UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE UN INVERNADERO CON VENTILA CENITAL

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO MÉXICO
DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA:

VICENTE LÓPEZ BAUTISTA

CHAPINGO, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2014

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE UN INVERNADERO CON VENTILA CENITAL

Tesis realizada por Vicente López Bautista bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: _____

DR. CARLOS ALBERTO VILLASEÑOR PEREA

ASESOR: _____

DR. GILBERTO DE JESÚS LÓPEZ CANTEÑS

ASESOR: _____

DR. MAURICIO CARRILLO GARCÍA

LECTOR EXTERNO: _____

DRA. ROCÍO CERVANTES OSORNIO

DEDICATORIA

Al TODOPODEROSO que me fortalece, y es mi pronto auxilio.

Para mi alma mater la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO.

Para el posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, los departamentos Ingeniería Mecánica Agrícola, Irrigación e Ingeniería Agroindustrial a la ESIME Zacatenco y Ticomán

Dedico este trabajo de investigación, sin ser la versión más acabada al Ing. Vidal Orea Lara, al Ing. Flores Galindo Emanuel y todos los que de alguna manera colaboraron en la realización de este trabajo.

A mi madre Sabina Bautista Torres por confiar y soñar junto con este servidor.

A mis sobrinos y familiares.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a JEHOVÁ en JESÚS el haberme sustentado hasta aquí, y le doy infinitas gracias por permitirme vivir este momento.

Miles de gracias al Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea por su positivismo en la realización de este trabajo y la confianza que siempre ha depositado en mi persona.

Al Dr. Gilberto de Jesús López Canteñs le agradezco personalmente por poner de su valioso tiempo y confianza extrema en la conclusión de este trabajo

Al Dr. Mauricio Carrillo García por influirme su afán de lucha siempre de manera por demás loable.

Al maestro Fernando Paris Delgado Gómez, por haberme enseñado que no hay límites y enseñarnos a los alumnos del posgrado la extensometría eléctrica.

Dr. Teodoro Gómez Hernández y esposa miles de gracias por su granito de arena en la consecución de este trabajo y sus bendiciones.

A mi Esposa que ha tenido que sacrificar su tiempo y soportar mis desesperanzas, siempre como la gran compañera que Dios me envió, mi chapa.

A mi hijo que muchas veces ha tenido que aprender por sí solo sus deberes académicos, sabes que eres lo más valioso que el creador me mandató a cuidar.

Miles de gracias a todos, sí en la lista que pongo a continuación me faltara alguien no es por omisión sí no por la emoción que me embarga en estos momentos.

Maestro Bonifacio Gaona Ponce, Maestro Marco Antonio Rojas Martínez, Maestra Fernanda Nieto Román, Maestro Ramón Lobato Silva, Maestro José Alfredo Espejel Zaragoza, Dr. Pedro Pascual Paneque Rondón, Ing. Gregorio Cornejo Meza, Dr. José Antonio Yam Tzec, Dr. Miguel Ángel Peña Peralta, Ing. Santiago, Ing. Diana.

A mis compañeros de aula.

A mis alumnos que siempre han confiado en su servidor y contagian su tezón.

A todos estoy confiando en JESÚS que les guarde.

DATOS BIOGRÁFICOS

López Bautista Vicente

Lugar de nacimiento, comunidad ocuilcalco, municipio San Agustín Metzquititlán, estado Hidalgo.

Ingeniero Mecánico Agrícola, egresado de la Universidad Autonóma Chapingo (UACh), maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, con enfoque en la Mecanización Agrícola y doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, área Mecanización Agrícola

Profesor de la universidad tecnológica de la sierra hidalguense y profesor investigador de la Universidad Autónoma Chapingo, departamento Ingeniería Agroindustrial.

Instructor de diversos cursos, entre ellos:

Curso “curso Básico de SOLID WORKS, V 2008” impartido a estudiantes de la carrera de ingeniería Mecánica Agrícola y estudiantes del Posgrado en Ingeniería Agrícola y uso integral del agua.

Curso Inventor V10 a los alumnos del primer semestre de la maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua.

“Entusiasmo e interés por el trabajo cuidando siempre la seguridad, disciplina y aprendizaje”

CONTENIDO

Página

INTRODUCCIÓN 1

Justificación de la investigación 7

Problema científico 7

Hipótesis 8

CAPÍTULO 1..... 11

1.1 Panorama general de la agricultura protegida 11

1.2 Tipos de invernaderos..... 15

1.2.1 Invernaderos unitúnel..... 15

1.2.2 Invernaderos techo a dos aguas con cubierta de plástico. 15

1.2.3 Invernaderos con techo en forma de arco..... 16

1.3 Tipos de invernaderos en las regiones de México 17

1.3.1 Túnel o Monocapilla..... 17

1.3.2 Multitúnel o Arco. 17

1.3.3 Invernadero Multitúnel con Ventana Cenital 18

1.3.4 Invernadero Diente de Sierra..... 19

1.3.5 Invernadero en Capilla o a Dos Aguas..... 19

1.3.6 Invernadero Tipo Parral o Casa Sombra..... 20

1.4 Cargas en el análisis de invernaderos 21

1.5 Las herramientas de análisis estructural en invernaderos 27

1.6 Fundamentación teórica..... 48

1.6.1 El cálculo de cargas..... 48

1.6.2 Modelo para el ensayo a la flexión..... 50

1.6.3 Presiones locales en túnel de viento utilizando un modelo a escala..... 52

1.7 Bibliografía..... 54

CAPÍTULO 2..... 60

COEFICIENTES DE LA FUERZA DEL VIENTO Y COMPORTAMIENTO DEL FLUJO SOBRE UN MODELO DE INVERNADERO 60

2.1 Resumen..... 60

2.2 Abstract..... 60

2.3 Introducción 61

2.4 Materiales y métodos..... 63

2.5 Resultados y discusión 67

2.6 Conclusiones 76

2.7 Bibliografía..... 78

CAPÍTULO 3..... 82

CARACTERIZACIÓN DE CONSTANTES MECÁNICAS EXTRAÍDAS DE UN ACERO GALVANIZADO DE LA ESTRUCTURA DE UN INVERNADERO 82

3.1 Resumen..... 82

3.2 Abstract..... 82

3.3 Introducción 83

3.4 Materiales y métodos..... 84

3.5 Resultados y discusión 86

3.6 Discusión de los resultados 91

3.7 Conclusiones 93

3.8 Bibliografía 95

CAPÍTULO 4..... 97

ANÁLISIS DE FLUJO DE VIENTO, RESISTENCIA MECÁNICA Y ESTUDIO METALOGRÁFICO, EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE UN INVERNADERO CON VENTILACIÓN CENITAL SOMETIDO A CARGAS COMBINADAS 97

4.1 Resumen..... 97

4.2 Abstract..... 97

4.3 Introducción 98

4.4 Problemática. 99

4.5 Metodología. 99

4.6 Resultados. 108

4.7 Discusión. 112

4.8 Bibliografía 114

CAPÍTULO 5..... 116

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS 116

5.1 Conclusiones 116

5.2 Recomendaciones 118

5.3 Perspectivas 118

ÍNDICE DE CUADROS

Página

CAPÍTULO 1

Cuadro 1. Cargas mínimas de diseño para componentes principales en invernaderos 26

Cuadro 2. Cargas de diseño y velocidades de viento en algunos países 27

Cuadro 3. Características dimensionales de los tipos de invernaderos……..…29

Cuadro 4. Cargas de diseño en invernaderos de la región mediterránea de Turquía..... 36

Cuadro 5. Acciones de cálculo..... 42

Cuadro 6. Combinación de acciones estudiadas 42

Cuadro 7. Tensiones máximas en elementos estructurales..... 43

CAPÍTULO 2

Cuadro 8. Condiciones ambientales durante la prueba. 65

CAPÍTULO 3

Cuadro 9 Comparativa del valor del esfuerzo de cendencia promedio de probetas con y sin soldadura, así como por elemento finito y la norma ASTM A36 92

Cuadro 10. Comparativa del valor de las deformaciones en relación de carga aplicada al momento de presentarse el fenómeno de plasticidad..... 92

Cuadro 11. Comparativa del valor de la relación de Poisson en correspondencia a la carga aplicada, al momento de presentarse el fenómeno de plasticidad.. 93

Cuadro 12. Desplazamiento del eje neutro en probetas con y sin soldadura, hasta la zona plástica. 93

CAPÍTULO 4

Cuadro 13. Condiciones ambientales promedio establecidas para la realización del ensayo..... 100

Cuadro 14. Valores de **Cp** y el promedio de la velocidad local, con respecto a la velocidad del flujo libre..... 109

Cuadro 15. Carga aerodinámica **P** ejercida sobre las caras del modelo a escala del invernadero. 110

Cuadro 16. Comparativa de los resultados del coeficiente de arrastre **Cp** obtenidos tanto por túnel de viento como por elemento finito en 2D. 111

Cuadro 17. Coeficientes de presión **Cp**, la velocidad máxima del flujo, y las presiones máximas y mínimas obtenidos del modelo en 3D por elemento finito. 111

Cuadro 18. Resultados de las variables mecánicas (deformación, esfuerzos principales (máximo y mínimo) y esfuerzo de corte en las direcciones **Y, Z**)... 112

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

CAPÍTULO 1

Figura 1. Colapso total de un invernadero después de vientos fuertes 12

Figura 2. Estructura (a) y materiales de construcción (b) de un invernadero en México..... 14

Figura 3. Ejemplos de invernadero túnel con techo redondeado, y con ventilación lateral continua en la pared. 15

Figura 4. Construcción de techo a dos aguas, cubierto con película plástica. .. 16

Figura 5. Construcción con película plástica a la izquierda con ventilación de techo continua, a la derecha construcción arco gótico con tubo de acero.. 16

Figura 6. Invernaderos cubiertos de plástico con ventilación en el cenit y las paredes laterales. 17

Figura 7. Invernadero tipo túnel y multitúnel 18

Figura 8. Multitunel con ventanas cenitales fija y móvil 18

Figura 9. Invernadero diente de sierra 19

Figura 10. Invernadero capilla a dos aguas o venlo..... 20

Figura 11. Invernadero tipo parral o casa sombra 21

Figura 12. Imagen de la estructura probada y tabla de la sección transversal de los elementos..... 33

Figura 13. Esquema de aplicación de las cargas y posición de los strain gages. 34

Figura 14 Esquema del colapso de la estructura e imagen del elemento colapsado 10-11 34

Figura 15. Tipo de invernadero, material de cubierta plástico y cargas de diseño. 38

Figura 16. Esquemas detallados y características estructurales de los invernaderos seleccionados de la región mediterránea de Turquía. 39

Figura 17. Alzados de los tres pórticos tipo y vista tridimensional de las estructuras estudiadas 41

Figura 18. Proceso de análisis estructural 46

Figura 19. Resumen de las diferentes herramientas utilizadas para obtener las cargas de diseño en invernaderos 47

Figura 20. Carga puntual $\boldsymbol{P}$ en un elemento en cantiléver. 50

Figura 21. Esfuerzos aplicados a un elemento infinitesimal. 51

CAPÍTULO 2

Figura 22. Definición de los valores de la dirección del viento. 64

Figura 23. Identificación de las superficies del modelo. 64

Figura 24. Comparación de los diferentes resultados de los coeficientes de presión. 66

Figura 25. Modelos de invernadero fabricados a escala. 68

Figura 26. Carga aerodinámica por unidad de superficie a 0° (al nivel del mar). 70

Figura 27. Carga aerodinámica por unidad de superficie a 90° (al nivel del mar). 71

Figura 28. Carga aerodinámica por unidad de superficie a 180° (al nivel del mar). 71

Figura 30. Vórtices generados en la parte superior del modelo por el desprendimiento del flujo. 72

Figura 31. Dirección de las corrientes de aire en el modelo. 73

Figura. 32. Vórtices adyacentes a las esquinas. 73

Figura 33.Simulación por elemento finito de las corrientes y vórtices de aire en el modelo de invernadero..... 74

Figura 34. Simulación de las corrientes de aire. 75

Figura 35. Distribución del viento en los laterales del modelo obtenidos por software. 76

CAPÍTULO 3

Figura 36. Elementos estructurales que conforman un invernadero de ventilación cenital..... 84

Figura 37. Ubicación de la extracción de las muestras a estudiar del elemento estructural. 85

Figura 38. Dimensiones del espécimen, así como la ubicación del extensómetro. 85

Figura 39. Diagrama esfuerzo-deformación, para un espécimen sin soldadura. 87

Figura 40. Diagrama esfuerzo-deformación, para un espécimen con soldadura. 87

Figura 41. Diagrama fuerza-deformación, para un espécimen sin soldadura. .. 88

Figura 42. Diagrama fuerza-deformación, para un espécimen con soldadura.. 88

Figura 43. Diagrama relación de Poisson-fuerza, para un espécimen sin soldadura. 89

Figura 44. Diagrama relación de Poisson-fuerza, para un espécimen con soldadura. 89

Figura 45. Comparativa de resultados esfuerzo-deformación, de especímenes con y sin soldadura. 90

Figura 46. Comparativa de resultados fuerza-deformación, de especímenes con y sin soldadura. 90

Figura 47. Comparativa de resultados relación de Poisson-fuerza, de especímenes con y sin soldadura. 91

CAPÍTULO 4

Figura 48. Ubicación del modelo definida por la orientación del flujo de viento incidente..... 100

Figura 49. Generación de vórtice por la acción de flujo de viento a $\mathbf{26\ m/s}$, (a) orientación a $\mathbf{0}$° y (b) orientación a $\mathbf{180}$°..... 101

Figura 50. Vórtices que generan zonas de presión negativa en sotavento del modelo de invernadero. 102

Figura 51. Distribución de velocidad y presión que se ejerce sobre el barlovento del modelo con orientación del flujo a $\mathbf{0}$°. 102

Figura 52. Zona de depresión actuando en el sotavento del modelo, por la acción del vórtice. 103

Figura 53. Esfuerzo principal máximo, debido al estado combinado de carga. 104

Figura 54. Esfuerzo de corte en dirección $\mathbf{Z}$, debido al estado combinado de carga. 105

Figura 55. Deformaciones que presentan los elementos estructurales, debido al estado combinado de carga. 105

Figura 56. Ubicación de muestras para estudio metalográfico, ... 106

Figura 57. Micrografía correspondiente a la zona de soldadura donde se presenta una microestructura de ferrita. 107

Figura 58. Micrografía correspondiente a la zona cercana al pliegue del perfil. 108

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE UN INVERNADERO CON VENTILA CENITAL

Vicente López Bautista[1]
Carlos Alberto Villaseñor Perea[2]

RESUMEN

Los invernaderos se deben diseñar de acuerdo a normas en vigor o considerando las condiciones climáticas de la zona; es probable que la estructura diseñada para un país específico no cumpla la eficiencia estructural de un país diferente. En este trabajo se evaluó la capacidad estructural de un invernadero con ventila cenital, en su pórtico más limitativo, esa variante es típica en la región central de México. Se aplicó el Método de los Elementos Finitos (FEM) a un modelo tridimensional con el programa ROBOT V. 2014. Obteniéndose las tensiones que se producen en los diferentes elementos, a partir de un estado combinado de cargas. Para el caso de columnas y cuerda inferior las tensiones son superiores a las admisibles, por lo que se recomienda emplear perfiles de mayor sección, o la incorporación de otros elementos estructurales. La aplicación de estas herramientas ingenieriles ayudarían a garantizar la seguridad mecánica de la estructura de invernaderos y su optimización. Previamente se realizaron estudios de la carga de viento y la caracterización del material. En túnel de viento con un modelo a escala fueron estimados coeficientes de presión y la carga aerodinámica.

Además se realizó una visualización del comportamiento del flujo de aire utilizando inyección de humo y simulación FEM. Resultó que la tendencia de los coeficientes de presión y la visualización del flujo de aire coinciden para esta geometría, los resultados del estudio de la carga del viento se usaron para definir la carga dinámica.

Para la caracterización mecánica del acero se llevó a cabo un análisis teórico; un análisis de flexión de una viga en voladizo utilizando probetas del material, en este caso se midieron deformaciones con extensometría eléctrica; también se empleó simulación con ordenador. Las predicciones teóricas indicaron una mayor flexión que la que se presenta en las mediciones experimentales. Encontrándose un valor promedio del módulo de Young no coincidente con los valores estándares. Como resultado del ensayo experimental, el desplazamiento del eje neutro es mayor en las probetas sin soldadura, lo cual concuerda con la simulación FEM. Los valores de las constantes encontradas se emplearon en el software utilizado para determinar las tensiones.

Palabras clave: Invernadero, análisis estructural, cargas

[1] Autor de tesis
[2] Director de tesis

BEHAVIORAL ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF A GREENHOUSE WITH OVERHEAD VENT

Vicente López Bautista[1]
Carlos Alberto Villaseñor Perea[2]

ABSTRACT

Greenhouses should be designed in compliance with regulations and considering the climatic conditions of the area. It is likely that the structure designed for a specific country does not meet its intended structural efficiency in a different country. This work assessed the structural capacity of a greenhouse with overhead vents, in a more restrictive porch, a variant that is typical of central Mexico. The Finite Element Method (FEM) was applied to a three-dimensional model with ROBOT V. 2014 software. The stresses in the different elements were obtained from a combined state of loads. In the case of columns and bottom trellis, tensions are higher than what is acceptable, so we recommend using larger section profiles, or incorporating other structural elements. The application of these engineering tools help ensure the mechanical safety of the structure of greenhouses and their optimization. Previously, studies of wind load and material characterization were conducted. In a scale model wind tunnel, coefficients of pressure and downforce were estimated. In addition, the behavior of airflow using viewing smoke injection and FEM simulation were performed. The pressure coefficient and the air flow visualization tended to coincide for this geometry. The study results of the wind load was used to define the dynamic load. To characterize steel mechanics a theoretical analysis was carried out, analyzing the bending of a cantilever beam using material samples. In this case, strain was measured with an electrical extensometer; computer simulation was also used. Theoretical predictions indicated greater bending than is reported in experimental measurements. Finding an average value of Young's modulus does not coincide with the standard. As a result of the experimental test, the displacement of the neutral axis is greater in the non-welded specimens; this is consistent with FEM simulation.The values of the constants found were used in the software to determine the stresses.

Keywords: Greenhouse, structural analysis, loads

[1]Thesis author
[2]Thesis advisor

INTRODUCCIÓN

La agricultura protegida mexicana en el año 2012 tenía una superficie total de 21531 ha (SAGARPA, 2012), presentando un amplio crecimiento y desarrollo de entre 20 y 25 % anual. En general los invernaderos constituyen el 44 % y la malla sombra el 51 % de la superficie total. Los invernaderos con cubierta plástica predominan de manera clara.

Dentro de la denominación de invernaderos se incluye una gran variedad de estructuras en muchos casos derivadas de las construcciones típicas. Uno de los más extendidos es el de estructura metálica con ventila cenital, el cual puede ser un túnel o multitúnel similar al de arco, pero puede estar formado por dos arcos –uno arriba del otro que permitan tener una ventila cenital en la parte más alta (FIRA, 2011). En el pasado, el desarrollo y diseño de invernaderos se basó principalmente en la experiencia (Elsner *et al*., 2000) y actualmente México y otras regiones del mundo, el establecimiento de los invernaderos se realiza en ausencia de proyecto de construcción, basándose únicamente en la experiencia y conocimiento local de las empresas constructoras, o inclusive para su instalación se acude a un herrero local (Briassoulis *et al*., 1997; Grafiadellis, 1999; Elsner *et al*., 2000a; Kendirli, 2006 y Yasemin-Emekli, 2010).

Los autores citados coinciden en señalar la necesidad que los invernaderos se diseñen de acuerdo a normas vigentes, o acorde a las condiciones climáticas de la zona, fundamentalmente atendiendo las cargas del viento y de la nieve.

Los invernaderos están diseñados para un menor nivel de seguridad estructural que las estructuras convencionales en consecuencia son estructuras muy

ligeras que quedan vulnerables a la carga del viento, de manera que en la práctica, a menudo experimentan daños durante las tormentas de viento (Figura 1). Debido a la necesidad de reducir al mínimo los costos, y a la demanda de un mayor nivel de transmisión de la luz y otros aspectos.

Para reducir el daño inducido por el viento puede ser común fortalecer las estructuras mediante el uso de miembros de mayor tamaño; sin embargo, este método provoca un aumento en el costo de la construcción.

Se han ensayado otras alternativas entre ellas cambiar la forma de la sección transversal (Uematsu *et al*., 2009); por ejemplo se tiene la propuesta de un nuevo tipo de invernadero con una sección transversal similar a un ala, lo que reduce significativamente las cargas de viento (Uematsu *et al*., 2005). De forma alternativa hacer las paredes laterales porosas también proporciona una reducción de las cargas de viento (Uematsu *et al*., 2005).

Dova *et al*. (2010) señalan que cuando un invernadero es diseñado para un país de la Unión Europea (EU) y se instala en un país diferente sin hacerle modificaciones apropiadas, la integridad estructural y la capacidad de soporte no cumple. La principal conclusión extraída de su trabajo es que para la EU existe la necesidad de un análisis de invernaderos de acero en el que se considere la geometría, el material y las condiciones ambientales.

Al respecto Kateris *et al*.,(2012) mencionan que el flujo de aire sobre una estructura de invernadero es un fenómeno complejo y complicado que depende principalmente de las características del viento (velocidad, dirección, etc.), la geometría de la estructura y el tipo de invernadero (un túnel o múltiple).

También indican que uno de los principales factores de esfuerzo de la estructura de soporte del invernadero es debido al viento. Para el cálculo de la carga del viento, se utiliza el coeficiente de presión externo. Este coeficiente se puede obtener de la norma EN 13031-1, (2001), que está especializada para invernaderos. Sin embargo, señalan que esos valores dados por el Eurocódigo conducen a construcciones pesadas, las cuales tienen efecto inverso sobre los costos, y por lo tanto se necesita más investigación en ésta área.

Muchos investigadores han llevado a cabo experimentos en escala ya sea completa o en condiciones de laboratorio con el fin de estudiar el flujo de aire sobre un invernadero. Se han llevado a cabo medidas experimentales a escala completa por Aldrich y Wells (1979), Pramod *et al*. (1980), Richardson *et al*. (1997), Molina-Aiz *et al*. (2004) y Richards *et al*. (2007). Mientras que en túnel se han llevado a cabo mediciones experimentales de viento por Acrivos *et a*l. (1968), Castro y Dianat (1983), Antoniou y Bergeles (1988), Vassiliou *et al*. (2000), Robertson *et al*. (2002), Ginger y Holmes (2003), y Blackmore y Tsokri (2006).

En las últimas décadas el uso de las computadoras ha creado un terreno fértil para el desarrollo de modelos matemáticos de simulación, donde las ecuaciones de momento y la continuidad son solucionados después de la discretización del campo de flujo con diferentes métodos, tales como elementos finitos, diferencias finitas y volumen finito (Fragos *et al*., 1997; Reichrath y Davies 2002; Mistriotis y Briassoulis, 2002; Tieleman, 2003; Shklyar y Arbel, 2004).

En el estudio realizado por Kateris et al., (2012) los coeficientes de presión de aire se calculan con un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD), este modelo simula el flujo de aire dentro de un túnel con las condiciones de contorno apropiadas. Los coeficientes de presión del viento calculados se comparan y discuten con las tasas correspondientes dadas por el Eurocódigo.

El análisis de estos antecedentes condujo a la necesidad de evaluar la capacidad estructural de la variante de invernadero típica con ventila cenital de la zona centro del país, en su marco estructural más limitativo con referencia a las condiciones climáticas, de cultivo, y material estructural, para comparar las tensiones generadas en los elementos de soporte.

Se hizo por tanto el análisis del comportamiento aerodinámico de un modelo de invernadero con ventila cenital, a través de la determinación de las presiones locales en túnel de viento utilizando un modelo a escala y considerando distintas direcciones del viento.

Se visualizó el comportamiento del flujo alrededor del modelo por medio de inyección de humo y el resultado se comparó con una simulación realizada en CFD para obtener una validación de la distribución.

Los coeficientes de la fuerza del viento fueron determinados y comparados con los valores reportados en algunos países.

El estudio del material se centró en caracterizar las constantes mecánicas mediante modelado teórico, modelado por software de elemento finito y medición experimental; en este último método los especímenes fueron instrumentados con dos galgas extensométricas para medir tanto las deformaciones normales como las transversales, estableciendo las constantes

mecánicas (Esfuerzo de cedencia, Modulo elástico y relación de Poisson), respectivamente.

Los resultados obtenidos permiten inferir que el perfil ocupado por el elemento estructural sufre de una asimetría de flexión, debido a que existe una rigidez mayor en la zona donde fue soldado, en comparación con la que no presenta alteración térmica, además el material presenta características diferentes de un acero estructural A36.

Los anteriores resultados se utilizaron en la definición de las condiciones de frontera en el software que se empleó para realizar el análisis de las tensiones.

En este mismo estudio se hace una comparativa de resultados obtenidos del estado de esfuerzos y deformaciones que presenta la estructura del invernadero con ventilación cenital, debido a la acción de un estado de cargas correspondientes a: el peso propio estructural, la carga de cultivo, la carga de viento y la combinación de éstas, realizado por el método de elemento finito en el programa *Autodesk Robot Structural* 2014.

El estado de cargas se indujo sobre dos tipos de material, correspondientes uno a la norma ASTM A36, y otro al caracterizado por ensayos a flexión en muestras obtenidas directamente de los perfiles. Se pudo observar que en la estructura con el primer material presentó valores más altos tanto en las deformaciones como en los esfuerzos normales y de corte.

Los valores máximos de los esfuerzos normales se localizan en las columnas que soportan la estructura, así como en los largueros horizontales que cargan la armadura superior del techo del invernadero. Dichos valores sobrepasan el límite elástico, lo anterior, se puede corroborar por los resultados de deformaciones que ostentan estos elementos.

Para los esfuerzos de corte, éstos no presentan valores importantes, por lo que solo se hace referencia al resultado obtenido en la estructura con acero caracterizado experimentalmente, bajo la acción de la carga combinada que fue de $141.88\,\mathrm{MPa}$ y el cual actúa en los largueros diagonales, que soportan el techo del invernadero.

Entre las conclusiones del trabajo se señalan la necesidad de revisar qué tipo de material se empleará para la construcción de los invernaderos y se recomienda emplear perfiles de mayor sección o la incorporación de nuevos elementos estructurales; así como la conveniencia de usar elementos de menor sección en las partes expuestas a menores esfuerzos.

Se pretende que los resultados de este trabajo sean útiles para el desarrollo de futuras investigaciones, así como para mejorar la seguridad mecánica de las estructuras y ser un referente para la industria de la construcción de invernaderos.

Justificación de la investigación

La falta de resistencia al viento es la causa de numerosos fallos estructurales en los invernaderos convencionales, provocando situaciones económicas críticas en el sector.

Esto, unido a la crisis por la que atraviesa en estos momentos el sector agrario, aparte de otro tipo de medidas, hace especialmente importante la labor de la investigación como fuente de innovación para mejorar la rentabilidad del sector en su doble vertiente, diversificación y mejora de la calidad en la producción por un lado y reducción de costos por otro, tanto los de producción como los de inversión en estructura.

Problema científico

La ausencia de investigación para los proyectos de diseño y construcción de invernaderos, aunado a que su ejecución se basa solo en la experiencia y conocimiento local de las empresas constructoras, tiene la inconveniencia de no garantizar la seguridad mecánica y el diseño estructural económico de los mismos, por esta razón el problema que se aborda en este trabajo es el siguiente:

Evaluar las condiciones estructurales en un invernadero con ventila cenital mediante herramientas de la ingeniería, para obtener la distribución de tensiones que se producen debido a las solicitaciones.

Hipótesis

Son el túnel de viento, el software de elemento finito y las mediciones experimentales las herramientas principales de ingeniería que permiten obtener la distribución de tensiones para evaluar las condiciones estructurales de un invernadero, en las condiciones climáticas de la región central de México.

Objetivos particulares

Para abordar la hipótesis planteada se llevarán a cabo las siguientes etapas en este trabajo de investigación:

- Determinar el comportamiento aerodinámico de un modelo de invernadero con ventila cenital
- Identificar el tipo de microestructura en perfiles estructurales que conforman el invernadero
- Determinar valores críticos de los esfuerzos (normales y de corte), así como las deformaciones que se presentan en cada miembro estructural del pórtico más crítico
- Obtener las constantes mecánicas del material empleado en los elementos estructurales de un invernadero.

Organización de la tesis

La tesis está organizada en seis capítulos; de los capítulos dos a cinco se presentan las investigaciones realizadas en forma de artículos científicos, conservando la estructura de los escritos enviados a revistas arbitradas; y en el capítulo final se presentan conclusiones, recomendaciones y perspectivas.

En el capítulo dos se evalúa el comportamiento aerodinámico de un modelo de invernadero con ventila cenital, a través de la determinación de las presiones locales en túnel de viento utilizando un modelo a escala, considerando distintas direcciones del viento.

El capítulo tres se centró en investigar diferentes muestras de acero con geometría rectangular obtenidas de elementos estructurales que conforman un invernadero de ventilación cenital, con el objetivo de caracterizar las constantes mecánicas extraídas del mismo. Los especímenes fueron instrumentados con dos galgas extensométricas para medir tanto las deformaciones normales como las transversales; esto, con la finalidad de poder caracterizar el material, estableciendo las constantes mecánicas (Esfuerzo de cedencia σ_0, Modulo elástico E y relación de Poisson ν), respectivamente. Se presentan los resultados correspondientes a los parámetros mecánicos establecidos por las deformaciones obtenidas por los extensómetros y los cuales fueron: esfuerzo - deformación, fuerza - deformación y relación de Poisson - fuerza.

En el capítulo cuatro se presenta el análisis del comportamiento de los esfuerzos, momentos y desplazamientos generados por la acción de cargas combinadas, apoyándose en software de elemento finito. Por último, se muestra un estudio metalográfico en elementos estructurales galvanizados que

presentan pandeo, con el fin de identificar posibles afectaciones en la microestructura.

Finalmente, en el capítulo cinco se presentan conclusiones y recomendaciones de todas las investigaciones, así como los temas a abordar en investigaciones futuras.

CAPÍTULO 1

1.1 Panorama general de la agricultura protegida

La agricultura protegida (AP) es un sistema de producción bajo diversas estructuras que protege cultivos, al minimizar las restricciones y efectos que imponen los fenómenos climáticos. Moreno *et al*., (2011) señalan que este sistema tiene como característica básica la protección contra los riesgos climatológicos (Figura 1), económicos (rentabilidad, mercado) o de limitación de recursos productivos (agua o superficie).

En México, la AP está en amplio crecimiento y desarrollo. La Secretaría de Ganadería Agricultura Pesca y Alimentación (SAGARPA 2010) reportó 11 760 ha en tanto que, para ese año la Asociación Mexicana de Agricultura Protegida, A.C. (AMHPAC) censó 15 300 ha. En general, los invernaderos constituyen 44 % y la malla sombra 51 % de la superficie total.

Los Estados que concentran el mayor número de hectáreas de cultivo bajo invernadero son Sinaloa (22 %) , Baja California (14 %) , Baja California Sur (12 %) y Jalisco (10 %) ; en estas cuatro entidades se concentra más del 50 % de la producción total de cultivos protegidos (Juárez *et al*., 2011).

Es pertinente mencionar que el dato de superficie es muy dinámico, pues la tasa de crecimiento anual de esta industria en México puede llegar al 20 %.

Figura 1. Colapso total de un invernadero después de vientos fuertes

En su caso las condiciones climáticas generan variaciones de presión sobre la cubierta de la estructura de un invernadero y esfuerzos en el marco y cimientos, de manera que los vientos pueden causan daño a velocidades relativamente altas.

Las estructuras más utilizadas de la agricultura protegida de México son los invernaderos, malla sombra, túneles altos y bajos.

En el inciso que sigue se presentan detalles acerca de estas estructuras.

Estructuras

Sí bien no existe una línea divisoria definida entre un invernadero tipo túnel y un macro túnel, se ha optado por considerar como elemento de referencia el volumen de aire encerrado por metro cuadrado de piso cubierto.

Algunas consideraciones para diferenciar túneles bajos y altos, así como invernaderos son las siguientes:

a) Túnel bajo. Estructura con una relación volumen/superficie (v/s) de 1/1 a 1.7/1, es decir, de 1 m3 por m2 a 1.7 m^3 por m^2. Son estructuras simples dentro de las cuales apenas se puede realizar alguna labor mínima de cultivo.

b) Túnel alto. Estructura con relación v/s de 1.8/1 a 3/1, en las que se puede trabajar en su interior, cuentan con posibilidades de ventilación controlada y pueden disponer del algún dispositivo de calefacción.

c) Invernaderos. Estructuras con relación v/s superiores a 3/1.

Uno de los elementos distintivos del invernadero respecto a la demás estructuras de protección es la facilidad del desplazamiento de los trabajadores para realizar las labores dentro del invernadero, así como los medios mecánicos y la disponibilidad de manejo y control del ambiente interno, condiciones que precisan de determinadas dimensiones en cuanto a altura, anchura, y por lo tanto del volumen por unidad cubierta (Juárez *et al*., 2011).

Las estructuras del invernadero pueden ser sencillas, tipo artesanal (hechos con material y conocimiento locales) o más complejas, tipo industrial (altamente mecanizados y equipados.

Zabeltitz (1999) agrupó las estructuras de invernaderos de acuerdo a tres criterios:

- Características constructivas: geometría, pendiente de cubierta y orientación.
- Material de cubierta: vidrio, plástico rígido, plástico flexible o combinaciones de ellos.
- Material de construcción: acero, aluminio, madera o combinaciones de ellos.

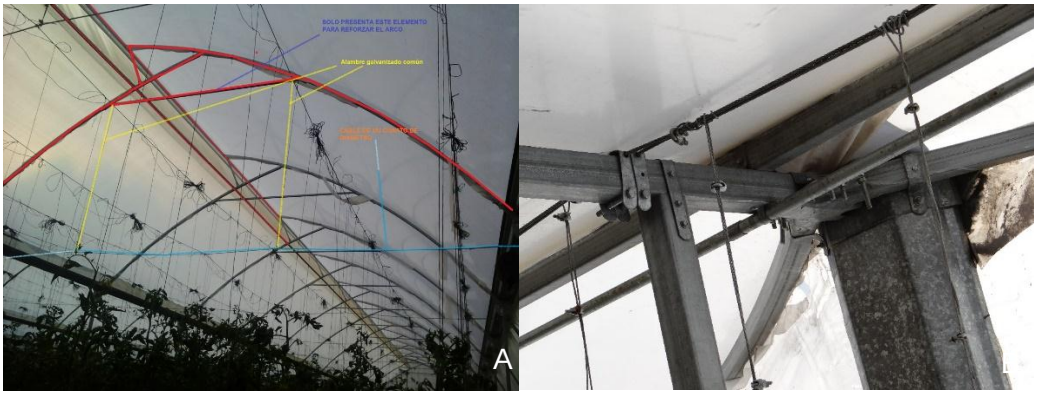


Figura 2. Estructura (a) y materiales de construcción (b) de un invernadero en México.

El tipo de material de la estructura condiciona la geometría y la altura del invernadero ya que debe soportar diferentes cargas (viento, nieve, peso de la estructura, peso de los equipos, etc.). Los materiales habituales que están presentes en los invernaderos son madera, acero (Figura 2) o aluminio y las formas más frecuentes son: techos planos, techos planos simétricos a dos aguas, techos planos asimétricos, arco redondeado y arco en punta (FAO, 2001).

Se utilizan estructuras con poca altura (y poco peso) para con menor carga de viento y, estructuras de mayor altura (más de 5 m) y materiales resistentes para mayor carga y para transmitir más radiación.

El cambio de geometría del invernadero de plano a circular, ha sido posible gracias a la incorporación de materiales flexibles ya que en invernaderos con cubierta circular es más fácil tensar la película de plástico que sobre superficies planas, la cual confiere mayor resistencia al viento.

Hoy en día los invernaderos están presentes en la mayor parte del mundo pero, existe una gran diversidad en cuanto a tipología (Díaz *et al.,* 2001).

Respondiendo a la diversidad en clima y la disponibilidad de recursos de las diferentes regiones ha hecho que no exista una estructura universal.

En varios países, especialmente con climas cálidos los invernaderos cubiertos de película plástica son extensivamente usados (Elsner *et al*., 2000).

1.2 Tipos de invernaderos

Las variantes más comerciales son las que se presentan a continuación:

1.2.1 Invernaderos unitúnel. La forma más simple de los invernaderos plásticos (Figura 3).

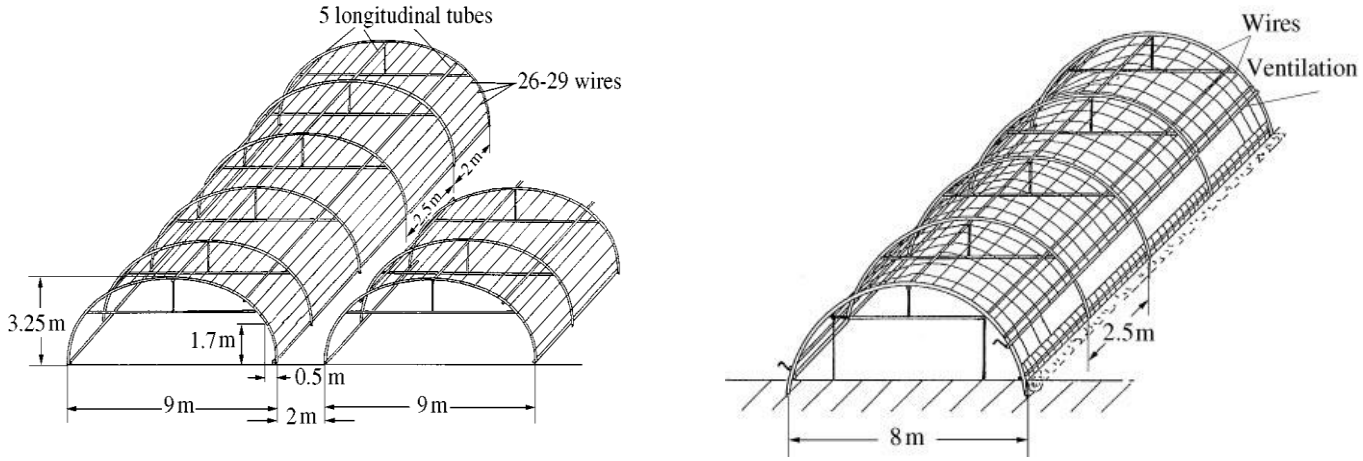


Figura 3. Ejemplos de invernadero túnel con techo redondeado, y con ventilación lateral continua en la pared (Fuente: Elsner *et al*., 2000).

1.2.2 Invernaderos techo a dos aguas con cubierta de plástico. Diferentes tipos de invernaderos techo a dos aguas con cubierta de plástico se construyen en todo el mundo (Fig. 4). Las columnas son de madera, acero o concreto. En muchos casos, son estructuras simples.

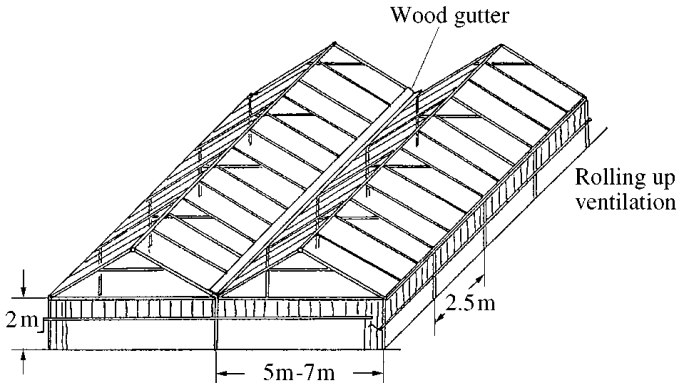


Figura 4. Construcción de techo a dos aguas, cubierto con película plástica (Fuente: Elsner *et al*., 2000).

1.2.3 Invernaderos con techo en forma de arco. El marco de este tipo de invernaderos es hecho de tubos de acero. La forma del techo puede ser redondo o gótico (Figura 5). Las estructuras de arco gótico tienen ventajas sobre los arcos redondos porque el agua de condensación puede fluir mejor hacia fuera en el lado interior del plástico, por lo tanto un menor número de gotas de agua caen sobre las plantas (Figura 5).

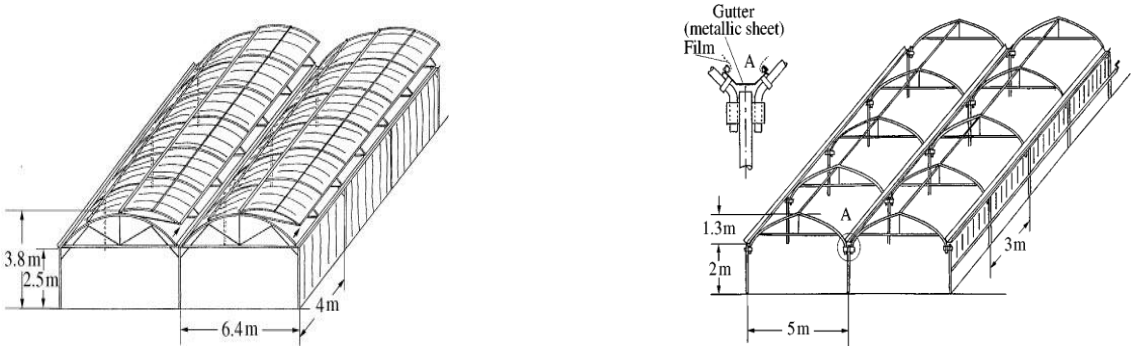


Figura 5. Construcción con película plástica a la izquierda con ventilación de techo continua, a la derecha construcción arco gótico con tubo de acero. (Fuente: Elsner *et al*., 2000).

Invernaderos con ventilación a lo largo del cenit también pueden estar equipados con ventilación de rodadura en las paredes laterales (Figura 6).

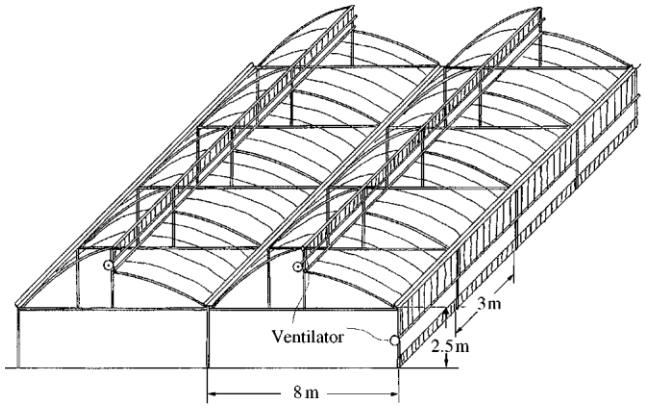


Figura 6. Invernaderos cubiertos de plástico con ventilación en el cenit y las paredes laterales (Fuente: Elsner *et al*., 2000).

1.3 Tipos de invernaderos en las regiones de México

Los invernaderos más comunes y que predominan en el mercado nacional, son los siguientes:

1.3.1 Túnel o Monocapilla. Es una nave de un solo túnel de techo curvo, con ventilación lateral (Figura 7).

1.3.2 Multitúnel o Arco. Está formado por grupos de túneles con techos en forma de arco, en donde la ventilación es lateral. Son aerodinámicos, con buena resistencia al viento y buena captación de radiación solar. El arco del techo es continuo y no permite tener ventanas cenitales (Figura 7).

Figura 7. Invernadero tipo túnel y multitúnel (Fuente: FIRA 2011)

1.3.3 Invernadero Multitúnel con Ventana Cenital. Son invernaderos similares al de arco, pero pueden estar formados por dos arcos –uno arriba del otro- que permiten tener una ventana cenital (en la parte más alta) por donde se puede sacar el calor que se acumula en esa parte del invernadero. Otros modelos presentan un solo arco al que se le adaptan ventanas cenitales de diferentes modalidades (curvas, rectas, sencilla o doble en forma de mariposa).

Estos invernaderos presentan una salida de aire caliente (que se eleva por ser menos denso) que es extraído por la formación de corrientes convectivas, por lo que son adecuados para climas calientes y tropicales (Figura 8).

Figura 8. Multitunel con ventanas cenitales fija y móvil (Fuente: FIRA 2011)

1.3.4 Invernadero Diente de Sierra. Los techos de estas estructuras son curvos en su mayoría, aunque pueden ser rectos, pero un lado siempre es de mayor altura que el otro, por lo que el agrupamiento de túneles presenta la forma de los dientes de una sierra. La ventilación se da en los espacios donde se unen una parte alta con una baja (figura 9).

Figura 9. Invernadero diente de sierra (Fuente: FIRA 2011)

1.3.5 Invernadero en Capilla o a Dos Aguas. El techo es de dos aguas que se unen en la parte central, que es la más alta. Este tipo de estructura es frecuentemente utilizada con cubiertas de vidrio, conocidos también como Tipo Holandés o Venlo. La inclinación de sus techos no permite la formación de bolsas de agua (figura 10).

Figura 10. Invernadero capilla a dos aguas o venlo (Fuente: FIRA 2011)

1.3.6 Invernadero Tipo Parral o Casa Sombra. Son estructuras formadas por postes y alambres de unos 3 metros de altura y anchos de 20 o más metros sobre los que se tiene un tejido de alambre que soporta una malla anti-áfidos y que puede ofrecer cierto porcentaje de sombreo. Se tienen versiones en las que al techo se les coloca plástico de invernadero para dar protección contra la lluvia y los excesos de humedad. La ventilación es a través de las paredes laterales. Los techos tienen poca pendiente por lo que se hacen estancamientos de agua y se dificulta su salida (figura 11).

El contacto de la malla de alambre, así como el encharcamiento de agua favorecen la ruptura de los plásticos. Su mayor uso es en zonas semiáridas del norte y noroeste del país, debido a su baja precipitación.

Figura 11. Invernadero tipo parral o casa sombra (Fuente: FIRA 2011)

Los invernaderos pueden presentar diversas variantes u opciones como son la ubicación de las ventilas, las paredes de posición vertical o inclinadas, con ventanas laterales y/o frontales o sin ventanas al estar cubiertos por plástico los 4 puntos cardinales, el uso de una o dos capas de plástico, entre otras.

1.4 Cargas en el análisis de invernaderos

Los invernaderos son estructuras ligeras que deben tener una alta transmitancia de la radiación solar para el crecimiento óptimo de las plantas. Las estructuras también deben ser capaces de soportar la carga debida al viento, la nieve, la lluvia y el granizo, así como la carga permanente, y las cargas de servicio. Los daños a los invernaderos, y en especial al invernadero plástico- ", son muy a menudo causados por las tormentas y las fuertes nevadas, debido a que los componentes estructurales principales no están diseñados para soportar tales cargas" (Elsner *et al*., 2000).

A fin de que los invernaderos satisfagan los márgenes de seguridad y para evitar daños graves, estos autores indican que la estructura del invernadero

debe ser diseñada de acuerdo con las normas pertinentes, las cuales ofrecen la orientación para el cálculo de varias cargas de diseño.

Esas normas o códigos de prácticas ya han sido preparadas en varios países. Las normas francesas NFU 57063 para unitúneles y NFU 57064 para invernaderos de plástico multitúneles, la norma británica y el Código de Prácticas para los invernaderos Holandeses con revestimientos flexibles son señaladas como ejemplo en la obra citada. Todas ellas son antecesoras de la norma común europea EN 13031-1.

Las principales cargas, que tienen que ser tomadas en cuenta en el diseño de invernaderos según Elsner *et al*., (2000) y Yasemín *et al*., (2010) son:

(1) carga permanente o carga muerta;

(2) cargas impuestas (carga de cultivo);

(3) instalaciones;

(4) carga de nieve;

(5) carga de viento; y

(6) carga sísmica

Combinaciones específicas de esas cargas, dadas en los estándares, deben ser consideradas para un diseño seguro.

Las normas clasifican los invernaderos en función de su duración prevista mínima (período de referencia). Esta clasificación se basa en la estimación de la vida útil de los invernaderos desde el punto de vista económico y técnico. Se debe observar que la vida útil de los invernaderos es mucho más corto que el

tiempo de vida de edificios convencionales; por tanto, las cargas deben calcularse de acuerdo con ello.

(1) Carga muerta.

El cálculo de la carga muerta se basa en pesos unitarios de los componentes estructurales y los materiales de cubierta. En algunos casos el peso de equipo fijo tales como calentadores, iluminación, sistemas de irrigación, sombreo y mallas térmicas es también incluido. Otros estándares excluyen el peso de la instalación aún sí es permanente, considerando eso separadamente.

(2) Carga de instalación.

Las cargas aplicadas a la estructura del invernadero por los elementos de soporte (ejemplo cables) de las cargas de servicio, tales como calentadores, enfriamiento, iluminación, sombreo, irrigación, ventilación y equipo de aislamiento, representan una carga permanente que se define como carga de instalación.

(3) Carga de cultivo.

Esta carga tiene que considerarse en invernaderos donde la estructura soporta el peso del cultivo, el cual es suspendido a través de cables verticales. Sí los cultivos son suspendidos sobre alambres horizontales separados, las fuerzas de tensión horizontales transmitidas a los faldones laterales tienen que ser tomadas en cuenta.

(4) Carga de nieve.

El cálculo de la carga de nieve se basa en datos de referencia en un periodo de retorno igual a 50 años. Se calcula el área expuesta del invernadero mediante la adopción de la proyección horizontal de la cubierta. La carga básica de nieve se multiplica por varios coeficientes para tener en cuenta la forma del techo, la inclinación de la cubierta la exposición de la cubierta a la nieve, el período de recurrencia, la vida útil del invernadero y la calefacción o no del interior.

(5) Carga de viento.

La presión del viento es calculada como una función del coeficiente de presión del viento correspondiente al segmento de la cubierta que se examina y la presión dinámica del viento. Las cargas del viento aparecen como fuerzas de presión y de succión en la superficie del invernadero. La presión dinámica del viento depende de la altura del invernadero, que es definida cómo la distancia entre el nivel del suelo y la altura media entre canalón o aleros y el punto más alto del techo (Elsner *et al*., 2000).

Debe ser notado que varias de los estándares adoptan diferentes aproximaciones para el cálculo de las cargas de viento. Como resultado, las cargas de diseño pueden diferir significativamente dependiendo del estándar usado.

Es importante señalar que los coeficientes de presión del viento determinan las fuerzas de succión y presión, como una función de la presión dinámica del viento, este depende de la forma y localización del segmento de cubierta para el cuál las fuerzas de viento son calculadas (Elsner *et al*., 2000).

(6) Carga sísmica

No está previsto el cálculo de La carga sísmica en estructuras de invernadero, por lo tanto la consideración de carga tiene que seguir la metodología correspondiente para edificios convencionales (Elsner *et al*., 2000).

Un aspecto relacionado con las cargas es la cimentación y anclaje ya que debido a que el diseño de la estructura de invernaderos es ligera, se debe prestar especial atención a la capacidad de las bases para resistir las fuerzas de levante bajo la acción del viento.

Para cimentación en bloques de concreto la máxima carga vertical hacia arriba no debe exceder el peso de los cimientos. Para las estructuras de bajo costo, tales como los unitúneles, los cimientos de la estructura son realizados mediante anclajes ligeros (uso de tubo macho en el terreno sobre el cual el arco es conectado o de tornillos anclados).

De las cargas descritas anteriormente, es relevante mencionar que una de las fuerzas más destructivas alrededor de un invernadero es el viento. Las cargas del viento pueden ser calculadas por la velocidad de flujo libre, multiplicada por el coeficiente de la fuerza del viento. Los coeficientes de la fuerza del viento dependen de la dirección, forma del invernadero, tamaño, y presencia o ausencia de ventilas y rompe vientos. Generalmente esos coeficientes pueden ser determinados en experimentos en túnel de viento.

Resumiendo, en el cuadro 1 se muestran las cargas mínimas de diseño para los invernaderos y en el Cuadro 2 se presentan las cargas y velocidades de viento en algunos de los países estudiados.

Cuadro 1. Cargas mínimas de diseño para componentes principales en invernaderos

Descripción de la carga	Valor mínimo ($kg \cdot m^{-2}$)	Valor ($lb \cdot ft^{-2)}$
Muerta		
Elementos principales, y cubiertas de polietileno	10	2
Armaduras	25	5
Cultivos soportados, tomates y pepinos	20	4
Viva, Trabajadores y materiales de reparación	25	5
Nieve 10 °C, mínima temperatura en invernadero	75	5
Viento, carga que actúa perpendicular a la superficie	50	10

Fuente: ASAE Standar 2005;

Cuadro 2. Cargas de diseño y velocidades de viento en algunos países

País	Carga de viento ($kN \cdot m^{-2}$)	Velocidad de viento ($m \cdot s^{-1}$)
Francia	29.0-91.0	22.0-38.0
Alemania	0.5-25.0	0.4-28.3
Grecia	0.5-25.0	0.4-28.3
Italia	29.0-91.0	24.0-31.0
Paises Bajos	29.0-91.0	19.26-32.7
Estados Unidos	0.5-25.0	0.4-28.0
España provincia ALMERÍA	1.65	26

Fuente: Elsner *et al*., 2000, Pérez *et al*., 2008.

El momento de flexión desarrollado en el marco en la base de la columna en barlovento es considerado como el efecto de carga más importante desde el punto de vista estructural (Uematsu *et al*., 2009).

1.5 Las herramientas de análisis estructural en invernaderos

Los procedimientos de análisis han mostrado una tendencia acelerada hacia el refinamiento. Vale la pena reflexionar sobre esta tendencia, para ejercer un juicio crítico acerca de los procedimientos que conviene emplear sobre un problema dado.

Actualmente el analista cuenta para apoyar su intuición esencialmente con tres tipos de ayuda: los métodos analíticos, la experimentación, las normas y manuales.

Deben considerarse estas como herramientas que ayuden y faciliten el proceso mental a través del cual se desarrolla el análisis y no como la esencia del análisis mismo.

Los métodos analíticos han tenido un desarrollo extraordinario en las últimas décadas. Se cuenta con procedimientos en modelos de estructuras complejas un ejemplo de revisión analítica se encuentra en el análisis estructural de invernaderos, en un estudio de cuatro especímenes de la región de Marmara en Turquía según Kendirli B. (2006).

En este estudio un total de cuatro tipos de invernaderos con la sección transversal más económica fueron seleccionados (Cuadro 3), enseguida el análisis estructural fue ejecutado usando el método de las fuerzas y el método de la distribución de momentos, al final los resultados fueron comparados.

Antes de la aplicación de ambos métodos, las cargas del propio peso de los elementos estructurales, la carga de instalación y la carga de viento que actúan sobre cada viga se definieron. El estándar Turco TS 498 para invernaderos fue usado para el cálculo de la carga de viento.

Dado que los invernaderos son utilizados para flores de corte no se tomaron en consideración las cargas de las plantas.

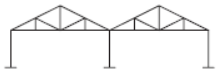
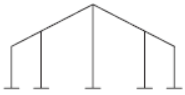
Relaciones de momento y fuerzas de corte fueron determinadas aplicando ambos métodos, una alta diferencia fue observada entre los valores obtenidos a partir del invernadero tipo multitúnel o en bloque con respecto a los demás

invernaderos que son tipo unitunel o aislados. No existiendo diferencias significativas entre los últimos.

Ocurren algunas diferencias en los cálculos hechos por los dos métodos debido a que el método de las fuerzas considera más parámetros de cálculo que el método de la distribución de momentos (Kendirli B. 2006). Estas diferencias se muestran en sí mismo en los invernaderos en bloque dado que ellos tienen más miembros estructurales y uniones.

Como resultado ambos métodos pueden ser usados en análisis de invernaderos tipo unitúneles.

Cuadro 3. Características dimensionales de los tipos de invernaderos

Tipo de invernadero	Características dimensionales de los invernaderos					Características del material (Acero estructural estándar)
	Ancho (m)	Longitud (m)	Altura lateral (m)	Altura a la cresta (m)	Ancho de la armadura (m)	
 Invernaderos multtúnel	18.00	48.00	3.15	4.20	4.00	Perfil del marco $L_{60.60.6}$
 Invernadero de un solo túnel	11.0	45.00	2.20	4.00	3.00	Perfil del marco $L_{60.60.6}$
Invernadero de un solo túnel	5.00	48.00	2.10	2.85	3.00	Perfil del marco $L_{40.40.4}$
Invernadero de un solo túnel	8.00	45.00	2.00	3.50	3.00	Perfil del marco $L_{60.60.6}$

FUENTE: Kendirli B. 2006.

Comentarios al proceso de análisis del trabajo anteriormente mencionado.

En primer lugar se observó que las cargas que afectan las barras de la estructura de los diferentes invernaderos ordenadas en forma descendente

serían como sigue: la carga de peso estructural reporta el mayor valor, seguida de la carga de instalación y por último la carga de viento.

En lo referente a la modelación de las cargas sobre las estructuras los miembros más esforzados son las columnas a barlovento en todos los modelos, indicando que en los mismos modelos los miembros en barlovento y sotavento presentan valores similares en el techo.

La carga de viento fue definida por el estándar Turco.

Aunque por regla general siempre debe tenderse al empleo de los métodos de análisis que mejor representen el fenómeno que se quiere estudiar, conviene llamar la atención sobre el peligro que representa que no se sepa determinar de manera adecuada los datos que alimenten el modelo y que no se tenga sensibilidad para juzgar si los resultados que se obtienen son realistas.

Una valiosa ayuda para el proceso de análisis puede obtenerse a través de la experimentación, de esta manera, la respuesta de un modelo ante determinado sistema de carga, medida en términos de desplazamientos o deformaciones se puede relacionar con la estructura real e inferir de ello conclusiones.

Una modalidad de este tipo de estudios son las pruebas en que la estructura misma se somete a cargas que reproducen las que debe soportar su operación normal o ante condiciones extraordinarias. Esto constituye una comprobación directa de la seguridad de la estructura.

Este tipo de trabajos se ejemplifica con el estudio realizado por Castellano *et al*., (2005) titulado, estructuras de invernaderos, análisis del estado límite de servicio, resultados experimentales y aspectos normativos.

En este trabajo se describen los resultados de deformaciones y esfuerzos, comparando las deformaciones medidas con las calculadas por medio de una simulación con software de elemento finito de la estructura y los valores límites principales asignados por el estándar común europeo (EN 13031-1).

En el análisis se utilizaron las siguientes herramientas: ensayo a escala real utilizando gages para medir las deformaciones; simulación FEM 2D y 3D utilizando SAP 2000; y se compararon los resultados con los valores límites asignados por la norma.

Se Utilizó una tipología comercial de invernadero con las características siguientes: estructura de acero, tres marcos conectados por canalones, techo a dos aguas, barras que sostienen el revestimiento, montantes y diagonales que forman la armadura, todo ello fue probado a escala real, colocando cargas verticales y una carga horizontal que simularía al viento, las cargas verticales fueron realizadas con tanques, llenándolos de agua y la carga horizontal colocada en la parte superior de una columna mediante un alambre de acero y una polea ligados a un marco reticular de acero (Figura 12).

Las cargas impuestas a la estructura se clasificaron en dos rangos: el rango T1 caracterizado por bajos niveles de carga y un comportamiento elástico, además T1 con 10 pasos de carga, mientras que para T2 las cargas se aplicaron hasta el colapso, T2 con siete pasos de carga.

Los desplazamientos de los nodos 8,9,10,11 y 14 según (figura 13), fueron medidos por medio de extensómetros mecánicos que tienen 0.1 mm de precisión.

La carga horizontal fue medida por una celda de carga a tracción, con un valor de 20 000 N, R 350 Ω, conectada al alambre de acero, el cual unió la parte superior de la columna a la polea.

Los esfuerzos fueron medidos con 13 strain gages o extensométros (Figura 13), cuya posición fue decidida por medio de un análisis estructural preliminar el cual identificó las secciones más críticas, en un modelo cargado por una combinación de fuerzas que simularon las cargas experimentales.

Los valores mayores de esfuerzo fueron encontrados sobre las columnas y un valor constante de esfuerzos sobre la armadura. Es interesante notar el comportamiento de la armadura con esfuerzos de compresión en elementos superiores o cuerda superior y esfuerzos de tensión en elementos inferiores o cuerda inferior. Sin embargo los esfuerzos medidos son siempre menores a 160 MPa esto quiere decir que el material estructural está trabajando en el rango elástico y el colapso ocurrió por inestabilidad del elemento

comprimido 10-11 según (Figura 14); se resalta que el colapso ocurrió por la combinación de cargas horizontal y vertical.

En lo que a los desplazamientos se refiere, se destaca que los tales medidos son más altos que los calculados por la simulación 2D y 3D, debido al problema de simular las conexiones reales contra las ideales, como resultado este valor debe ser cuidadosamente tomado en cuenta por los diseñadores en el modelado de la estructura.

El estándar establece que los invernaderos tipo A deben ser diseñados considerando el SLS y el UlS (estado límite último); en este caso el desplazamiento horizontal es inferior que el valor límite estándar de 66 mm.

En las deflexiones ocurre la misma tendencia los valores medidos son inferiores que los valores límite la máxima caída en los elementos de la armadura fue registrado en el nodo 11 con un valor de 6.7 mm.

Element		Element		Element		Element		Element	
15-8 16-14	60 x 120 s=3.0mm	9-2 13-6 10-2 12-6 10-3 12-5 11-3 11-5	30 x 30 s=1.5 mm	8-9 9-10 10-11 11-12 12-13 13-14	30 x 60 s=2.0 mm	9-1 13-7	60 x 60 s=1.5 mm	11-4	20 x 60 s=1.5 mm
								1-2 4-5 2-3 5-6 3-4 6-7	60 30 14 s=1.5mm

Figura 12. Imagen de la estructura probada y tabla de la sección transversal de los elementos

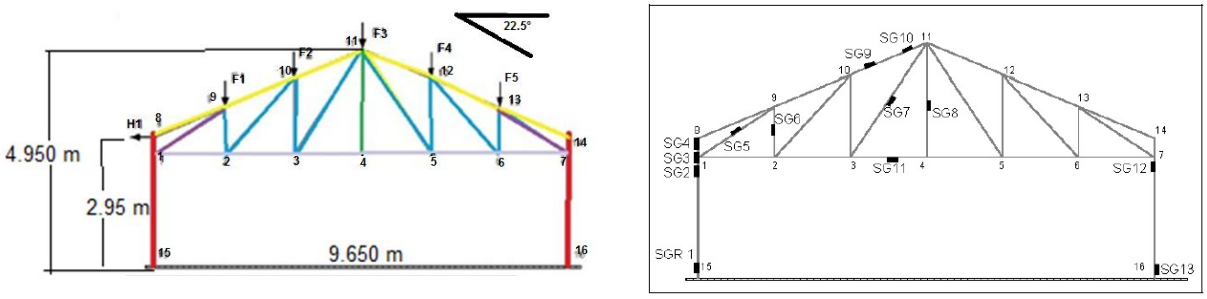


Figura 13. Esquema de aplicación de las cargas y posición de los strain gages.

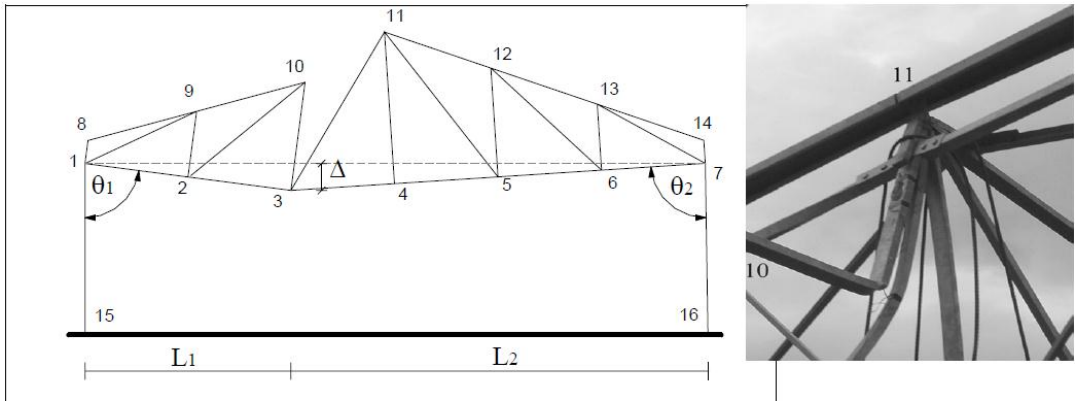


Figura 14 Esquema del colapso de la estructura e imagen del elemento colapsado 10-11

Comentarios relativos al trabajo anterior

En el experimento, específicamente en la medición de los gages en lo que respecta a la base de la columna el strain gage 1 y strain gage 13 nos darían un valor de la deformación máxima sin separar la deformación debido al fenómeno de flexión por carga horizontal de las columnas y el fenómeno de la carga axial debido a las cargas verticales aún más no se separa la deformación debido a la torsión si la hubiera.

El colapso del elemento se debió a la combinación de cargas verticales y horizontales en este caso en compresión de dicho elemento con la carga colocada en esa forma; simulando la carga de viento sí se hubiera colocado la carga horizontal en sentido contario en la otra cara posiblemente de hubiera deformado excesivamente el elemento 11-12.

Tampoco describe o se relata nada sobre el posible hundimiento de los cimientos que sería reportado por los strain gages 2 y 12

No se describe que tipo de strain gage, su factor y la forma en cómo se obtuvieron los datos desde el strain gage hasta el valor numérico de la deformación.

Se dice que todos los elementos están trabajando en el rango elástico aun así hubo colapso de la estructura estudiada.

Actualmente están disponibles sistemas de cómputo que permiten generar una gran variedad de modelos estructurales y analizar su respuesta ante una gran variedad de condiciones de carga. Estos sistemas permiten visualizar de forma gráfica y generar de manera automática muchas de las propiedades geométricas y mecánicas requeridas para el análisis.

También con los post-procesadores se generan los resultados y representaciones graficas de las configuraciones de deformaciones y de esfuerzos o aún de las formas de vibrar las estructuras sujetas a efectos dinámicos. La mayoría de estos sistemas de cómputo están basados en la técnica de elementos finitos.

La complejidad de los problemas y el número de ecuaciones simultáneas que estos sistemas pueden resolver son asombrosos. Ejemplos los constituyen los softwares SAP 2000, Robot Structural y Ansys.

En lo relacionado a análisis estructural de invernaderos se presenta el siguiente análisis del trabajo realizado por Yasemin *et al*., (2010) en la región mediterránea de Turquía; el análisis fue ejecutado sobre algunos invernaderos seleccionados (Figura 16), este se realizó con el programa SAP2000. Antes de la aplicación del programa las cargas principales (carga muerta, cargas impuestas, instalaciones, carga de viento, nieve y sísmica) fueron calculadas.

Los valores son los siguientes:

Cuadro 4. Cargas de diseño en invernaderos de la región mediterránea de Turquía.

Cargas	Valor
Carga de cultivo	7 kg/m
Carga de instalaciones	7 kg/m
Carga de nieve	Fue despreciada (región mediterránea) considerando datos climatológicos de la región de estudio
Carga sísmica	Fue despreciada ya que no limita la seguridad para los trabajadores (Elsner *et al*., 2000).
Carga de viento	Las estructuras deben ser diseñadas para resistir una velocidad del viento de 130 km h^{-1} (36.11 ms^{-1})
Carga de su propio peso	Acero mencionado en cuadro 3

FUENTE: Yasemin *et al*., (2010)

Las cargas de cultivo, peso propio de los elementos, y carga de instalaciones son consideradas cargas muertas; la carga de viento se considera carga dinámica, según el estándar turco 498 además este fue usado para los cálculos de la carga de viento.

Se observa valor muy alto de la velocidad del viento en este artículo con respecto a los valores reportados en otros países.

Todas las cargas enunciadas en la figura 15, fueron usadas en el software SAP 2000.

En el software se dibuja el modelo del tipo de invernadero, con la interface de usuario gráfica que aparece sobre el monitor. Este modelado se realiza con puntos nodales en el número de los cuales exactamente determina la geometría del tipo de invernadero.

Los tipos de material usados en las vigas y las propiedades de sección de las mismas vigas son definidas, posteriormente .

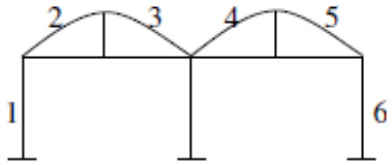
En este programa después de ingresar los datos análisis estático y dinámico fue ejecutado para cada construcción de invernadero de la figura 16.

Encontrándose los resultados siguientes:

Para los invernaderos tipo 1, 2, y 4 los cuales son cubiertos con vidrio no pueden soportar carga muerta y carga dinámica de manera segura dado que las relaciones de tensión son más grandes que 1. Sin embargo los invernaderos cubiertos con plástico que incluyen los tipos 3 y 5 la mayoría

de sus elementos pueden soportan las cargas muertas pero no las cargas dinámicas. Sin embargo todos los invernaderos investigados no soportan las cargas dinámicas.

El tipo 5 de invernadero es la construcción más común en la región, y en esos invernaderos, el material de las columnas es de acero con sección de perfil en L y los arcos también de acero de sección de perfil en T (Figura 14), cabe hacer el señalamiento que este tipo de invernadero es el que más se asemeja a los tipos construidos en México y aun específicamente en la región central del país.



Carga por viento máxima 336 Kg

Carga de cultivo 154 kg

Carga de instalación 154 kg

Despreciaron carga de granizo

Carga estructural 13 kg

Artículo

Figura 15. Tipo de invernadero, material de cubierta plástico y cargas de diseño.

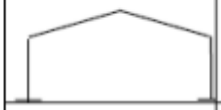
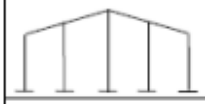
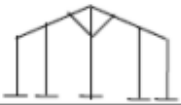
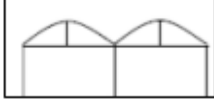
Tipo de invernadero	Ancho (m)	Longitud (m)	Altura lateral (m)	Altura a la cresta (m)	Ancho de la armadura (m)	Material de cubierta	Material del marco (acero)
	16.5	60.0	2.1	5.1	2.5	Vidrio	$L_{40,40,5}$ $T_{40,40,5}$
	11.3	50.0	1.8	3.9	0.5	Vidrio	$L_{40,40,4}$ $T_{35,35,4.5}$
	20.0	42.0	4.0	6.0	0.75	Plástico	$L_{50,50,5}$ $T_{35,35,4.5}$
	16.5	50.0	1.8	5.5	2.5	Vidrio	$L_{40,40,4}$ $T_{30,30,4}$
	11.0	40.0	2.0	3.0	2.0	Plástico	$L_{40,40,4}$ $T_{30,30,4}$

Figura 16. Esquemas detallados y características estructurales de los invernaderos seleccionados de la región mediterránea de Turquía.

Es de resaltar que al comparar los resultados sobre el marco de invernadero en el elemento más crítico que es la columna, existe concordancia con (Castellano *et al*.,2005 y Carreño *et al*., 2011); por lo anterior en el estudio que se realizará es necesario poner énfasis en estos resultados.

Comentarios al trabajo:

El software SAP 2000 puede ser usado para análisis dinámico y estático de diferentes proyectos de invernadero.

Los usuarios pueden hacer análisis de proyectos de invernaderos con pocas entradas dado que los datos los cuales son usados en análisis dinámico y estático son previamente calculados.

Para ejemplificar esta herramienta se describe un segundo trabajo en el cual se analiza la capacidad estructural de los elementos horizontales y verticales que componen el pórtico resistente más limitativo de la variante de invernadero multitúnel más utilizada en el sudeste de España, (Carreño *et al*., 2011).

El objetivo de este trabajo fue 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) y 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.

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 encuentras 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. 17).

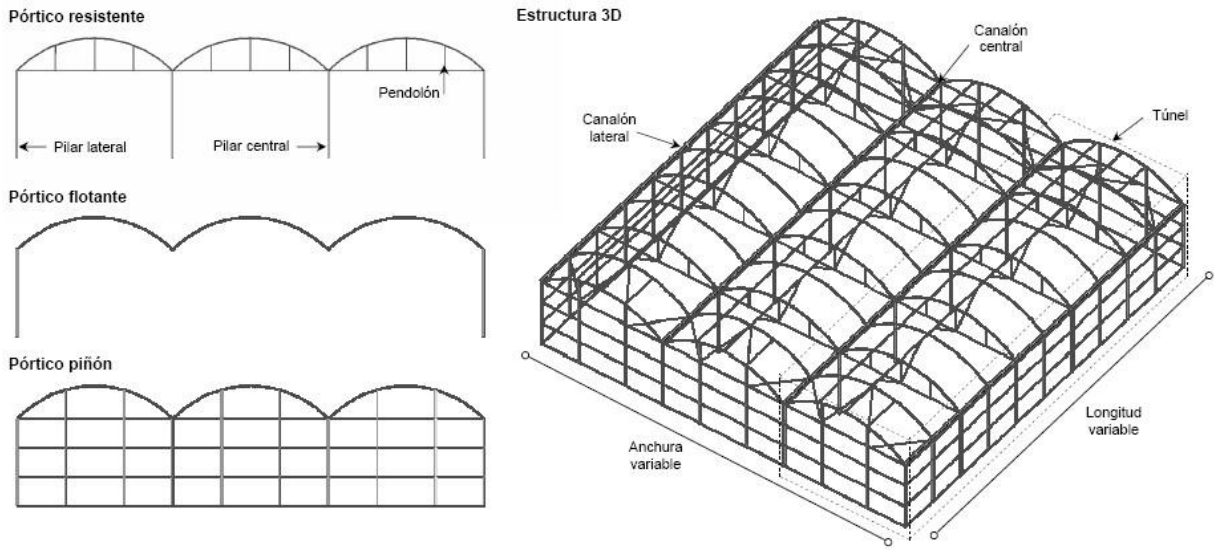


Figura 17. Alzados de los tres pórticos tipo y vista tridimensional de las estructuras estudiadas

Las valores característicos de la acciones han sido definidas de acuerdo a la norma (Cuadro 4). Prácticamente la totalidad de los invernaderos de la cuenca mediterránea emplean plástico como material de cerramiento. Según UNE-EN 13031-1 (2002), 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 el (Cuadro 5).

Cuadro 5. Acciones de cálculo

Descripción de la carga	UNE-EN-13031-1
Permanente	Estimación automática por el programa
Viento	Velocidad de referencia 27 ms^{-1} segúnUNE 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

Fuente: (Carreño-Ortega 2011).

Cuadro 6. Combinación de acciones estudiadas

Hipótesis	UNE-EN-13031-1
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

Fuente: (Carreño-Ortega 2011).

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

En la descripción de resultados se presentan los valores máximos y una figura representativa del estado de tensiones (Figura 11)

Con el fin de realizar un análisis con referencia a condiciones de nuestro país se presentan resultados de valores máximos de tensiones alcanzados en invernaderos de 3 túneles (Cuadro 7) ya que cómo se describe en el trabajo con el aumento del número de túneles las tensiones disminuyen o permanecen sin variación.

Cuadro 7. Tensiones máximas en elementos estructurales

Dirección del viento	Tensiones máximas en elementos
Viento 0°	Arcos laterales 636.11 MPa, arcos centrales 211.1 MPa
Viento 90°	Arcos laterales 212.03 MPa, arcos centrales 230.92 MPa,
Viento 0°	Tirantes de cercha 553.43 MPa
Viento 90°	Tirantes de cercha 420.65 MPa
Viento 0°	Canalón lateral 434.82 MPa
Viento 90°	Canalón lateral 378.31 MPa
Viento 0°	Canalón central 620.87 MPa
Viento 90°	Canalón central 380 MPa
Viento 0°	Pilar lateral 1.101,54 MPa
Viento 90°	Pilar lateral 400 MPa
Viento 0°	Pilar central 779.76 MPa
Viento 90°	Pilar central 400 MPa
Viento 0°	Montantes -15.64 MPa
Viento 90°	Montantes -15.42 MPa

Fuente: (Carreño-Ortega 2011).

Las tensiones alcanzadas con los perfiles seleccionados, en varios casos son muy superiores a las máximas admisibles (265 MPa) 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, esto de acuerdo con Yasemin *et al*., (2010) .

Aunque el análisis se haya hecho para un invernadero de tres túneles según Moriyama *et al*., (2010) el comportamiento de colapso de un invernadero ante vientos fuertes en barlovento será el mismo que el de un invernadero aislado o unitúnel.

En general Diversos autores han puesto en manifiesto que los invernaderos se construyen en ausencia de un proyecto de construcción, basándose únicamente en la experiencia y conocimiento local de las empresas constructoras (Briassoulis *et al*., 1997; Grafiadellis, 1999; Von Elsner *et al*., 2000; Kendirli, 2005; Yasemin-Emekli, 2010).

Se plantea la necesidad de diseñar invernaderos de acuerdo a normas vigentes, o acorde a las condiciones climáticas de la zona, fundamentalmente atendiendo las cargas del viento o nieve ya que su bajo peso los hace especialmente vulnerables éstos, sufriendo daños que van desde desprendimiento hasta el colapso total como se mostró en la (figura 1).

Los invernaderos son diseñados para minimizar el valor del área de sección transversal de los miembros estructurales debido a la demanda de un alto nivel de transmisión de luz. En particular aquellos revestidos con película plástica son las estructuras más ligeras que frecuentemente experimentan daños.

Por ello, los coeficientes de presión (Cp) del viento se usan para el diseño de los invernaderos debido a que puede ser estimado para mejorar su desempeño a la resistencia.

La distribución C_p depende de la forma de la estructura, se han utilizado las mediciones a escala completa y el análisis dinámico de fluido computacional (CFD) también pruebas de túnel de viento para estimar las distribuciones de C_p, para varios tipos de invernaderos revestidos con película plástica

En el caso de las cargas de diseño se ha utilizado el conocimiento desarrollado a través de los diferentes estudios y las siguientes herramientas (figura 18) para su modelación y obtención de valores.

Resumen del proceso de análisis estructural

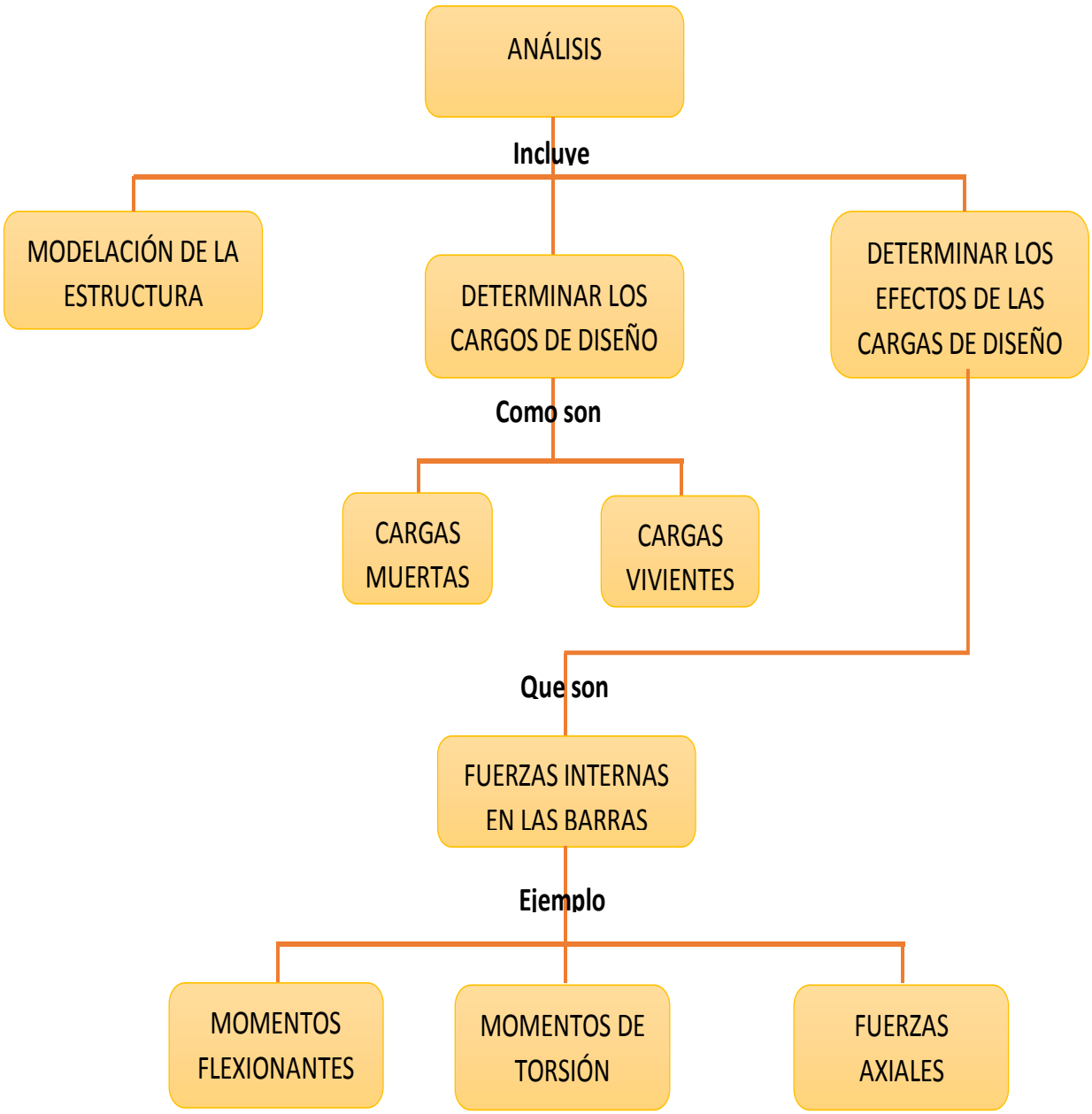


Figura 18. Proceso de análisis estructural

Las herramientas de análisis estructural

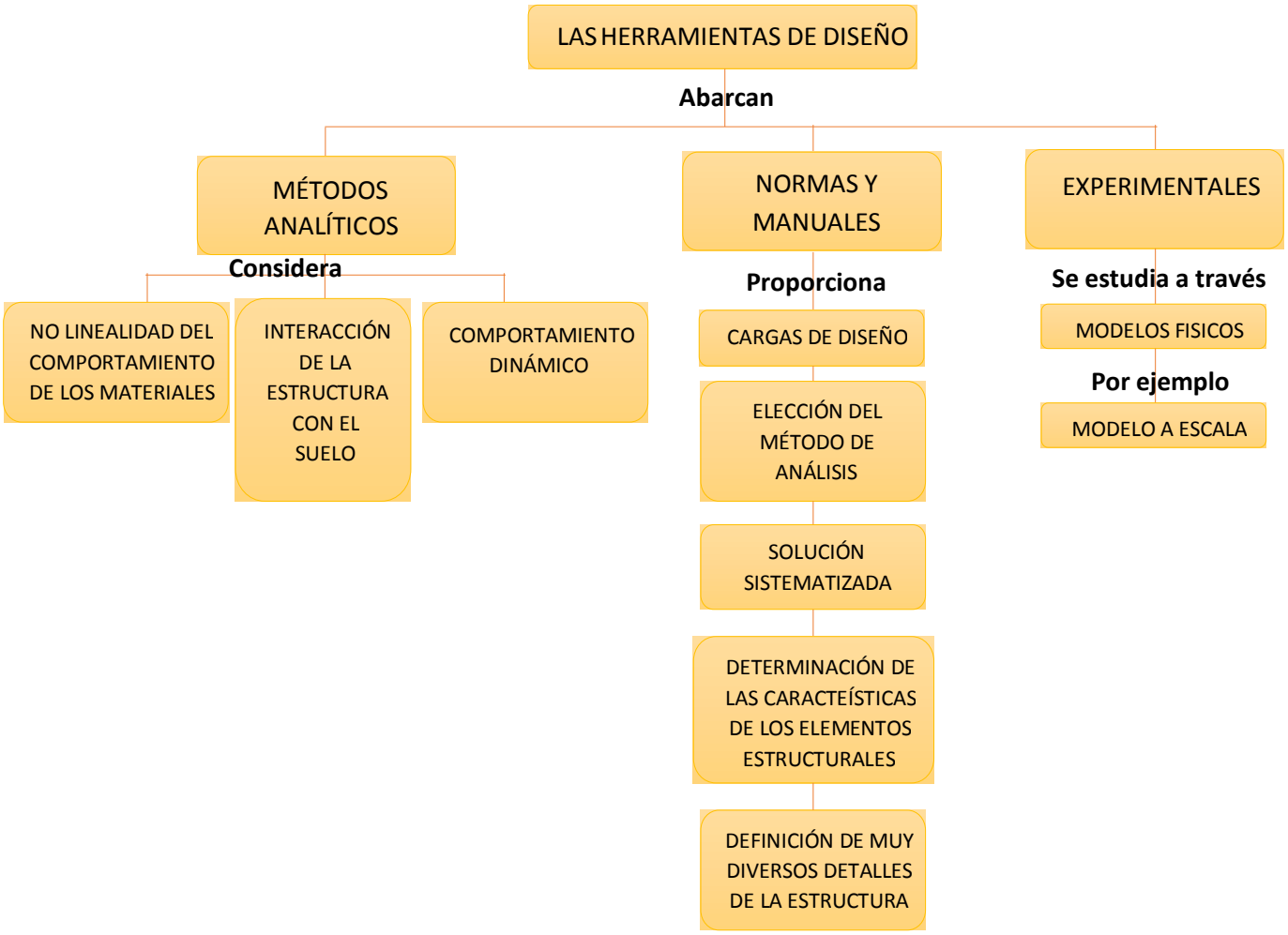


Figura 19. Resumen de las diferentes herramientas utilizadas para obtener las cargas de diseño en invernaderos

1.6 Fundamentación teórica

1.6.1 El cálculo de cargas

Presión de flujo libre. La presión de dinámica q_z ($N \cdot m^{-2}$) se evalúa con respecto a la altura z y este se calcula con la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2 I \quad (N \cdot m^{-2}) \qquad (1)$$

Dónde: K_z = coeficiente de exposición de la velocidad de presión; K_{zt} = factor topográfico; K_d = factor de direccionalidad del viento; I = intensidad de turbulencia a la altura z; V = velocidad del viento ($m \cdot s^{-1}$); q_h = presión de la velocidad calculada usando la ecuación anterior a la altura media del techo h.

Edificaciones rígidas de todas las alturas

Las presiones de diseño del viento para edificaciones rígidas de todas las alturas, se determina por la siguiente ecuación:

$$p = q \cdot G \cdot C_p - q_i \cdot (GC_{pi}) \quad (N \cdot m^{-2}) \qquad (2)$$

Dónde:

$q = q_z$ para muros de barlovento evaluados a la altura z por encima del suelo; $q = q_h$ para muros de sotavento, muros laterales y techos, evaluado a la altura h; $q_i = q_h$ para muros de barlovento, muros laterales, muros de sotavento y techos de edificaciones cerradas y para la evaluación de la presión interna negativa en edificios parcialmente cerrados; $qi = q_z$ para la evaluación de la presión interna positiva en edificaciones parcialmente cerradas, donde la altura z se define como el nivel de la apertura más alta en la edificación que podría afectar la presión interna positiva. Para las edificaciones situadas en lugares con

escombros, vidrios que no son resistentes al impacto o protegidas con un recubrimiento resistente al impacto, se considerarán como una abertura.

Para la evaluación de la presión interna positiva, q_i puede ser evaluada de forma conservadora a la altura h, entonces $q_i = q_h$ donde G = factor de efecto-ráfaga; C_p = coeficiente de presión externa; GC_{pi} = coeficiente de presión interna.

Edificaciones flexibles. Para edificaciones flexibles la presión de diseño del viento se determina por la ecuación siguiente:

$$p = q \cdot G_f \cdot C_p - q_i \cdot (GC_{pi}) \quad (N \cdot m^{-2}) \qquad (3)$$

Dónde G_f = factor de efecto-rafaga

Edificaciones bajas. Para edificaciones de baja altura la presión de diseño del viento se determina por la ecuación siguiente

$$p = q_h[(GC_{pf}) - (GC_{pi})] \quad (N \cdot m^{-2}) \qquad (4)$$

Dónde: q_h = presión de velocidad; GC_{pf} = coeficiente de presión externa; GC_{pi} = coeficiente de presión interna

Las presiones de diseño del viento sobre los componentes y revestimiento para todas las edificaciones con altura mayor 60 pies (18,3 m) se determinarán a partir de la siguiente ecuación:

$$p = q(GC_p) - q_i(GC_{pi}) \quad (N \cdot m^{-2}) \qquad (5)$$

Dónde: $q = q_z$

Para la evaluación de la presión interna positiva en edificaciones parcialmente cerradas donde la altura z se define como el nivel de la apertura más alta en la edificación que podría afectar la presión interna positiva. Para las edificaciones situadas en regiones de escombros, con vidrios que no son resistentes al impacto o protegidas con un recubrimiento resistente al impacto, se considerarán como una abertura. Para la evaluación de la presión interna positiva, q_i puede ser evaluada de forma conservadora a la altura h, entonces

$$q_i = q_{h;} \tag{6}$$

Donde GC_p = coeficiente de presión externa; GC_{pi} = coeficiente de presión interna

1.6.2 Modelo para el ensayo a la flexión

Para el desarrollo del ensayo a flexión en un espécimen, es necesario plantear ecuaciones que describan el comportamiento de la deformación, desplazamiento del eje neutro, así como los esfuerzos tanto normales como de corte.

Para obtener el esfuerzo normal de un elemento en cantiléver, se inicia el análisis para un caso plano, donde se aplica una carga puntual P a uno de los extremos de la muestra (Figura 20).

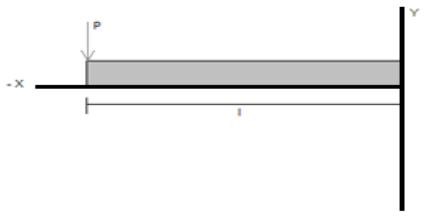


Figura 20. Carga puntual P en un elemento en cantiléver.

Partiendo de la Figura 20, se tiene la siguiente analogía, donde el esfuerzo normal y de corte, están en función de la posición (x, y):

$$\begin{Bmatrix} \tau_{xy} = \tau_{xy}(x, y) \\ \sigma_x = \sigma_x(x, y) \end{Bmatrix} \tag{7}$$

En un estado generalizado de esfuerzos aplicados a un elemento infinitesimal, como el que se muestra en la Figura 21. Se plantea la sumatoria de los elementos del tensor de esfuerzos igualados a cero.

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

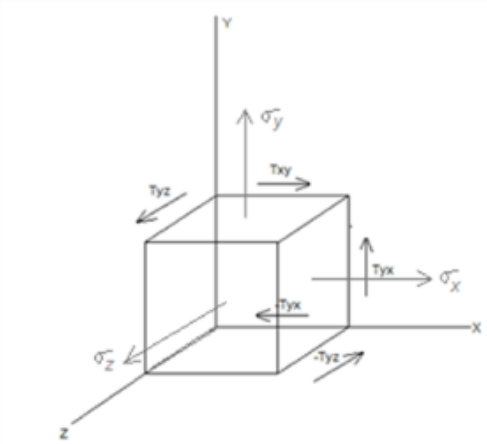


Figura 21. Esfuerzos aplicados a un elemento infinitesimal.

El conocimiento del comportamiento del desplazamiento de la elástica que se está analizando es de gran relevancia, ya que se puede predecir en qué momento se presenta el fenómeno de plasticidad.

Partiendo de la ecuación diferencial que refiere el desplazamiento de la elástica.

$$EI\frac{dv^2}{dx^2} = M(x) \quad (9)$$

Establecidas las ecuaciones teóricas que explican el comportamiento del estado mecánico del espécimen; se calcula la carga crítica necesaria para que se presente en la muestra, el fenómeno de plasticidad.

1.6.3 Presiones locales en túnel de viento utilizando un modelo a escala.

Los invernaderos son usualmente estructuras ligeras con marcos de metal cubiertos con plástico, por lo cual son sensibles a las cargas dinámicas tales como la carga de viento. En un modelo de invernadero con ventila cenital, se determinan las presiones locales en un túnel de viento.

Los datos del túnel son:

- Sección de prueba: 1.2m x 1.2m x 2.4m;
- Velocidad nominal: 100 km/h;
- Tipo circuito abierto en succión.
- Coeficiente de presión en función de presiones

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} p_\infty V_\infty^2} \quad (10)$$

Dónde:

p = presión local (la presión en la toma del modelo); p_∞ = presión en la corriente libre (flujo generado por el túnel de viento); ρ_∞ = densidad del aire en el túnel de viento; V_∞ = velocidad del viento generado por el túnel

Coeficiente de presión en función de velocidades

$$C_P = 1 - \left(\frac{V}{V_\infty}\right)^2 \quad (11)$$

Dónde:

V = velocidad local (velocidad en la toma de presión); V_∞ = velocidad del viento generado por el túnel.

1.7 Bibliografía

American National Standards Institute. 2005. Commercial Greenhouse design and Layout. Adopted and published by the American Society of Agriculture Engineers. pp. 751-757.

Antoniou, J. y Bergeles, G. 1988. Development of the Reattached Flow Behind Surface – Mounted Two – Dimensional Prisms. J. Fluids Eng. 110:127-133.

Blackmore, P.A. and Tsokri, E. 2006. Wind loads on curved roofs. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 94(11):833-844.

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.

Castro, I. Dianat, M. 1983. Surface flow patterns on rectangular bodies in thick boundary layers. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 11:107-119. Fragos, V.P., Psychoudaki, S.P. and Malamataris, N.A

Carreño-ortega A. Vázquez J. Pérez A. Callejón-Ferre A. Sánchez E. (2011)a. Análisis estructural 3D de los invernaderos multitúnel del sudeste de España. Parte 1: elementos verticales.VI congreso ibérico de Agroingeniería. Pp. 10.

Carreño-ortega A. Vázquez J. Pérez A. Callejón-Ferre A. Sánchez E. (2011)b. Análisis estructural 3D de los invernaderos multitúnel del sudeste de España. Parte 2: elementos horizontales.VI congreso ibérico de Agroingeniería. Pp. 10.

Castellano S. Candura A. Scarascia-Mugnozza G. (2005). Greenhouse Structures SLS Analysis: Experimental Results and Normative Aspects. Acta Hort. Vol. 691.Pp. 701-708

Díaz, T.; Espí G.; Fontecha A.; Jiménez C.; López J.; Salmerón A. 2001. Los filmes plásticos en la producción agrícola. Ed. Mundi Prensa. España.

Dova E. Katsoulas N. Kittas C. Sophianopoulos D. (2012).Differences in Required Structural Efficiency of Standard Commercial Steel Greenhouses among EU Countries: a Hellenic Experience.Proc. XXVIIIth IHC – IS on Greenhouse 2010 and Soilless Cultivation Ed.: N. Castilla Acta Hort. 927.

Elsner B.;Briassoulis D.; Waaijenberg D.;Mistriotis A.; Zabeltitz C.; Gratraud J.;Russo G.; Suay-Cortes R. (2000)a. Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries, Part I: Design Requirements..J. Agric. Eng. Res.Vol. 75, (1)1:1-16.

FAO.Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. (2001). El cultivo protegido en clima mediterráneo. 90, 318 pp.

Fideicomisos Instituidos en relación con la Agricultura. (2011). Consejos prácticos para invertir en invernaderos. FIRA boletín informativo. Nueva Época.Num.14. Talleres FIRA, Morelia, Michoacán, México.

Fragos, V.P., Psychoudaki, S.P. and Malamataris, N.A. 1997. Computer-aided analysis of flow past a surface-mounted obstacle, Int. J. Num. Methods Fluids 25:495-512.

Ginger, J.D. and Holmes, J.D. 2003. Effect of building length on wind loads on low-rise buildings with a steep roof pitch. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 91:1377-1400.

Grafiadellis M. 1999. The greenhouse structures in mediterranean regions problems and trends. Colloque sur les Cultures Protégées dans la Région Mediterranéenne. Agdair: Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. Vol. 31.

Juárez, P., Bugarín, M. R. 2011. Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. Revista Fuente Año 3 No. 8. Pp. 21-27.

Kateris D. Kotsopoulos A. Fragos V. Nikita-Martzopoulou C.2012.Numerical Zstimation of Pressure Coefficients over Single and Multispan Duo Pitched Roof Greenhouses. Proc. IS on GreenSys. Eds.: C. Kittas et al. Acta Hort. 952, ISHS 2012

Kendirli B. 2006.Structural analysis of greenhouses:A case study in Turkey. Building and Environment. Vol (41).Pp 864–871.

Mistriotis A.; Briassoulis D. 2002. Numerical estimation of the internal and external aerodynamic coefficients of a tunnel greenhouse structure with opening. Comp. Electric. Agric. 34:191-205.

Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L., Alvarez, A.J. 2004. Measurement and simulation of climate inside Almeria type greenhouse using computational fluid dynamics. Agric. For. Meteorol. 125:33-51.

Moreno R. A., Aguilar D. J., Luévano G. A. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. Revista mexicana de Agronegocios, Quinta Época. Año XV. Volumen 29.

Moriyama H.; Sase S; Uematsu Y.; Yamaguchi T. 2010. Wind tunnel study of the interaction of twoor three side by side pipe - framed greenhouses on wind pressure coefficients. Transactions of the ASABE. Vol 53(2):585-592.

Pérez J.; Carreño Á.; López G.; Callejón Á.; Vázquez J. (2008).Approach to the determination of structural loads models in greenhouses Type Almería. Agricultural and biosystems engineering for a sustainable world. International Conference on Agricultural Engineering, Hersonissos, Crete, Greece, 23-25 June, pp. P-082.

Pramod, K., Prakash, Rasendra, Agarwal and Manharan, L. 1980. Flow past fence in turbulent boundary layer. Journal of the hydraulics division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 106 No: HY1.

Reichrath, S. and Davies, T.W. 2002. Computational fluid dynamics simulations and validation of the pressure distribution on the roof of a commercial multi-span Venlotype glasshouse. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 90(3):139-149.

Richardson, G.M., Hoxey, R.P., Robertson, A.P. and Short, J.L. 1997. The Silsoe Structures Building: Comparisons of pressures measured at full scale and in two wind tunnels. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 72:187-197.

Richards, P.J., Hoxey, R.P., Connell, B.D. and Lander, D.P. 2007. Wind-tunnel modelling of the Silsoe Cube. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 95:1384-1399.

Robertson, A.P., Roux J.., Gratraud, G., Scarascia, G., Castellano, S., De Virel, M. Palier P. 2002. Wind pressures on permeably and impermeably-clad structures. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 90:461-474.

Secretaría de Ganadería Agricultura Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2010. Programa de Ejecución Directa de Agricultura Protegida. Secretaría de Agricultura Ganadería, Pesca y Alimentación. [consultado 2011 mayo 5]. Disponible en: http://www.amhpac.org/contenido/plan%20nacional%20de%20agricultura%20protegida%202009.pdf

Shklyar, A. and Arbel, A. 2004. Numerical model of the three-dimensional isothermal flow patterns and mass fluxes in a pitched-roof greenhouse. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 92(12):1039-1059.

Tieleman, H.W. 2003. Wind tunnel simulation of wind loading on low-rise structures: a review. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 91(12-15):1627-1649.

Uematsu Y. Nakahara K. Tanaka S. Moriyama H. Sase S.(2009).Effects of sidewall openings on the wind loads on pipe-framed greenhouses.The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, November 8-12 Taipei, Taiwan.

Uematsu Y. Orimo T. Watanabe S. Kitamura S. Iwaya M. (2005), "Wind loads on a steel greenhouse with a wing-like cross section", Proceedings of the Fourth European and African Conference on Wind Engineering, Prague, 11 - 15 July, 2005 (Paper 101).

UNE-EN 13031-1 .2002. Invernaderos: proyectos y construcción. Parte 1: Invernaderos para la producción comercial. European Committee for standardization CEN. Brussels, Belgium.

Vassiliou, N., Martzopoulos, G. and Nikita-Martzopoulou, C. 2000. Determination of natural ventilation rate in a double span arch type greenhouse. Acta Hort. 534:171- 180.

Yasemin-Emekli N.;Kendirli B.;Kurun A. 2010 .Structural analysis and functional characteristics of greenhouses in the Mediterranean region of Turkey. African Journal of Biotechnology. Vol.9 (21), 3131-3139.

Zabeltitz C. 1999.Greenhouse structures. En: Ecosystems of the world, Greenhouse Ecosystems. Capítulo I, 1-15. Ed Elseiver, 432 pp.

http://2006-2012.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx .Fecha de consulta: 9 noviembre 2014.

CAPÍTULO 2

COEFICIENTES DE LA FUERZA DEL VIENTO Y COMPORTAMIENTO DEL FLUJO SOBRE UN MODELO DE INVERNADERO

2.1 Resumen

Los invernaderos son usualmente marcos de metal cubiertos con plástico y además son estructuras ligeras, por lo cual son sensibles a las cargas dinámicas tales como la carga de viento. En este trabajo se analiza el comportamiento aerodinámico de un modelo de invernadero con ventila cenital, a través de la determinación de las presiones locales en túnel de viento utilizando un modelo a escala, considerando distintas direcciones del viento. El flujo de aire sobre un invernadero es un fenómeno complejo, debido a esto se visualizó el comportamiento del flujo de aire alrededor del modelo por medio de inyección de humo y el resultado se comparó con una simulación realizada en CFD para obtener una validación de la distribución del flujo; los coeficientes de la fuerza del viento fueron determinados y comparados con los valores reportados en algunos países; corroborando el estudio. Se espera que los resultados presentados sean útiles para el desarrollo de futuras investigaciones, así como para garantizar la seguridad mecánica de las estructuras y ser un referente para la industria de la construcción de invernaderos.

PALABRAS CLAVE: Invernadero, carga aerodinámica, túnel de viento, humo, CFD, simulación.

WIND FORCE COEFFICIENTS AND BEHAVIOR OF FLOW OVER A MODEL OF GREENHOUSE

2.2 Abstract

Greenhouses are usually frames covered with plastic and they are light metal structures, which are sensitive to dynamic loads such as wind load. In this research the aerodynamic behavior of a model greenhouse with zenithal vents is analyzed, through the determination of local pressure, in wind tunnel using a scale model, considering different wind directions. Airflow on a greenhouse is a complex phenomenon because of this was visualized the behavior of pattern the airflow around the model by injection of smoke and the result was compared with CFD simulation for validation flow distribution; coefficients wind strength were determined and compared with the values reported in some countries; corroborating the study. It is expected that the results presented are useful for the development of future researches and to ensure the mechanical safety of structures and be a reference for industry building greenhouses.

KEY WORDS: Greenhouse, aerodynamic load, wind tunnel, smoke, CFD, simulation.

2.3 Introducción

Son muchos los autores que han puesto en manifiesto que los invernaderos se construyen en ausencia de proyecto de construcción, únicamente basándose en la experiencia y conocimiento local de las empresas constructoras (Briassoulis *et al*., 1997; Grafiadellis, 1999; Von Elsner *et al*., 2000; Kendirli, 2005; Yasemin-Emekli, 2010; Briassoulis *et al*., 2010). En el pasado, el desarrollo y diseño de invernaderos fue principalmente basado en la experiencia (Von Elsner *et al*., 2000). Todos ellos coinciden en la necesidad de diseñar los invernaderos de acuerdo a normativas vigentes, o acordes a las condiciones climáticas de la zona, fundamentalmente atendiendo las cargas del viento y de la nieve. Su bajo peso propio de los invernaderos los hace especialmente vulnerables a los vientos fuertes; eventos en los que sufren daños que van desde arrancamientos hasta el colapso total, según se ha podido constatar en reiteradas oportunidades.

Por ejemplo, el viento genera variaciones de presión sobre la cubierta del invernadero y esfuerzos correspondientes en el marco y cimientos, los cuales pueden causar daño en caso de velocidades de viento extremo. Para este caso la presión del viento es calculada como una función del coeficiente de presión correspondiente al segmento de cubierta en consideración y la presión dinámica del viento. Las cargas de viento aparecen como fuerzas de presión y succión sobre la superficie de invernadero. La presión dinámica del viento depende de la altura efectiva del invernadero, la cual es definida como la distancia entre el nivel del suelo y la altura promedio y el punto más alto del techo (Von Elsner, 2000; ENV, 2002; Subramani and Sugathan, 2012).

Una de las fuerzas más destructivas alrededor de un invernadero es el viento. Las cargas del viento pueden ser calculadas por la presión de flujo libre, multiplicada por el coeficiente de la fuerza del viento. Los coeficientes de la fuerza del viento dependen de la dirección, forma del invernadero, tamaño, y presencia o ausencia de ventilas y rompe vientos. Generalmente, pueden ser determinados en experimentos en túnel de viento. Los valores reportados en algunos países muestran diferencias, debido a las condiciones experimentales. En particular, los invernaderos revestidos con plástico son estructuras muy ligeras y frecuentemente experimentan daños debido a tormentas de viento. El coeficiente de presión del viento es usado en el diseño de los invernaderos, para mejorar las estructuras de los mismos. La estimación apropiada de la distribución del coeficiente de presión del viento depende de la forma de la estructura, mediciones a escala completa, análisis dinámico de fluidos computacionales y pruebas de túnel de viento para diferentes tipos de invernaderos revestidos de plástico (ASAE Standards, 1987; Hoxey *et al*., 1984; Mathews *et al*., 1987; Mistriotis *et al*., 2002; Robertson *et al*., 2002; Brugger *et al*., 2003; Allori *et al.,* 2011, Allori, *et all*., 2013).

Moriyama *et al*. (2010) realizaron una prueba de túnel de viento para obtener la distribución del coeficiente de presión del viento sobre un invernadero.

Debe ser notado que varias normas adoptan diferentes aproximaciones para el cálculo de las cargas de viento. Como resultado las cargas de diseño pueden diferir significativamente. Dependiendo de la forma geométrica de la construcción los coeficientes de presión aerodinámicos deben ser considerados para la superficie de cada sector de la estructura.

El propósito de este estudio fue determinar los coeficientes de la fuerza del viento sobre un tipo de invernadero con ventila cenital típico en la zona central de México, mediante la construcción de un modelo a escala, instrumentado con tomas de presión en una prueba de túnel de viento; los resultados obtenidos se

consideran de gran utilidad para la optimización de las estructuras de los invernaderos, así como para garantizar la seguridad mecánica, además fueron comparados con los valores reportados por otros estudios, también se muestran los resultados de la carga aerodinámica por unidad de superficie usando los resultados de los coeficientes de presión promedio y la visualización del patrón de flujo de aire alrededor de la estructura. La realización del estudio por medio del método de elemento finito, tuvo la finalidad de comparar los resultados de los coeficientes y distribución de carga de viento, obtenidos en el ensayo de túnel de viento.

2.4 Materiales y métodos

Los ensayos se realizaron en el marco de la metodología presentada por Barlow *et al*. (1999), en el túnel de viento PA-2ZU de succión, con sección de prueba de 1.2 x 1.2 x 2.4 m en la escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Ticoman. El túnel de viento desarrolló una velocidad del viento de 95.34 km h^{-1}. El modelo a escala de un invernadero común construido en México fue de 1:100 con 22 tomas de presión como se muestra en la Figura 22. El correspondiente modelo a escala completa tiene dimensiones de 7.5 m de ancho, 6.22 m de altura a la cresta y 42 m de longitud; el efecto de estancamiento sobre las distribuciones de presión fue considerada insignificante (Jensen *et al*., 1995).

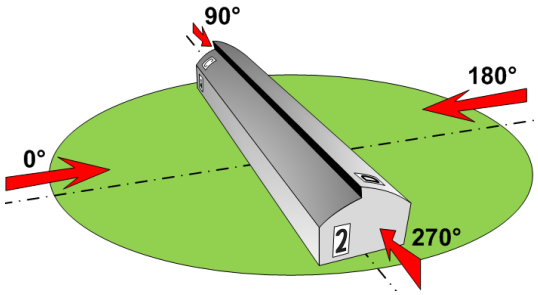


Figura 22. Definición de los valores de la dirección del viento.

El modelo fue hecho de madera, se realizaron mediciones para 4 posiciones angulares con respecto a la dirección del viento a 0, 90, 180 y 270° (Figura 22); las superficies del modelo están definidas en la Figura 23.

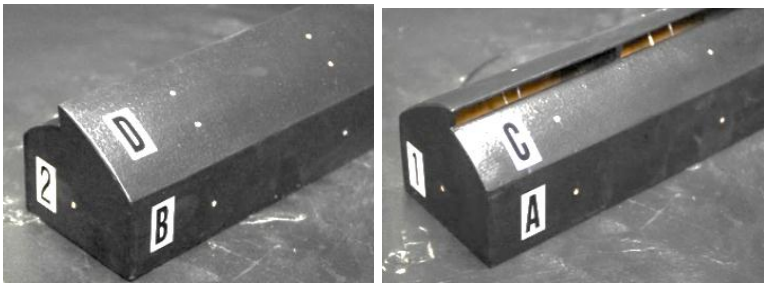


Figura 23. Identificación de las superficies del modelo.

Las condiciones ambientales promedios durante la prueba fueron las siguientes (Cuadro 8):

Cuadro 8. Condiciones ambientales durante la prueba.

Parámetro	Valor promedio
Temperatura ambiente	19.6 °C
Presión atmosférica	587.5 mmHg
Humedad relativa	79%
Densidad del aire	0.923 kg m^{-3}

Para la medición de las presiones locales se utilizaron tomas de presión conectadas mediante tubos capilares de PVC, manómetros multicolumna.

El perfil de la velocidad media del viento a una altura de 1000 mm en el centro de la mesa giratoria del túnel de viento fue medido por un anemómetro (modelo IFA300, TSI, Inc.). La influencia del número de Reynolds sobre la presión del viento se asumió despreciable (Building Center of Japan, 1994).

El ensayo se llevó a cabo sin simulación de capa límite terrestre. El coeficiente de presión del viento puede ser definido como sigue (Ecuación 1):

$$C_p = \frac{P - P_s}{q_h} \qquad (1)$$

$$q_h = \frac{1}{2 * \rho * {U_H}^2}$$

donde C_p = el coeficiente de presión del viento; P = la presión que actúa sobre el modelo ($N \cdot m^{-2}$), P_s = la presión estática sobre el túnel de viento ($N \cdot m^{-2}$), q_h = la presión de flujo libre ($N \cdot m^{-2}$), ρ = la densidad del aire (kg m^{-3}), U_H = la velocidad del viento a la altura de referencia (m s^{-1}).

La presión estática fue medida por un tubo de Pitot localizado en un punto a 3.5 m adelante del centro de la mesa giratoria.

Los coeficientes estimados en la dirección del viento a 0, 90, 180 y 270° (Figura 24), fueron comparados con los valores provistos por ANSI (1982); Nelson (1988); ASAE (1976) y JGHA (1981).

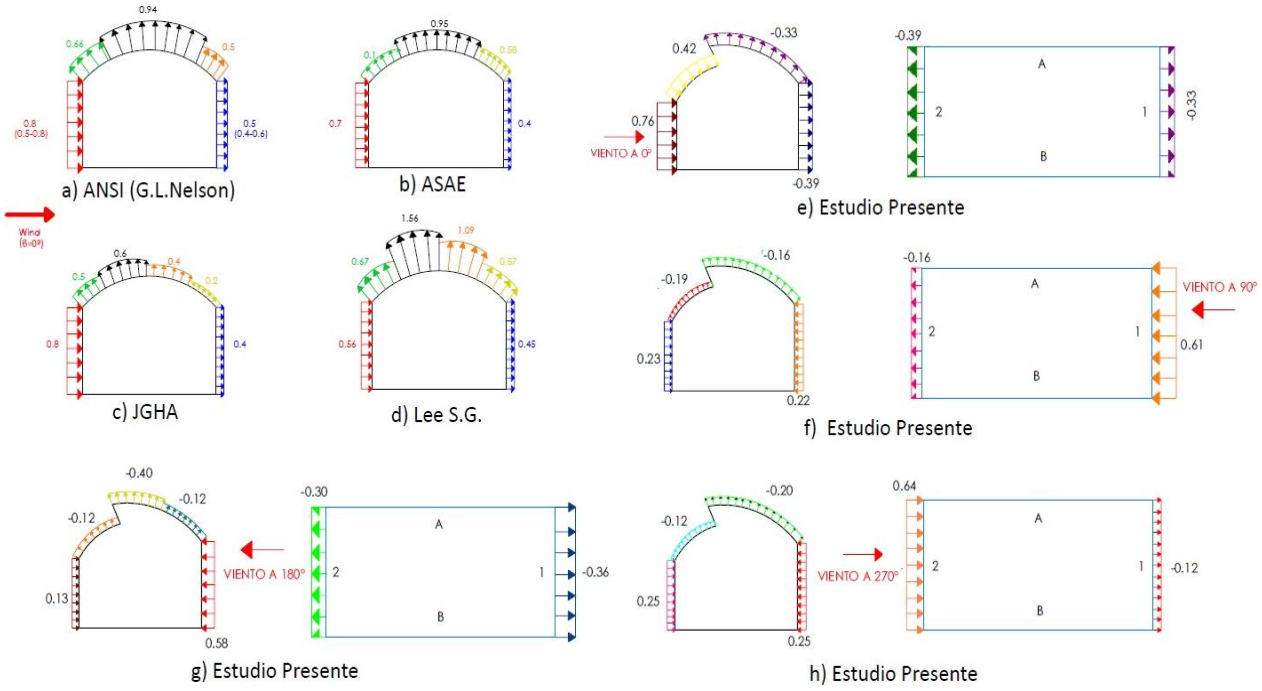


Figura 24. Comparación de los diferentes resultados de los coeficientes de presión.

Visualización del patrón de flujo de aire

El flujo de aire alrededor de una estructura es complejo, y es difícil de entender el campo de flujo solamente a partir de la distribución de los coeficientes de presión. Para una mejor apreciación de la relación entre el flujo de aire y la geometría del invernadero, se realizó la visualización por medio de inyección de humo en dos y tres dimensiones:

1) Visualización del flujo en 2D. En este método no se considera la influencia de los extremos del modelo, las caras 1 y 2 coinciden con las paredes de la sección del túnel de viento (Figura 25).

2) Visualización del flujo en 3D. Al igual que en los coeficientes de presión, las superficies del modelo para flujo en 3D están definidas como se indica en la Figura 25. Para la visualización del flujo se utilizó una video cámara comercial Sony SLT A77 V Co., Ltd., y un generador e inyector de humo de alta velocidad. La carga por unidad de superficie se obtiene con la Ecuación 2:

$$P = q * C_p \quad (2)$$

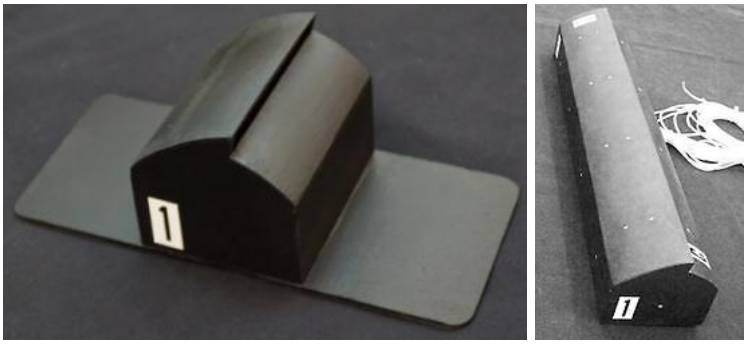
donde *P* = la carga aerodinámica por unidad de superficie ($N \cdot m^{-2}$), *q* = la presión dinámica del flujo libre ($N \cdot m^{-2}$).

2.5 Resultados y discusión

Comparación de los coeficientes de la fuerza del viento

La Figura 4 muestra la distribución de los coeficientes de la fuerza del viento, comparada con estudios realizados por diferentes autores. Los valores de los coeficientes en la pared a barlovento presentaron discrepancias. Lee (1996)

Lee (2005) y Nelson (1998) presentaron resultados de 0.5 a 0.6, y de 0.5 a 0.8, respectivamente. Los resultados obtenidos al igual que los reportados por Nelson (1988), ASAE (1976) y JGHA (1981), presentaron valores promedio de 0.7 a 0.8, a diferencia de los resultados reportados por Lee (1996), cuyo valor promedio fue de 0.55.



(a) Flujo en 2D. (b) Flujo en 3D.

Figura 25. Modelos de invernadero fabricados a escala.

Debido a que la distribución de la presión del viento sobre las paredes en barlovento varían con el grosor de la capa límite y la altura de la pared, se consideraron coincidentes los valores propuestos por Nelson (1998) y Lee (1996). En este rango de valores encontramos el valor promedio de la pared en barlovento para el invernadero típico con ventila cenital construido en México.

Los coeficientes obtenidos en arco inferior en barlovento en un cuarto del ancho del techo, fueron similares a los reportados por Lee (1996), ANSI (1982) y JGHA (1981), y fueron muy diferentes a los presentados por ASAE (1976). En la región media se encontraron discrepancias considerables, las cuales son atribuidas principalmente a las diferencias de las condiciones experimentales para la prueba del túnel de viento, tales como el número de Reynolds, el tipo de

terreno, superficie del modelo de invernadero, localización de la toma de presión, y métodos de medición.

Para arco superior en sotavento en un cuarto del ancho del techo, los resultados obtenidos fueron similares a los reportados por JHGA (1981), y mostraron inconsistencia con los presentados por Lee (1996), ANSI (1982) y ASAE (1976). Los coeficientes obtenidos en la pared de sotavento fueron similares a los resultados reportados por los autores mencionados.

Para los estudios de referencia solo se realizó la estimación con la dirección del viento a 0° por lo cual no existen resultados comparativos con las siguientes posiciones angulares descritas anteriormente. Según Ha *et al*., (2014), en una prueba de túnel de viento para un invernadero con tres pórticos con una orientación del viento a 0 y 90°, el valor máximo alcanzado de C_p fue de 0.48, con succiones muy altas de hasta -1.39 en la orientación de 0°.

Se consideraron importantes las siguientes observaciones:

Los coeficientes de presión obtenidos se pueden utilizar bajo cualquier valor de velocidad, la geometría del modelo no muestra dependencia con respecto al número de Reynolds.

En el período de tiempo de las mediciones, se encontró que los resultados presentan estabilidad sobre los coeficientes de presión. Es notable el caso de flujo incidiendo a los 180°, se presenta un caso peculiar en donde en la superficie A en sotavento, presenta valores positivos de C_p, menores a los de la superficie B en barlovento, debido a la diferencia de alturas de las superficies C y D, y por la forma en arco.

Se analizaron tres casos críticos: La carga positiva máxima se presentó a 0° en la superficie A, debido a la posición directa en barlovento de la ventila cenital, lo cual generó una tendencia al estancamiento, produciendo altos valores de C_p. La carga negativa máxima se presentó también en 0° en la superficie lateral 2 y en la superficie B en sotavento. Finalmente la carga negativa máxima se presentó también en los 180° de incidencia del viento, específicamente en la parte superior de la superficie D, ocasionado por el fuerte desprendimiento del flujo que existe en esa zona.

El valor positivo de C_p sobre el techo en barlovento y la alta succión sobre el techo en sotavento, causaron un gran arrastre sobre los marcos el cual puede ocasionar pandeo o colapso del marco a una velocidad de viento baja, como sucede en un marco aislado. Por lo cual, el arco cerca de la pared debe ser reforzado, o diseñar la columna en sotavento.

La carga por unidad de superficie se presenta en las Figuras 26,27,28 y 29 para cada zona de incidencia del viento.

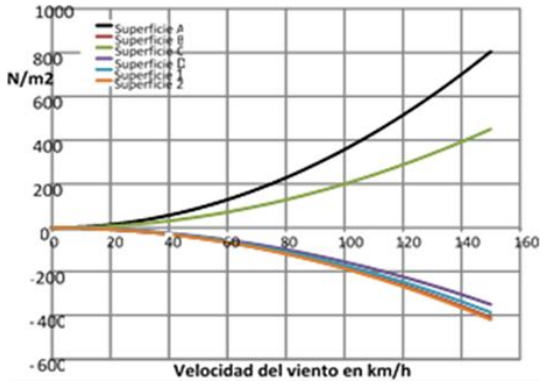


Figura 26. Carga aerodinámica por unidad de superficie a 0° (al nivel del mar).

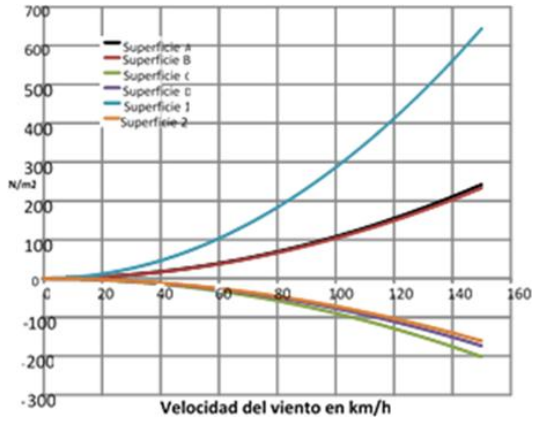


Figura 27. Carga aerodinámica por unidad de superficie a 90° (al nivel del mar).

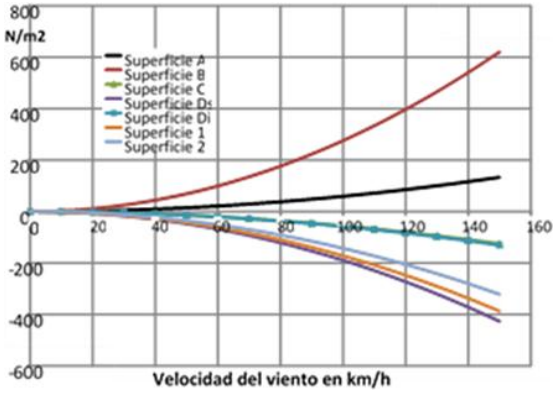


Figura 28. Carga aerodinámica por unidad de superficie a 180° (al nivel del mar).

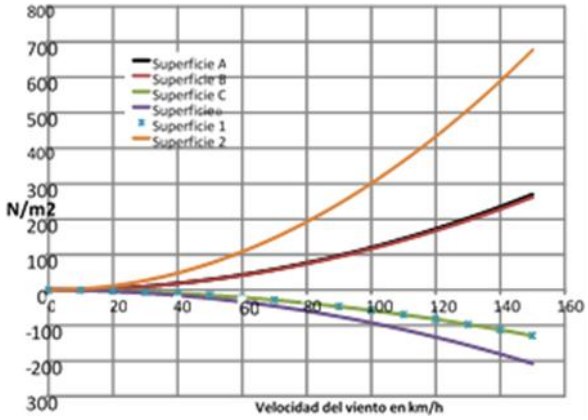


Figura 29. Carga aerodinámica por unidad de superficie a 270° (al nivel del mar).

Visualización del flujo de aire en 2D obtenido por inyección de humo

En la Figura 30a se observan los vórtices desprendidos de la parte superior del modelo, generando en sotavento una zona de depresión. En la Figura 30b se muestran los vórtices generados por el desprendimiento del flujo en la parte superior de la ventila. Nótese que el número 1 en posición de reflexión se debe a que el modelo giró 180° en el túnel y el equipo fotográfico captó en forma invertida al modelo. Finalmente se le dio un tratamiento digital a la imagen para que coincidiera el sentido del flujo al del primer caso analizado (sentido de derecha a izquierda).

(a) Ventila cenital en barlovento. (b) Ventila cenital en sotavento**.**

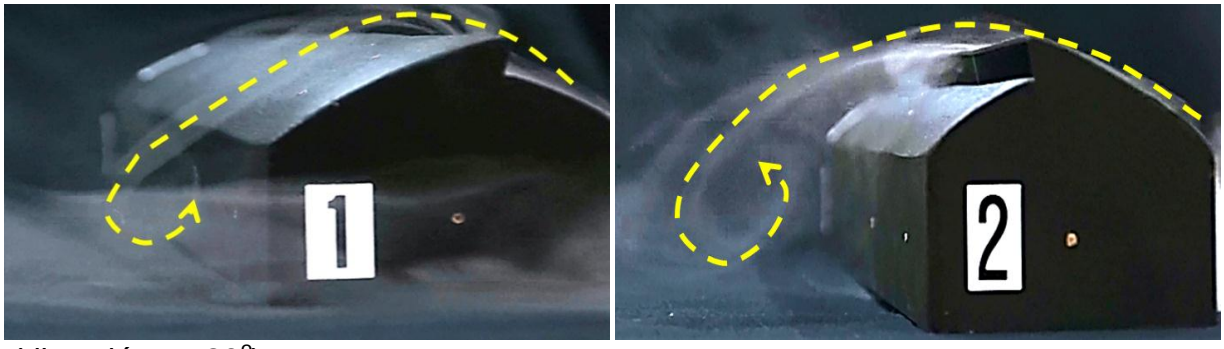
Figura 30. Vórtices generados en la parte superior del modelo por el desprendimiento del flujo.

Visualización del flujo de aire en 3D obtenido por inyección de humo

La Figura 31a presenta el flujo tridimensional de aire a 0°, y se observa una adherencia mayor de las líneas de corriente en comparación con el caso del flujo bidimensional. La Figura 31b presenta el flujo tridimensional de aire a 180°, y se observa un vórtice de mayores dimensiones al caso de la dirección 0°. La

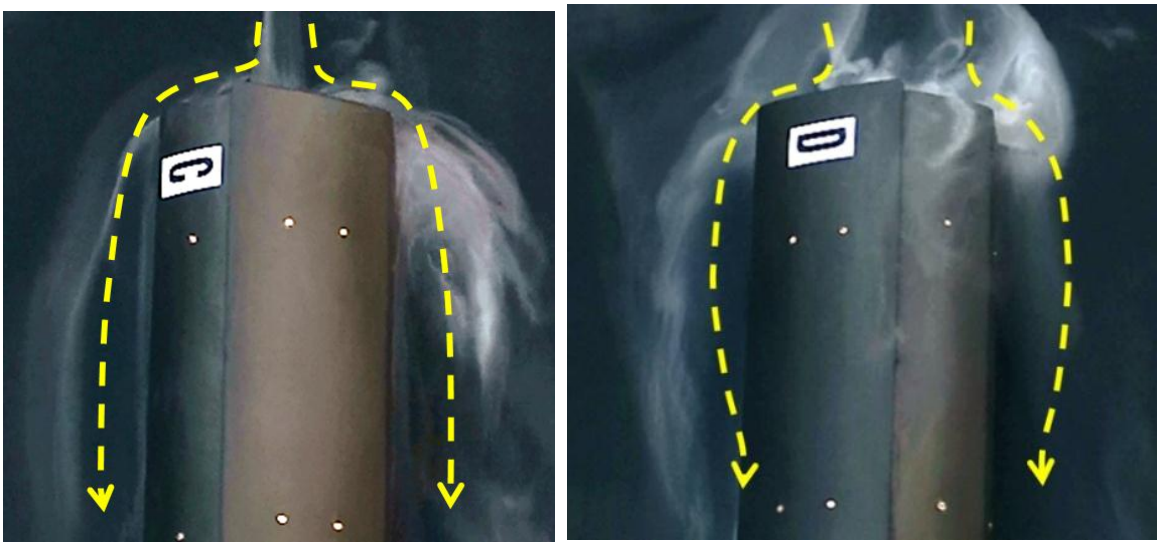
Figura 32 presenta en ambos casos un desprendimiento de flujo en las esquinas, generando vórtices adyacentes a estas, teniendo muy baja influencia la condición asimétrica del toldo.

(a)Ventila cenital en barlovento (dirección a 0^{o}). (b)Ventila cenital en sotavento



(dirección a 180^{o}).

Figura 31. Dirección de las corrientes de aire en el modelo.

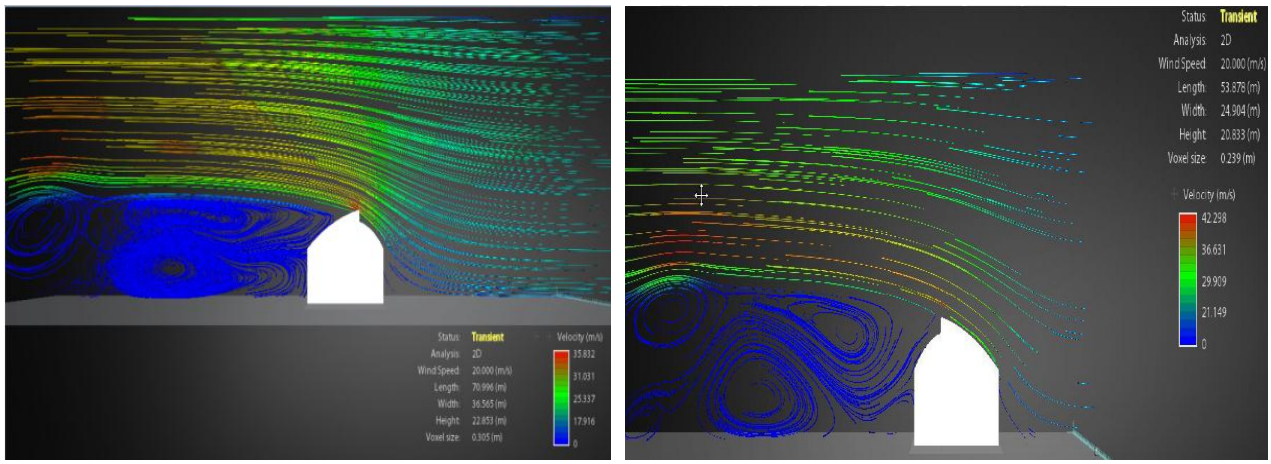


(a) Aplicación del aire en la superficie 1. (b) Aplicación del aire en la superficie 2.

Figura. 32. Vórtices adyacentes a las esquinas.

Simulación del flujo de aire en 2D obtenido por elemento finito

El comportamiento de flujo con orientación a 0°, denota la generación de una serie de vórtices debido a la geometría que presenta la ventila cenital, dando lugar a una zona de presión negativa que actúa sobre sotavento en forma de arrastre (Figura 33). Se puede apreciar la generación de vórtices justo en la zona de depresión, causando una estela de turbulencia bastante larga en comparación con el ancho de la sección transversal. A 180° también se aprecian los vórtices, la diferencia es su desarrollo, su diámetro va en aumento rápidamente y son dirigidos hacia el terreno con una pendiente muy pronunciada, el último vórtice se abre y esto ocasiona una región de flujo inverso impactando a un costado del modelo, lo cual concuerda con los valores positivos de C_p (Figuras 33a y 33b).

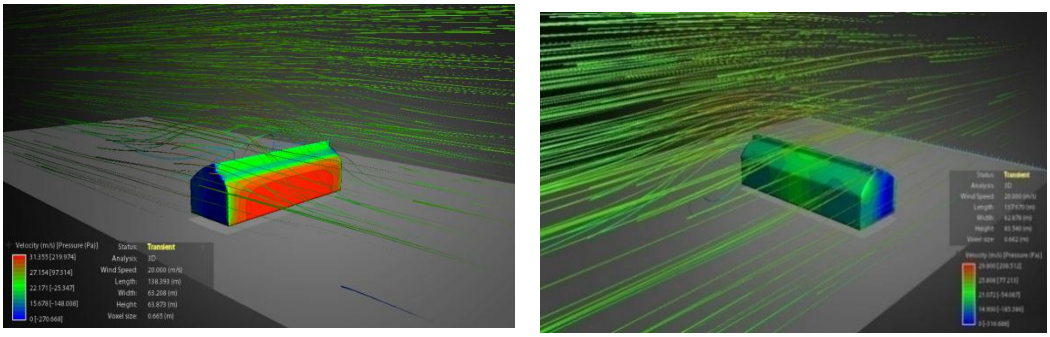


(a) Ventila cenital en barlovento (orientación a 0°). (b) Ventila cenital en sotavento (orientación a 180°).

Figura 33.Simulación por elemento finito de las corrientes y vórtices de aire en el modelo de invernadero.

Simulación del flujo de aire en 3D obtenido por elemento finito

La distribución de flujo libre, así como la presión ejercida sobre el modelo con una orientación de 0°, se distribuyó en el área de barlovento, encontrándose el valor más crítico en el centro, mostrando una tendencia decreciente hacia las orillas. En sotavento se aprecia una zona de presión negativa, debido a los vórtices que se desprenden de la geometría superior del mismo (Figura 34). También aquí se aprecian los vórtices, sin embargo su trayectoria es más pronunciada hacia el suelo, generando con esto una zona en sotavento con un valor de coeficiente de presión positivo.



(a) Vista 3D con las superficies 1, A y C al frente. (b) Vista 3D con las superficies 2, A y C al frente.
Figura 34. Simulación de las corrientes de aire.

Cuando cambia la orientación del flujo de viento en dirección a 180°, se observa un aumento en el valor de la presión negativa que incide en sotavento, debido a que el vórtice generado es de mayor tamaño en comparación con el obtenido en la orientación de 0° (Figura 34).

Para las zonas definidas cómo 1 y 2 predomina el desprendimiento de flujo justo en la esquina, con una tendencia a adherirse corriente abajo, tendiendo

cualitativamente a existir una similitud entre el experimento en túnel de viento y la simulación en CFD (Figura 35).

Al igual que Ha *et al*. (2014), los valores obtenidas de la distribución de C_p de la simulación con software CFD, (Lebanon 2013), y de la visualización con flujo de aire, fueron cualitativamente similares, aunque para fines de comparación es necesario mejorar el modelo CFD.

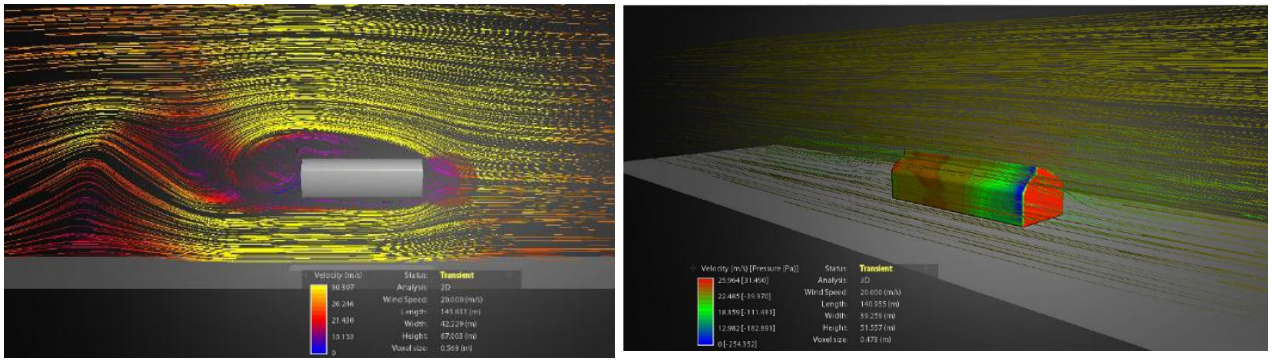


Figura 35. Distribución del viento en los laterales del modelo obtenidos por software.

2.6 Conclusiones

El estudio de visualización tanto con inyección de humo como por medio de la simulación numérica computarizada, coincidió con los datos de distribución de coeficientes de presión reportados. En lo que corresponde a la visualización de flujo por medio de la inyección de humo, es importante mencionar que este reporte es un resumen, por lo tanto se recomienda consultar el disco compacto anexo a este documento, en donde se pueden ver las videograbaciones del ensayo de visualización de flujo.

En este estudio, la distribución de los coeficientes de presión del aire a lo largo de las superficies fueron calculados por una prueba en un túnel de viento el cual

simula el flujo; en general los valores calculados están dentro un rango aceptable, comparados con otros estudios. Consecuentemente se concluye que la aplicación de los valores reportados en este estudio ofrece seguridad y diseño estructural económico. La carga aerodinámica por unidad de superficie será de utilidad para que los constructores evalúen y sugieran un nuevo plan de diseño teniendo en cuenta la estabilidad estructural.

2.7 Bibliografía

Allori, D., Bartoli, G., Miguel, A.F. 2011. Fluid flow through macro-porous materials: friction coefficient and wind tunnel similitude criteria. International Journal of Fluid Mechanics Research 39 (2), 136–148.

Allori, D., Bartoli, G., Mannini, C. 2013. Wind tunnel tests on macro-porous structural elements: A scaling procedure. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 123: 291–299.

American Society of Agricultural Engineers USA. 1987. ASAE Standards 1987. ASAE Standards 1987. 1987 No. Ed. 34 pp. 614pp.

American National Standards Institute. 1982. Minimum design loads for buildings and other structures, ANSI 58.1, 100 p.

American Society of Agricultural Engineers. 1976. Designing building to resist snow and wind loads, ASAE (R288.3), 373-377.

Barlow J. B.; Rae W. H.; Pope A. 1999. Low-speed Wind Tunnel Testing. 3rd ed. Wiley, New York.

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.

Briassoulis, D., Mistriotis, A., Giannoulis, A. 2010. Wind forces on porous elevated panels. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 98 (12), 919–928.

Brugger M. J.; Montero E.; Baeza J.; Pérez Parra. 2003. Computational fluid dynamic modelling to improve the design of the Spanish parral style greenhouse ASAE Paper No. 034049. St Joseph; Mich; ASAE.

Building center of Japan. 1994. Guidebook of Wind Tunnel Test for Building. Tokio, Japan.

ENV 1991-1. 2002. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures: Basis of design. European Committee for standardization CEN. Brussels, Belgium.

Lebanon. N. H. 2013. Fluent documentation. Fluent Inc.http://www.ansys.com/ consultada mayo 11 2013.

Grafiadellis M. 1999. The greenhouse structures in 79editerranean regions-problems and trends. In Protected cultivation in the Mediterranean region = Cultures protégées dans la region mediaterranéenne (Cahiers Options Mediterranéennes). Colloque sur les Cultures Protégées dans la Région Mediterranéenne. Agdair: Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. Vol. 31.

Ha-taechwan; Lee In-bok; Hwang Hyunscob; Ha Jcongsu. 2014. Wind Pressure Coeficients Determination for Greenhouse Built on a Reclaimed Land. Acta horticulturae 1037.

Hoxey R. P.; Richardson G. M. 1984. Measurements of wind load son pull-scale film plastic. Ciad. Greenhouse. J. Wind Eng. Ind- Aerodyn. 16(1):57-83.

Japan Greenhouse Horticulture Association. 1981. Greenhouse structural requirement, JGHA, 12-17.

Jensen M.; Grank N. 1995. Model-scale tests in turbulent wind: Part II Copenhagen, Denmark: Danish technical press.

Kendirli B. 2005. Structural analysis of greenhouses: A case study in Turkey. Build Environ Vol. 75(1):1-16.

Lee S. G.; Lee H. W. 1996. An analysis of wind force coefficients for structural design of greenhouse. Acta Horticulturae. 440:280-285

Lee, I., Lee, S., Kim, G., Sung, J., Sung, S. and Yoon, Y. 2005. PIV verification of green- house ventilation air flows to evaluate CFD accuracy. Transactions of the ASAE 48(5):2277-2288.

Mathews E. H.; Meyer J. P. 1987. Numerical modeling of wind loading on a film clad greenhouse. Bldg. Environ. 22(2):129-134.

Mistriotis A.; Briassoulis D. 2002. Numerical estimation of the internal and external aerodynamic coefficients of a tunnel greenhouse structure with opening. Comp. Electric. Agric. 34:191-205.

Moniyama H.; Sase S; Uematsu Y.; Yamaguchi T. 2010. Wind tunnel study of the interaction of twoor three side by side pipe – framed greenhouses on wind pressure coefficients. Transactions of the ASABE. Vol 53(2):585-592.

Nelson G.L.; Manbeck H. B.; Meador N. F. 1988. Light agricultural and industrial structures. Van Nostrand Reinhold Co., 147-161

Robertson A. P.; Roux J.; Gratraud G.; Sxarascia S.; Castellano M.; De Virel D.; Palier P. 2002. Wind pressures on permeably and impermeably-clad structures. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 90(4-5):461-474.

Subramani, T., Sugathan, A. 2012. Finite Element Analysis of Thin Walled-Shell Structures by ANSYS and LS-DYNA. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). Vol.2, Issue.4, July-Aug. pp-1576-1587.

Von Elsner B.; Briassoulis D.; Waaijenberg D.; Mistriotis A.; Von Zabelititz C.; Gratraud J.; Russo G.; Suay-Cortes R. 2000. Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries, Part I: Desing requirements. J Agric Eng Res. Vol. 75(1):1-16.

Yasemin E. 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), pp. 3131-3139.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN DE CONSTANTES MECÁNICAS EXTRAÍDAS DE UN ACERO GALVANIZADO DE LA ESTRUCTURA DE UN INVERNADERO

3.1 Resumen

El presente estudio experimental se centró en investigar diferentes muestras de acero con geometría rectangular obtenidas de elementos estructurales que conforman un invernadero de ventilación cenital, con el objetivo de caracterizar las constantes mecánicas extraídas del mismo. Los especímenes fueron instrumentados con dos galgas extensométricas para medir tanto las deformaciones normales como las transversales; esto, con la finalidad de caracterizar el material, estableciendo las constantes mecánicas (*Esfuerzo de cedencia* σ_0*, Modulo elástico* E *y relación de Poisson* ν*)*, respectivamente. Se presentan los resultados correspondientes a los parámetros mecánicos establecidos por las deformaciones obtenidas por los extensómetros y los cuales fueron: esfuerzo & deformación, fuerza & deformación y relación de Poisson & fuerza. Resultando que el perfil rectangular ocupado por el elemento estructural sufre de una asimetría de flexión, debido a que existe una rigidez mayor en la zona donde fue soldado, en comparación con la que no presenta alteración térmica. El material no corresponde con las características de un acero estructural A36, ya que presenta un esfuerzo de cedencia más bajo, no cumpliendo con las normas establecidas, existiendo un riesgo inminente de presentarse deformación plástica cuando sean sometidos a estados de carga fluctuante y sobrepeso.

Palabras clave: probeta de acero, galgas extensométricas, deformaciones normales y transversales.

MECHANICAL- CONSTANTS DRAWN FROM CHARACTERIZATION A STEEL ONCE WAS GALVANIZED OF A GREENHOUSE'S STRUCTURE

3.2 Abstract

The present experimental study focused in to investigate different steel samples with rectangular geometry obtained of structural elements that shape a zenithal- ventilation greenhouse, with the objective of characterizing mechanical constants extracted from the same one. Specimens were instrumented with two strain gauges to measure so the normal deformations as the side roads; this, with purpose of characterizing material, establishing the mechanical constants (*effort of yielding*σ_0, *modulate elastic E and Poisson's relation v),* respectively. Results are presented corresponding to the mechanical parameters established for the deformations obtained with the extensometers and them as they were: strength & deformation, force & deformation and Poisson's relation & force. Resulting that the rectangular profile occupied by the structural element is afflicted with a flexion asymmetry, because a bigger rigidity in the zone where was soldier, as compared with that does not has alteration thermic. The material does not correspond with the characteristics of a structural steel A36, as it is a effort of yielding more low, failing to comply with the rules laid down, there is a imminent risk of plastic deformation occur when they are subjected to fluctuating charge states and overweight.

Key words: steel test tube, strain gauges, normal and transverse deformations.

3.3 Introducción

Las vigas generalmente son cuerpos sólidos de forma alargada y sección recta constante, de gran interés en la ingeniería que normalmente se utilizan en posición horizontal y siendo de longitud grande comparada con las dimensiones de su sección recta. Las vigas pueden estar sometidas a cargas concentradas, cargas distribuidas, o pares (momentos concentrados) que actúen solos o en combinación o en combinación cualquiera, siendo la flexión la principal deformación que sufren (Riley y Sturges, 1995).

Para el desarrollo del ensayo a flexión en un espécimen, es necesario plantear ecuaciones que describan el comportamiento de la deformación, desplazamiento del eje neutro, así como los esfuerzos tanto normales como de corte (Dally, & Riley, 1965; Hideya, & Conway, 1973). Además se debe obtener la carga crítica necesaria para que se presente en la muestra el fenómeno de plasticidad. El conocimiento del comportamiento del desplazamiento de la elástica de la probeta que se analiza es de gran relevancia, ya que se puede predecir en qué momento se presenta el fenómeno de plasticidad, además de permitir analizar dicha muestra por medio de análisis de imagen (Timoshenko, 1957; Casanoves, 1965; Meyers, 1978; Hearn, 1997; Dieter, 1998; Timoshenko & Godier, 1981; Vázquez, 2001; Casanoves, 2007)

Realizando el análisis del estado mecánico en el espécimen por el método de elemento finito, permite observar el comportamiento que presenta éste, al ser sometido a una carga puntual. Además, los valores que se obtengan, servirán

como marco de referencia para ser comparado con los resultados adquiridos en el estudio experimental y en los teóricos.

El objetivo del presente trabajo es caracterizar las constantes mecánicas extraídas de un acero galvanizado que conforman un invernadero de ventilación cenital.

3.4 Materiales y métodos

El estudio consistió en someter a flexión diferentes muestras de acero con geometría rectangular obtenidas de elementos estructurales que conforman un invernadero de ventilación cenital como se observa en la Figura 36.

Figura 36. Elementos estructurales que conforman un invernadero con ventilación cenital.

Dichos especímenes fueron instrumentados con dos galgas extensométricas para medir tanto las deformaciones normales como las transversales; esto, con la finalidad de poder caracterizar el material, estableciendo las constantes mecánicas (*Esfuerzo de cedencia* σ_0, *Modulo elástico* E *y relación de Poisson* ν*)*, respectivamente.

Obtención de muestra y dimensionamiento

El perfil usado corresponde a un elemento tipo perfil tubular rectangular (PTR) soldado por la parte central y sometido a un proceso de recubrimiento galvanizado de zinc, para evitar la corrosión. En la Figura 37, se presentan las zonas donde fueron obtenidas dichas probetas.

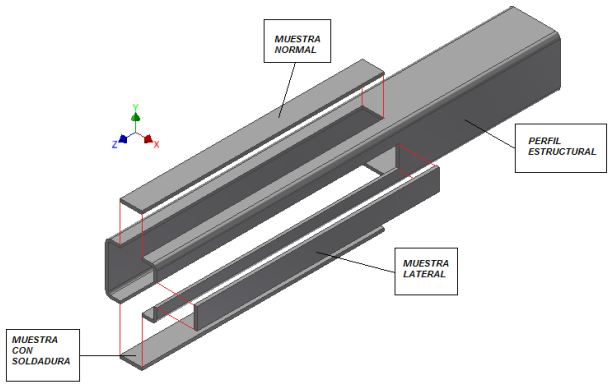


Figura 37. Ubicación de la extracción de las muestras a estudiar del elemento estructural.

Las dimensiones del ancho b y el largo l de las probetas, fueron calculadas en función de la carga máxima necesaria para deformar plásticamente; en la Figura 38, se observan las dimensiones generales del espécimen.

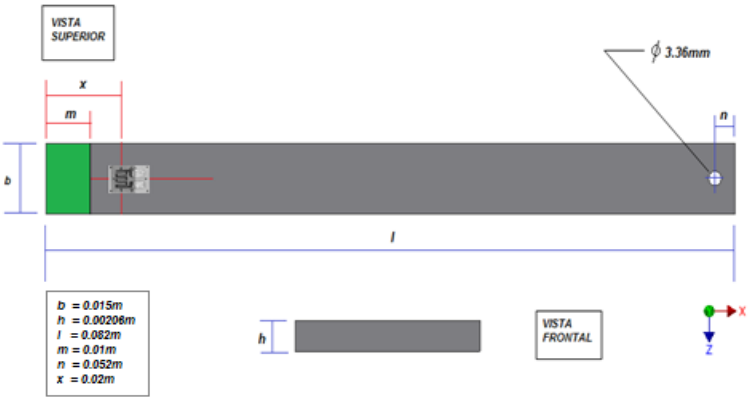


Figura 38. Dimensiones del espécimen, así como la ubicación del extensómetro.

Ensayo a flexión

El ensayo consistió en someter a flexión pura los especímenes de acero rectangulares instrumentados, para obtener las deformaciones debido a la acción de una carga controlada, ésta fue colocada de manera gradual en intervalos de 10 N hasta alcanzar 80 N. Los extensómetros que se ocuparon para medir las deformaciones tanto en dirección X como en dirección Y, corresponden a la serie: $EA-06-240LZ-120$ de tipo uniaxial, correspondiente para acero. La instalación es referida a la nota técnica $B-117-14$ de Measurements group (Vishay, 2001; Vishay,2005).

3.5 Resultados y discusión

Se presentan los resultados correspondientes a los parámetros mecánicos establecidos por las deformaciones obtenidas por los extensómetros y los cuales se enlistan a continuación.

- Esfuerzo-deformación.
- Fuerza-deformación.
- Relación de Poisson-fuerza.

Dichas graficas refieren tanto para los especímenes con soldadura y sin soldadura; donde también, se realiza una comparativa de resultados arrojados entre ambas muestras.

Esfuerzo-deformación

En la Figura 39 y 40, se muestran los resultados promedio de esfuerzo-deformación, obtenidos tanto en muestras con y sin soldadura.

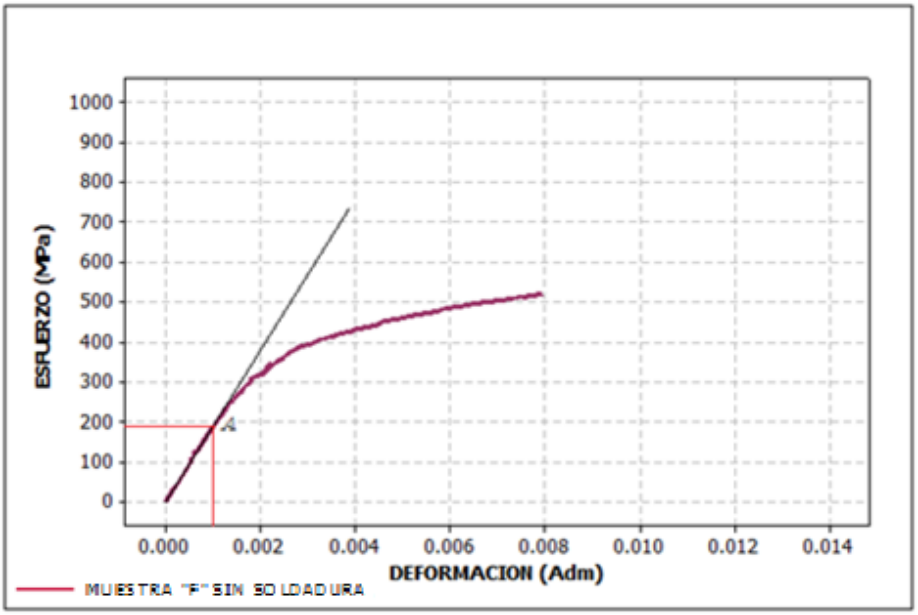


Figura 39. Diagrama esfuerzo-deformación, para un espécimen sin soldadura.

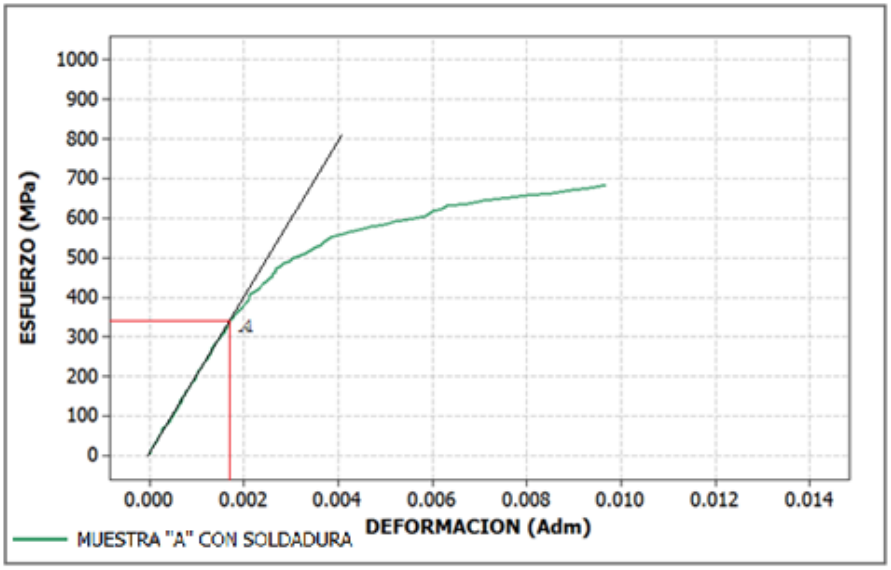


Figura 40. Diagrama esfuerzo-deformación, para un espécimen con soldadura.

Fuerza-deformación

En la Figura 41 y 42, se muestran los resultados promedio de fuerza y deformación, obtenidos tanto en muestras con y sin soldadura.

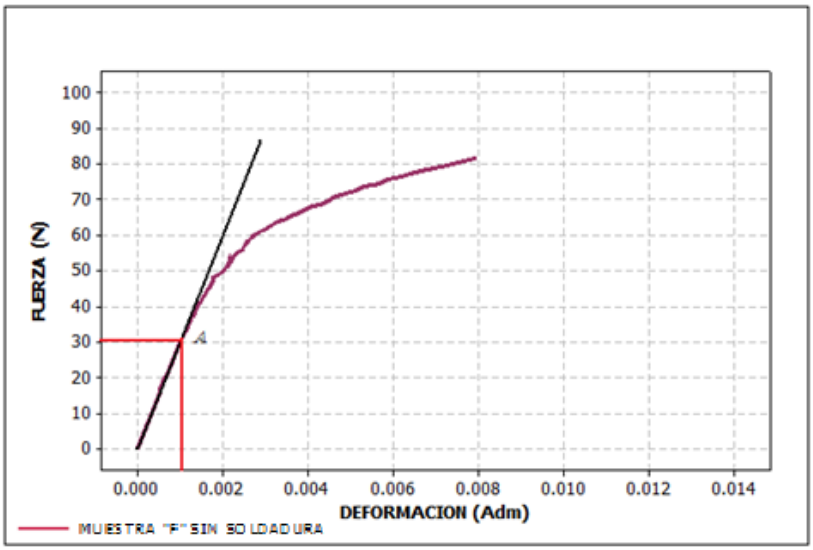


Figura 41. Diagrama fuerza-deformación, para un espécimen sin soldadura.

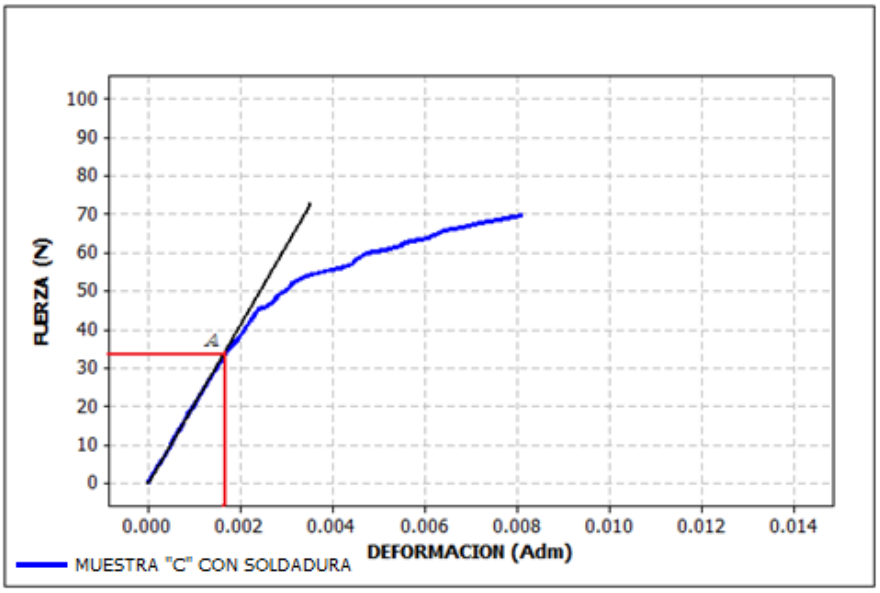


Figura 42. Diagrama fuerza-deformación, para un espécimen con soldadura.

Relación de Poisson-fuerza

En la Figura 43 y 44, se muestran los resultados promedio de relación de Poisson-fuerza, obtenidos tanto en muestras con y sin soldadura.

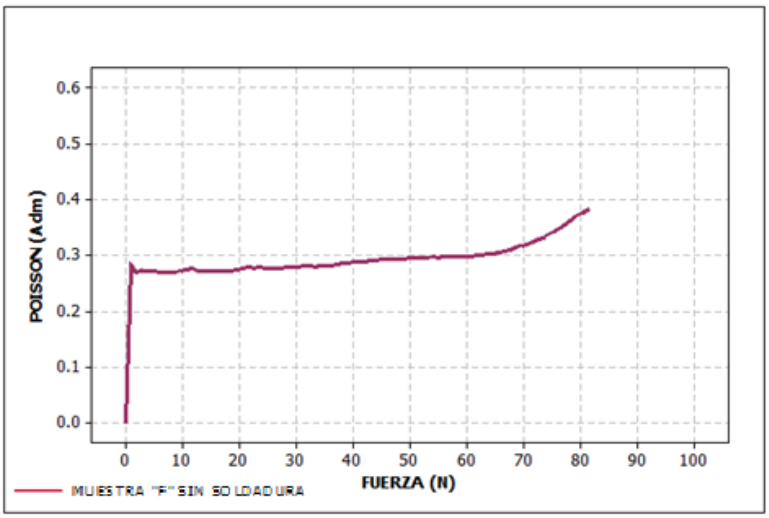


Figura 43. Diagrama relación de Poisson-fuerza, para un espécimen sin soldadura.

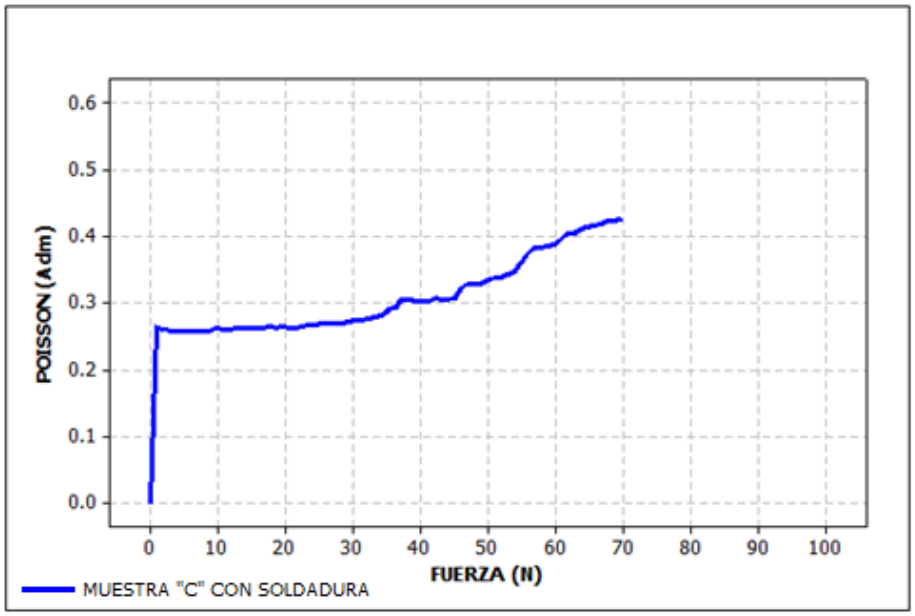


Figura 44. Diagrama relación de Poisson-fuerza, para un espécimen con soldadura.

Comparativa de resultados promedio del esfuerzo-deformación

En la Figura 45, se muestra la comparativa de resultados promedio del esfuerzo-deformación, obtenidos tanto en muestras con y sin soldadura.

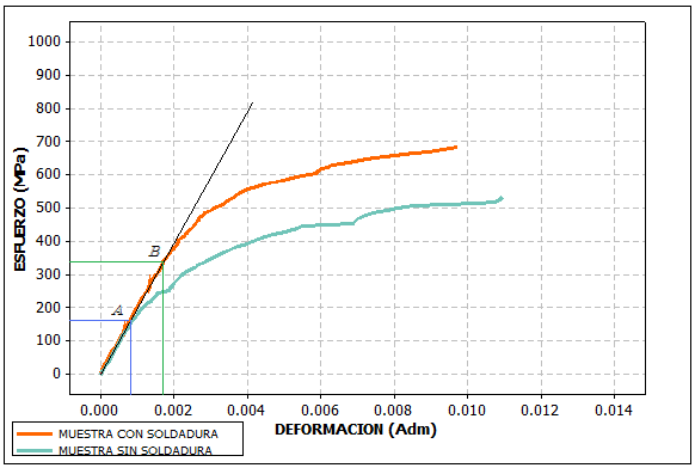


Figura 45. Comparativa de resultados esfuerzo-deformación, de especímenes con y sin soldadura.

Fuerza y deformación

En la Figura 46, se muestra la comparativa de resultados promedio de la fuerza-deformación, obtenidos tanto en muestras con y sin soldadura.

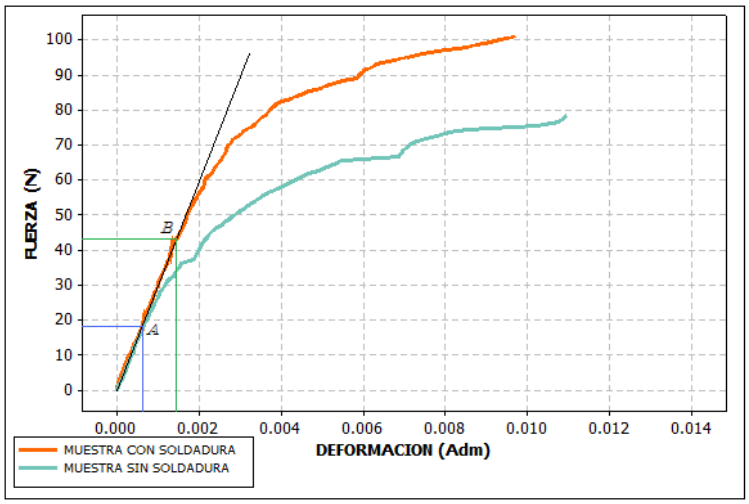


Figura 46. Comparativa de resultados fuerza-deformación, de especímenes con y sin soldadura.

Relación de Poisson-deformación

En la Figura 47, se muestra la comparativa de resultados promedio de la relación de Poisson-deformación, obtenidos tanto en muestras con y sin soldadura.

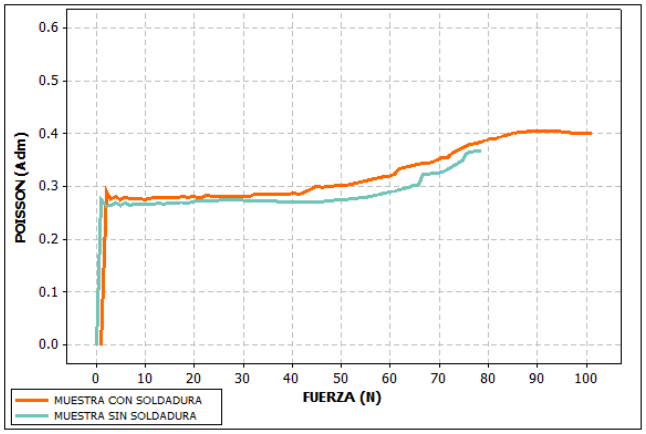


Figura 47. Comparativa de resultados relación de Poisson-fuerza, de especímenes con y sin soldadura.

3.6 Discusión de los resultados

Una vez obtenidos los datos de las constantes mecánicas (*esfuerzo de cendencia* σ_0*, modulo elástico* E*, así como la relación de Poisson* ν) en muestras de acero con y sin soldadura, se aprecia esfuerzo-deformación, mostrada en la Figura 10, una variación del esfuerzo de cedencia entre ambas muestras.

En la gráfica fuerza-deformación de la Figura 46, se observa una variación de la fuerza entre una muestra y otra. El espécimen con soldadura presenta un posible endurecimiento debido a un cambio microestructural en la periferia donde fue colocada la soldadura (Jokinen *et al.,* 2000).

Por su parte, en la gráfica relación de Poisson-fuerza de la Figura 47, se aprecia un aumento de la relación de Poisson en la muestra con soldadura, así como el crecimiento de la curva con menor carga, en comparación con la probeta que no está afectada.

En el cuadro 9, se realiza una comparativa del valor del esfuerzo de cendencia promedio en probetas con y sin soldadura, así como por elemento finito y la norma ASTM A36 (2005).

Cuadro 9. Comparativa del valor del esfuerzo de cendencia promedio de probetas con y sin soldadura, así como por elemento finito y la norma ASTM A36 (2005)

Tipo de probeta	Fuerza ($\mathbf{N}$)	Esfuerzo de cedencia ($\mathbf{MPa}$)
Sin soldadura	31.3	194.2
Con soldadura	34.3	285.2
Elemento finito	39.2	112.3
Norma ASTM A36	39.1	250

En el cuadro 10, se realiza una comparativa del valor de las deformaciones con relación a la carga aplicada, al momento de presentarse el fenómeno de plasticidad.

Cuadro 10. Comparativa del valor de las deformaciones en relación de carga aplicada al momento de presentarse el fenómeno de plasticidad.

Tipo de probeta	Fuerza ($\boldsymbol{N}$)	Deformaciones ($\boldsymbol{Adm}$)
Sin soldadura	31.39	$1075x10^{-6}$
Con soldadura	42.18	$1406x10^{-6}$
Elemento finito	31.39	$141x10^{-6}$

En el cuadro 11, se realiza una comparativa del valor de la relación de Poisson en correspondencia a la carga aplicada, al momento de presentarse el fenómeno de plasticidad.

Cuadro 11. Comparativa del valor de la relación de Poisson en correspondencia a la carga aplicada, al momento de presentarse el fenómeno de plasticidad.

Tipo de probeta	Fuerza ($\boldsymbol{N}$)	Relación de Poisson ($\boldsymbol{Adm}$)
Sin soldadura	31.39	0.28
Con soldadura	54.93	0.31

El desplazamiento del eje neutro de ambas probetas se presenta en el cuadro 12, dicho desplazamiento corresponde a la zona plástica.

Cuadro 12. Desplazamiento del eje neutro en probetas con y sin soldadura, hasta la zona plástica.

Tipo de probeta	Desplazamiento del eje neutro ($\boldsymbol{mm}$)
Sin soldadura	10.66
Con soldadura	7.65
Elemento finito	4.93

3.7 Conclusiones

El perfil rectangular ocupado para elemento estructural sufre de una asimetría de flexión, debido a que existe una rigidez mayor en la zona donde fue soldado, en comparación con la que no presenta alteración térmica.

El material no corresponde con las características de un acero estructural A36, ocupado para la construcción de invernaderos como lo marca la norma ASTM A36, ya que presenta un esfuerzo de cedencia más bajo.

El acero también presenta esfuerzo residual debido al proceso de galvanizado, por lo que es constatable con el valor de referencia del esfuerzo de cedencia, así como el comportamiento en la relación de Poisson.

El desplazamiento del eje neutro es mayor en las probetas no afectadas por soldadura, en comparación con las que sí lo están, debido a que éstas no presentan endurecimiento de la superficie debido a un choque térmico.

El mismo caso, se aprecia en el desplazamiento del eje neutro obtenido por elemento finito, en comparación con el presentado experimentalmente.

El acero que conforma los elementos estructurales para la construcción de invernaderos con ventila cenital, no cumple con las normas establecidas, existiendo un riesgo inminente de presentarse deformación plástica cuando son sometidos a estados de carga fluctuante y sobrepeso.

3.8 Bibliografía

ASTM A36/A36M. 2005. Historical Standard: Especificación Normalizada para Acero al Carbono Estructural. U.S.A.

Casanoves, M. D. 1965. Mecánica y Cálculo tensorial, Editorial Dossat, Madrid, España.

Casanoves, M. D. 2007. El espacio y el tiempo en las Matemáticas y en la Física, *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat. (Esp),* 101(2): 259-283.

Dally, W. J. Riley F. W. 1965. Experimental Stress Analysis, Ed. McGraw Hill, New York, USA.

Dieter, G. E. 1998. Mechanical Metallurgy, Ed. McGraw Hill, London, UK.

Hearn, E. J. 1997. Mechanics of Materials, EdOxfort, London, UK.

Jokinen, T.; T. Vihervä, H. Riikonen y V. Kujanpää. 2000. Welding of ship structural *steel A36 using a Nd:YAG laser and gas–metal arc welding,* http://dx.doi.org/10.2351/1.1309549 *J. Laser Appl.* 12, 185.

Meyers, M. 1978. A mechanism for dislocation generation in shock-wave deformation, pp. 21–26, Scripta Metallurgica, DOI: 10.1016/0036-9748(78)90219-3,Volume 12, Issue 1, January, pp. 21–26.

Vazquez J. F. 2001. Casos especiales de flexión en vigas, Ed. Talleres gráficos de la Dirección del Instituto Politécnico Nacional, ISBN: México.

Riley, W. F. y L. D. Sturges. 1995. Ingeniería Mecánica, Ed. Reverté, Barcelona, España.

Timoshenko, S. y Godier J. N. 1981. Theory of Elasticity, Ed. McGraw Hill, New York, USA.

Timoshenko, S. 1957. Resistencia de Materiales, Ed. Espasa–Calpe, Vol. 1 y 2, Madrid, España.

Vishay. 2005. Interactive Data Book, Vol. 2, United States, s. n.

Vishay. 2001. Intruction Bulletin *B–127–14,* United States, s. n.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE FLUJO DE VIENTO, RESISTENCIA MECÁNICA Y ESTUDIO METALOGRÁFICO, EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE UN INVERNADERO CON VENTILACIÓN CENITAL SOMETIDO A CARGAS COMBINADAS

4.1 Resumen

La importancia de conocer el estado de esfuerzos y deformaciones, al que se someten los elementos estructurales que conforman un invernadero con ventilación cenital, debido a los diferentes tipos de carga que actúan sobre ésta, tales como: la carga de viento según la zona donde es ubicado, la variación gradual de la carga del cultivo, los efectos térmicos, etc., así también, la presencia de esfuerzos residuales generados en el método de galvanizado para prevenir la corrosión, han llevado a la generación de fallas en dichos elementos, propiciando fracturas y el colapso de la estructura afectando a los cultivos que se tienen dentro de ésta, reflejándose en pérdidas económicas cuantiosas para los agricultores.

En este trabajo se presenta un análisis en túnel de viento, así como por el método de elemento finito simulando la carga de viento a la que está sometida la estructura del invernadero con ventilación cenital; así también, se muestra el análisis del comportamiento de los esfuerzos, momentos y desplazamientos generados por la acción de cargas combinadas, apoyándose el método de elemento finito. Por último, se muestra un estudio metalográfico en elementos estructurales galvanizadosque presentan pandeo, con el fin de identificar posibles afectaciones en la microestructura.

Palabras clave:

Invernadero con ventilación cenital, Esfuerzo, Deformaciones, Flujo de viento, Metalográfico, Cargas de viento.

WIND FLOW ANALYSIS, STRENGTH AND METALLOGRAPHIC STUDY ON STRUCTURAL ELEMENTS OF A GREENHOUSE VENTILATION WITH OVERHEAD EXPENSES UNDER COMBINED

4.2 Abstract

The importance of knowing the state of stress and strain to which the structural elements of a greenhouse roof ventilation undergo due to different types of loads acting on it, such as wind load according to the area where it is located, the gradual variation of the load of the crop, thermal effects, etc., and also, the presence of residual stresses generated in the method of galvanized to prevent corrosion, have led to the generation of faults in these elements, leading to fractures and the collapse of the structure affecting crops have within it, reflected in substantial economic losses to farmers.

This paper presents an analysis on wind tunnel, as well as the finite element method simulating wind load that is subject to the greenhouse structure with overhead ventilation; well, behavior analysis efforts, moments and displacements generated by the action of combined loads shown, based on finite element method. Finally, metallographic study is shown in structural members having bending galvanized, in order to identify possible effects on the microstructure.

Keywords:

Conservatory roof ventilation, Effort, Warps, wind flow, Metallographic, Wind loads.

4.3 Introducción

Son muchos los autores que han puesto de manifiesto que los invernaderos ubicados en zonas costeras, se construyen en ausencia de proyecto de construcción; basándose únicamente en la experiencia y conocimiento local de las empresas constructoras (Briassoulis, et. al.1997). Todos ellos, coinciden en la necesidad de diseñar los invernaderos de acuerdo a normativas vigentes o en base a las condiciones climáticas imperantes en la zona, fundamentalmente atendiendo a las cargas de viento y nieve.

En Europa, la norma UNE-EN 13031-1 (2002) define los principios generales y requisitos de resistencia mecánica, estabilidad, estado de servicio y durabilidad para el proyecto, así como 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 Castellano, (2005); así también, para evaluar la estabilidad estructural del invernadero multitúnel más empleado en Almería (Fernández y Pérez 2004).

Por otra parte, los invernaderos se construyen con dimensiones variables, normalmente adaptándose a la superficie de la parcela disponible. Esto supone una gran variabilidad en las dimensiones del invernadero que no es considerada 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. Por otra parte, se han desarrollado líneas de investigaciones orientadas a conocer la

capacidad mecánica de diferentes geometrías de invernadero (Fernández y Pérez 2004; Castellano et al., 2005).

Sin embargo, no existe trabajo alguno que estudie la relación entre la capacidad estructural, los efectos climáticos que prevalecen en zona costera y los procesos de manufactura aplicados a los miembros estructurales, los cuales interactúen de manera combinada.

4.4 Problemática.

Los invernaderos con ventilación cenital ubicados en zonas costeras, han mostrado afectaciones en los elementos estructurales que los conforman, modificando la geometría del mismo, esto ha conllevado al colapso de la estructura debido a la presencia de fracturas en el material, destruyendo las cosechas que se tienen dentro de estas. Propiciando enormes pérdidas económicas a los agricultores.

4.5 Metodología.

Ensayo en túnel de viento.

En este ensayo se realizó en un túnel tipo PA-2ZU, obteniéndose los datos del coeficiente y distribución de presión que ejerce el viento sobre barlovento, así como en sotavento de un modelo del invernadero con ventilación cenital a escala: 1/100; estos datos fueron obtenidos por 22 tomas de presión en 4 posiciones angulares con respecto de la dirección del viento $(0^{\circ},\ 90^{\circ},\ 180^{\circ}\ \text{y}\ 270^{\circ})$, en condiciones ambientales promedio establecidas, las

cuales se refieren en el cuadro 13 (Castellano et al., 2005; Callejón et al., 2009 ;Fernández y Pérez. 2004).

Cuadro 13. Condiciones ambientales promedio establecidas para la realización del ensayo.

Temperatura ambiente (°C)	Presión atmosférica (mmHg)	Humedad relativa %	Densidad del aire kg/m^3
19.6	587.5	0.79	0.92

La velocidad del túnel de viento durante dichos ensayos fue de $26\ m/s$; la ubicación del modelo quedó definida por la orientación del flujo de viento incidente (Figura 48), (Barlow et al., 1999).

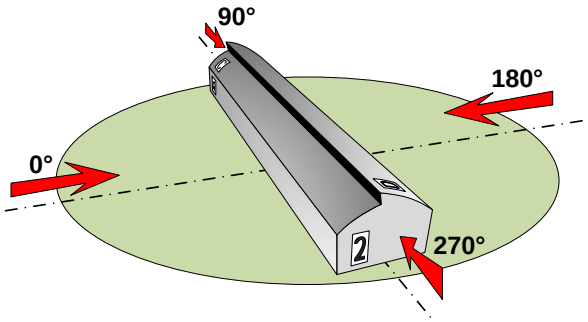


Figura 48. Ubicación del modelo definida por la orientación del flujo de viento incidente.

Visualización de flujo por medio de inyección de humo.

Al someter el modelo a un flujo de viento con la orientación a $0°$ y velocidad de 26 ms^{-1}, se observa el desprendimiento del vórtice de la parte superior de la geometría frontal que presenta la ventila cenital del modelo de invernadero, generando en sotavento una zona de presión negativa incidente, en forma de arrastre (Fernández y Pérez.2004; Castellano et al., 2005; Callejón et al., 2009);

al rotar el modelo $180°$, el vórtice que se desarrolla por el desprendimiento del flujo laminar de la parte superior de la ventila se extienden de manera considerable, en comparación con el obtenido en la orientación de $0°$, propiciando un área mayor de presión negativa ejerciéndose sobre el sotavento (Figura 49) (Fernández y Pérez.2004; Callejón et al., 2009) .

Figura 49. Generación de vórtice por la acción de flujo de viento a $26\ \mathrm{m/s}$, (a) orientación a $0°$ y (b) orientación a $180°$.

Simulación del flujo de viento obtenido por el método de elemento finito en 2D y 3D.

Visualización en $2\mathrm{D}$.

La realización del estudio por medio del método de elemento finito, tuvo la finalidad de comparar los resultados del coeficiente y distribución de carga de viento, obtenidos en el ensayo de túnel de viento. El comportamiento de flujo con orientación a $0°$, denota la generación de una serie de vórtices debido a la geometría que presenta la ventila cenital, dando lugar a una zona de presión negativa que actúa sobre el sotavento en forma de arrastre (Figura 50) (Fernández y Pérez.2004; Callejón et al., 2009).

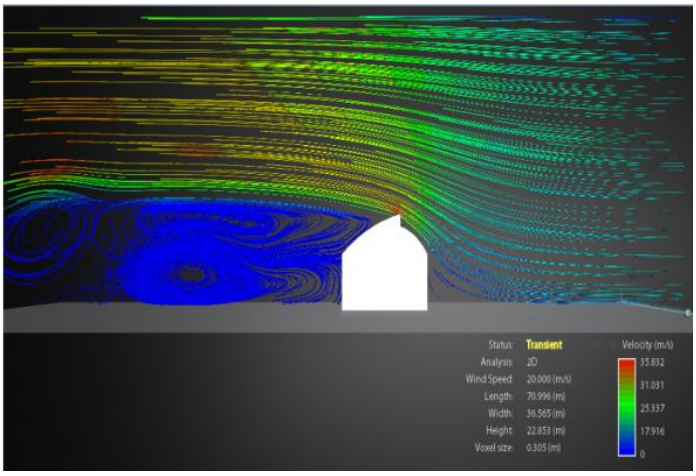


Figura 50. Vórtices que generan zonas de presión negativa en sotavento del modelo de invernadero.

Visualización en 3D.

La distribución de la velocidad, así como la presión ejercida sobre el modelo con una orientación de 0°, se distribuye en el área de barlovento, encontrándose el valor más crítico en el centro, así como mostrando una tendencia decreciente hacia las orillas. En el sotavento se aprecia una zona de presión negativa, debido a los vórtices que se desprenden de la geometría superior del mismo (Figura 51).

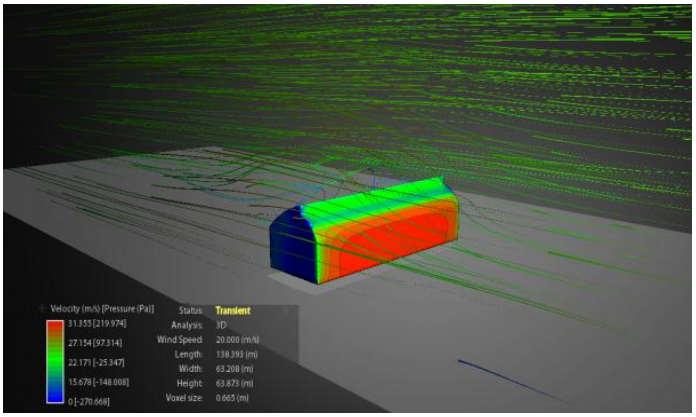


Figura 51. Distribución de velocidad y presión que se ejerce sobre el barlovento del modelo con orientación del flujo a 0°.

Cuando cambia la orientación del flujo de viento en dirección a los $180°$, se observa un aumento en el valor de la presión negativa que incide en el sotavento, debido a que el vórtice generado es de mayor tamaño en comparación con el obtenido en la orientación de $0°$ (Figura 52) (Fernández y Pérez 2004; Callejón et al., 2009).

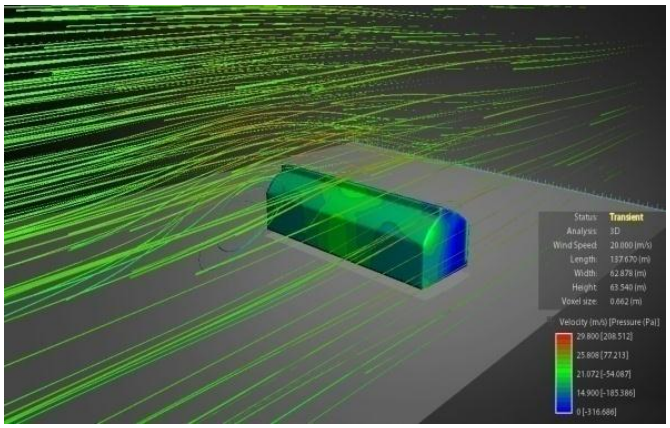


Figura 52. Zona de depresión actuando en el sotavento del modelo, por la acción del vórtice.

Análisis estructural.

El análisis de los elementos estructurales que conforman un invernadero, permite establecer el comportamiento de los esfuerzos normales y de corte, así como las deformaciones debido a la acción de un estado de carga combinado. Para este estudio, se aplicaron tres tipos de carga de manera combinada como son: el peso propio de la estructura, la carga que ejerce el cultivo y la carga de viento. Esto tiene como finalidad, conocer los valores de los parámetros mecánicos antes mencionados y así poder compararlos con los establecidos en la norma (ASTM A36, 2005).

Esfuerzo normal máximo.

El esfuerzo normal máximo que presentan los elementos estructurales que están bajo la acción de un estado combinado de carga, produce valores críticos, en comparación con lo especificado en la norma ASTM A36 (2005) referido al esfuerzo de cedencia y último para un acero A36 respectivamente. Por lo que se infiere que existe la presencia del fenómeno de plasticidad en los perfiles estructurales (Figura 53), (Timoshenko, y Goodier 1981).

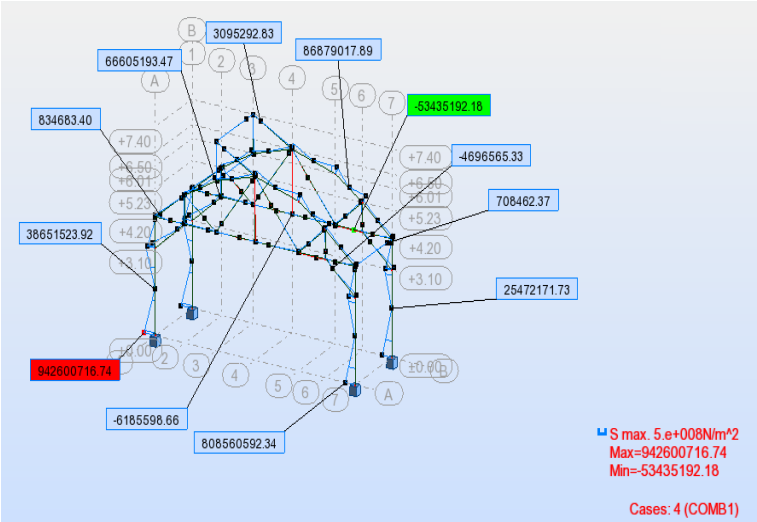


Figura 53. Esfuerzo principal máximo, debido al estado combinado de carga.

Esfuerzo de corte

Los esfuerzos de corte que presenta la armadura bajo la acción de la carga combinada, exhibe valores dentro del rango elástico (figura 54), por lo que el comportamiento de la estructura en este estado no afecta a los elementos estructurales que la conforman (Hearn, E. 1997; Dieter, 1988).

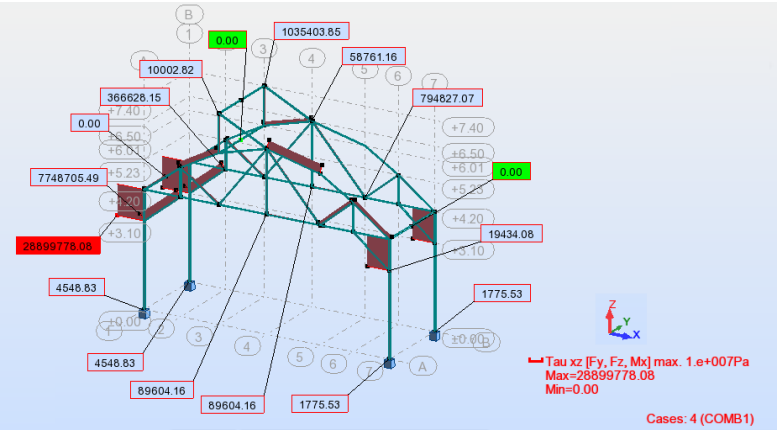


Figura 54. Esfuerzo de corte en dirección Z, debido al estado combinado de carga.

Deformaciones.

Los valores de deformación que presenta la estructura, concuerdan con los obtenidos por análisis teórico de los elementos estructurales tanto a flexión como a compresión. Los valores obtenidos por el estado de carga combinada son pequeños, debido primordialmente a la rigidez estructural (Figura 55) (Casesnoves, M. D.1965; Viniegra, H. F. 2000; Vazquez, F.J. 2001; Hjelmstad. K. 2005).

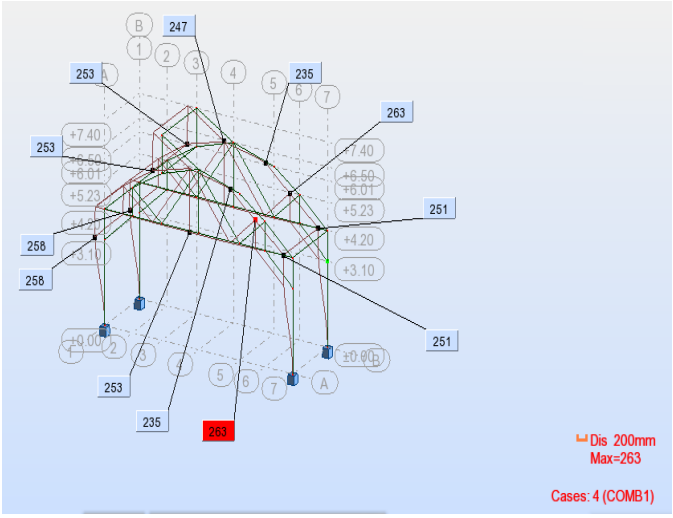


Figura 55. Deformaciones que presentan los elementos estructurales, debido al estado combinado de carga.

Estudio metalográfico.

Este estudio tiene como finalidad identificar: tipo de microestructura, posibles fallas tales como vacancias, impurezas o grietas debidas al proceso de fabricación o galvanizado del acero, en los elementos mecánicos que conforman la armadura de invernadero. El procedimiento para la realización de las metalografías está basado en la norma (ASTM E3 2005); para la revelado de la estructura granular la superficie fue atacada con Nital al 2%, respectivamente (ASTM E3 – 95. 2000; Avner, H.1988; ASTM. 2005).

Ubicación de muestras.

Las muestras seleccionadas para este estudio, fueron extraídas de elementos estructurales que presentan afectaciones (Tal como torsión o pandeo). Los puntos de interés corresponden a las zonas siguientes: unión conformada por el metal y la soldadura; pliegues del perfil y por último, la superficie galvanizada sin afectaciones (Figura 56).

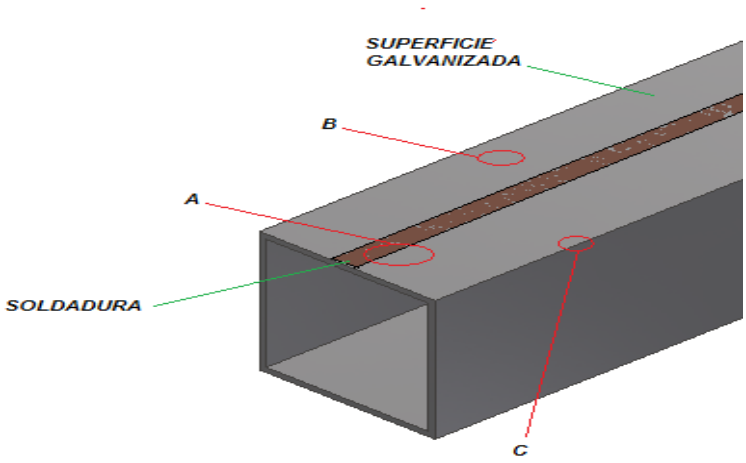


Figura 56. Ubicación de muestras para estudio metalográfico**,**
(A) unión de soladura y metal, (B) área galvanizada sin afectaciones y (C) pliegues del perfil.

Zona de unión con soldadura.

La micrografía correspondiente a la zona de unión de la soldadura con el metal. La microestructura que presenta es de tipo ferrita, acompañada de nódulos muy pequeños aislados de perlita fina; así también, se observan pequeños puntos de impurezas, así como vacancias en los límites de grano (Figura 57) (ASTM E3 – 95. 2000; Avner, H.1988).

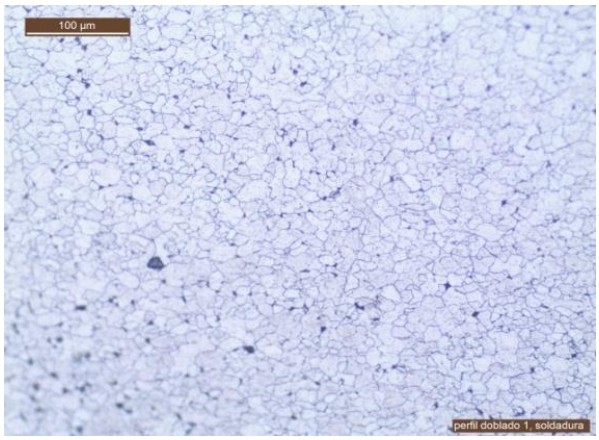


Figura 57. Micrografía correspondiente a la zona de soldadura donde se presenta una microestructura de ferrita.

Área del pliegue del perfil.

Esta zona corresponde a las cercanías del pliegue que da forma a la geometría cuadrada del perfil, referido en la Figura 9. En la micrografía se observa una matriz de ferrita, acompañado por colonias muy diminutas de perlita, así como impurezas incrustadas de sulfuro de manganeso, así como vacancias en los límites de grano (Figura 58) (ASTM E3 – 95. 2000; Avner, H.1988; ASTM. 2004).

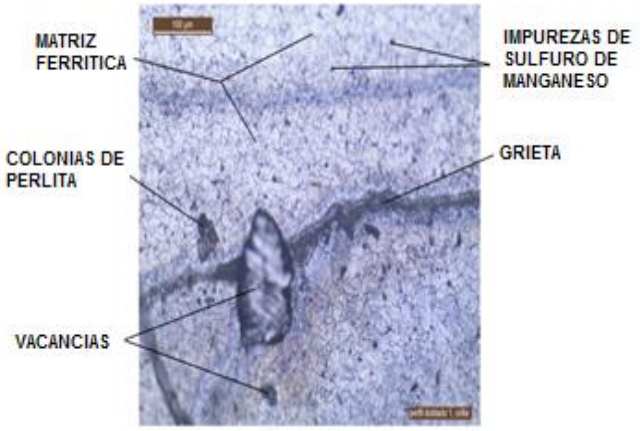


Figura 58. Micrografía correspondiente a la zona cercana al pliegue del perfil.

Además, se aprecia una grieta asociada con una serie de vacancias en la superficie y orientada paralelamente dobles del material (Avner, H. S.1988. ASTM. 2004).

4.6 Resultados.

Los resultados obtenidos por el ensayo en túnel de viento, así como del análisis de flujo por el método de elemento finito, se obtuvieron valores de Cp en las diferentes caras del modelo del invernadero, dependiendo de la orientación del flujo del viento incidente. En el cuadro 14, se presentan los valores promedios del Cp, así como el promedio de la velocidad local con respecto a la velocidad del flujo libre.

Cuadro 14. Valores de Cp y el promedio de la velocidad local, con respecto a la velocidad del flujo libre.

a=0°			a=90°		
Superficie	Cp	Vlocal/V	Superficie	Cp	Vlocal/V
A	0.76	0.49	A	0.23	0.88
B	-0.39	1.18	B	0.22	0.88
C	0.42	0.76	C	-0.19	1.09
D	-0.33	1.15	D	-0.16	1.08
1	-0.36	1.17	1	0.61	0.63
2	-0.39	1.18	2	-0.15	1.07

a=180°			a=270°		
Superficie	Cp	Vlocal/V	Ubicación	Cp	Vlocal/V
A	0.13	0.94	A	0.25	0.86
B	0.58	0.64	B	0.25	0.87
C	-0.12	1.06	C	-0.12	1.06
DS	-0.40	1.18	D	-0.20	1.09
DI	-0.12	1.06	1	-0.12	1.06
1	-0.36	1.17	2	0.64	0.6
2	-0.30	1.14			

Con los resultados obtenidos del Cp, fue posible calcular la carga aerodinámica P que se ejerce sobre las caras del modelo a escala del invernadero; dichos resultados se muestran en el cuadro 15, respectivamente.

Cuadro 15. Carga aerodinámica P ejercida sobre las caras del modelo a escala del invernadero.

a=0°		a=180°	
Superficie	Carga aerodinámica (Pa)	Superficie	Carga aerodinámica (Pa)
A	245.99	A	42.07
B	-126.23	B	187.73
C	135.94	C	-38.84
D	-106.81	DS	-129.47
1	-116.52	DI	-38.84
2	-126.23	1	-116.52
		2	-97.10

a=90°		a=270°	
Superficie	Carga aerodinámica (Pa)	Superficie	Carga aerodinámica (Pa)
A	74.44	A	80.92
B	71.20	B	80.92
C	-61.49	C	-38.84
D	-51.78	D	-64.73
1	197.44	1	-38.84
2	-48.55	2	207.15

En el cuadro 16, se muestra la comparativa de los resultados del coeficiente de presión C_p que presentó el modelo en el ensayo real dentro del túnel de viento, así como los obtenidos por el método de elemento finito en 2D.

Cuadro 16. Comparativa de los resultados del coeficiente de arrastre C_p obtenidos tanto por túnel de viento como por elemento finito en 2D.

Tipo de estudio	Cara Barlovento	Orientación	Coeficiente de presión C_p
Túnel de viento	A	0º	0.72
Elemento finito	A	0º	0.68
Túnel de viento	B	180º	0.6
Elemento finito	B	180º	0.69
Túnel de viento	1	90º	0.61
Elemento finito	1	90º	0.88
Túnel de viento	2	270º	0.64
Elemento finito	2	270º	0.70

El coeficiente de presión C_p, la velocidad máxima del flujo y las presiones (máximas y mínimas), obtenidos en análisis de flujo en 3D por medio del método de elemento finito, se presentan en el cuadro 17.

Cuadro 17. Coeficientes de presión C_p, la velocidad máxima del flujo, y las presiones máximas y mínimas obtenidos del modelo en 3D por elemento finito.

Cara	Orientación	C_p	V_{max} m/s	P_{max} Pa	P_{min} Pa
A	0º	0.87	28.6	221.8	-348.07
B	180º	0.75	29.17	208.97	0
1	90º	095	27	212.81	-335.85
2	270º	0.84	25.91	194.45	-290.06

Análisis estructural.

En el cuadro 18, se presentan los resultados obtenidos por el estudio estructural tanto de la deformación, esfuerzos principales (máximo y mínimo), así como el esfuerzo de corte en las direcciones Y, Z, respectivamente.

Cuadro 18. Resultados de las variables mecánicas (deformación, esfuerzos principales (máximo y mínimo) y esfuerzo de corte en las direcciones Y, Z).

Variable mecánica	Tipo de carga	Máximo MPa, μdef	Mínimo MPa, μde
Esfuerzo principal	Sobre peso	312.85	-270.9
Esfuerzo principal	Combinado	942.60	-881.9
Esfuerzo de corte	Combinado	29.85	-25.72
Deformaciones	Combinado	263	235

Imágenes metalográficas.

Se determinó que la microestructura que presenta el acero de los elementos estructurales corresponde a ferrita, con un contenido de carbono que oscila entre 0.08 a 0.13%, lo que corresponde a un acero 1010. Se detectó también, diminutas colonias aisladas de perlita, así como impurezas incrustadas en los límites de grano y una serie de vacancias en donde se relaciona el crecimiento de una grieta orientada paralelamente al doblez del perfil del elemento estructural.

4.7 Discusión.

El acero con que se manufacturó el perfil cuadrado ocupado como elemento estructural del invernadero, fue sometido a un proceso de galvanizado

sumergiéndolo un baño de zinc a una temperatura de $470°C$ aproximadamente; para después, enfriar al aire sin control alguno, dando lugar a la presencia de una microestructura de ferrita, correspondiente a un hierro α; además, se presentar esfuerzos residuales en el perfil. En el estudio metalográfico se constata lo dicho anteriormente, habiendo observado una matriz de ferrita, presencia de impurezas incrustadas, vacancias y grietas con orientación paralela al pliegue del perfil, Aunado a lo anterior, los valores arrojados por medio del análisis estructural del invernadero, muestran valores de esfuerzo normal de aproximadamente $312.85\ \mathrm{MPa}$, debido a la acción de la carga de cultivo. Siendo éste valor crítico más alto, en comparación con el estipulado para la cedencia que refiere la norma ASTM, que es de $250\ \mathrm{MPa}$ Norma (ASTM A36, 2005) respectivamente.

En el caso combinado, el resultado del esfuerzo normal, corresponde al un intervalo de 942.6 a $-881.9\ \mathrm{MPa}$, donde dichos valores son críticos en comparación con el estipulado por la norma, referido al esfuerzo mínimo de ruptura correspondiente al intervalo de 400 a $550\ \mathrm{MPA}$ Norma (ASTM A36. 2005).

Por lo que, al someterla estructura e estas cargas de manera cíclica, conllevan a la presencia del fenómeno de plasticidad, así también, se presenta rigidez de la estructura, ayudando esto a la nucleación de grietas por fatiga en los elementos estructurales, derivando posteriormente en un colapso de la estructura.

4.8 Bibliografía

ASTM E3-95. 2000. Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. U.S.A.

ASTM A36/A36M. 2005. Historical Standard: Especificación Normalizada para Acero al Carbono Estructural. U.S.A.

Avner, H. S. 1988. Introducción a la Metalurgia Física. México: Mc Graw Hill. Segunda edición.

Barlow, J. B. Rae, W. H. Pope A. 1999. Low Speed Wind Tunnel Testing. ISBN: 978-0-471-55774-6.

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.

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.

Casesnoves, M. D.1965. Mecánica y Cálculo tensorial. Madrid: Editorial Dossat.

Castellano S. Candura A. Scarascia-Mugnozza G. 2005. Greenhouse Structures SLS Analysis: Experimental Results and Normative Aspects. Acta Hort. Vol. 691.Pp. 701-708.

Dieter, G. E.1988.Mechanical Metallurgy. London: McGraw Hill.

Fernandez C., Pérez J. 2004. Caracterización de los invernaderos de la provincia de Almería. Ed. Cajamar Almería, Spain.

HjeImstad, K.2005.Fundamentals of structural Mechanics. London: Springer Science.

Hearn, E. J. 1997.Mechanics of Materials. London: Oxford.

Kendirli B. 2005. Structural analysis of greenhouses: A case study in Turkey. Build Environ Vol. 75(1):1-16.

Timoshenko, S. Goodier, J. N.1981. Theory of Elasticity.New York: McGraw Hill.

UNE-EN 13031-1.2002. Invernaderos: proyectos y construcción. Parte 1:Invernaderos para la producción comercial. European Committee for standardization CEN. Brussels, Belgium.

Valencia, C. G. 2002. Acción del viento sobre las estructuras. Colombia: Ed. Unibiblio.

Vazquez, F.J.2001. Casos especiales en flexión de vigas. México: Talleres gráficos de la Dirección del Instituto Politécnico Nacional.

Viniegra, H. F. 2000.Mecánica del Medio Continuo. México: UNAM.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS

5.1 Conclusiones

Existe la necesidad de un análisis estructural unificado de invernaderos de acero que pueda ser comprensiblemente ejecutada sobre la geometría, material, así como las condiciones ambientales.

En este estudio las herramientas mencionadas han sido empleadas para evaluar la estabilidad estructural de un invernadero típico empleado en la zona central de México.

Usando los datos ingresados al software Robot Structural fueron obtenidas las tensiones resultado de las cargas, de acuerdo a los resultados, la estructura del invernadero en algunos elementos no puede soportar las cargas de manera segura.

La distribución de los coeficientes de presión del aire a lo largo de las superficies fueron calculados por una prueba en un túnel de viento el cual simula el flujo; en general los valores calculados están dentro un rango aceptable, comparados con otros estudios.

La distribución de flujo libre, así como la presión ejercida sobre el modelo con una orientación de $0°$, se distribuyó en el área de barlovento, encontrándose el valor más crítico en el centro, mostrando una tendencia decreciente hacia las orillas. En sotavento se aprecia una zona de presión negativa, debido a los vórtices que se desprenden de la geometría superior del mismo.

Cuando cambia la orientación del flujo de viento en dirección a 180°, se observa un aumento en el valor de la presión negativa que incide en sotavento, debido a que el vórtice generado es de mayor tamaño en comparación con el obtenido en la orientación de 0°.

El perfil rectangular ocupado para elemento estructural sufre de una asimetría de flexión, debido a que existe una rigidez mayor en la zona donde fue soldado, en comparación con la que no presenta alteración térmica.

El material analizado para la estructura del invernadero no corresponde con las características de un acero estructural A36, ocupado para la construcción de invernaderos como lo marca la norma ASTM A36, ya que presenta un esfuerzo de cedencia más bajo.

El desplazamiento del eje neutro es mayor en las probetas no afectadas por soldadura, en comparación con las que sí lo están, debido a que éstas no presentan endurecimiento de la superficie debido a un choque térmico.

Los valores arrojados por medio del análisis estructural del invernadero, muestran valores de esfuerzo normal de aproximadamente $312.85\ \mathrm{MPa}$, debido a la acción de la carga de cultivo. Siendo éste valor crítico más alto, en comparación con el estipulado para la cedencia que refiere la norma ASTM, que es de $250\ \mathrm{MPa}$.

En el caso combinado, el resultado del esfuerzo normal, corresponde a un intervalo de 942.6 a $-881.9\ \mathrm{MPa}$, donde dichos valores son críticos en comparación con el estipulado por la norma, referido al esfuerzo mínimo de ruptura correspondiente al intervalo de 400 a $550\ \mathrm{MPa}$. Por lo que, al someterla

estructura e estas cargas de manera cíclica, conllevan a la presencia del fenómeno de plasticidad, así también, se presenta rigidez de la estructura.

5.2 Recomendaciones

La carga aerodinámica por unidad de superficie obtenida será de utilidad para que los constructores evalúen y sugieran un nuevo plan de diseño teniendo en cuenta la estabilidad estructural.

Se recomienda emplear perfiles de mayor sección o la incorporación de nuevos elementos estructurales para garantizar la correcta capacidad estructural de la geometría estudiada.

Debido a los resultados obtenidos se propone un estudio experimental apoyado en la técnica de extensometría eléctrica y fotoelasticidad en elementos críticos, que mostraron valores correspondientes a un comportamiento plástico.

Los resultados obtenidos se considera que pueden ser empleados como referencia para predecir el comportamiento de geometrías similares sometidas a condiciones dispares de carga.

La carga aerodinámica por unidad de superficie podría ser de utilidad para que los constructores evalúen y sugieran un nuevo plan de diseño.

5.3 **Perspectivas**

Las investigaciones realizadas contribuirán al conocimiento de las estructuras de los invernaderos con vistas a proteger los cultivos, al minimizar las restricciones y efectos que imponen los fenómenos climáticos. Lo que

conlleva a que estos satisfagan suficientes márgenes de seguridad y evitar daños severos a la estructura de los mismos, con el objetivo de incrementar la efectividad económica en los procesos productivos agrícolas.

Los efectos positivos se potencializarán si se utilizan de forma integral, con los trabajos realizados por otros investigadores, y con las mejoras que se le efectúen a los invernaderos existentes para minimizar las restricciones y efectos que imponen los fenómenos climáticos.

Un aspecto importante en los estudios realizados, es que sobre el tema en otros países solo han sido abordados de forma teórica y experimental por un grupo reducido de investigadores. En México, estos estudios sobre el análisis estructural de los invernaderos comienzan con esta investigación.