencia de la anchura y longitud del invernadero en la distribución de tensiones que se producen 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. El aumento de las dimensiones del invernadero conlleva importantes variaciones en las tensiones máximas registradas por canalones. Sin embargo, en arcos y tirantes de cercha, las tensiones permanecen constantes. 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, método de elementos finitos (MEF), canalón, arco, tirante.

Abstract

This work analyses the structural capacity of the horizontal elements of the multispan greenhouses most commonly used in the southeast of Spain. An analysis has been performed in order to study the influence of the greenhouse width and length on the normal stress state produced in its horizontal 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 results of 16 structures, with similar multispan geometries, were analyzed. These geometries were obtained varying both width and length, thus the plant surface ranged from 600 m² up to 38400 m². The calculation of the loads present on greenhouses was performed according to EN 13031-1. The increase in greenhouse dimensions lead to significant variations in maximum stress values in gutters. However, in horizontal braces and in arches, the stress values were similar for the different greenhouses studied. Obtained results are regarded as very useful both for the design optimization and mechanical safety of multispan greenhouses structures.

Keywords: Greenhouse; Multispan; Finite element method (FEM); Arch; Horizontal braces; Gutter

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 horizontales (arcos, tirante de cercha y canalón) 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).

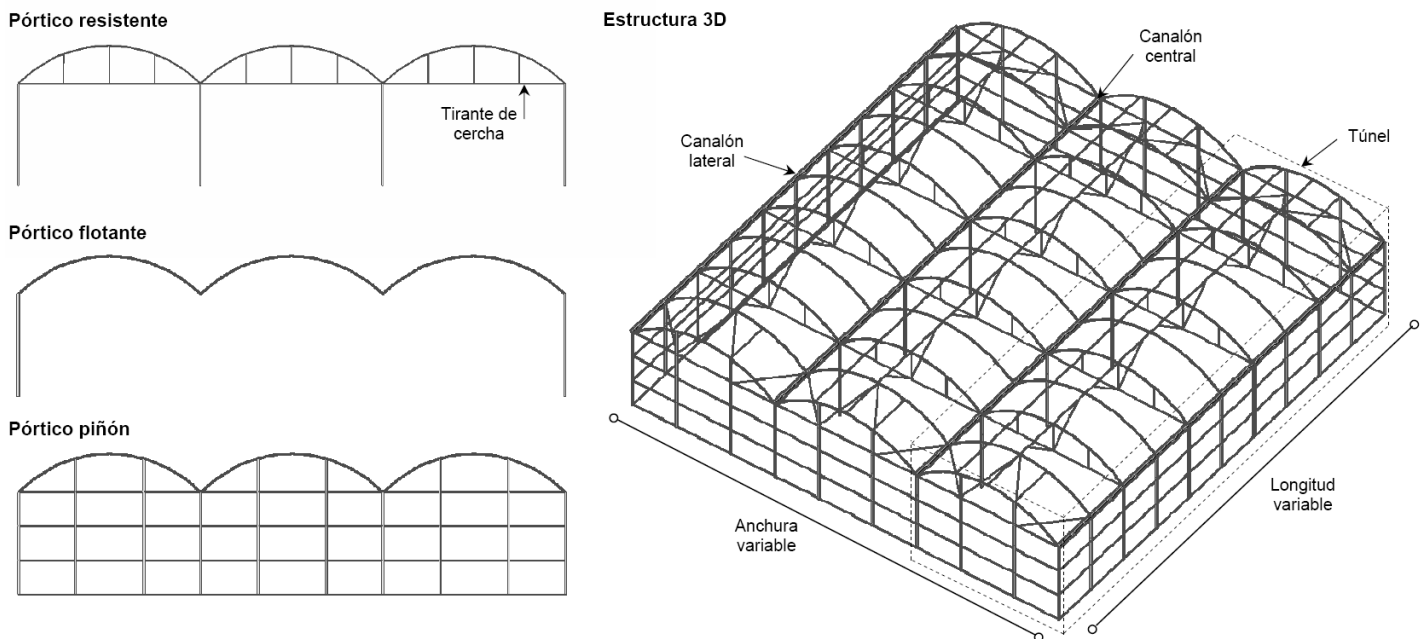


Figura 1. Alzados de los tres pórticos tipo y vista tridimensional de las estructuras estudiadas.

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, 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 [12]. 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 arcos, tirantes de cercha y canalones que componen el pórtico resistente más limitativo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. Arcos.

En la Fig. 2 se muestran las tensiones máximas registradas en arcos de pórtico resistente para dirección de viento 0° y 90°. Las tensiones máximas se han obtenido para dirección de viento 0° en los pórticos situados en el punto medio de los invernaderos. Para dirección de viento 90°, las tensiones máximas se han obtenido en los pórticos contiguos a los pórticos piñón donde inicie la carga de viento.

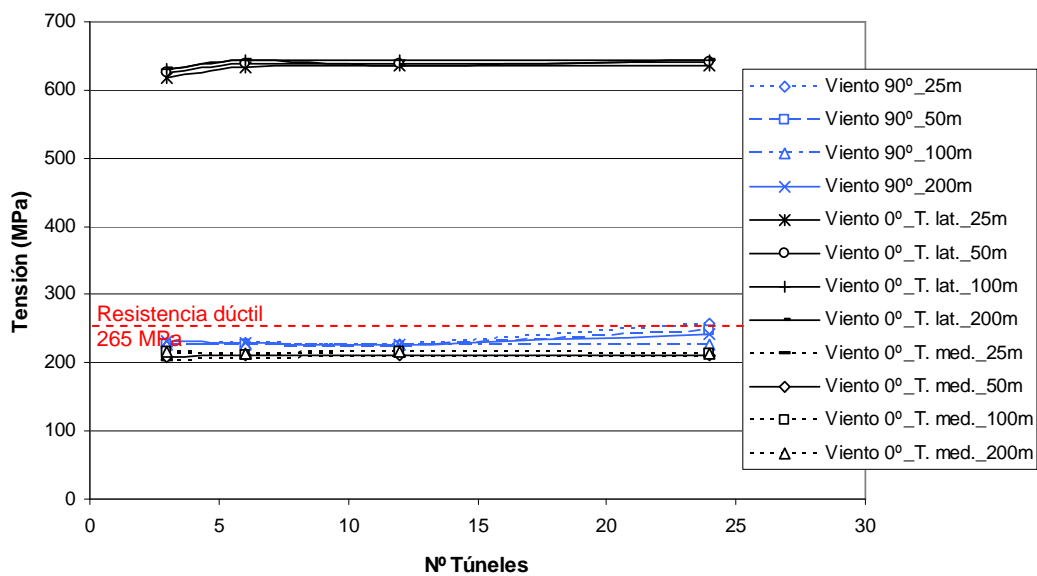


Figura 2. Tensiones máximas registradas en arcos para las hipótesis de viento en dirección 0° y 90°.

En la Figura 2 se observan dos grupos de valores de tensiones máximas. Uno corresponde a las tensiones registradas para dirección de viento 0°, en el que, a su vez, se diferencian las tensiones alcanzadas en arcos laterales frente a las tensiones registradas en arcos centrales. El otro grupo representa las tensiones máximas registradas en arcos laterales y centrales para la hipótesis de viento en dirección 90°. En ambos casos, no se aprecian variaciones significativas en el valor de las tensiones máximas alcanzadas como consecuencia del aumento del número de túneles y/o pórticos que componen el invernadero.

Las tensiones máximas en arcos laterales se alcanzan para dirección de viento 0°, con valores medios de $636,11 \pm 7,37$ MPa, siendo un 300,79% superiores a las tensiones registradas en arcos centrales para esta misma dirección de viento. En arcos centrales las tensiones máximas se registran para dirección de viento 90°, con valores medios de $230,92 \pm 9,44$ MPa. Para dirección de viento 0°, el valor medio de las tensiones es un 8,29% inferior ($211,48 \pm 4,16$ MPa).

Dada la escasa variabilidad que presentan las tensiones registradas tanto por arcos laterales como por arcos centrales, para las diferentes estructuras de invernadero estudiadas, dichos elementos, diferenciados entre sí, pueden estandarizarse para el conjunto de las estructuras de invernadero estudiadas, tendiendo de esta forma, de acuerdo con [3], hacia la construcción de invernaderos estandarizados más seguros y económicos.

3.2. Tirantes de cercha.

En la Fig. 3 se muestran las tensiones máximas registradas en tirantes de cercha para las direcciones de viento 0° y 90°. Las tensiones máximas se registran en los tirantes próximos al lateral donde impacta la ráfaga de viento, con valores similares en el conjunto de pórticos resistentes situados en la zona media del invernadero.

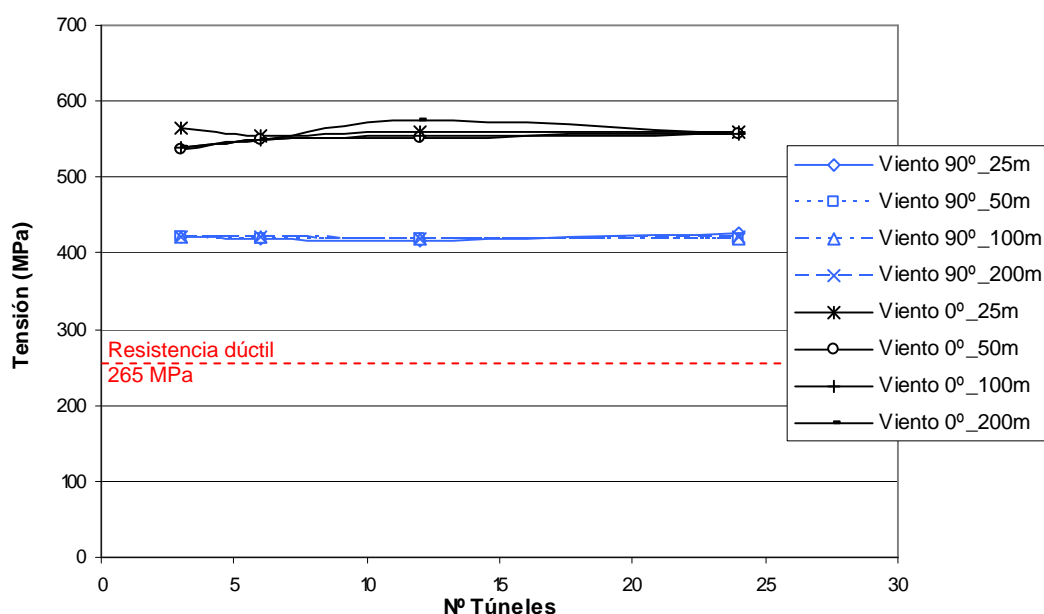


Figura 3. Tensiones máximas en tirantes de cercha para las hipótesis de viento en dirección 0° y 90°.

Las tensiones máximas se registran en dirección de viento 0°, con unos valores medios para el conjunto de las estructuras de $553,43 \pm 9,82$ MPa, siendo el valor de tensión media registrado para dirección de viento 90° de $420,65 \pm 2,25$ MPa. Los valores de tensión registrados para dirección de viento 0°, resultan ser un 208,84% superiores a la resistencia dúctil del acero a utilizar según UNE-EN 13031-1 (S275JR).

Al igual que en arcos, los elementos tirantes de cercha pueden estandarizarse para el conjunto de las estructuras de invernadero estudiadas.

3.3. Canalones.

3.3.1. Canalón lateral.

En la Fig. 4 se muestran las tensiones máximas registradas en canalón lateral para dirección de viento 0° y 90° .

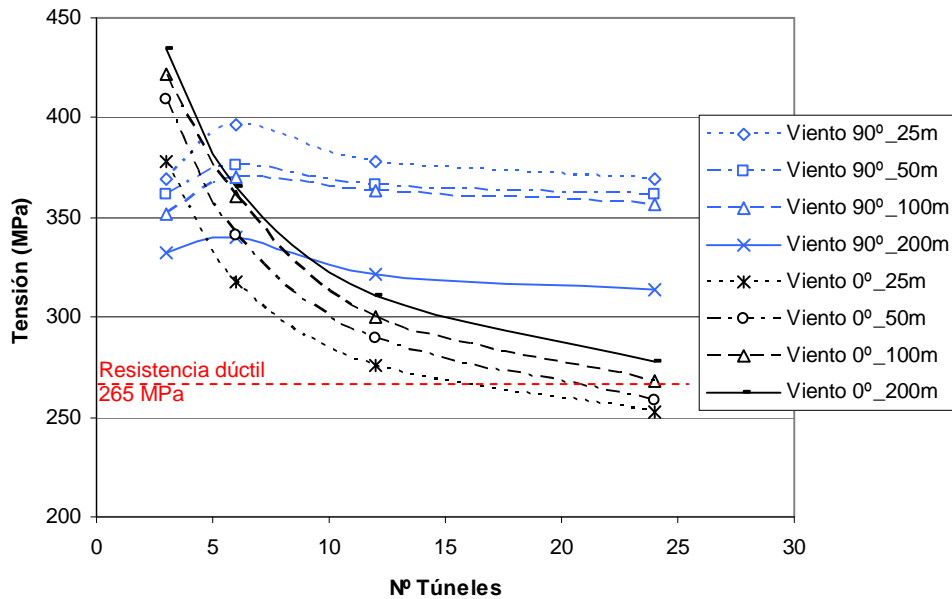


Figura 4. Tensiones máximas registradas en canalón lateral para las hipótesis de viento en dirección 0° y 90° .

Canalones laterales ubicados en invernaderos con número de túneles inferior a 5 unidades, alcanzan las tensiones máximas para dirección de viento 0° , registrándose las tensiones máximas en los restantes invernaderos para dirección de viento 90° .

Para dirección de viento 90° , se observan variaciones en las tensiones registradas atendiendo al número de túneles que componen el invernadero y la profundidad del mismo. En general, la tendencia es que un aumento en la longitud del invernadero conlleva reducciones en las tensiones registradas. Para la misma longitud del invernadero, las tensiones máximas corresponden a invernaderos de 6 túneles en todos los casos. Las tensiones máximas se alcanzan en invernaderos de 6 túneles y 25 m de profundidad (396,86 MPa) y los valores mínimos en invernaderos de 24 túneles y 200 m (313,92 MPa).

Para dirección de viento 0° , existe una marcada tendencia, de forma que aumentos en la profundidad del invernadero conllevan notables reducciones en las tensiones máximas. Las tensiones máximas en los canalones laterales se dan en invernaderos de 3 túneles y 200 m de profundidad (434,82 MPa). Para el mismo número de túneles y 25 m de profundidad, la tensión máxima obtenida es un 13% inferior (378,31 MPa).

Las caídas de tensión que un aumento del número de túneles conlleva para dirección de viento 0°, así como las ocasionadas por un aumento de la profundidad del invernadero para dirección de viento 90°, son justificadas por la disminución de la esbeltez de la estructura asociada con la adición de túneles y/o pórticos.

3.3.2. Canalón central.

En la Fig. 5 se muestran las tensiones máximas registradas en canalón central para las direcciones de viento 0° y 90°.

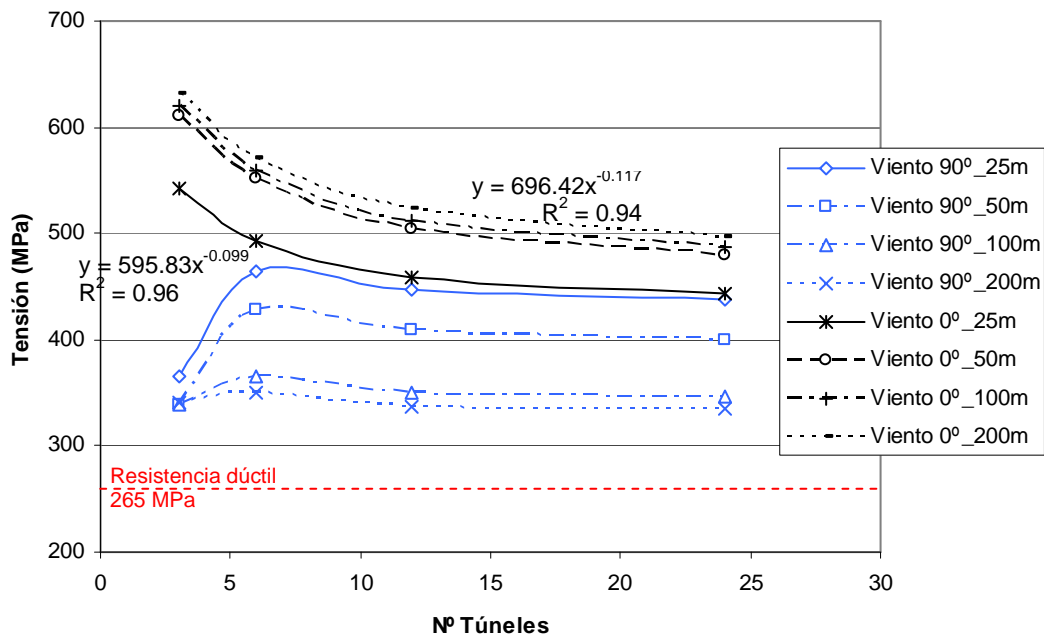


Figura 5. Tensiones máximas registradas en canalón central para las hipótesis de viento en dirección 0° y 90°.

Las tensiones máximas se registran para dirección de viento 0°. Para dicho supuesto, se observa como un aumento del número de túneles conlleva una reducción en las tensiones máximas registradas. En invernaderos de 50, 100 y 200 m de profundidad, las tensiones máximas se ajustan a la expresión matemática (3), siendo (4) la que corresponde a invernaderos de 25 m. Así, el valor medio de las tensiones máximas registradas en canalón central para profundidades de invernadero superiores a 50 m es de $620,87 \pm 10,41$ MPa, para invernaderos de 3 túneles, y de $487,74 \pm 8,85$ MPa, para invernaderos de 24 túneles. Por otro lado, invernaderos de 25 m de profundidad alcanzan unas tensiones máximas de $542,93$ MPa, en invernaderos de 3 túneles, y de $442,74$ MPa, en invernaderos de 24 túneles.

$$T = 696.42 t^{-0.117} (R^2 = 0.94) \quad (3)$$

$$T = 595.83 t^{-0.099} (R^2 = 0.96) \quad (4)$$

Para dirección de viento 90°, se observan variaciones en las tensiones registradas dependiendo del número de túneles del invernadero y la profundidad del mismo. Los valores máximos de tensión se registran en invernaderos de 6 túneles, siendo este efecto más

acentuado en invernaderos con profundidades de 25 y 50 m. En invernaderos de 12 y 24 túneles las tensiones máximas son prácticamente similares para invernaderos de la misma longitud.

Al igual que para canalones laterales en dicha dirección de viento, un aumento del número de túneles conlleva significativas reducciones en las tensiones máximas registradas, siendo las tensiones medias obtenidas para invernaderos de profundidad 25 m considerablemente inferiores a las registradas en los restantes invernaderos (50, 100 y 200 m), aspecto que queda justificado por la rigidización que los pórticos piñón ejercen sobre la zona media de la estructura para profundidades de invernadero inferiores a 50 m.

En general, la determinación de las tensiones máximas por elemento constructivo nos ha permitido evaluar los perfiles empleados, dando a conocer los problemas de estabilidad que, con excepción de arcos centrales, presenta la perfilería seleccionada. Resultados semejantes fueron obtenidos por [5], quienes evalúan la idoneidad de los perfiles empleados en las geometrías de invernadero más habituales de Turquía, mostrando las importantes carencias en capacidad estructural que en su conjunto presentaban.

4. CONCLUSIONES.

Con la investigación realizada se puede afirmar que el aumento de las dimensiones del invernadero conlleva variaciones en las tensiones máximas registradas en canalones. Sin embargo, arcos laterales y centrales así como los elementos tirantes de cercha, presentan unos valores de tensión del mismo orden para el conjunto de las estructuras analizadas.

Las tensiones alcanzadas con los perfiles seleccionados (arco: 60x1,5 mm; tirante de cercha: 32x1,5 mm y canalón: longitud 430 mm y espesor 1,8 mm), resultan ser, salvo para los elementos arcos centrales, muy superiores a las máximas admisibles por el acero a utilizar según UNE-EN 13031-1 (S275JR). Se recomienda emplear perfiles de mayor sección o la incorporación de nuevos elementos estructurales para garantizar la correcta capacidad estructural de la geometría multitúnel estudiada.

Se pone de manifiesto, que para el dimensionado de aquellos elementos que alcanzan las tensiones límite bajo dirección de viento 0°, el estado tensional de invernaderos de 50 m puede emplearse como 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 cuyas tensión límite se alcanzan en dirección de viento 90°, invernaderos de 6 túneles pueden utilizarse como referencia para representar el estado de tensiones de invernaderos con número de túneles comprendido entre 3 y 24 unidades, debiendo de ser estudiada la profundidad definitiva de invernadero a proyectar. 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 específicas 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 région méditerranéenne (Cahiers Options Méditerranéennes)*. Colloque sur les Cultures Protégées dans la Région Méditerranéenne. Agadir: Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. Vol. 31.
- [3] Von Eslner 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 multispans 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] Internet website
<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?siteID=123112&id=11818169>.