

Manual práctico para mástiles de acero en estructuras tensadas por membranas de fibra de poliéster

Mayela Valentina Pérez Ortigoza y Jesús Medina

Especialización de Obras Civiles. Mención Edificaciones. Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería. Maracaibo, Venezuela.

Correo electrónico: mayelaperez32@hotmail.com y jmedinaf@gmail.com

Recibido: 16-02-2020

Aceptado: 20-04-2020

Resumen

La investigación tuvo como propósito realizar un manual práctico para mástiles de acero en estructuras tensadas por membranas de fibra de poliéster, aplicando los principios recomendados por Hamon y Pérez [1], Carranza y Taco[2], Ballaben [3], entre otros. El tipo de investigación fue descriptiva, con un diseño no experimental transeccional. La técnica para recolectar los datos fue la observación directa de documentos bibliográficos y normativos principalmente. Se tomó como unidad de análisis, los perfiles tubulares de acero los cuales se analizaron de acuerdo a las condiciones que inciden en el proceso de selección del perfil óptimo, así como las necesidades de los usuarios que ayudaron a determinar los parámetros de selección de dichos perfiles de acuerdo con el diseño de las tenso-membranas para el aprovechamiento efectivo del trabajo del sistema estructural en conjunto. Posteriormente se analizaron y se discutieron los resultados obtenidos, presentando una propuesta de las consideraciones técnicas para dar conclusiones y recomendaciones de la misma.

Palabras clave: Mástiles de acero, estructuras tensadas, membranas de fibra de poliéster.

Practical handbook for steel mast in structures tensioned by polyester fiber membranes

Abstract

The purpose of the research was to make a practical handbook for steel masts in structures tensioned by polyester fiber membranes, applying the principles recommended by the authors: Hamon et al., Carranza et al., and Ballaben. The type of research was descriptive, with a non-experimental, transeccional design. The technique to collect the data used was the search for documentary information, based on bibliographic texts, various types of documents, national and foreign magazines, brochures, internet, etc. The base element or unit of analysis was taken as the tubular steel profiles, of which the conditions that affect the selection process of the optimal profile were analyzed, as well as the needs of the users who helped determine the selection parameters of said profiles in accordance with the design of the tensile-membranes for the effective use of the work of the structural system as a whole. Subsequently, the results obtained were analyzed and discussed, presenting a proposal of the technical considerations to give conclusions and recommendations.

Key words: Steel masts, tensioned structures, polyester fiber membranes.

Introducción

Las membranas textiles han entrado a Venezuela con relativo retraso, a pesar de que la ubicación del país dentro de la franja ecuatorial; le da un clima moderado, permite la utilización de espacios abiertos todo el año, a lo que se le suma la presencia de vientos máximos en la costa de 7 m/s, condiciones ideales para el uso de cubiertas textiles.

A partir de la edificación de este tipo de cubiertas, fueron evolucionando los sistemas constructivos a partir de los nuevos conocimientos adquiridos por los profesionales en las áreas de la ingeniería civil y la arquitectura nacional e internacionalmente, aportando nuevas tecnologías para el desarrollo del país de forma exponencial. Actualmente la demanda de estructuras tensionadas tiene un creciente aumento, ya que son relativamente nuevos para el mundo de la ingeniería, además existe un reducido conocimiento científico acerca de las mismas.

Las estructuras flexibles, tales como: las mallas de cables, los ten Sigrud y las membranas (estructuras de tensión) son conocidas por la simplicidad de sus elementos, así como por su fácil ensamblaje, mínimo consumo de materiales, mínimo desperdicio y eficiencia energética. Estos aspectos les permiten sobrepasar a cualquier otro sistema estructural en términos de ligereza y capacidad para cubrir grandes luces.

Uno de los problemas que este crecimiento tecnológico ha generado es que no todas las empresas que construyen estructuras textiles tienen la preparación técnica adecuada ni el método apropiado para edificar este tipo de cubiertas; es por esto que comienza a ser necesario establecer normas, procedimientos y metodologías que permitan regular el diseño de este tipo de estructura y asegurar la calidad de las obras.

Teniendo en cuenta una guía por medio de la cual se disponga de consideraciones de acuerdo con la geometría en planta de mástiles de acero como sistema de soporte indirecto en tenso-membranas con el fin de seleccionar la alternativa más efectiva para el aprovechamiento de un mejor tensado en la constitución de las mismas, de acuerdo con las normativas del país; considerando este método de fácil acceso y construcción, generando en este sentido, un aporte visualmente futurista y atractivo hacia la tecnología de la construcción tendiendo a ser un tipo de sistema constructivo que aporte soluciones hacia el desarrollo sostenible y económico a nivel global.

Por lo anteriormente expuesto, se plantea la siguiente pregunta: ¿Cuáles son las consideraciones que se deben analizar para la selección de mástiles de acero en estructuras tensadas por membranas de fibra de poliéster, según su geometría en Planta? Esta interrogante nos direccionó hacia el siguiente objetivo general: Proponer un manual práctico para la selección de mástiles de acero en estructuras tensadas por membranas de fibra de poliéster, según su geometría en Planta. Para lograr este objetivo, primero se debe describir los sistemas de soporte indirecto de acero como elemento estructural constructivo. Segundo, se hace importante, analizar las consideraciones requeridas para la selección de mástiles de acero en estructuras tensadas por membranas de fibra de poliéster. Y, finalmente lo anterior permitirá diseñar un manual práctico para la selección de mástiles de acero en estructuras tensadas por membranas de fibra de poliéster, según su geometría en planta.

Metodología

En este tipo de investigación establecida como descriptiva se clasifica como un estudio de medición de variables independientes, ya que las variables a estudiar en la misma no se correlacionan entre sí, así mismo, estas serán: estudiadas, medidas y evaluadas de manera independiente. La presente investigación tiene un diseño no experimental ya que, no se manipula la variable objeto de estudio por parte de los investigadores. El estudio se realizó en un solo momento, sin llevar a cabo pruebas ni chequeos periódicos, relacionando así la variable, con los fenómenos que inciden en la selección de los mástiles de acero; delimitado por un período de tiempo específico, por lo tanto, para la presente investigación se estableció un diseño transeccional. En este orden de ideas, el presente estudio fue una investigación documental, puesto que se describió los elementos que inciden en la selección de los mástiles de acero cuyo valor es pertinente analizar desde los documentos existentes en la materia.

Sus unidades de análisis estuvieron conformadas por mástiles de acero en estructuras tensadas, siendo ellos el elemento central de estudio, ya que de ellos depende la selección adecuada de los mismos.

Durante esta investigación se utilizó el tipo de observación indirecta, debido a que se obtuvo información a través de fuentes secundarias, es decir, sin alterar los eventos estudiados, tales como el proceso de diseño del sistema estructural; así mismo se aplicó la técnica de la observación documental para sustentar análisis de las consideraciones técnicas para la adecuada selección de los mástiles de acero del sistema estructural.

Resultados

De acuerdo a los análisis realizados en la siguiente propuesta se evidencian los resultados obtenidos y son reflejados mediante la estructura de un Manual práctico para la selección de mástiles de acero en estructuras tensadas por membranas de fibra de poliéster, según su geometría en planta:

1. Preámbulo del Manual.

Misión

La misión del manual práctico para la selección de mástiles de acero, está centrada en ofrecer consideraciones técnicas que satisfagan las necesidades de ingenieros, arquitectos y diseñadores estructurales, apoyados en el mejoramiento continuo, la participación y compromiso de todos los profesionales inmersos en el diseño y cálculo de sistemas estructurales de soporte indirecto, guiadas en estos lineamientos y para el aprovechamiento máximo de su tensado de acuerdo con su geometría en planta.

Visión

Garantizar la contribución hacia la vida útil de las estructuras, con el fin de contribuir con el proceso de selección de los mástiles, el cual se espera que surja de provecho para las entidades encargadas de realizar y diseñar este tipo de estructuras garantizándose así la calidad de las mismas.

Objetivos generales

Aportar soluciones técnicas a los factores involucrados en el proceso de selección de mástiles de acero estructural

Recomendar perfiles tubulares adecuados según las consideraciones técnicas del sistema estructural y las condiciones del entorno.

Brindar una guía práctica para el usuario y/o profesional interesado en la selección de mástiles de acero para dar solución al diseño del sistema estructural de soporte indirecto, según lo requiera su proyecto

Contribuir al aprovechamiento del mejor tensado de las tenso-membranas según su geometría en planta de cualquier proyecto civil que involucre un sistema estructural de soporte indirecto.

Alcance

Por extensión, esta guía no contiene instrucciones detalladas del proceso de diseño del sistema estructural de soporte indirecto de las tenso-membranas, ya que es un proceso que depende del tipo de soporte, dimensiones y un conjunto de características definidas por el diseñador lo que implica una infinidad de características y combinaciones a nivel de diseño; y por ello se inclina más al proceso de selección del perfil óptimo de acuerdo con la capacidad de esfuerzo a soportar por dicho sistema. Cabe destacar que

la descomposición de fuerzas para llevar a cabo el proceso de cálculo de este tipo de sistema, también dependerá de los factores anteriormente mencionados, es por esto que se omiten en el presente manual.

2. Introducción.

Debido a la constante evolución y avance de la tecnología en el mundo, surgen nuevas soluciones a problemas de índole ingenieril para garantizar la optimización de los procesos de diseño y cálculo estructural de los diversos sistemas inherentes a dicha disciplina. En el caso de las tenso-membranas, se han convertido en una de las soluciones arquitectónicas de vanguardia empleadas por excelencia, para proveer el cerramiento horizontal de espacios con grandes luces, aplicadas como cubiertas.

En este sentido, se ha demostrado que una de las dificultades que el crecimiento tecnológico ha generado, es que no todas las empresas que construyen estructuras textiles tienen la preparación, ni el método apropiado para edificar este tipo de cubiertas; es por esto que se requiere establecer normas, procedimientos y metodologías que permitan regular el diseño de este tipo de estructura y asegurar la calidad en la aplicación del sistema de soporte indirecto en la construcción.

En el presente manual se establecen las consideraciones para la exitosa selección de los perfiles indicados para llevar a cabo posteriormente el proceso de diseño, cálculo y ejecución de este tipo de proyectos.

3. Fases del Manual.

Fase 1. Consideraciones generales

Resulta de gran importancia consideración de la posición de la tenso-membrana respecto a la incidencia de la dirección del flujo de viento, siendo éste una de las cargas principales que afecta directamente en la selección de los perfiles, ya que se requiere de su inclusión estricta en el proceso de descomposición de fuerzas en el cálculo estructural, tomando en cuenta de igual manera: los efectos de empuje y succión de viento según sea el caso. Dentro de las consideraciones, es preciso tomar en cuenta el peso propio del sistema, aunque una de las ventajas que ofrece el mismo, es la ligereza y peso propio inferior a 1 kp/m²; sin embargo, es de importancia ya que es una carga a considerar en el cálculo estructural.

La altura de cada perfil también es relevante en el proceso de selección de los mismos, sin embargo, los fabricantes proveen perfiles con una altura máxima de 12 metros para evitar el pandeo lateral torsional elástico. Con la correcta selección de perfiles, su estudio, cálculo y proceso de diseño estructural, este sistema puede poseer la capacidad de cubrir superficies superiores a los 100.000 m² para cualquier tipo de función.

Fase 2. Selección de ángulo de inclinación

Para llevar a cabo el proceso de selección del perfil tubular óptimo se requiere la definición detallada del diseño de la tenso-membrana, algunos aspectos arquitectónicos a considerar, son los que definirán el tipo de perfil a seleccionar. Como primer aspecto a considerar para la selección del perfil tubular óptimo es la selección del ángulo de inclinación del mismo.

Las tenso-membranas si bien es cierto, son nuevos sistemas y estrategias de diseño estructural que permiten guiar la nueva libertad formal, lo que conlleva a la utilización clara y simbólica de un icono visual de gran relevancia. Si bien es cierto, el diseño estructural de vanguardia permite la libertad formal, estructuralmente, a continuación, en la Tabla 1, se recomiendan ángulos de inclinación para perfiles tubulares de acero entre el rango de $30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, para garantizar la capacidad estática de los perfiles tubulares circulares.

Tabla 1. Ángulos de inclinación recomendados para la selección del perfil óptimo.

Θ
30°
40°
50°
60°
70°
80°
90°

En el caso que el ángulo de inclinación establecido en el diseño del proyecto, no se presente reflejado en la tabla anterior, se debe realizar su respectiva interpolación. Los ángulos de inclinación presentados, se destacan entre el rango satisfactorio para garantizar la condición de capacidad eficiente de los perfiles tubulares a seleccionar por el usuario.

Fase 3. Perfiles óptimos

Para la selección del perfil óptimo se debe considerar el tipo de sección que se requiere según el diseño arquitectónico establecido, en este manual se presentan perfiles tubulares de sección cuadrada y circular como solución y respuesta a los ángulos previamente definidos los cuales cumplen con las capacidades eficientes para cada perfil. A continuación, en la Tabla 2 se presentan los perfiles que fueron seleccionados según los catálogos de los fabricantes: Hierrobeco [4] y Unicon [5] quienes se dedican a la fabricación de perfiles de acero a nivel nacional cumpliendo con las normativas del país.

Tabla 2. Perfiles de sección circular óptimos según ángulos de inclinación.

Θ	PERFILES ÓPTIMOS				
	DIAMETRO (Pulgadas)	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Área (cm ²)	Peso (kgf/m)
30°	10 ¾	273.1	9.00	74.7	58.61
40°	9 5/8	244.5	7.00	52.2	41.00
50°	8 5/8	219.2	5.50	36.9	28.97
60°	7 5/8	193.7	4.50	26.7	20.99
70°	6	152.4	4.00	18.6	14.64
80°	5 ½	139.7	3.40	14.6	11.43
90°	5	127.0	3.00	11.7	9.17

Se presentaron los perfiles circulares óptimos para cada ángulo de inclinación, presentando sus diámetros en unidades de medida de; pulgadas y milímetros, así como también se presentó el espesor, área y peso de cada perfil respectivamente. A continuación, se presentan los perfiles óptimos a seleccionar de sección cuadrada:

Tabla 3. Perfiles de sección cuadrada óptimos según ángulos de inclinación

Θ	PERFILES ÓPTIMOS				
	H x B (mm)	Espesor (mm)	Radio en esquinas (mm)	Área (cm ²)	Peso (kgf/m)
30°	220 x 220	9.00	13.50	73.18	57.45
40°	200 x 200	7.00	10.50	52.36	41.10
50°	175 x 175	5.50	8.25	36.25	28.46
60°	155 x 155	4.50	6.75	26.39	20.72
70°	120 x 120	4.00	6.00	18.01	14.10
80°	110 x 110	3.04	5.10	14.10	11.07
90°	100 x 100	3.00	4.50	11.32	8.89

Se presentaron los perfiles de sección cuadrada óptimos para cada ángulo de inclinación, presentando sus dimensiones base (B) x altura (H) en unidades de medida de; milímetros, así como también se presentó el espesor, radio de esquina, área y peso de cada perfil respectivamente.

Los perfiles seleccionados (en ambas secciones), corresponden a los ángulos establecidos según la capacidad a tracción que debe soportar por cada inclinación, entre menor es el ángulo, mayor será el perfil para garantizar la resistencia de diseño, ya que en estas condiciones la membrana tiende a soportar una tensión mayor.

Fase 4. Capacidad de esfuerzos a tracción

La resistencia de diseño de los elementos a tracción $\phi \times P_n$, será el mayor valor entre el estado límite de cedencia sobre el área total y el estado límite de rotura, sobre el área efectiva. Se tienen las siguientes ecuaciones, donde la tracción de cedencia sobre área total se considera por la expresión $P_n = F_y \times A \rightarrow \phi = 0.90$ y la tracción de rotura sobre es el área neta efectiva. $P_n = F_u \times A_e \rightarrow \phi = 0.75$. Es por esto que, de estos factores depende la capacidad de soporte a tracción de cada sección planteada. Los valores de las capacidades fueron obtenidos manual de diseño de estructuras de acero con perfiles tubulares de acero, producido por la industria UNICON[5]

A continuación, en las Tablas 4 y 5, se presentan, los ángulos de inclinación para los perfiles de acero y las dimensiones de las secciones obtenidas, así mismo, la tracción de rotura y de cedencia se denota con el símbolo ϕ .

Tabla 4. Capacidad de miembros a tracción para perfiles de sección circular

Θ	TRACCIÓN DE CEDENCIA	TRACCIÓN DE ROTURA				
	$\phi = 0,90$	$\phi = 0,75$				
	ϕP_n (ton)	ϕP_n (ton) $A_e = 0.95A$	ϕP_n (ton) $A_e = 0.90A$	ϕP_n (ton) $A_e = 0.85^a$	ϕP_n (ton) $A_e = 0.80A$	ϕP_n (ton) $A_e = 0.80^a$
30°	220,21	216.25	204.87	193.48	182.10	170.72
40°	153.96	151.20	143.25	135.29	127.33	119.37
50°	108.78	106.82	101.20	95.58	89.95	84.33
60°	78.82	77.40	73.33	69.26	65.18	61.11
70°	54.97	53.96	51.14	48.30	45.46	42.61
80°	42.91	42.13	39.92	37.70	35.48	33.26
90°	34.44	33.82	32.04	30.26	28.48	26.70

Tabla 5. Capacidad de miembros a tracción para perfiles de sección circular

Θ	TRACCIÓN DE CEDENCIA	TRACCIÓN DE ROTURA				
	$\phi = 0,90$	$\phi = 0,75$				
	ϕP_n (ton)	ϕP_n (ton) $A_e = 0.95^a$	ϕP_n (ton) $A_e = 0.90A$	ϕP_n (ton) $A_e = 0.85A$	ϕP_n (ton) $A_e = 0.80A$	ϕP_n (ton) $A_e = 0.80A$
30°	216.54	212.63	201.44	190.25	179.06	167.87
40°	154.79	152.00	144.00	136.00	128.00	120.00
50°	107.12	105.19	99.65	94.11	88.58	83.04
60°	77.96	76.56	72.53	68.50	64.47	60.44
70°	53.23	52.27	49.52	46.77	44.02	41.27
80°	41.66	40.91	38.76	36.60	34.45	32.30
90°	33.47	32.87	31.14	29.41	27.68	25.95

Estos valores presentados, le proporcionará al usuario del manual para la selección de perfiles óptimos para las tenso membranas, factores aproximados de capacidad de soporte en unidades de peso según las dimensiones de la sección y el ángulo de inclinación del perfil. Se debe considerar que previa la consideración de los valores de capacidades de carga se debe realizar la respectiva descomposición fuerzas en la estructura para efectuar el cálculo estructural de la tenso-membrana. Existen infinitas combinaciones y posiciones en las cuales se pueden colocar los perfiles, es por ello que se debe considerar en todo momento la geometría en planta del diseño y tener definido correctamente el ángulo de inclinación de los perfiles tubulares a aplicar en el diseño.

Conclusiones

El sistema de soporte indirecto se compone por los siguientes elementos: membrana textil de fibra de poliéster (puede alcanzar una resistencia de 600 kn/m), cables espirales o de cordones, tensores abiertos y/o cerrados, terminales (trenzados, con abrazaderas, con casquillos, fundidos, prensados y/o de cono interior) completando así su soporte a nivel de fundación mediante anclajes (activos y/o pasivos); así mismo cuenta con mástiles de acero (empotrados o articulados de sección circular o cuadrada), siendo este, el elemento que proporciona el soporte estructural, posee cabezales de mástiles que definen la red conductora con los cables (de 50 mm² de sección o varilla de 8-10 mm de diámetro); además de ellos, según se requiera en el diseño, se pueden emplear guardacabos como elemento accesorio. El diseño de la tenso-membrana y su geometría en planta son los principales factores que determinan la variabilidad de los elementos del sistema.

Se partió del hecho de asumir que las tenso-membranas tienen la particularidad de resistir esfuerzos a tracción, es por ello que se establecieron los esfuerzos a tracción que soporta cada perfil según lo establecido en los catálogos suministrados por los fabricantes y según sus ángulos de inclinación que se requiera en el diseño. Para la selección de los perfiles óptimo se debe considerar (como principal factor), los ángulos de inclinación de los mismos; con un rango entre $30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ según el diseño arquitectónico, para garantizar el trabajo efectivo del sistema. Así mismo, se debe tomar en cuenta la geometría en planta del conjunto, ya que de ella depende la disposición de los diversos dispositivos inherentes al sistema.

Resultó de gran importancia recomendar el estudio de la posición de la tenso-membrana respecto a la incidencia de la dirección del flujo de viento, siendo éste una de las cargas principales que afecta directamente en la selección de los perfiles, ya que se requiere de su inclusión estricta en el proceso de

descomposición de fuerzas en el cálculo estructural, tomando en cuenta de igual manera: los efectos de empuje y succión de viento según sea el caso. Dentro de las consideraciones, es preciso tomar en cuenta el peso propio del sistema, aunque una de las ventajas que ofrece el mismo, es la ligereza y peso propio inferior a 1 kp/m^2 ; sin embargo, es de importancia ya que es una carga a considerar en el cálculo estructural.

Se concluyó que la altura a considerar de cada perfil también es relevante en el proceso de selección de los mismos, sin embargo, los fabricantes proveen perfiles con una altura máxima de 12 metros para evitar el pandeo lateral torsional elástico. Se determinó que, con la correcta selección de perfiles, su estudio, cálculo y proceso de diseño estructural, este sistema puede poseer la capacidad de cubrir superficies superiores a los 100.000 m^2 para cualquier tipo de función.

Referencias

- [1] Hámon, M. y Pérez, M. Criterios básicos en el análisis y diseño de tensoestructuras. Trabajo Especial de Grado. Ingeniería Civil. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. (2006)
- [2] Carranza, F. y Taco, J. Cálculo y diseño estructural para la cubierta del mercado central de la parroquia de píttag en base a tenso-estructura con el uso de bambú gigante (*dendrocálamus asper*). Trabajo Especial de Grado. Ingeniería Civil. Escuela politécnica del ejército. Sangolquí, Ecuador.(2011)
- [3] Ballaben, J. Mástiles arriostrados: análisis dinámico no lineal y cuantificación de incertidumbres. Universidad del Sur. Trabajo Especial de Doctorado en Ingeniería. Ingeniería Civil. Bahía Blanca, Argentina.(2016)
- [4] HB Hierrobeco: Catálogo de Productos Recuperado de: http://www.hierrobeco_.com/wp_content/uploads/2020/09/catalogo_productos_hierrobeco_01_07.pdf
- [5] UNICON. Diseño de Estructuras de Acero con Perfiles Tubulares. Primera Edición. Caracas, Venezuela (2011)