

TC-7

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL
DE CUBIERTAS TEXTILES SOMETIDAS A VARIACIONES
EN LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS**

Hernández, Carlos

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), Facultad de Arquitectura
y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela, Caracas
chhm@alum.mit.edu

Un modelo simplificado de una membrana anticlastica¹¹ es el de dos cuerdas perpendiculares entre si que se encuentran en un punto, si las cuerdas se tensan en direcciones opuestas , el punto de encuentro se inmoviliza, a medida que aumentamos la tensión en las dos cuerdas, se requerirá cada vez una fuerza mayor para desplazar el punto de encuentro de las cuerdas, en otras palabras el sistema es mas rígido al aumentar la tensión de las cuerdas y su deformación al aplicar una fuerza externa del sistema será menor.

Esta tensión que aplicamos a un sistema de cables o membrana anticlástica para darle rigidez es la pretensión. *Una membrana o malla anticlástica tiene un comportamiento estructural adecuado solo si esta en un estado tensionado.* [1]

La perdida de la pretensión reduce la rigidez del sistema aumentando su deformación ante cargas externas. Si la perdida de la pretensión supera ciertos limites la membrana comenzara a flamear o deflectara con el riesgo de acumular agua o nieve, en ambos casos comprometiendo la durabilidad de la membrana. Por ello, es de gran importancia conocer y poder predecir el proceso de perdida de ésta, para establecer planes de mantenimiento que permitan mantener los niveles óptimos de la tensión inicial en las estructuras de membranas anticlasticas y evitar que éstas lleguen a niveles críticos de perdida de la pretensión. La pérdida de la pretensión se debe al comportamiento propio del material, pero existen adicionalmente factores externos que influyen la pérdida de pretensión de las membranas, entre algunos de estos factores, esta el factor climático y por lo tanto el clima influyen en la vida tensional de las membranas.

¹ Tracción que se aplica a una membrana para darle rigidez.

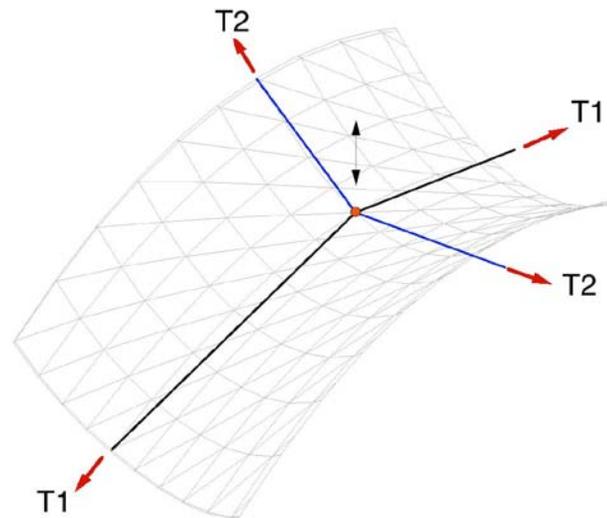


Figura 1 Modelo.

En este trabajo se intentara comprobar esta hipótesis y para ello como primera etapa se desarrolla un banco de ensayos que permite estudiar el efecto de la temperatura superficial , la humedad, y las cargas de viento sobre la perdida de pretensión. el banco de ensayos pueden reproducir de manera controlada e independiente cada una de las diferentes variables de interés para el estudio , permite ensayar esta variables en modelos físicos a escala y con procesos de ciclos acelerados que en un menor tiempo pueden simular el comportamiento de las membranas en su ciclo de vida normal reduciendo el costo del estudio. Por otro lado el resultado de estos estudios permitirán validar un modelo matemático que se desarrolla en paralelo .

Para la realización de los ensayos es necesario que el banco de ensayos este automatizado ya que este debe realizar de forma repetitiva cada uno de los ciclos establecidos y a su vez contar con un sistema de adquisición de datos que permitan llevar un registro de cómo varían las fuerzas de tracción sobre la membrana, mientras es sometida a ciclos de carga y descarga bajo diversas condiciones de temperatura y humedad.

Para el diseño del banco se establecieron las condiciones de trabajo, la geometría de la membrana, las fuerza de pretensión , los rangos de temperatura, humedad, y fuerzas del

viento, de manera de dimensionar la estructura del banco y los sistemas de aplicación y medición de las diferentes variables.

1. Definición de las condiciones de trabajo.

1.1 -Condiciones Climática:

Se seleccionaron las condiciones de trabajo basándonos en las características de las zonas climáticas definidas el grupo de acondicionamiento ambiental de IDEC de la facultad de Arquitectura de la UCV. [2]

Para la determinación de la temperatura superficial se combinaron factores extremos de temperatura, insolación y velocidad de viento que casi nunca se encuentran asociadas en el territorio Venezolano pero que nos permitió establecer el extremo máximo de la temperatura superficial.

En la tabla 1 se establecen las condiciones de trabajo seleccionadas:

Determinación de la temperatura Superficial:

$$T_{sol} - T_{aire} = T_{aire} + (\alpha E_s - h_r (10^\circ C)) \div h_{cr} \quad [4]$$

$$\alpha = 0,2$$

$$h_{cr} = 15 \text{ watts/m}^2 \text{ } ^\circ C$$

$$h_r = 5 \text{ watts/m}^2 \text{ } ^\circ C$$

$$E_s = 1000 \text{ watts/m}^2$$

$$T = 35^\circ C$$

Conductividad térmica

Coefficiente de intercambio radiactivo

Temperatura en condiciones de máxima insolación 45-50°C, poco viento y máx. Temperatura.

RANGOS DE TRABAJO

	Minima	Máximo
Fuerzas	40Kg/m ²	75Kg/m ²
V. Viento		120 Km./h
Temperatura	30°C	50°C
Humedad		80%

TABLA 1

1.2 - Condiciones Geométrico/Estructurales:

Se construyó un modelo virtual para determinar las fuerzas resultantes, la pretensión requerida y la geometría que nos permitirá la construcción del modelo físico.

Se utilizó para ello el programa EASY (de Technet) donde se construyeron mallas para paraboloides de 0,90x0,90 mts y 1,80x1,80 mts con relaciones Flecha/luz 1:5, 1:15. FIG. (2) Y se cargaron con cargas verticales de 40 Kg./M² y de 80 KG/M² tanto en presión como en succión (basados en los rangos determinados previamente en las condiciones climáticas para las áreas a estudiar) FIG.(3)

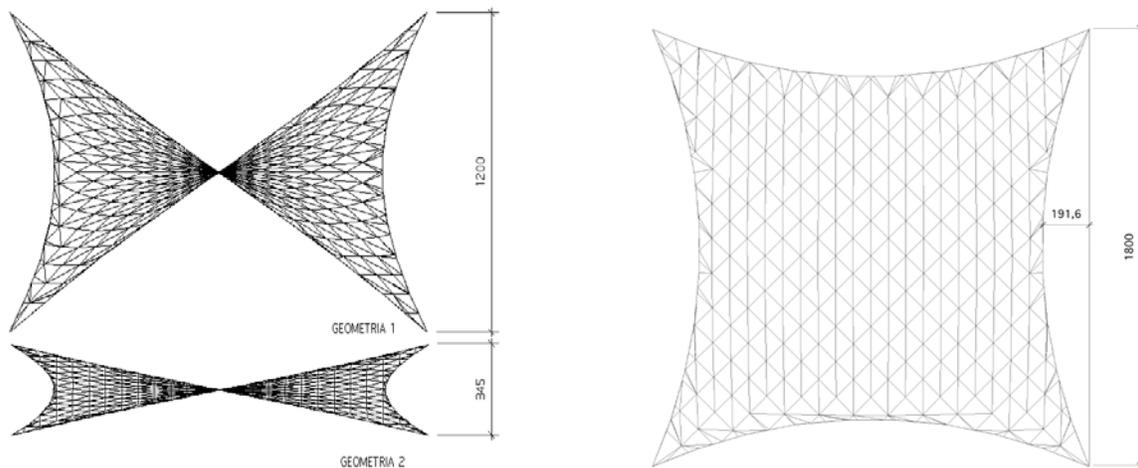


Figura.2 Geometría de los paraboloides de relaciones Flecha/luz 1:5(Geom.1), 1:15 (Geom.2).

Se estableció en el modelo una retícula de 300X300 mm donde se calcularon las cargas verticales y la deformaciones por nodo, lo que nos permitirá la ubicación del lastre en los ensayos donde sea aplican las cargas de vientos. TABLA 2.

El modelo nos permite definir el patronaje para la construcción del modelo físico con la misma geometría del modelo virtual.

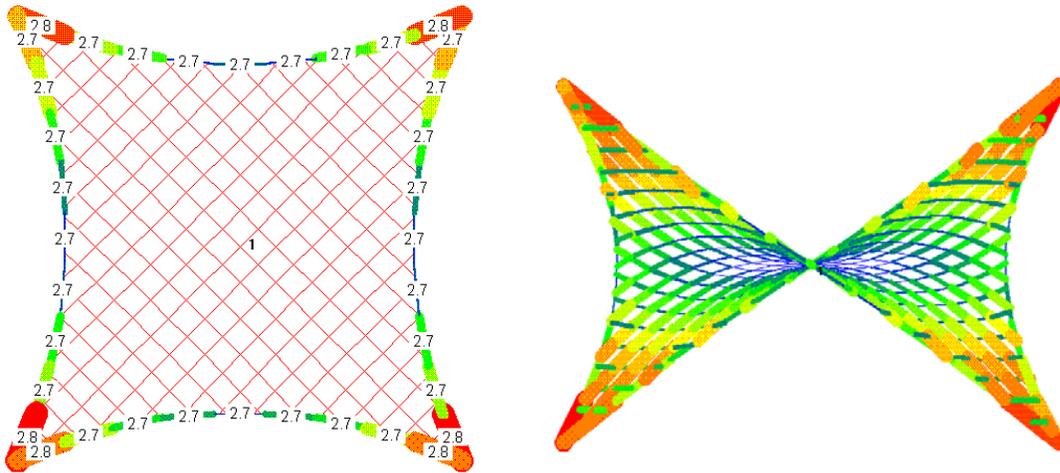


Figura.3 Salida grafica del programa donde se muestran las fuerzas resultantes en las relingas a la izquierda y sobre la superficie de la membrana a la derecha.

GEOMETRIA	CARGA	RESULTANTE EXTREMOS KN	FUERZA EN TELA U/T KN	DEFORMACION MTS
1	PRETENSION	5,3	0,1/0,1	
1	40 KN	6,1	0,1/0,2	0,01
1	80 KN	6,2	0,1/0,2	0,01
2	PRETENSION	4,4	0,1/0,1	
2	40 KN	5,4	0,1/0,2	0,03
2	80 KN	7,1	0,1/0,3	0,03

TABLA 2 Se muestran el resumen de los resultados.

2. Diseño del banco de ensayos y el sistema de adquisición de datos:

Se diseña el banco de trabajo en base de las condiciones anteriormente establecidas, este permite contener una pequeña membrana de aproximadamente 2,8 m² con flechas variables y espacio para alojar los diferentes dispositivos requeridos para simular las diferentes condiciones de ensayo y los equipos de medición.



Figura 4 Marco de soporte.

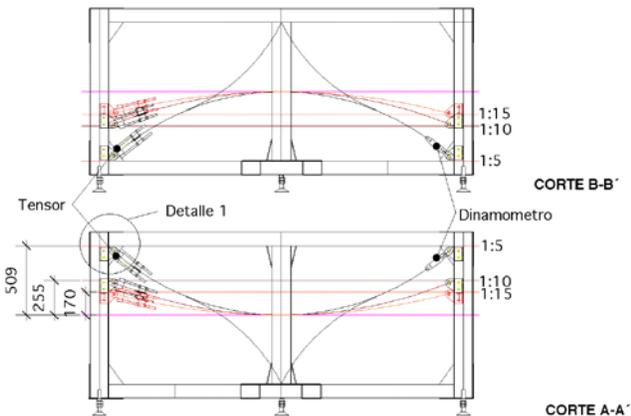


Figura 5 La bases se ajustan para diferentes curvaturas.

2.1 - Estructura de soporte:

La estructura de soporte consiste en un marco poco deformable en forma de prisma de planta cuadrada de 2000X 2000 X1200 mm construido con tubulares estructurales ECO(1) 100X100 mm. Soldados en las aristas. El marco tiene unas patas ajustables que permiten su nivelación. (FIG.4)

Sobre los párales de las aristas verticales se fijan unas bases metálicas que permiten la conexión de la membrana, estas bases se pueden ajustar para producir paraboloides de relaciones Flecha/luz 1:5, 1:10, 1:15.(FIG.5)

A este marco básico se le adiciona una segunda estructura en forma de mesa que contiene los mecanismos para el sistema de aplicación de viento , esta estructura se fija mediante cuatro pasadores al marco básico cuando es requerida.

2.2 -Mecanismo de Introducción de la tensión/y medición

La conexión de la membrana con el marco estructural se realiza a través de un elemento que permite la introducción de la tensión (tensor) FIG. 7 y mediante una celda de carga, los tensores se ubican uno en el extremo del paraboloide que esta mas alto en relación con el plano horizontal de base (punto alto) y el otro en el extremo perpendicular a este que se encuentra en un punto bajo del paraboloide, en los extremos opuestos a los tensores se colocan las celdas de

carga, en ambos casos los terminales permiten dos grados de libertad para asegurar una perfecta alineación, asegurando que solo existan cargas axiales sobre los tensores y celdas de carga. El sistema permite la introducción de cargas de tracción hasta de 2400Kg.

Para medir las cargas de tracción sobre la tenso estructura se utilizan celdas de carga (FIG.6) de Tipo S marca HBM con capacidad para medir hasta 1360,77 Kg. (3000 lb.) con posibilidad de exceder la carga máxima en 120%. Estas celdas utilizan galgas extensiométricos resistivas colocadas en forma de puente de Wheatstone las cuales detectan la deformación sufrida por la celda y la reportan de manera analógica en un equivalente de la fuerza aplicada en una relación de 3mV por Voltio de alimentación con una sensibilidad de 3 mV/V , el rango de temperatura de operación es de -30 a +70 °C. Las celdas se conectan a un circuito de acondicionamiento de señal, compuesto básicamente por un amplificador instrumental, con filtraje pasa bajos ($f_c = 50$ Hz) y una referencia de tensión de alta calidad, y a una entrada analógica de un módulo de adquisición de datos USB-6009 que permite a la computadora recoger los datos de carga.[6]

2.3 - Sistema de aplicación de las cargas de viento:

El principal problema para reproducir la carga aplicada por el viento es la distribución homogénea de esta sobre la superficie de la membrana.

Se estudiaron varios métodos escogiéndose uno que se considero el mas sencillo de aplicar y a la vez el que proporcionaba una distribución mas homogénea de la carga, En el método escogido, la carga de viento se aplica a través de un colchón de aire que se apoya sobre la membrana.



Figura 6 Celda de carga.

Figura 7 Tensor.

Al marco principal del banco se le conecta una estructura tipo mesa dentro de la cual se encuentra un marco metálico al que se le a fijado una superficie rígida (lamina de aglomerado). Este marco esta colgado de la estructura principal por un sistema de plegamiento (FIG. 8) de barras articuladas que limitan el movimiento horizontal del marco, pero a su vez permiten el movimiento vertical, de esta manera se asegura que el marco este horizontal durante todo el recorrido. El desplazamiento del plano se produce con la ayuda de un Actuador lineal, (Dynamat) con capacidad de empuje de 3Kn a una velocidad de 10mm/seg, colocado en el centro del marco y la estructura principal, este motor es el que aplica la fuerza requerida. La fuerza aplicada se mide con una celda de carga colocada entre el actuador lineal y el marco.

Colgado de la superficie del marco móvil se coloca un colchón construido con vinil, (FIG.9) parcialmente lleno de aire el cual al entrar en contacto con la superficie de la membrana asume su forma. A medida que la distancia entre el marco y la membrana disminuye, la presión dentro del colchón aumenta, transmitiendo la fuerza que el motor aplica sobre el colchón, mediante el movimiento del plano rígido, a la membrana como presión. La presión es normal a la superficie e igual por unidad de área lo que asegura la aplicación de la fuerza de forma homogénea y de igual manera que como se aplica en el modelo computacional. [8]



Figura 8 Mecanismo para mantener la horizontalidad del marco



Figura 9 Colchón.

2.4 - Sistema de aplicación de Temperatura :

Como lo que se quiere reproducir es la temperatura superficial producida por la cantidad de insolación y no la temperatura ambiente, se desecharon sistemas de calentamiento por convección en los que se calienta aire alrededor de la membrana y se decidió irse por un sistema de calentamiento por radiación que permiten calentar la superficie de la membrana sin calentar el ambiente. El sistema escogido consta de dieciséis (16) lámparas infrarrojas industriales de 250 watts (FIG.10) teniendo una potencia máxima total de 4000 Watts. Las lámparas se colocan bajo la tenso estructura para cubrir un área de 2,4 m². Con la radiación infrarroja el calor irradiado se puede direccionar con mucha precisión evitando que se pierda energía haciendo este método muy eficiente. Debido a la geometría tridimensional de la superficie de la membrana se utilizó una base ajustable para mantener la distancia y la perpendicularidad entre la lámpara y la membrana. La regulación de las lámparas nos permite llevar la temperatura superficial a 60 °C .[6]

Se diseñó un sistema de control que permite un calentamiento homogéneo de la superficie, las lámparas se dividen en cuatro circuitos independientes, cada uno controlado por un sensor (sensores digitales duales temperatura/ humedad) colocado bajo la membrana dentro de bolsillos para evitar la exposición directa de las lámparas, y en el centro del área de acción del circuito correspondiente, produciendo cuatro lazos de control independientes FIG 11. El sistema permite controlar la cantidad de potencia que se le entrega a la lámpara logrando que irradie la cantidad necesaria de energía en todo momento para así mantener estable la temperatura en la

superficie, el sistema de control puede compensar el efecto de la diferencia de distancia Lámpara/membrana e incluso permite compensar el efecto de enfriamiento por corrientes de aire. Aunque el sistema estará cerrado durante los ensayos, durante los ajustes del sistema de control todas las caras del banco estaban abiertas para facilitar el acceso, las lámparas enfrentadas a la corriente de aire se encendían con mayor frecuencia que las alejadas, para compensar el enfriamiento, pudiendo de esta manera asegurar una temperatura homogénea en toda la superficie.



Figura 10 Lámparas infrarrojas.

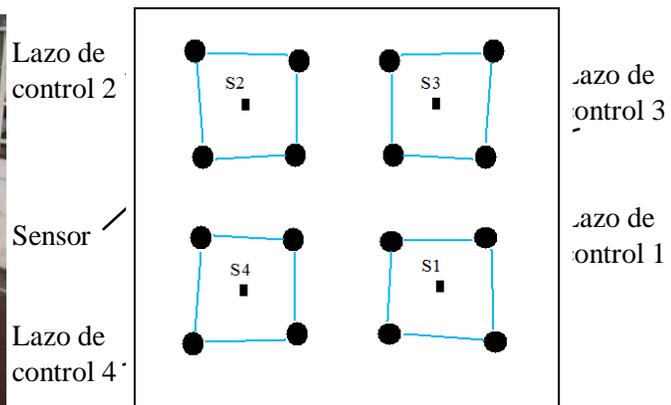


Figura 11 Diagrama de ubicación de los sensores.

El periodo de calentamiento de la membrana a 50 es de 3 min. para acelerar el enfriamiento se utiliza un extractor. Extracción de aire 11,4 M3/min. inyección de aire 8,6 M3/min. (potencia 40 Vatios) lo que permite renovar el volumen total (2.6 M3) en 54 seg. El extractor se accion mediante triac controlados desde la computadora.

La temperatura ambiente se registra con un sensor digital conectado al sistema de control y permite llevar un registro de la temperatura ambiente independiente de la temperatura de la membrana.

2.5 - Sistema de aplicación de Humedad:

La humedad se varia introduciendo agua en forma de neblina con un aspersor dentro del mismo sistema aislado que se utiliza para los ensayos de temperatura. Para ello se utiliza un motor lineal o *plumger* que acciona (abriendo o cerrando) un aspersor tipo pico de manguera

multifunción. (FIG.12) la humedad se mide dentro del cajón mediante los sensores integrados duales que envían la información de forma digital a la computadora la cual ajusta el tiempo de aspersión y temperatura necesario para llegar al nivel de humedad (80%), para cerrar el ciclo los extractores y las lámparas (FIG.13) se accionan para sacar el aire húmedo y llevar la humedad al nivel de la ambiente.

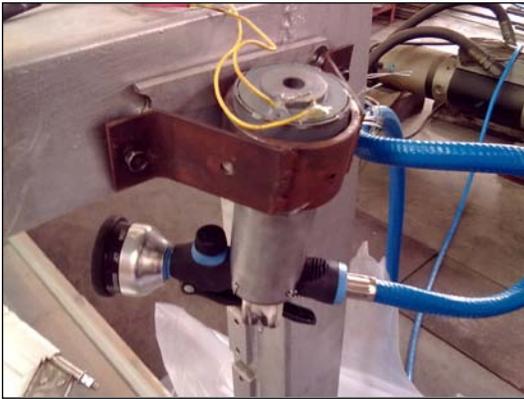


Figura 12 Aspersor con Plumger



Figura 13 Extractor.

2.6 - Sistema de control Automático:

“El banco de ensayos debe funcionar por largos periodos con poca supervisión humana, en caso de que el proceso se detenga bruscamente, el sistema de supervisión debe almacenar los datos de interés del proceso de forma automática y se debe garantizar que el sistema no se salga de control en caso de fallas eléctricas o de pérdida de comunicación.” [6]

El control del banco se realiza con un computador equipado con una tarjeta de adquisición de datos de Nacional Instruments modelo USB 6009. FIG.14

El sistema de control se complementa con tres micro controladores PIC18 los cuales reciben la data de los sensores (sensores digitales duales) , las ordenes del computador, y accionan los diferentes dispositivos, lo que se hace a través de triac que energizan las lámparas, extractores, etc.

Se cuenta con dos módulos de potencia, el modulo de alta potencia que se encarga del manejo del sistema de calentamiento figura 15 y el modulo de potencia empleado para el manejo de dispositivos del proceso como actuadores o difusores.

El sistema permite adquirir data de temperatura, humedad y de tensión.

En la figura 16 se muestra un diagrama de bloques de cómo se interconectan las diferentes secciones que componen a los módulos.



Figura 14 Procesador principal

Figura 15 Modulo de alta potencia

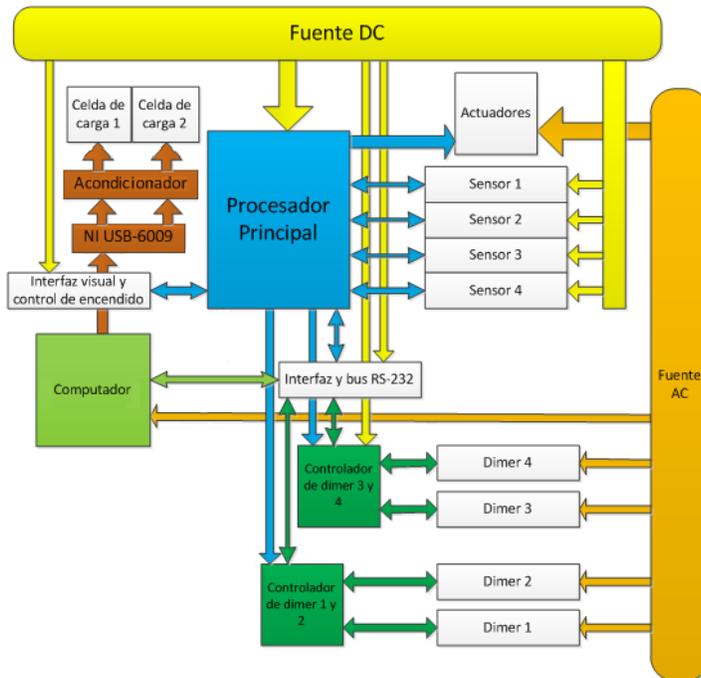


Figura 16 Estructura del hardware.

3. Ensayos

3.1 – Probetas

La membrana es confeccionada según el patronaje obtenido del modelo informático (programa EASY) Su geometría es de un paraboloides hiperbólico simétrico de 1800mm de lado. (para el primer grupo de ensayos con una relación luz/flecha de 1:5, geometría 1).

Los cortes de los patrones se realizan de manera que cuando se ensamblan la trama y la urdimbre en los cuatro patrones estén ubicadas de la misma manera para asegurar una homogeneidad en el comportamiento y para que todas las probetas sean comparables.

La membrana esta reforzada en las aristas por una guaya (relinga) de $\varnothing 6$ mm 6x19 iwrc, con terminales inoxidables roscados en los extremos y colocada dentro de un bolsillo. En los vértices la membrana remata en puños idénticos que aprisionan el extremo de la membrana y reciben las guayas de las relingas. a la membrana se le hace un bolsillo con una barra plástica para evitar que resbale. Los puños al igual que las guayas de las relingas son removibles y se usan en todas las membranas a ensayar. El puño esta construido de dos piezas construidas en lamina de acero inoxidable de 1 mm doblada en los bordes a una de las piezas se le sueldan los tubos que permiten el paso de la guaya. (FIG. 17)

3.2 - Ensayos del equipo

Se realizaron pruebas con los sistemas para verificar que se comportaba de acuerdo a las especificaciones del diseño y a las simulaciones virtuales que se realizaron durante el diseño de los circuitos de control y que tenían la robustez necesaria para soportar largos periodos de funcionamiento.

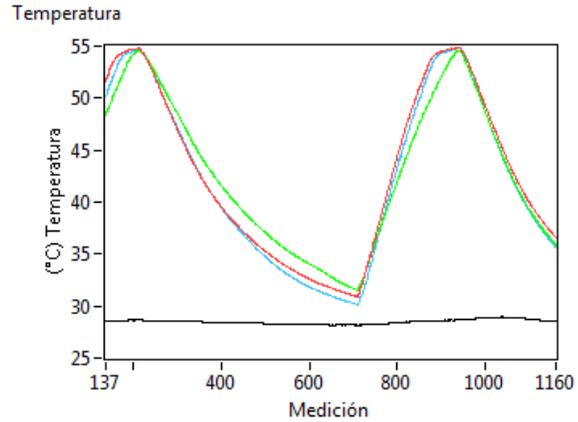


Figura 17 Probeta.

Grafico 1 Comportamiento de la temperatura

Para el sistema de temperatura se programaron rutinas de ensayo para realizar varios ciclos tomando la temperatura ambiente como mínima y llevando la membrana a 55 °C , en el grafico 1 se muestra el comportamiento del sistema. La línea negra muestra la temperatura ambiente, mientras que las líneas de colores representan la temperatura sobre la membrana medida por cada uno de los sensores, se observa un comportamiento bastante parecido en las diferentes sensores, las diferencias están en la pendiente para alcanzar los valores máximos y mínimos y esto es debido a las diferencias geométricas en las diferentes ubicaciones de los sensores en cuanto a la distancia lámparas/membrana o la ubicación del extractor, variaciones que el sistema de control compensa para llega a las temperaturas establecidas como máxima y mínima de la forma mas rápida posible .

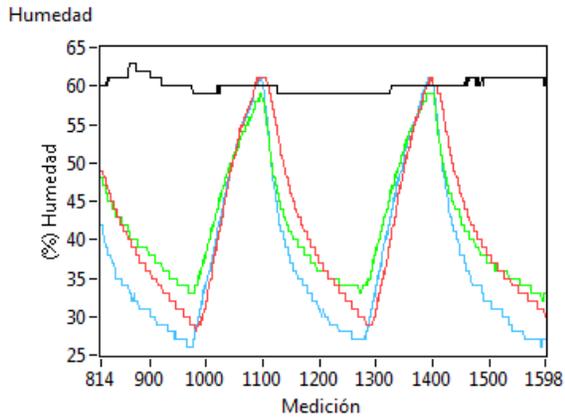


Gráfico 2 Comportamiento de la humedad

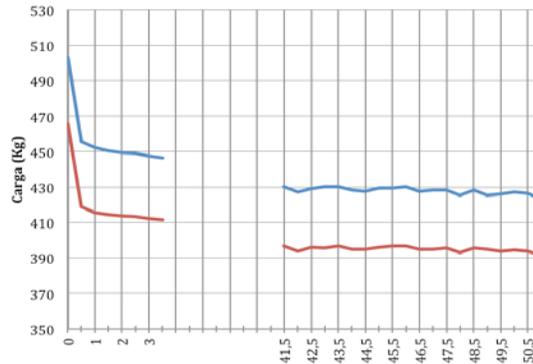


Gráfico 3 Pérdida de pretensión del Patrón.

Para el caso de la humedad se realizaron ensayos para realizar ciclos de 30% a 55% de humedad el comportamiento del sistema se muestra en el gráfico 2, donde la línea negra representa la humedad dentro del banco de ensayos y las líneas de colores la humedad sobre la membrana registrada por los diferentes sensores. La variación se debe a la diferencia de ubicación de los sensores en relación al aspersor y al extractor afectando principalmente las mediciones iniciales, el sistema lleva de forma satisfactoria la humedad al valor máximo establecido, regulando el promedio de humedad dentro del banco.

Desde el punto de vista de la medición de las cargas, estas se comportaron de la forma esperada, aumentando al bajar la temperatura (contracción del material) y disminuyendo al calentarse la membrana (dilatación del material), y de forma contraria cuando la humedad disminuye la carga disminuye y viceversa.

3.3 - Patrón

Se coloca una membrana nueva en el banco de ensayos, se lleva hasta una pretensión de 440 Kg. se deja caer la pretensión por 15 min. y se vuelve a pretensar a la carga anterior. La membrana se deja en el banco durante 36 días sin más manipulación, se midió la tensión en las celdas de carga, la temperatura ambiente y la humedad. Con este patrón se establecerá el proceso de pérdida de pretensión debido a las características propias del material, en el gráfico

3 se observa caída rápida de la pretensión, la pretensión sube al producirse una segunda aplicación de tensión y luego comienza a descender hasta estabilizarse a las 80 horas esta caída rápida se produce por el reacomodo de las fibras dentro de la membrana (creep), la pérdida de pretensión continuara muy lentamente, solo afectada por los cambios de temperatura ambiente entre el día y la noche del laboratorio de estructura.

CONCLUSIONES

- El banco de ensayos permite ensayar Paraboloides Hiperbólicos de 2,8M² de área con relaciones de Flecha/luz 1:5, 1:10, 1:15, permite aplicarles y medir tensiones hasta de 1360,77 Kg. con una precisión de +-1 Kg.
- Permite calentar por radiación la membrana de forma homogénea de 20 °C a 60 °C y regresar a temperatura ambiente en ciclos de 30 minutos; para la temperatura máxima de trabajo el ciclo se puede realizar en 25 minutos o 57 ciclos por día.
- La humedad de banco se puede mantener en un rango de 20% a 80% y es posible realizar ciclos completos en 12,5 minutos.
- El banco permite llevar la membrana a las condiciones y dentro de los rangos establecidos en las condiciones de trabajo.
- La membrana ensayada establece el patrón de la pérdida de pretensión debida al reacomodo de las fibras en el material, cuya pendiente nos permitirá extrapolar esta pérdida en un tiempo mayor y nos servirá para comparar la pérdida cuando se apliquen otras condiciones.
- En el momento de escribir este trabajo no se a concluido el sistema de control del mecanismo de simulación de la fuerza del viento. Y se están realizando los ensayos de temperatura y humedad.

REFERENCIAS:

[1] Pauletti R. M.O.(2008). "Static Analysis of Taut Structures" In: Eugenio Oñate ; Bernard Kröplin.(Orgs.). Textile Composites and Inflatable Structures II. 1 ed. Dordrecht:

Springer-Verlag, 1, p. 117-139.

[2] Hobaica M. H. (, 1984) "Caracterisation des zones climatiques au Venezuela pour la conception thermique des batiments", Tesis, Centre Scientifique et Technique du Batiment.

[3] Hernández C.H. (1997) "Evolución de los estados tensionales en Cubiertas Textiles" Ejercicio de evaluación, Facultad de Arquitectura, Universidad Central de Venezuela.

[4] Rosales L. "Guía de Estudios, Tema 2 Clima", Departamento de Acondicionamiento Ambiental, Escuela de Arquitectura, UCV.

[5] D'Anniballe L. M., Romero J.(2010) "Automatización de un Banco de Ensayos para Tenso estructuras" Modelos Computacionales en Ingeniería: Desarrollos Novedosos y Aplicaciones R. Chacon, F. León, Duarte, O. Verastegui (editores) 2010 SVMNI, Pág. EC78-EC84.

[6] D'Anniballe L. M. (2010). " Automatización de un Banco de ensayos de Tenso estructuras para realizar Pruebas de temperatura y Humedad" Trabajo Especial de grado para optar al Título de Ingeniero Electricista, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

[7] ASTM G141-96. (2004). "Addressing Variability in Exposure testing on Nonmetallic Materials" Annual book of ASTM Standards, Vol. 14.04.

[8] Luetich J.J. "Unidades de presión" www.luenticus.org/articulos/. Bajado Agosto 2010.

REFERENCIA DE LAS FIGURAS:

Figura 1 Modelo. Autor

Figura 2 Geometría de los paraboloides de relaciones Flecha/luz 1:5(Geom.1), 1:15
(Geom.2). [3]

Figura 3 Salida grafica del programa donde se muestran las fuerzas resultantes en las
relingas a la izquierda y sobre la superficie de la membrana a la derecha. [3]

Figura 4 Marco de soporte. [6]

Figura 5 La bases se ajustan para diferentes curvaturas. [3]

Figura 6 Celda de carga. Autor

Figura 7 Tensor. Autor

Figura 8 Mecanismo para mantener la horizontalidad del marco. Autor

Figura 9 Colchón. Autor

Figura 10 Lamparas infrarrojas. Autor

Figura 11 Diagrama de ubicación de los sensores. [6]

Figura 12 Aspensor con Plumger. [6]

Figura 13 Extractor. Autor

Figura 14 Procesador principal. Autor

Figura 15 Modulo de alta potencia. [6]

Figura 16 Estructura del hardware. [6]

Figura 17 Probeta. Autor

Tabla 1 [3]

Tabla 2 Se muestran el resumen de los resultados. [3]

Grafico 1 Comportamiento de la temperatura . [6]

Grafico 2 Comportamiento de la humedad. [6]

Grafico 3 Perdida de pretensión del Patrón. Autor