

---

# Tenso-estructuras de cubierta

Ezael Pedroza<sup>1</sup>, Dr. S. Tulio De la Cruz<sup>2</sup>, Mtro. Alberto Rodríguez<sup>2</sup>, Mtro. Eduardo Aguilera<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Estudiante del Programa de Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

<sup>2</sup> Docente del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

## Resumen

En el documento se hace una revisión de la información disponible referente a las estructuras tensadas, cómo han ido evolucionando y cómo los métodos rudimentarios utilizados por los primeros pobladores de la tierra se utilizaban para la construcción de este tipo de estructuras, así como los elementos que las integran, sus funciones principales, las formas diversas que las componen y sus principales características. Uno de los aspectos significantes que se tratan es la forma en cómo una estructura tensada funciona, desde el punto de vista mecánico, los aspectos generales que dieron a la idea de las teorías que hacen posible el cálculo de este tipo de estructuras, los procesos constructivos para montarlas y cómo estas estructuras deben ser considerada para su análisis y diseño.

**Palabras Claves:** estructura tensada, tenso-estructura, velaria, cubierta.

## Introducción

El desarrollo de las tenso-estructuras como cubiertas significa un avance en técnicas de mejoramiento de espacios, debido a diversos factores estructurales que presentan una ventaja sobre estructuras rígidas y con materiales pesados. Asimismo, el diseño y la construcción de estructuras de cubierta tensada dependen de las necesidades y características de un proyecto arquitectónico específico a desarrollar. Estas estructuras espaciales crean un entorno moderno, atractivo y original. La implementación de las tenso-estructuras en los últimos años hace posible abrir un nuevo

camino en el diseño arquitectónico y la construcción de estructuras que presenten variedades a diferencia de las cubiertas convencionales.

Las estructuras tensadas juegan un gran papel como estructuras flexibles ya que son conocidas por la simplicidad de ensamble de los elementos que la componen, y por su eficiencia en el uso de materiales y mano de obra, lo cual las hace superiores a otros sistemas estructurales que sirven de cubiertas.

## Antecedentes

A lo largo de su historia, los hombres han buscado refugio de las inclemencias que surgen a su alrededor, buscando cobijo y protección de los sucesos que ocurren en un medio determinado. Existieron diversos métodos utilizados por el hombre para cubrir la necesidad de refugio; entre los más usados han subsistido algunos que por su practicidad, movilidad y aprovechamiento de materiales sirven como gran ejemplo para la construcción de estructuras en nuestros tiempos.

Muchas culturas alrededor del globo terráqueo construyeron refugios y desarrollaron sus propios sistemas de construcción, que surgieron de los conocimientos empíricos adquiridos a lo largo de las generaciones, por ensayo y error (Castro, Cera, & Diaz, 2010). Con el paso de los años y generaciones después, estos refugios siguieron siendo modificados por lo que las tiendas y cubiertas utilizadas no tenían un inicio determinado ni un fin establecido; es decir, simplemente se encontraban en un cambio constante.

Diversas culturas nómadas enfrentaron condiciones adversas de clima y tuvieron que realizar diseños ingeniosos que les permitieran mantenerse resguardados, mientras que otras culturas regresaban al concepto básico de una cubierta cónica, como se la que se muestra en la Figura 1. Las tiendas 'tipis' de Norteamérica eran las más adecuadas a las necesidades primarias de los indios que vivían en las vastas praderas, pues debido a su diseño de rápida maniobra, podían también ser utilizadas

como medio de arrastre para cargar provisiones (Castro, Cera, & Diaz, 2010).



Figura 1 Ejemplo de vivienda utilizada en la antigüedad.

Durante los siglos la implementación de cubiertas textiles fue retomando fuerza cuando los romanos las utilizaron como herramienta primordial para cubrirse de las inclemencias del sol en los coliseos; utilizando toldos de tela y entramados de cuerda, se podía realizar una cubierta que protegiera a los espectadores (Basset Salom, 2013). Con el paso del tiempo, la implementación de estas estructuras renacería siglos más tarde, en la década de los cincuentas, cuando después de la segunda guerra mundial la arquitectura a tensión realmente tomó su lugar actual. Algunos arquitectos a finales del siglo XX han contribuido al desarrollo de las estructuras tensadas no sólo con la geometría, sino también con soluciones a los requisitos estructurales que éstas demandan.

## Tipos y clasificaciones

Las diferentes estructuras tensadas se pueden clasificar de acuerdo a su forma geométrica, la cual hace variar el anclaje y los soportes que éstas presentan; también se pueden clasificar de acuerdo a los materiales utilizados en su construcción, lo que permite una gran variedad de combinaciones en cuanto a tipos posibles de diseños.

La clasificación en cuanto a la forma de la superficie de las cubiertas distingue dos tipos: la sinclástica y las anticlástica (Basset Salom, 2013). Estas formas se pueden ver en la Figura 2.

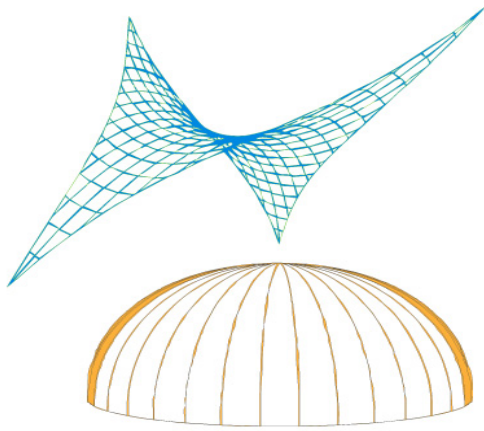


Figura 2 Ejemplos de formas anticlásticas y sinclásticas

La primera, menos utilizadas en estructuras de tensión, puede definirse como una curvatura gaussiana positiva, como ejemplo principal, puede citarse la esfera, la cual cuenta con la misma curvatura gaussiana positiva en todos sus puntos, donde los centros de las curvas se encuentran del mismo lado de superficie; algunos otros

casos de las figuras que se forman con este tipo de geometría son: las paraboloides circulares, esféricas y elípticas. En el caso de las cubiertas caracterizadas como anticlásticas existen muchas más variantes, debido a que la forma de la curva que se le da, la cual cuenta con una curvatura gaussiana negativa, principalmente se caracteriza por presentar centros de curvatura que se encuentran en direcciones opuestas y debido a esta diferencia provoca que de manera más sencilla generando fuerzas de tracción en la misma superficie, algunos ejemplos de superficies que se forman son la paraboloides hiperbólico, en forma de cono, en forma ondulada, en tipo bóveda y en forma de velas. Los elementos utilizados para darle forma a estas estructuras son los cables, mástiles, arcos y los apoyados en puntos, no solo la forma en la que trabaja el conjunto estructural si no también la forma en cómo se reparte los esfuerzos de las cargas externas, al contrario de las que se caracterizan como sinclásticas, se debe tener en cuenta que las cargas gravitatorias se encuentra en el lado cóncavo de la superficie y la succión por viento se dará encontrara en contacto con la cara convexa de la cubierta. La versatilidad de las cubiertas a tensión radica en la libertad de combinaciones que crea diversas estructuras artísticas, más siempre teniendo en cuenta que éstas trabajen a tensión con el propósito de mantener su forma.

## Materiales y funcionamiento

Durante el último siglo el descubrimiento de nuevos materiales y las nuevas aplicaciones de los ya existentes han sido el complemento para transformar los diseños e ideas, además el mejoramiento ayuda a que los materiales puedan realizar diferentes tareas que contribuyan en la eficiencia de las estructuras de cubierta. Un ejemplo claro de los cambios que se han realizado con el paso del tiempo es la implementación de textiles no provenientes de materiales orgánicos, ya sea pieles de animales o tejidos naturales ya que debido al descubrimiento de materiales fácilmente moldeables como el plástico, se pudo implementar una serie de diversos tejidos a base de muchos materiales diversos, debido a que en el caso de la mayoría de las estructuras de cubiertas tensadas la parte primordial que le otorga las ventajas de ligereza y practicidad dependen del material textil con el que se realice la estructura, los materiales utilizados tienden a ser una combinación que le otorga resistencias y características diversas las cuales dependen de las necesidades que requiera el proyecto. En su mayoría los textiles que se utilizan están hechos con materiales plásticos como lo son el PVC, *nylon*, politetrafluoroetileno, fibra de vidrio con teflón, poliéster y en algunos casos fibra de carbono también conocida como *kevlar* (de Oliveira Pauletti, 2011). El producto formado puede contener diversas combinaciones de éstos y en diversas proporciones, ya sea para aumentar su resistencia a esfuerzos o a condiciones adversas de la intemperie.

Las estructuras convencionales de concreto, acero, madera o mampostería, tienen dos propiedades principales que les

brindan estabilidad y la capacidad de transmitir cargas, éstas son: la inercia y la rigidez (Castro, Cera, & Diaz, 2010). Es por eso que el componente de la estructura que le otorga la caracterización principal de cubierta es la membrana o textil, gracias a las características de los materiales textiles que pueden adquirir formas peculiares. Asimismo, las membranas o textiles cuentan con diversas combinaciones de materiales que le dan una alta calidad y vida útil, por ejemplo, en las membranas comúnmente se establece una combinación de capas, las cuales cuentan con diversos propósitos a la hora de su funcionamiento; en estas capas se encuentran materiales como bases de tejido, los cuales son los encargados de la resistencia. Otras capas de PVC cuales cubren de los rayos solares y agentes atmosféricos que puedan reducir la vida útil del material; por último, también se encuentra una capa impermeabilizante que permite la evacuación de las aguas de lluvia y la humedad que su pueda presentar.

En el diseño de una estructura de cubierta tensada se puede utilizar otro material, el cual, junto con las membranas y textiles, se considera como material flexible que conforma la estructura tensada. Los cables, principalmente de acero, son los conforman una de las bases estructurales en la construcción de cubiertas tensadas. El cable de acero es un elemento estructural simple, que está compuesto de un conjunto de elementos que transmiten fuerzas, movimientos y energía entre dos puntos, de una manera predeterminada para lograr un fin deseado (Tigo & Vinicio Carranza, 2011). Esta característica del cable hace que su utilización en estructuras tensadas sea de

las más comunes debido a las formas y fuerzas que se generan en éstas.

La principal función que ejercen los cables en las estructuras de cubierta es el de actuar como tensores que refuerzan la membrana textil, la cual permite mantener su forma al ser conectado al elemento rígido que soporta la cubierta. Otro elemento que se caracteriza por ser flexible son las relingas, elementos que permiten reforzar el borde de la membrana, donde tiende a acumularse gran parte de la tensión, además de servir como elemento de transición entre dichos bordes y los puntos de fijación o anclaje (Basset Salom, 2013). Más que elementos flexibles estos pueden ser considerados como uno de los materiales más importantes a la hora de las consideraciones en el diseño de una estructura de cubierta por lo que tienden a ser sustituidos como elementos de mayor rigidez.

En las estructuras de tejido tensado donde la estructura de apoyo consiste en el mástil, la tela está suspendida de cables colgados del mástil u otros elementos de compresión (Henrysson, 2012). Principalmente los elementos que constituyen la parte rígida están constituidos por mástiles o postes, los cuales se encargan de soportar las fuerzas que se transmiten de los elementos colgantes manteniendo la estabilidad y forma de los elementos flexibles, estos elementos rígidos no son los únicos que se encuentran en las tenso-estructuras, también existen los puntos de anclaje los cuales, al igual que los mástiles, tienden a estar sujetos a una superficie estática a la cual le transmiten los esfuerzos resultantes de la estructura colgante

introduciendo y manteniendo la tensión necesaria a los elementos flexibles.

Existen diversos tipos de anclaje, los cuales se diferencian por su función con respecto al comportamiento en la estructura. En la Figura 3 se puede observar un ejemplo de anclaje y soporte.

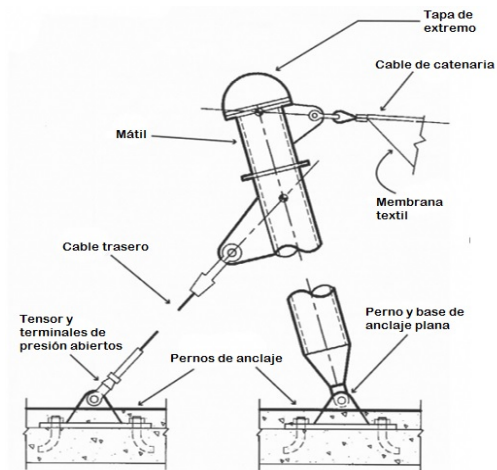


Figura 3 Ejemplo de un sistema de soporte

Existen los estáticos o rígidos que son aquellos que no permiten movimiento en diversas direcciones y mantienen una rigidez, mientras que en algunos otros tipos hay elemento que permiten movimientos como rotación en varias direcciones o restringidos a sólo una dirección, estos elementos se deben de caracterizar por no permitir que las fuerzas de tracción se pierdan aunque permitan los movimientos de rotación, esto es debido a que si la fuerza de tensión en el anclaje se pierde, la forma de la tenso-estructura cambiará y los análisis no se habrán establecido para las nuevas dimensiones de la estructura.

## Comportamiento mecánico

En una estructura tensada su principal comportamiento se basa en la tensión producida por los anclajes y mástiles. A diferencia de las estructuras convencionales donde su comportamiento se basa en su peso y su rigidez, como las estructuras de piedra, concreto, acero y madera, que son estas propiedades las que hacen posible una transmisión de cargas a las bases de éstas, en las estructuras tensadas no se cuenta con estas características, debido a que el peso y la rigidez, en el área de distribución de cargas, es mucho menor.

Debido a las características de rigidez de las estructuras de cubiertas tensadas, los materiales se ven pretensados con el propósito de incrementar la rigidez en los elementos que componen el sistema y estos encuentren la estabilidad y el equilibrio al momento de la aplicación de las cargas, el comportamiento de las estructuras de tensión se puede dividir en tres fases (Santoso, 2004); en la primera la membrana o cables se desdoblán de la posición de reposo hacia una etapa de esfuerzos incipientes, en la segunda etapa comienzan las deformaciones por las cargas muertas que se le aplican a la estructura y para finalizar en la etapa de servicio donde se le aplican cargas vivas y dinámicas a la estructura, creando un comportamiento no lineal.

Además, si por un lado los elementos estructurales básicos de las estructuras tensadas son posiblemente los elementos más simples en ser formulados matemáticamente, por otra parte el comportamiento estructural de estos elementos trabajando en conjunto es

esencialmente no lineal, en la mayoría de los casos invalidando el uso de soluciones analíticas (de Oliveira Pauletti, 2011). Se sabe que el comportamiento natural intrínsecamente no lineal de las estructuras tensadas ha hecho que el análisis de estas estructuras sea diferente al de las estructuras rígidas que suelen calcularse con métodos lineales en los que se tienen pequeñas deformaciones elásticas y desplazamientos, el estudio durante las últimas décadas se concentró en el desarrollo de sistemas de análisis para este tipo de estructuras. Uno de los primeros arquitectos en desarrollar una teoría para el comportamiento de este tipo de estructura fue Frei Otto, quien analizó burbujas de jabón que se encontraban entre dos soportes donde se encontraba que la burbuja estaba a tensión en cada punto y el área de la superficie era mínima (Lewis, 2013). Este método se utilizó para análisis computacionales posteriores, ver Figura 4.

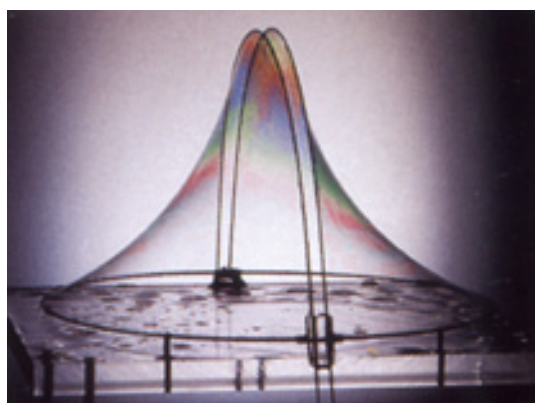


Figura 4 Imagen del experimento de burbujas de jabón

Hoy en día para calcular los modelos de estructuras tensadas se realiza conforme a programas computacionales que dan una gran aproximación al comportamiento de la



superficie, el proceso computacional para encontrar la forma, aborda la cuestión de cuál es la configuración geométrica detallada de una superficie cuyos límites de claro están dados y se asume una pretensión satisfactoria (Lewis, 2013). Estos sistemas computacionales existentes se basan en la implementación del método de elemento finito, el cual se aplica popularmente en ingeniería, ya que la tecnología informática está muy desarrollada, lo suficiente como para calcular estructuras complicadas con

mallas muy finas, y las estructuras de tejido puede llevarse a cabo en base a la geometría de la malla hecha con elementos finitos. Por lo tanto los modelos numéricos de estructura de la tela utilizando el método de elementos finitos es ampliamente utilizado en las estructuras de tela en cuanto a diseño y el análisis, a pesar de que los modelos físicos todavía están a menudo fabricados y probados para un concepto general de diseño (Zhang, 2010).

### **Nuevas consideraciones de diseño**

Al realizar un proyecto de obra o el diseño primordial de una estructura siempre se consideran diversos factores los cuales influyen directamente en la construcción o implementación del diseño, muchos de los factores son de conocimiento estructural relevante o que comúnmente se ven en proyectos de obra, aunque cada proyecto es diferente, el diseño de una estructura tensada no solo se basa en encontrar una geometría adecuada, antes se deben revisar diversos requerimientos tales como la apariencia, requerimientos estructurales, clima, medio ambiente, sostenibilidad y construcción (de Llorens Duran, 2011). Durante estos pasos se ira definiendo la geometría a implementar en el diseño.

Una vez contando con diagramas y diseños preliminares la siguiente consideración debe ser la estimación de cargas con las que tendrá contacto la estructura tensada. Para ello, los códigos y

normas aplicables deben de tomarse en cuenta. La respuesta de una estructura tensada a las cargas de proyecto gira en torno a una configuración de equilibrio inicial, o configuración viable, en la que la membrana (o red de cables) está reforzada por el efecto de las cargas permanentes, básicamente, las cargas de peso propio y de tensión de la membrana (Ruy Marcelo, 2011,32). Los métodos de análisis para estos modelos se basan en la distribución de cargas en un cable. Una costumbre en la práctica profesional es diseñar este tipo de estructuras únicamente por peso propio, tal y como se hace en arquitectura, cuidando únicamente las recomendaciones del fabricante de la lona o material textil (Hernandez Barrios, Valdes Vazquez, & Hernandez Martinez, 2010). Es por ello que el análisis de cargar de viento es uno de los factores relevantes que intervienen en los cálculos.

## Metodología

Las estructuras de cubierta tensada pueden encontrarse de diversas configuraciones. Debido a que la estructura misma tiene el nombre coloquial de velaria, la búsqueda comienza con aspectos arquitectónicos, tales como las formas que existen o las geometrías que se pueden formar con las superficies flexibles, los resultados que también pueden ser esperados tienen que ver con la utilización que pueden tener las estructuras de cubiertas con este tipo de características, la bibliografía que se obtiene de realizar esta búsqueda son las características de cómo están conformadas fisiológicamente. Luego de las características que se tienen en ámbitos constructivos, se considera el comportamiento mecánico de los materiales y el comportamiento estructural que tiene la construcción en conjunto; en estas consideraciones se encuentran aspectos que se centran en el análisis y diseño de este tipo de estructuras y como subdivisión se encuentran las consideraciones a tomar a la hora del análisis.

Una vez recabada la información, ésta se organiza y cataloga dependiendo del

criterio preferido; el utilizado para este documento se basó principalmente en la disponibilidad de los documentos que se utilizaron, pues eran de libre acceso. Otro de los criterios utilizados fue la fecha en la que se realizó el documento, que tuviera una diferencia entre la fecha de realización y la actualidad, menor a 5 años. Uno de los factores importantes en la categorización de la información es la viabilidad y la confiabilidad de la fuente, lo cual le da certeza para ser utilizada como marco de referencia. La información que se cataloga como aceptable para la revisión se rescata de la fuente para uso propio en el artículo; también la información referente a la fuente de donde se está obteniendo la información para referenciar. Aunque la fiabilidad de la información se tomó como factores para categorizarlo, se revisa nuevamente para que la validez de ésta información utilizada en el artículo no sea puesta en duda. La importancia de conocer si la información que se recaba para las referencias son de una calidad acorde con el documento es debido a que serán el reflejo del contenido del documento.



## Conclusiones

Las tenso-estructuras son una alternativa para usarse en cubiertas para sombra. La implementación de estas estructuras puede ser establecida en cualquier lugar donde las condiciones del proyecto lo permitan. La innovación en aspectos constructivos se está dando por la eficiencia en el uso de los materiales por ámbitos económicos y ecológicos, lo cual implica un reto a la imaginación e ingenio, siendo una alternativa con grandes ventajas, aunque toda estructura cuenta con sus dificultades de implementación las tenso estructuras llevan una ventaja favorable en estructuras de cubierta, la versatilidad de adaptación solo se ve limitada por la capacidad del que implementa este sistema de estructuras.

Según Valdez Pérez (Valdez Pérez, 2013), las tenso estructuras han tenido un papel relevante en la supervivencia de los primeros pobladores y su innovación ha permitido que se sigan desarrollando en la actualidad, aunque se considere que el uso limitado en la funcionalidad de estas estructuras representa un problema, en realidad podría verse como una implementación de conocimientos para un área establecida. La construcción de tenso-estructuras debería ser una práctica común para usarse en las cubiertas que se requieren en nuestra región.

## Referencias

- Ambroziak, A., & Klosowski, P. (2010). Example of tension fabric structure analysis. *Gdansk University of Technology*, 1-10.
- Basset Salom, L. (2013). *Tensoestructuras*. Valencia: Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universidad Politécnica de Valencia.
- Castellanos Espinosa, E. A. (2012). *Estudio analítico experimental de una lonaria sujeta a efectos dinámicos por viento*. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Castro, S., Cera, R. A., & Diaz, H. (2010). *Tenso estructuras: Investigación*. Venezuela: Facultad de arquitectura y urbanismo.
- Construccion y Vivienda. (2014). *Tensoestructuras. Suplementos especiales: Materiales y procesos*, 8-84.
- De Llorens Duran, J. (2011). *Los detalles constructivos de las tenso estructuras*. Barcelona: Escuela de Arquitectura de Barcelona.
- De Oliveira Pauletti, R. (2011). Anotaciones sobre el proyecto y el análisis de las estructuras tensadas. *Entre rayas*, 30-41.
- Gamboa, M., Hincz, K., & Tun Cruz, V. (2011). Medición de presiones aerodinámicas en una estructura de membrana. *Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 9-24.
- Henrysson, E. (2012). *Analysis of Membrane Structures*. Göteborg: CHalmers University of Technology.
- Hernandez Barrios, H., Valdes Vazquez, G., & Hernandez Martinez, A. (2010). *Procedimiento simplificado de diseño eólico de tenso estructuras*. Guanajuato: Congreso nacional de ingeniería estructural.
- Lewis, W. J. (2013). Modeling of fabric structures and associated design issues. *Journal of architectural engineering*, 1-15.
- Muñiz Martín, E. (2014). *Análisis dinámico de las tenso estructuras: Propuesta de metodología de cálculo y software aplicado*. Cataluña: Universidad Politecnica de Cataluña.
- Primachenko, B. M. (2014). Engineering geometry method for modeling the structure and performance characteristics of fabric articles for technical purposes. *Fibre Chemistry*, 45-53.
- Santoso, K. (2004). *Wide-Span Cable Structures*. California: University of California.
- Shibo, R. (2008). *Analysis of Tent Structures*. Delft: Delft University of Technology.
- Tigo, F., & Vinicio Carranza, A. (2011). Cálculo y diseño estructural para la cubierta del mercado central. *Escuela Politecnica del Ejército*, 365.
- Ungureanu, N., CĂCIULĂ, S.-D., & Vrabie, M. (2010). About some suspension roofs made of the orthogonal cable networks. *Gheorghe asachi technical university*, 1-110.
- Valdez Pérez, F. (2013). *Cubiertas Velarias: las tensoestructuras*. Mexico: Facultad de Estudios Superiores de Acatlán.
- Zhang, L. (2010). Reliability analysis of fabric structures. *Newcastle University: Newcastle upon tyne.*, 1-15.
- Zhibin, L., Ruojun, Q., & Xingfei, Y. (2012). Erection Analysis of Large-Scale Radial Cable Net. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 1-5.