

**APLIACIÓN DE ESTRUCTURAS ARBORIFORMES Y COLGANTES A UN
PUENTE PEATONAL:**

LA EVOCACIÓN DE FORMAS NATURALES A TRAVÉS DE LA
ESTRUCTURA

Ruth Lorena Ducón Sosa

Alicia Liliana Vergara Latorre

Giovanna Gisela Acosta David

Universidad Piloto de Colombia

Facultad de Arquitectura y Artes

Programa de Arquitectura

Bogotá D.C

Julio, 2013

**APLIACIÓN DE ESTRUCTURAS ARBORIFORMES Y COLGANTES A UN
PUENTE PEATONAL:**

LA EVOCACIÓN DE FORMAS NATURALES A TRAVÉS DE LA
ESTRUCTURA

Ruth Lorena Ducón Sosa

Alicia Liliana Vergara Latorre

Giovanna Gisela Acosta David

Trabajo de grado para optar a título de Arquitecto

Director – Seminarista:

Arquitecto, Marcel Antonio Maury Montenegro.

Asesores: Arq. Armando Lozada
Arq. Plutarco Rojas
Publicista Gabriel Acero

Universidad Piloto de Colombia

Facultad de Arquitectura y Artes

Programa de Arquitectura

Bogotá D.C

Julio, 2013

NOTA DE ACEPTACIÓN

Arq. Edgar Camacho Camacho.
Decano Fac. Arquitectura y Artes.

Arq. Carlos Rueda Plata.
Director de coordinación parte II

Arq. Marcel Antonio Maury
Montenegro.

Director-Coautor

Bogotá D.C. – 17 de Julio de 2013

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN: DE LA TÉCNICA A LA ARQUITECTURA

INTRODUCCIÓN

1. FORMULACIÓN DE PROYECTO	8
TEMA	8
PROBLEMA.....	8
OBJETIVO	8
3.1. OBJETIVO GENERAL	8
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
HIPÓTESIS	9
JUSTIFICACIÓN.....	9
ALCANCE.....	9
2. CONTEXTO HISTÓRICO.....	10
3. MARCO TEÓRICO	15
4. MARCO CONCEPTUAL - CONCEPTOS BÁSICOS	19
5. DETERMINANTES DE DISEÑO	20
5.1 DIAGNÓSTICO DEL LUGAR	20
6. NORMATIVA	22
7. PROPUESTA.....	24
7.1 Descripción del proceso	24
7.2 Propuesta y Evaluación	26
DEFINICIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.....	28
HIPOTESIS DE DISEÑO	31
7.3 Comprobación de la Hipótesis.....	34
Análisis estructural	34
7.4 Estructuras colgantes en el proyecto	36
7.5 Descripción.....	40
7.6 Modulación	43
7.7 ANALOGÍA	46
8. CONCLUSIONES	47
9. BIBLIOGRAFÍA	48

RESÚMEN

De la técnica a la arquitectura: La proyección del puente peatonal ubicado en la ciudad de Bogotá parte de la técnica y pone al servicio de la arquitectura elementos para convertir el diseño de éste en un elemento iconográfico dentro de la ciudad, que debido a su forma hace una analogía con la imagen ambiental de un árbol, en contenido con la reducción de material y en figura con la expresión de una imagen; Para ello se plantea la hipótesis: **“Al reducir una luz en luces mas pequeñas, se reduce el momento flector y por ende el volumen de material”**.

Es importante resaltar que el proyecto va más allá de la intervención cualitativa del puente, puesto que en su elaboración se tuvo en cuenta la coherencia y el buen funcionamiento estructural de las arboriformes y cables gracias a los software Robot y SmartForm, los cuales permiten aplicar cargas al modelo, simular el funcionamiento estructural y obtener la curva funicular parabólica optima .

Otras de las ventajas del puente es que puede ser adaptable a tres diferentes perfiles viales de la ciudad de Bogotá, debido a la modulación de sus paneles de concreto que en el tablero son de 2 x 3 y en las rampas de 2 x 2, desmontables, liviano y eficiente.

Palabras clave: Técnica, Diseño, Puente, Iconografía, Árbol, Reducción de material.

INTRODUCCIÓN

En nuestro tiempo se hace necesaria la búsqueda de soluciones integrales para el cubrimiento de grandes y medianas luces es así que en cuanto a estructuras se refiere se exige que sean más eficientes y ligeras cada vez, con un uso óptimo de los recursos materiales energéticos y económicos, con estructuras móviles y adaptables.

La tipología arboriforme que hace parte de las estructuras no convencionales ha tenido cabida en la arquitectura desde el siglo pasado, nació dentro de un contexto tecnológico vinculado con los inicios del High-Tech. Este tipo de investigaciones surgieron a raíz de la pregunta: ¿Cómo era posible lograr cubrir eficientemente luces con un mínimo impacto visual, y ambiental?.

El principal antecedente se tiene en 1960 cuando Frei Otto desarrolló el modelo funicular de una estructura sometida a compresión basado en que en las grandes y medianas luces se deberían evitar en lo posible los elementos que trabajan a flexión a favor de los elementos traccionados o comprimidos, ya que los primeros requieren secciones mayores. De acuerdo con este enunciado Frei Otto planteó que al reducir una luz en luces más pequeñas la flexión disminuiría y con esta el tamaño de las secciones.

El principio del que parte es la naturaleza misma, sus procesos y formas, manifestando su eficiencia y afirmando que es un modelo a seguir para mejorar el entorno arquitectónico principalmente por la abstracción de sus formas aplicadas a la lógica de su comportamiento, de esta noción parte la temática del proyecto, en el que a través de la evocación de formas naturales, nacen estructuras arboriformes aplicadas a la estructura de un puente peatonal, el cuál además de cumplir con los requerimientos que este tipo de estructuras requieren, también logra aportar a la espacialidad del mismo, pues se hace necesario combinarlas con estructuras colgantes que en conjunto logran una solución integral en cuanto a eficiencia, al aspecto sensorial y a la optimización de recursos.

Hoy en día la exploración sobre estos sistemas no convencionales ha avanzado de manera considerable, como los proyectos lo demuestran. Desde Buckminster Fuller con la cúpula geodésica, en el campo de los cables esta Gaudí con su estudio sobre la curva funicular, y arquitectos como Frei Otto, Gerkan y Calatrava que trabajaron también con estructuras colgantes y arboriformes.

En el siguiente documento se describirá cada uno de los aspectos tenidos en cuenta para la toma de cada una de las decisiones que determinan la forma. Además de el proceso llevado a cabo para la comprobación de su eficiencia, con base en la hipótesis que en este trabajo se planteó.

Para concluir Frei Otto afirma:

Las construcciones siempre tienen una forma, y algunas de ellas incluso un aspecto inconfundible, desde este punto de vista físico, la mejor construcción es aquella que emplea el mínimo de energía y material; una construcción así, es, en ocasiones, especialmente bella. Construir significa hacer arquitectura real en las fronteras del conocimiento.

1. FORMULACIÓN DE PROYECTO

TEMA

Partiendo de la técnica y poniendo elementos al servicio de la arquitectura aplicar los sistemas estructurales arboriformes y colgantes al diseño de un puente peatonal de una manera eficiente, es decir proponiendo una estructura coherente sin incurrir a exceso de material.

PROBLEMA

Diseñar arquitectónicamente un puente peatonal a partir de estructura arboriformes y colgantes con capacidad de cubrir una vía $V0=100.00m$, $V1=60.00m$ y el perfil de la 26 con 68B- Bis =136m, según la normativa vigente en la ciudad de Bogotá?.

OBJETIVO

3.1. OBJETIVO GENERAL

Resolver y proyectar el diseño de un puente peatonal a partir de estructuras arboriformes y colgantes que permita que el puente sea adaptable a tres tipos de vías ($V0$, $V1$ y al perfil de la 26 con 68b- Bis), liviano, eficiente, desmontable, y con posibilidad de ampliación.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Relacionar la arquitectura e ingeniería en el proyecto partiendo de un concepto técnico para la proyección de una iconografía, que contribuye a enriquecer la imagen de la ciudad.
2. Explorar posibilidades estructurales con tipología arboriforme y de cables las cuales puedan ser modulares.
3. Demostrar la coherencia y el buen funcionamiento estructural de la propuesta.

HIPÓTESIS

Para resolver el puente de manera eficiente, el proyecto se enfoca en el elemento que se ve sometido al esfuerzo mas comprometedor (flexión) y por ende el que mas material demanda, para reducir este esfuerzo se reduce la luz del tablero en luces mas pequeñas con la ayuda de las arboriformes y cables para así reducir el momento flector y por ende la cantidad de material.

JUSTIFICACIÓN

Con este trabajo de grado se pretende ampliar el marco de posibilidades explorando el potencial de las tipologías estructurales no convencionales, en este caso arboriformes y colgantes orientadas a la elaboración estructural de puentes peatonales en la ciudad de Bogotá, con mayor eficiencia (menor volumen de material) que los actuales, y creando un nuevo perfil de la ciudad, enfocándonos en la parte cualitativa de la estructura (cualidad-calidad), pero de igual manera teniendo convicción de su trabajo estructural.

ALCANCE

En el siguiente proyecto de grado poniendo la técnica a disposición de la arquitectura se diseña y proyecta un puente peatonal con base en estructura arboriforme que cuenta con las siguientes características: Liviano, modular , desmontable y eficiente. En cuanto a esta último aspecto, se evalúa llevando a cabo simulaciones con el modelo para su posterior demostración de eficiencia. La propuesta del puente en este proyecto de grado tiene implícito el aporte en cuanto a la imagen al perfil de ciudad que se quiere hacer al tomar un elemento que tiene relación con lo ambiental, pero en contenido constituye una solución eficaz al problema de medianas luces. El resultado se presentará con los tipos definidos para cada vía (V0, V1 y al perfil de la 26 con 68b- Bis), y cada uno de los módulos que lo conforman.

2. CONTEXTO HISTÓRICO

El origen y desarrollo de nuevas formas estructurales y arquitectónicas del siglo XIX y XX estuvo ligado a la aparición de nuevos materiales y sistemas estructurales. ¹Este contexto arquitectónico modificó el papel de la estructura, ofreciendo nuevas posibilidades de resolver el problema de cubrir grandes luces, ampliando el abanico formal de las estructuras y optimizando el funcionamiento de estas y el empleo de material.

Frei Otto es uno de los primeros arquitectos en experimentar con estructuras no convencionales en el siglo XX, *ya que los métodos de trabajo de él, se basaban en el estudio de la naturaleza. Observaba el comportamiento de la estructura de plantas y animales, y es de esta manera que logra diferentes soluciones estructurales*² ; Por lo señalado anteriormente y porque buscaba construir de forma eficiente, es decir con un consumo mínimo de recursos, se convierte en uno de los precursores con más iniciativa en cuanto a este tema, por lo tanto un referente para el proyecto de grado.

El concepto de estructuras Arboriformes llamadas así por Otto, proviene de árbol-forma que en imagen se relaciona con un elemento natural, pero que en estructura su función es diferente, según el libro la esencia del árbol estas estructuras son un *sistema de transmisión de cargas verticales que tienen como objetivo recibir y transmitir de la cubierta los esfuerzos a partir de varios y repartidos puntos de aplicación de fuerzas a un menor número de puntos fijos, por medio de la ramificación de sus elementos portantes en puntos llamados nudos, buscando reducir la flexión y la longitud de pandeo.*³

Una de las primeras aplicaciones de estas estructuras en la arquitectura e ingeniería fue en las construcciones de viaductos, como se puede observar en el tren de alta velocidad de Magnetbahn en 1991 (Imagen 1), el cual debía *plantear un sistema de puentes eficientes que no sufriera distorsión bajo los efectos de temperatura o por las cargas dinámicas de los propios trenes, presentando además un mínimo impacto ambiental y visual*⁴. Descomponiendo la luz total a cubrir, en luces más pequeñas por medio de la ramificación del elemento

Fig. 1. tren de alta velocidad de Magnetbahn



http://oa.upm.es/910/1/Alejandro_Bernabeu_Larena.pdf

¹ BALMOND, Cecil. Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea. Madrid: 2007. Disponible online: http://oa.upm.es/910/1/Alejandro_Bernabeu_Larena.pdf. Capítulos 1.

² Generalidades sobre estructuras. 2007 Disponible online http://www.fceia.unr.edu.ar/darquitectonico/darquitectonico/data/pdf/Frei_Otto.pdf. Pag 6.

³ MAURY, Marcel Antonio. La esencia del árbol. Bogotá: Punto aparte, Universidad Nacional de Colombia, 2009.

⁴ BALMOND, Cecil. Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea. Madrid: 2007. Disponible online: http://oa.upm.es/910/1/Alejandro_Bernabeu_Larena.pdf. Pag 10.

que sostienen el puente, de tal forma que el viaducto se apoye en un mayor número de puntos los cuales finalmente reducen el momento flector.

También encontramos la estructura de la cubierta del Pabellón de Manheim realizada en 1973 (Imagen 2) la cual está formada por estructuras arboriformes que aunque no son en su totalidad arboriformes porque solo tienen una ramificación si se acercan al principio de está (reducir una luz en pequeñas luces, para reducir el momento flector) las cuales sostienen la cubierta que salva una luz máxima de 80 metros, *planteándose de esta manera para eliminar los esfuerzos de flexión en la estructura bajo cargas gravitatorias de peso propio, resolviendo sus nudos de manera que permita el giro y la continuidad de las piezas en las dos direcciones, en las zonas donde aparecen tracciones se introducen cables que refuerzan localmente la estructura para otorgarle estabilidad.*⁵

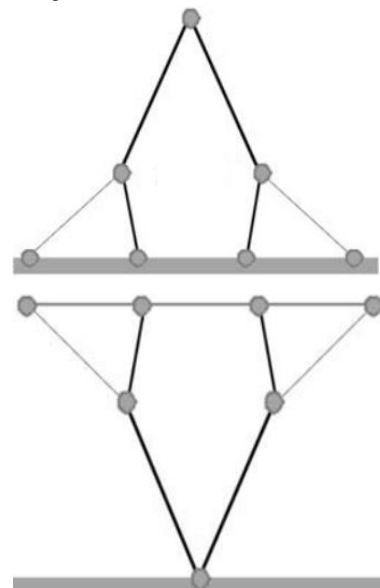
Fig. 2. Pabellón de Manheim



http://oa.upm.es/910/1/Alejandro_Bernabeu_Larena.pdf

Estas son unas de las primeras construcciones con estas estructuras de Frei Otto, sin embargo en 1960 este empezó a trabajar en el tema con un *modelo funicular*, el cual trabajaba a tracción para sostener una placa de poco espesor a modo de cubierta (Imagen 3); una vez teniendo el modelo concluido y rigidizado, se invirtió de posición con lo cual se obtuvo una estructura caracterizada por su reducida longitud de pandeo y la existencia de momentos flectores muy pequeños en la cubierta.⁶(Imagen 4).

Fig. 3. Modelo funicular



La esencia del árbol, Marcel Antonio Maury, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá

Es a partir de este estudio y los proyectos anteriormente mencionados que Frei Otto se convierte en uno de las primeras personas que hablan del tema, siendo uno de los más renombrados del siglo XX y todavía aún en el siglo XXI, debido *al desarrollo de estructuras eficientes y su síntesis entre la transmisión de las cargas y la forma arquitectónica, generando una nueva tipología estructural. (Creo espacios arquitectónicos de grandes luces, se basó en simples conceptos: liviandad, sencillez tecnológica y manifestación estética de la estructura).*⁷

⁵ BALMOND, Cecil. Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea. Madrid: 2007. Disponible online: http://oa.upm.es/910/1/Alejandro_Bernabeu_Larena.pdf. Pg 11.

⁶ MAURY, Marcel Antonio. La esencia del árbol. Bogota: Punto aparte, Universidad Nacional de Colombia, 2009. Pag 19.

Es por esto que Frei Otto se ha caracterizado por ser un referente para los ingenieros y arquitectos innovadores en la creación de nuevas formas estructurales como Santiago Calatrava con **Orient Station**, en Lisboa 1993 la estrategia que se usa en esta estación, más específicamente en sus cubiertas es un sistema que inicia en apoyos similares a una columna y cuando llegan a la una altura determinada estos comienzan a ramificarse para lograr la mayor cobertura en la cubierta como lo muestra la imagen (Imagen 4), No hay mucha diferencia que se encuentra en la estructura de las **BCE place and heritage and square** en 1988 donde su objetivo también es dividir la luces de la cubierta y de este modo reducir al máximo el momento flector (Imagen 5). También observada históricamente en la **Basílica Católica de Barcelona** de Antoni Gaudí con la sagrada familia que se basa en una estructura de columnas llamadas Arborescentes que trabajan de manera conjunta para sostener una importante superficie de cubiertas. (Imagen 6).

Fig. 4. Orient Station



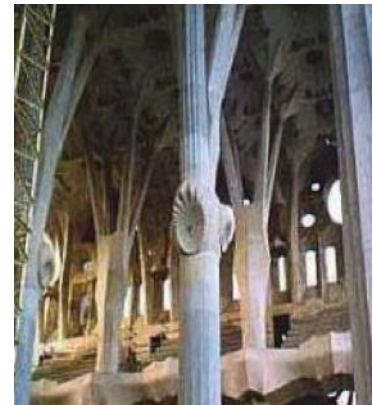
<http://www.woophy.com/photo/16913>

Fig. 5. **BCE place and heritage and square**



<http://architourist.pbworks.com/w/page/13599620/BCE%20Place%20Galleria> 8

Fig. 6. Basílica Católica de Barcelona



<http://www.intereconomia.com/blog/cigueena-torre/sagrada-familia-cerrada-al-culto-sinsentido> 8

Richard Rogers ,Aeropuerto **T4, Madrid**, 2007 (Imagen 7), **Serie Architects, Restaurante “The Tote” ,Mumbai India** (Imagen 8).

El Aeropuerto de Stuttgart (Imagen 9) adicionalmente al trabajo estructural ya visto anteriormente en los demás referentes cuenta con nudos articulados en la finalización de sus ramificaciones lo que beneficia la estructura y hace que no trabaje totalmente a compresión de esta manera evitar el esfuerzo cortante.

⁷ Grupo de trabajo Universidad Nacional de Rosario, Monografía de Análisis de autores, Frei Otto. Rosario: 2010. Se encuentra online en http://www.fceia.unr.edu.ar/darquitectonico/darquitectonico/data/pdf/Frei_Otto.pdf. Pag 5.

Fig.7. Aeropuerto T4



[http://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Madrid_Barajas_Airport_\(T4\)_-_LEMD_-_20060507.jpg](http://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Madrid_Barajas_Airport_(T4)_-_LEMD_-_20060507.jpg)

Fig. 8. "The Tote"



<http://www.dezeen.com/2009/12/07/the-tote-by-serie-architects/>

Fig. 9. Aeropuerto de Stuttgart



<http://saberlibre.net/mallorcaweb/rene/akademy.html>

Otra tipología de construcciones eficientes en puentes son las estructuras colgantes las cuales están *formadas por cables tensores (tirantes) para sustentar el peso de la estructura y de su carga*⁸, por lo que son las más frecuentes para cubrir grandes luces sin apoyos intermedios.

En general los cables entendidos como el encadenamiento de muchas articulaciones es un elemento que expresa la forma directamente a lo más óptimo en cuanto al comportamiento estructural, es decir, se adapta y expresa la geometría más adecuada para dar respuesta a un comportamiento estructural.

Al entender los cables de esa manera se encuentra que este tipo de estructuras son aplicadas a diferentes tipos de puentes ya sean atirantados o colgantes como se utilizó en los primeros puentes desarrollados a principios del siglo XIX y como ejemplos podemos observar el puente **de Menai en Gales** (Imagen 10), el **Hammersmith en Londres** (Imagen 11), **Puente Colgante de Portugalete** en Vizcaya, de 1893 (Imagen 12) es más exactamente un

Fig.10. puente de Menai



http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_colgante_de_Menai

Fig.11. Hammersmith



<http://www.minube.com/ripcion/el-puente-de-hammersmith-a66763>

Fig.12. Puente Colgante de Portugalete



<http://www.furgovw.org/furgallery/?page=10&usuario=7745>

⁸ Instituto awards. Disponible online: <http://instituto.awardspace.com/Documentos/tema1.pdf>. Tema 1.

transbordador. Desde entonces puentes colgantes han sido construidos a lo largo de todo el mundo.

Esta tipología es la más frecuente solución para salvar grandes luces cuando no se pueda añadir apoyos centrales.

Después de identificar el contexto histórico de estas dos estructuras (arboriformes y cables) es pertinente utilizar estas tipologías en un puente peatonal, debido a su función, a sus primeras aplicaciones y a la frecuencia con que estas se utilizan en este tipo de proyectos; Logrando el buen funcionamiento estructural con un híbrido entre cables y arboriformes.

3. MARCO TEÓRICO

En la historia de la arquitectura ha sido una constante el interés en los modelos de estructura que nos ofrece la naturaleza, como afirma Javier Sinosiain en su libro Bio-Architecture

*La gran meta de la estructura estriba en conseguir el máximo mediante el mínimo, La estructura no consiste en hacer algo más fuerte, agregando masa y volumen, sino en utilizar el material de la manera más adecuada, igual que en la naturaleza.*⁹

Desde los primeros días el hombre ha tomado la inspiración y guía para el diseño de estructuras de muchas de las formas del mundo natural, y es que hay una relación inherente entre biología y arquitectura en los que se han hecho algunos avances tecnológicos y de investigación que han posibilitado la construcción de estructuras más ligeras sobre las mismas bases, Por ejemplo los puentes son el ejemplo más claro estos son los que encontramos en la naturaleza:

Fig.13. Puentes naturales



Tomadas del libro: Javier Sinosiain. (2003) Bio-Architecture: Architectural Press Publ

A la izquierda el simplemente apoyado formado por un árbol caído, el puente en arco formado por rocas o el puente colgante por medio de enredaderas. Asimismo estos mismos tipos pero son ejemplos que fueron aplicados por el hombre:

Fig.14. Puentes hechos por el hombre



Tomadas del libro: Javier Sinosiain. (2003) Bio-Architecture: Architectural Press Publ

⁹SINOSIAIN, Javier. Bio-Architecture. Mexico: Architectural Press Publ. 2003. Capitulo 1.

En estos tres casos el principio es el mismo pues el propósito de una estructura radica en canalizar los esfuerzos al terreno ya sea un puente o un árbol; los esfuerzos que actúan sobre una estructura producen cinco tipos básicos de fuerzas: compresión, tracción, flexión, cortante y torsión.

Uno de los más fuertes exponentes de este tipo de avances, es Frei Otto, muy destacado por las investigaciones y proyectos llevados a cabo en el siglo XX, proyectos que caben dentro del contexto tecnológico y se vinculan a los inicios del llamado High-Tech.¹⁰

Además uno de los objetivos permanente de Otto ha sido el lograr *mucho* (hablando en términos de eficiencia y seguridad) a partir de *poco* (Ahorro de recursos); percibido como un principio básico que nos conecta con la sostenibilidad actual, así ha enunciado el principio de la construcción ligera como un modo de construir con un consumo mínimo de medios materiales, energéticos y económicos. Se ha dedicado a la investigación de la generación de la forma en la naturaleza, en la técnica y en la arquitectura, buscando principios comunes, explorando todo tipo de materiales y procesos físicos.

Es entonces como a medida que avanzó su investigación sobre la tracción y la búsqueda de estructuras resistentes y racionales Frei Otto encuentra inspiración en el campo de la biología y desarrolla modelos y métodos en que las formas se generan con el fin de observar y analizar los procesos mediante los cuales los objetos materiales se originan en todos los reinos de la naturaleza y la tecnología¹¹, demostrando su eficacia al comprobar que la naturaleza es como el modelo a seguir para mejorar nuestro entorno arquitectónico no necesariamente por su trabajo estructural, sino gracias a la abstracción de su forma aplicada a la lógica de su comportamiento.

Frei otto afirma:

Como en las estructuras de grandes luces se deberían evitar en lo posible los elementos que trabajan a flexión a favor de los elemento traccionados o comprimidos, ya que los primeros requieren secciones mayores. También es aconsejable reducir en lo posible la longitud de pandeo

Fig.15. Experimento Frei Otto



Tomado del libro Ronald Conrad . (1965) Frei Otto: Structures. Gustavo Gili

¹⁰ WINFRIED, Nerdinger. Frei Otto complete works lightweight construction natural desing, Birkhauser Verlag A.G, 2005. Cpitulo 5 y 7.

¹¹ SONGEL, Juan María Una conversación con Frei Otto, Alemania: GG, 2004. Capítulos 3 y 5.

de los elementos comprimidos. En los elementos de gran esbeltez que trabajan a compresión, la sección y, por tanto, el material empleado dependen en gran manera de la resistencia al pandeo¹².

Con base al anterior planteamiento Otto desarrolló en 1960 el modelo funicular de una estructura sometida a compresión que sostiene una placa plana en la parte superior a modo de cubierta:

Después que se logró que la estructura esté firme, se invirtió el modelo y los resultados arrojaron una mejoría en cuanto al comportamiento de la estructura porque se han reducido los momentos flectores en la placa de la cubierta y también se disminuyó la longitud de pandeo de sus elementos.



Fig.16. Experimento Frey Otto

Tomado del libro Ronald Conrad . (1965) Frey Otto: Structures. Gustavo Gili

Estas estructuras arboriformes se caracterizan porque pueden variar su comportamiento estructural, una cubierta puede ser considerada como una superficie formada por muchos puntos de aplicación de fuerzas que deben ser conducidos hasta unos puntos fijos (Los apoyos). Esta tipología se definen como:

Sistema jerarquizado de transmisión de cargas verticales, que tiene como objetivo recibir y transmitir de la cubierta los esfuerzos a partir de varios y repartido puntos de aplicación de fuerzas a un menor número de puntos fijos (Los apoyos en el suelo), por medio de la ramificación de sus elementos portantes en puntos llamados nudos, buscando reducir la flexión y la longitud de pandeo.¹³

La eficiencia con esta tipología se consigue al obtener una reacción óptima entre la longitud de pandeo, y las barras o puntos de apoyo en este tipo de estructuras arboriformes se pueden reducir ambos factores.

Frei Otto cree en la tecnología moderna, y, desde el principio, se planteó resolver las estructuras con gran ligereza y resistencia extrema, que iban a

¹² FREI, Otto. Pioneer in light weight tensile and membrane structures. Oklahoma: Sed 2004. Capitulo 2.

¹³ MAURY, Marcel Antonio. La esencia del árbol. Bogota: Punto aparte, Universidad Nacional de Colombia, 2009. Pag 16.

hacer un uso óptimo de los nuevos materiales, porque en nuestros tiempos se exigen estructuras más eficientes y ligeras, más ahorro de energía, móviles y adaptables, Él insiste en resolver los problemas de hoy desde la arquitectura, pero integrada a la naturaleza.

Este enfoque lo comparte Peter Pearce, que tiene como estrategia la forma como agente en el diseño de alto rendimiento, y es el estudio de la estructura natural lo que le ha proporcionado las bases de esta estrategia. **La evidencia** muestra que los patrones de energía y encontrar una forma en la naturaleza son factores determinantes en el principio de la generación y asimismo en *La naturaleza como estrategia de diseño* como titula su libro, en el cuál afirma:

*La estructura de la naturaleza sugiere que debe haber algunos principios fundamentales y las leyes, un sistema de fuerza intrínseca, que pueden formar la base para el diseño de sistemas de diversidad mínimos de construcción.*¹⁴

En conclusión la pertinencia de estos autores que son mas reconocidos en el tema y las temáticas que desarrollan aportan a la definición y entendimiento de este tipo de estructuras, su función y forma, además de su relación intrínseca con la eficiencia hablando de la búsqueda del mínimo de energía y material que se requiere. Es claro que es posible con este tipo de estructuras, si se determinan los detalles minuciosamente y se llevan a cabo pruebas que lo demuestren.

Para puntualizar: Las construcciones son medios auxiliares y no fines en sí mismos, por ejemplo, un puente forma parte de un sistema de caminos trazados por el hombre que sirve para superar un obstáculo que se interpone en la comunicación de dos hombres.

*Las construcciones siempre tienen una forma, y algunas de ellas incluso un aspecto inconfundible, desde este punto de vista físico, la mejor construcción es aquella que emplea el mínimo de energía y material; una construcción así, es, en ocasiones, especialmente bella. Construir significa hacer arquitectura real en las fronteras del conocimiento.*¹⁵

¹⁴ PEARCE, Peter. Structure in Nature is a Strategy for Design. Library of congress cataloging in publication Data. 1990. Capitulo 4.

¹⁵ SONGEL, Juan María Una conversación con Frei Otto, Alemania: GG, 2004. Capitulo 7.

4. MARCO CONCEPTUAL - CONCEPTOS BÁSICOS

CONCEPTOS	DEFINICIONES
Estructura	Es el conjunto de elementos resistentes, convenientemente vinculados entre sí, que accionan y reaccionan bajo los efectos de las cargas. Su finalidad es resistir y transmitir las cargas ¹⁶ .
Empuje	Es una fuerza que expelle o acelera masa en una dirección (acción), la masa acelerada causará una fuerza igual en dirección contraria (reacción) ¹⁷ .
Esfuerzo	Esfuerzo es la resistencia que ofrece un área unitaria del material del que está hecho un miembro para una carga aplicada externa ¹⁸ .
Catenaria	Es la curva que describe una cadena suspendida por sus extremos, sometida a un campo gravitatorio uniforme ¹⁹ .
Curva funicular	Forma curva que adopta un cable al ser sometido a una carga vertical distribuida uniformemente ²⁰ .
Proporción	Es la relación especial entre un grupo de números o cantidades. Según la definición aritmética, proporción es la igualdad de dos razones ²¹ .
Resistencia	La capacidad de un sólido para soportar presiones y fuerzas aplicadas sin quebrarse, deformarse o sufrir deterioros ²² .
Analogía	Significa comparación o relación entre varias razones o conceptos; comparar o relacionar dos o más seres u objetos, a través de la razón, señalando características generales y particulares, generando razonamientos basados en la existencia de semejanzas entre estos, aplicando a uno de ellos una relación o una propiedad que está claramente establecida en el otro ²³ .

¹⁶ Definición construida a partir de "Definición de estructuras" disponible online: <http://www.arqhys.com/casas/estructuras-definicion.html>

¹⁷ Definición elaborada a partir wikipedia disponible online: <http://es.wikipedia.org/wiki/Empuje>

¹⁸ Definición elaborada a partir de <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/5000155/lecciones/lec1>.

¹⁹ Definición elaborada a partir wikipedia disponible online: <http://es.wikipedia.org/wiki/Empujem>

²⁰ Definición elaborada a partir del Diccionario de arquitectura y construcción, disponible online: <http://www.parro.com.ar/definicion-de-curva+funicular>

²¹ Definición elaborada a partir de <http://docente.ucol.mx/grios/aritmetica/razon%20y%20proporcion.htm>

²² Definición elaborada a partir de "la caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos", disponible online: http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/1774/01.MGB_INTRODUCCION.pdf;jsessionid=3E25A2876BEEE0A8651CDEAE6B7BCD99.tdx2?sequence=2.

²³ Definición elaborada a partir de http://catedu.es/matematicas_mundo/PROBLEMAS/problemas_semejanza_analogia.htm.

Debido a la complejidad del tema se hace necesario definir una serie de conceptos que se adoptaron para el presente trabajo de grado, los cuales son la base de pensamiento sobre lo que hacemos y lo que ello significa.

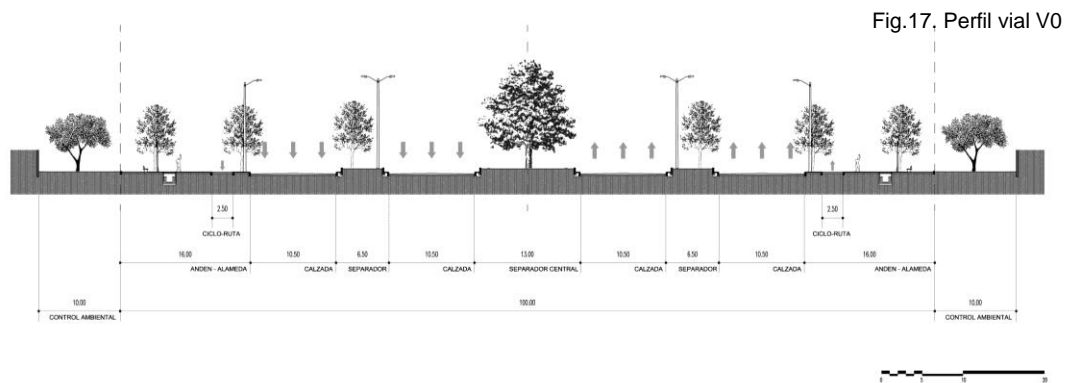
5. DETERMINANTES DE DISEÑO

En el siguiente capítulo se presentan los requerimientos y determinantes de la conceptualización para la elaboración de un puente peatonal en la ciudad de Bogotá.

5.1 DIAGNÓSTICO DEL LUGAR

Las características físicas requeridas del lugar son según lo dispone la normativa de la ciudad de Bogotá. Cumplir con las especificaciones de una vía V0, y V1, con flujo peatonal alto y continuo.

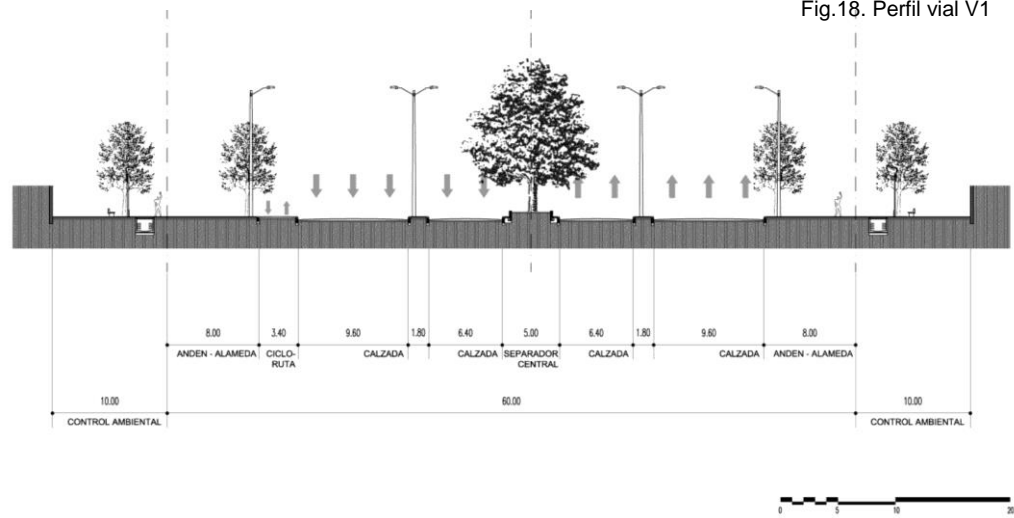
- La V0 cuenta con 100m en su totalidad de los cuales 10.0 m en cada borde corresponden al control ambiental, para el manejo paisajístico. Para la parte del andén-alameda son destinados 16.0 m que incluyen los 2.5 m de la ciclo ruta. Las calzadas tienen 10.50 m cada una de las cuatro, distanciadas por un separador central de 13.00 y un separador sencillo en los extremos de 6.5m.



http://www.idu.gov.co/web/guest/tramites_doc_especificacion

- El perfil de la vía V1 tiene en total 40.0m de los cuales cuenta con un control ambiental en ambos lados de 10.0 m, los siguientes 8.0 m corresponden al andén-alameda, la ciclo ruta tiene 3.40 m, las calzadas interiores que conforman la vía tienen 6.40 m, éstas se distancian gracias al separador central que tiene 5.00m y las calzadas de los bordes tienen 9.60 m.

Fig.18. Perfil vial V1



http://www.idu.gov.co/web/guest/tramites_doc_especificacion

- El perfil de la 26 con 68b- Bis se encuentra categorizada dentro de una vía V0 sin embargo tiene en total de 135 m de extremo a extremo, de los cuales 54 m son de vías, 62 m de separadores y 19 m de anden.

Fig.19. Perfil de la 26



Elaboración propia

6. NORMATIVA

Decreto 279 de 2003 Alcalde Mayor de Bogotá

Del siguiente decreto se toman los artículos que aplican para la elaboración del diseño estructural de un puente peatonal en la ciudad de Bogotá.

NORMA	ESCALA	DESCRIPCIÓN	APORTE
ARTICULO 3	DISTRITAL	Elemento básicos de los puentes peatonales: 1. Accesos y salidas que conectan el puente peatonal, por medio de escaleras, rampas o ascensores. 2. El enlace en si mismo, que es el elemento que comunica los accesos y salidas. 3. Los apoyos.	Factores con los cuales tienen que contar nuestro planteamiento estructural.
ARTICULO 4	DISTRITAL	Diseños del puente peatonal: Se tienen diseños de estos, definidos en La Cartilla De Puentes Peatonales, elaboradas por el I.D.U. De manera excepcional los interesados en construir puentes que no se acojan a estos diseños, podrán proponer ante el IDU un diseño con base en un estudio que lo justifique, siempre que cumplan con las normas definidas en el presente decreto.	Primer referente a analizar y las respectivas normas a tener en cuenta.
ARTICULO 5	DISTRITAL	Normas para el diseño y construcción de puentes peatonales: 1. Mantener libre las vías vehiculares existentes y previstas. 2. Deben diseñarse, construirse y adecuarse de tal manera que facilite la accesibilidad de las personas con movilidad reducida o cuya capacidad de orientación se encuentre disminuida por la edad, analfabetismo, limitación o enfermedad. 3. Se deben solucionar mediante estructuras livianas, desmontables, para facilitar su retiro o reubicación en caso de una eventual exigencia o necesidad del ordenamiento territorial. 4. El gálibo deberá ser mínimo de cinco metros. 5. El ancho mínimo útil de un puente peatonal será de 2.40 metros. 6. En el diseño del puente no podrán generarse espacios que impidan la visibilidad del peatón y volumetrías pesadas que reduzcan la seguridad ciudadana del sitio.	6 de las normas a tener en cuenta que aplican para el diseño estructural de un puente peatonal, respetando las estrategias y la infraestructura, para el mejoramiento, conservación y mantenimiento del mismo.

ARTICULO 9	DISTRITAL	<p>Competencias para autorizar la construcción de puentes peatonales: deberán ser autorizados por el Departamento Administrativo de Planeación Distrital, a partir del estudio de necesidad y factibilidad técnica. La factibilidad técnica se sustentará en:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La elevación del impacto urbano y de la seguridad ciudadana de la construcción propuesta. 2. La justificación con base en la necesidad de resolver flujos peatonales a través de altos volúmenes de tráfico vehicular y la coherencia de las obras propuestas con el POT y los instrumentos que lo desarrollan. 	Factores a tener en cuenta para que permitan el diseño estructural de un puente peatonal, los estudios, análisis y justificaciones del porqué, cómo y cuándo.
ARTICULO 14	DISTRITAL	<p>Condiciones para la construcción de puentes peatonales: Todo diseño y construcción de puentes peatonales debe garantizar la salubridad e integridad física de las personas y la estabilidad de los terrenos, edificaciones y elementos constitutivos del espacio público y privado en el que se desarrolla.</p>	Criterios para desarrollar el diseño según el plan de desarrollo vial para regularizar los niveles de movilidad, factibilidad técnica, impacto urbano y viabilidad del proyecto.

Este decreto nos presenta las disposiciones reglamentarias que actualmente son necesarios cubrir para poder desarrollar e implantar un puente peatonal en la ciudad de Bogotá, con el objetivo de garantizar seguridad, el cumplimiento de los requisitos de habitabilidad, la preservación de la ecología y demás normas relativas a las obras de zonas publicas.

7. PROPUESTA

7.1 Descripción del proceso

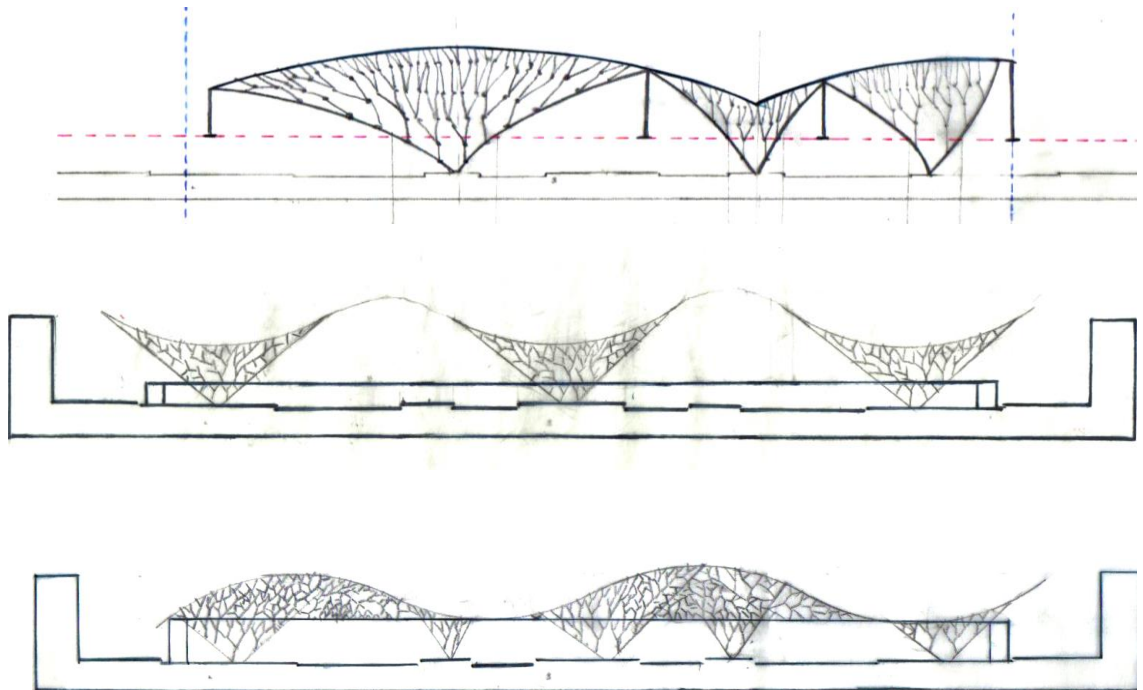
En el diseño y en el resultado de un puente peatonal inciden diversos factores, y debido a la complejidad del proyecto, intervienen una mayor cantidad de factores que condicionan el mismo.

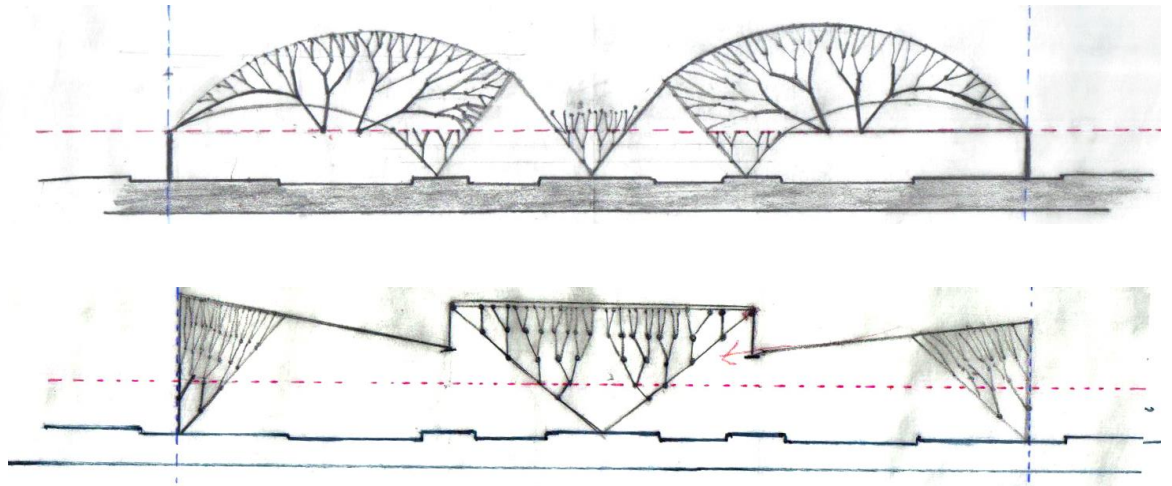
Planteado el problema técnico de cualquier puente que es vencer una luz, existen factores que son puntos de partida para el proyecto, se indica a continuación un listado de elementos a tener en cuenta:

1. Vencer luces de 136m, 100m y 60m
2. Altura entre el suelo y el tablero de 5m
3. Impacto visual bajo
4. Cumplimiento de la norma vigente según cada vía
5. El buen tránsito de los transeúntes y vehículos

Proceso de diseño

- ✓ Planteamiento de propuestas en función de los datos de partida.





- ✓ Selección de las alternativas técnicas básicas
- ✓ Anteproyecto.
- ✓ Proyecto. Definición del proyecto hasta un grado tal que sea funcional y eficiente

El puente como toda obra de Arquitectura, influirá sobre el entorno de su implantación. Tendrá directa incidencia sobre:

- ✓ *Urbanismo local*
- ✓ *Comercio, comunicaciones y toda otra actividad humana*
- ✓ *Medio ambiente.*

Debido a que un puente peatonal es una obra pública con el proyecto además de cumplir técnicamente con todos los requisitos de seguridad según la norma vigente en la ciudad de Bogotá y serviciabilidad, el proyecto cuenta con una estética de la estructura, incluida su relación con el medio físico, transformándose en más que un puente en un icono de la ciudad, como el puente de la Bahía de Sydney, el Golden Gate o el transbordador de La Boca.

Imagen 20. puente de la Bahía



<http://elcomercio.pe/turismo/1389935/noticia-emblematico-puente-bahia-sidney-cumplio-80-anos>

Imagen 21. Golden Gate



<http://www.citypictures1.com/San-Francisco-Pictures/Golden-Gate-Bridge-52-847-picture.htm>

Imagen 22. el transbordador



<http://latidobuenosaires.com/fotos/labocavueltaderochapuentetransbordadorbuenosairesargentina.html>

7.2 Propuesta y Evaluación

En este proyecto la propuesta radica en aprovechar las ventajas que brindan las estructuras arboriformes al optimizar su comportamiento frente a una luz a partir de la disminución de la distancia gracias a la ramificaciones de sus elementos, para resolver el problema de una mediana luz con una estructura liviana, segura y eficiente.

Desde el punto de vista técnico el problema de un puente es vencer una luz, entonces se busca ampliar y mejorar la posibilidad de enfrentarse a este problema de forma eficiente, en este caso con el menor volumen de material posible, sin restarle la seguridad y armonía en cuanto a imagen que como elemento que forma parte de la ciudad requiere.

Para esto se parte de la cantidad de material que se necesita con relación a cada esfuerzo (Ver imagen 23). Se analizan los 3 tipos de esfuerzos más típicos en una estructura la tracción, la compresión y la flexión.

Fig. 23. Cuadro de esfuerzos.

Esfuerzo	Factores que afectan la cantidad de material en el elemento.	Resultado
Tracción	Carga, área de la sección.	Poca cantidad de material.
Compresión	Carga, área e inercia de la sección y longitud de pandeo.	Más cantidad de material que la tracción.
Flexión	Carga, luz cubierta y área e inercia de la sección.	Mucha cantidad de material.

Cuadro tomado del libro: Marcel Antonio Maury. (2009) La esencia del árbol. Editorial Punto aparte

Fig.24. Tracción

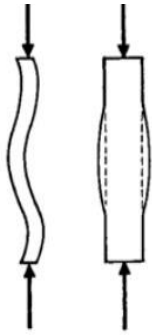


Tomadas de: I.E.S. Cástulo
Web Site. Departamento de
Tecnología, Antonio Huertas

Tracción (Imagen 24): Los elementos sometidos a tracción son aquellos en los cuales actúan fuerzas que tratan de estirar el elemento tendiendo a aumentar su longitud; Son los tensores los que mejor comportamiento tienen frente a este.

En cuanto al esfuerzo se refiere es el más eficiente hablando en términos de consumo de material, pues el que menos volumen consume, ya que lo que interviene es el área de sección total del cable, y la carga aplicada.

Fig.25. Compresión

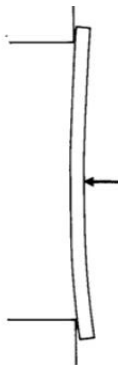


Tomadas de: I.E.S. Cástulo
Web Site. Departamento de
Tecnología, Antonio Huertas

Compresión (imagen 25): Los elementos sometidos a compresión son aquellos en los cuales las fuerzas tratan de comprimirlo haciendo que las partículas de un material se aproximen, tendiendo a disminuir su altura y así mismo a producir acortamientos.

En cuanto al consumo de material, este esfuerzo consume un poco más que la tracción porque en este interviene la carga, la inercia y área de la sección del elemento, y además la longitud de pandeo.

Fig6. Flexión.



Tomadas de: I.E.S. Cástulo
Web Site. Departamento de
Tecnología, Antonio Huertas

Flexión (imagen 26): Los elementos sometidos a flexión son aquellos en los cuáles las fuerzas tienden a curvarlos y por ende a deformarlos. Es una combinación de esfuerzos de compresión y tracción, ya que mientras la cara superior del elemento está sometida a flexión (En esta actúa la compresión) se acortan, la inferior (En la cual actúa la tracción) se alarga.

En cuanto al volumen de material que requiere después de la tracción y la compresión, los elementos que trabajan a son los que más cantidad de material demandan ya que implica controlar la carga, la luz y el área e inercia de la sección.

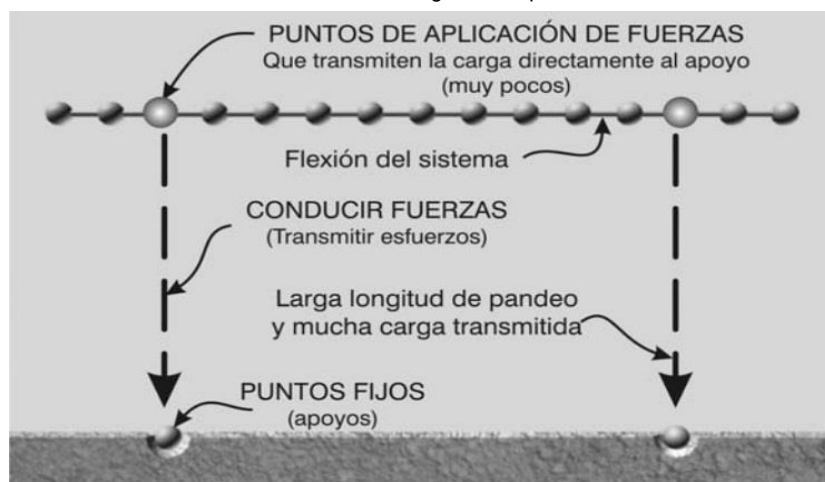
Los anteriores esfuerzos y los factores que intervienen en cada uno de ellos son los que condicionan el consumo de material que se necesita en una estructura para lograr compensarlos. Pero es en especial la flexión la que atrae la atención pues es uno de los que más material necesita y es por ende uno de los esfuerzos que más se debe controlar, y esto se logra atacando uno de los factores que intervienen en está y que más la afecta, que es la luz.

DEFINICIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

Según Frei Otto:

Una arboriforme es un sistema vertical de cargas, en el cual a menor número de puntos de aplicación de fuerza que trasmite la carga directamente al apoyo, la cubierta, como un sistema estructural, estará sometida a flexión; Si la distancia entre estos puntos aumenta, la luz aumenta y por tanto la flexión también. (Ver imagen 27)

Fig.27. Comportamiento de una arboriforme

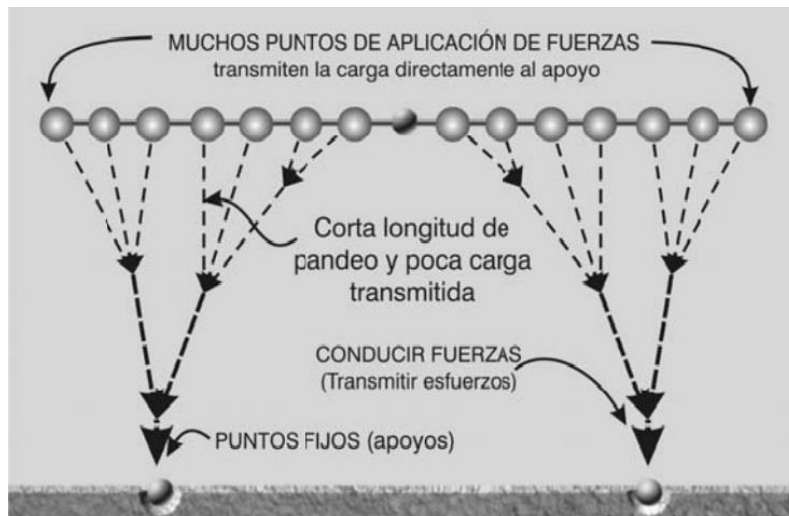


tomadas del libro: Marcel Antonio Maury. (2009) La esencia del árbol. Editorial Punto aparte

Si en el elemento el número de aplicación de fuerzas que transmiten la carga directamente al apoyo aumenta, la distancia entre ellos disminuye, y por tanto la flexión de la cubierta como sistema disminuye.²⁴ (Ver imagen 28)

²⁴ Marcel Antonio Maury. (2009) La esencia del árbol. Editorial Punto aparte

Fig.28. Comportamiento de una arboriforme



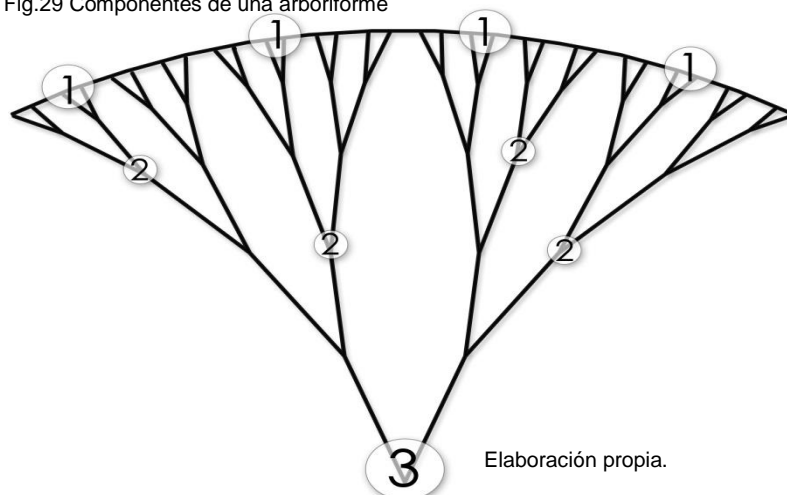
tomadas del libro: Marcel Antonio Maury. (2009) La esencia del árbol. Editorial Punto aparte

Este tipo de estructuras están compuestas por dos elementos principales: Las barras y los Nodos. Que siguen un orden jerárquico que depende de su ubicación en el sistema, así:

Los nodos son los encargados de transmitir las cargas hacia las barras, y de conectar unas con otras, manteniendo una continuidad, para que las cargas bajen de manera axial (1 en Imagen 29). Pero también existen algunos nodos que solo están conectados en un extremo a las barras, pues del otro están sujetos a una superficie rígida en la parte superior (2 en Imagen 29), y otros a un punto fijo en la parte inferior (3 en Imagen 29). En cualquiera de los casos son

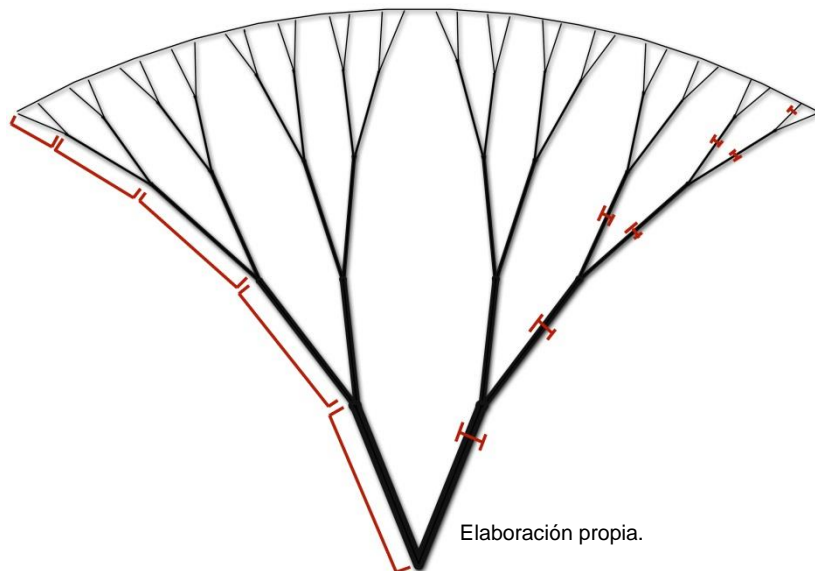
los encargados de la transferencia de las cargas, que es la que le brinda continuidad y estabilidad a la estructura.

Fig.29 Componentes de una arboriforme



Las barras constituyen una parte importante de las estructuras arboriformes, pues son las que permiten llevar las cargas hacia los apoyos, ayudadas de la función de conectores que cumplen los nodos. Como se menciona anteriormente éstas cumplen un orden jerárquico que determinan que los diámetros de cada barra varíen de la siguiente manera: Las barras de la parte inferior que están más cerca al suelo son las que mayor diámetro tienen ya que en estas confluyen todas las cargas que llegan de la parte superior y además el número de ramificaciones en este punto que recibe las cargas es menor. A medida que las barras ascienden en el sistema hasta llegar a la superficie rígida, su diámetro disminuye, entonces en las barras de la parte superior es menor a comparación de las primeras, pues el sistema cuenta con más ramificaciones que exigen un esfuerzo menor en cada barra. (Ver imagen 30)

Fig.30. Componentes de una arboriforme

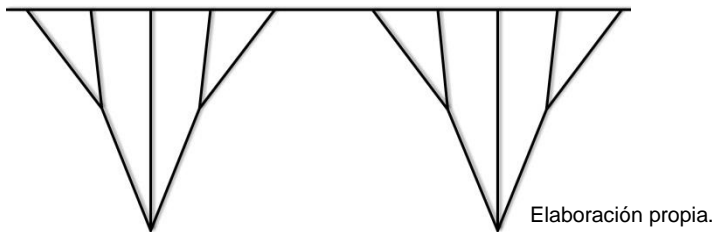


Esta teoría se aplicaría a la estructura de un puente de la siguiente manera:

HIPOTESIS DE DISEÑO

Según Frei Otto una arboriforme busca reducir la luz a partir de la ramificación de los elementos, disminuyendo la longitud de pandeo de esta manera. (Ver imagen 31)

Fig.31.



- Este es un sistema con forma de árbol el cual bifurca sus elementos hasta conducir los esfuerzos a los apoyos, que recibe las cargas de varios puntos en la cubierta y los conduce a un número menor de puntos.
- Si el número de puntos de aplicación de fuerzas que transmiten la carga directamente al apoyo aumenta, la distancia entre ellos disminuye, y por tanto la flexión de la cubierta disminuye.

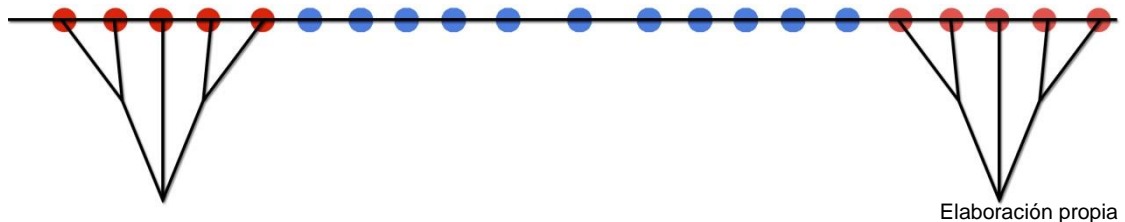
Esta es una manera de reducir las luces, pero como el tráfico vehicular no lo permite porque no pueden pasar los carros sin tocar la estructura, se separan los “árboles” (Ver imagen 32).

Fig.32. .



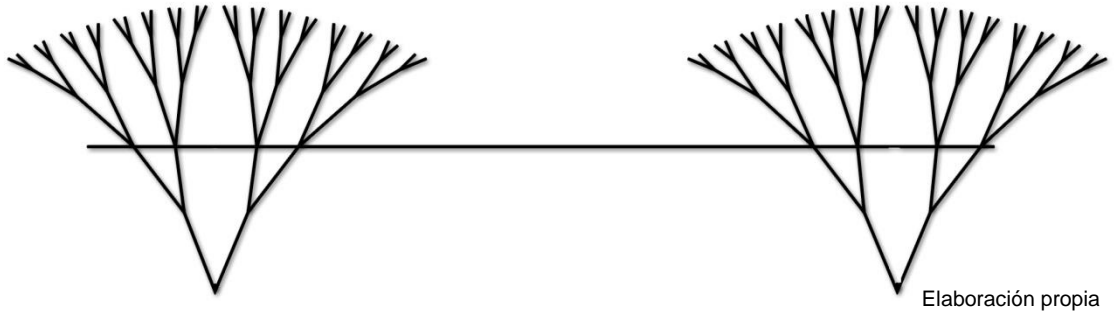
De esta forma ya nos quedan algunos puntos resueltos por las arboriformes (Puntos en rojo Imagen 33), pero como resolver estos puntos (Puntos en azul Imagen 33) los cuales las arboriformes no alcanzan a coger?

Fig.33.



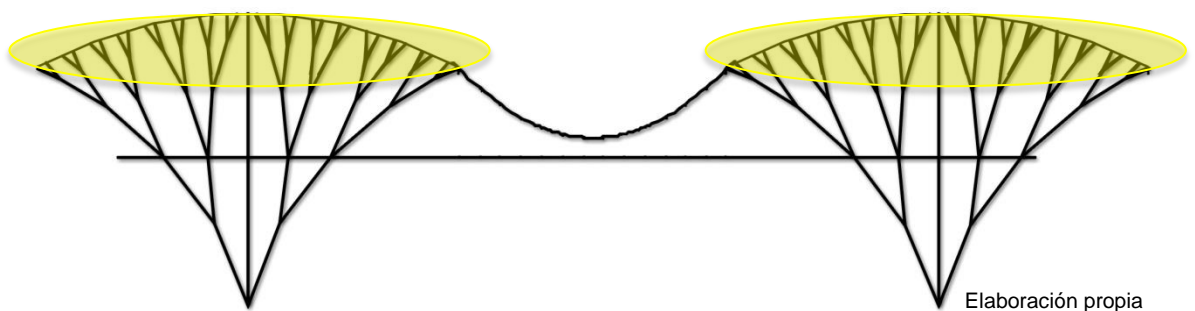
Como los carros no permiten disponer de otro modulo , se soluciona desde arriba, descolgando un cable. En cuyo caso lo se hace es extender las arboriformes (Ver imagen 34)

Fig.34.



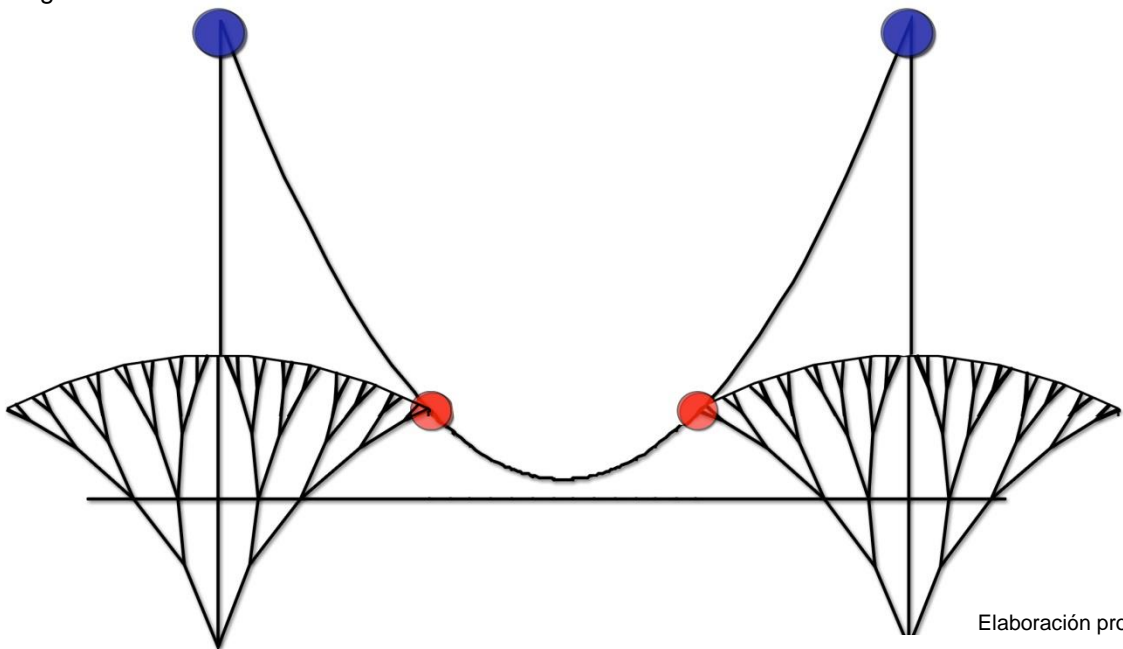
Añadiendo una superficie rígida en la parte superior (Ver círculos amarillos imagen 35) para otorgarle mas estabilidad a los módulos y que a partir de esta área rígida se descuelgue un cable y funcionen como un solo elemento (ver imagen 35) además con una ventaja.

Fig.35.



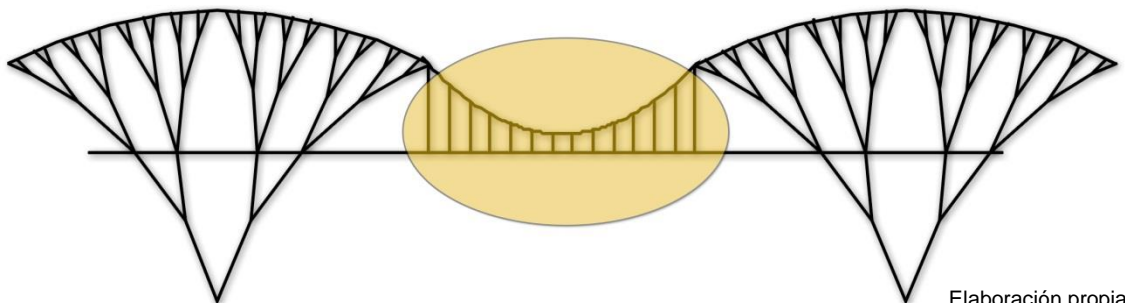
Haciendo una comparación con mástiles, los cuales son utilizados frecuentemente cuando se desea hacer un puente colgante, se observa que en ambos casos (con mástiles y con arboriformes) la catenaria del cable esta descrita por una parábola, pero el requerimiento de altura dependiendo con que se construya es diferente; Con mástiles el requerimiento de altura es mayor para alcanzar el ángulo apropiado del cable (Ver puntos con color azul de la imagen 36), mientras que con las arboriformes se logra ese ángulo con una menor altura, sujetándola desde estos puntos (Ver puntos rojos de la imagen 36)

Fig.36.



Para reducir el momento flector de esta área (ver círculo amarillo imagen 37) se descuelgan cables que están repartidos cada 2.20m de la parábola del cable que une los dos módulos y que ya describimos anteriormente, otorgándole estabilidad en esta área del puente (Ver imagen 37)

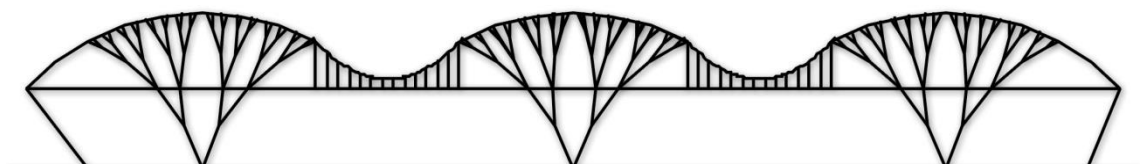
Fug.37.



Aquí ya queda disminuida la luz en luces más pequeñas y por tanto hipotéticamente se reduce el momento flector y por ende el volumen de material, evidenciando el correcto funcionamiento de la hipótesis planteada.

Posteriormente de saber que las arboriformes y los cables logran una buena estabilidad, se replica los pasos anteriormente mencionados, para lograr adecuar la estructura al perfil vial mas largo, el V0 (ver imagen 38) que cuenta con 100 metros de ancho, y así a partir de este ir desplazando los módulos dependiendo el ancho de cada vía para ajustarlos a las vías V1 con 80 m y al perfil de la 26 con 68b- Bis con 136 m.

Fiug.38.



7.3 Comprobación de la Hipótesis

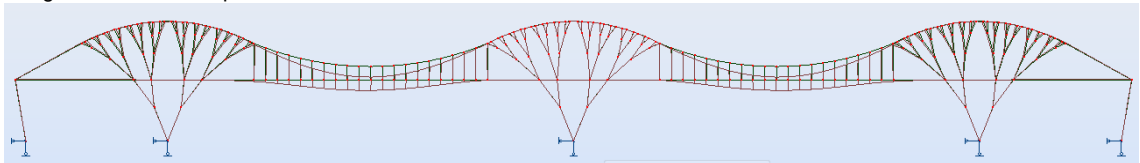
Análisis estructural

Intuir el comportamiento estructural no es obvio, por lo que se requiere hacer una serie de demostraciones, sometiendo el modelo a un cálculo estructural en un software llamado Robot Structural Analysis el cual simula las reacciones de las estructuras, frente a cargas aplicadas vertical y horizontalmente, de una manera eficaz y didáctica. Además se hace un paralelo con un pórtico convencional bajo las mismas condiciones, para tener un referente al momento de interpretar los resultados. Las cargas aplicadas en estos modelos son tomadas de la norma sismo resistente (NSR 2010) para graderías que exige llevar a cabo el cálculo estructural con 500kg

El primer factor que se evalúa es la deformación que sufren las estructuras, aplicando el caso de carga más crítico, para tener un margen de error con respecto a los casos intermedios. El resultado es similar en ambos modelos, en los que se presenta en la parte del tablero que está entre los apoyos, como se muestra en las imágenes, en las que el programa exagera la deriva para que la deformación sea más clara. (Ver imagen 39 y 40).

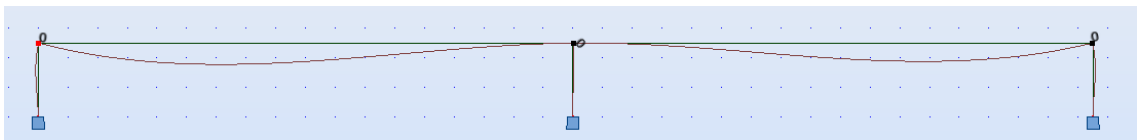
El comportamiento de las estructuras fluctúa debido a los elementos por los que está compuesta, mientras que el modelo arboriforme ramifica sus elementos y descuelga cables, para reducir una luz en luces más pequeñas, el pórtico lo hace aumentando considerablemente la sección del tablero, y por tanto la cantidad de material.

Fig.39. Deformación puente arboriforme



Elaboración propia en Robot

Fig.40. Deformación pórtico.

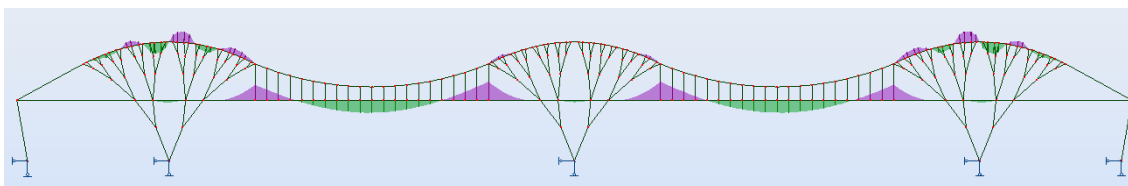


Elaboración propia en Robot

La flexión es uno de los esfuerzos que más afecta el consumo de material por tal motivo es el que más atención requiere en esta exploración. Se observa que el momento flector máximo en el puente arboriforme es de 41.48KNm en el tablero ubicado entre los apoyos (ver imagen 41), comparado con el pórtico en el cuál el máximo, se da entre apoyos por la luz tan grande que se tiene es de

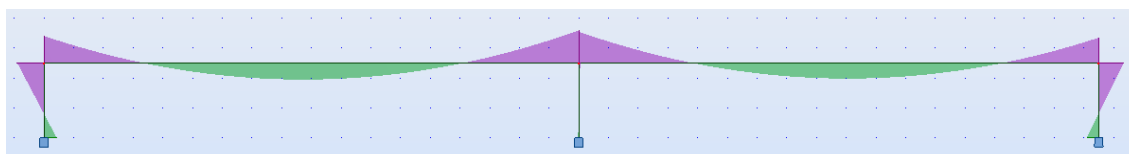
433,06KNm (ver imagen 42) aumentando el momento flector máximo, lo que produce una gran ventaja para el ahorro de material en el modelo arboriforme.

Fig.41.Flexión puente arboriforme



Elaboración propia en Robot

Fig.42.Flexión pórtico

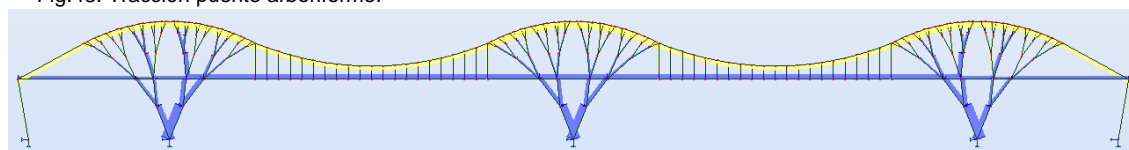


Elaboración propia en Robot

En el comportamiento estructural de los puentes intervienen varios tipos de esfuerzos, como la tracción (En amarillo imagen 43) en los cables tanto en la parte superior, como en la que sostienen el tablero que se encuentran repartidos cada 2.20m, así como también en dos de las ramificaciones de los módulos de los extremos que debido a su simetría, la mitad de las barras trabaja a compresión y la otra mitad a tracción.

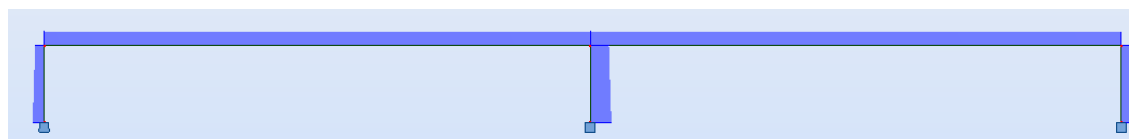
La compresión (ver en azul imagen 44) se encuentra repartida a lo largo del tablero, en todo el modulo central y en los módulos extremos está presente en la parte inferior del árbol y en algunas ramas de la parte superior. A diferencia del pórtico (ver imagen 45) en que todos sus elementos trabajan a compresión pura.

Fig.43. Tracción puente arboriforme.



Elaboración propia en Robot

Fig.44. Tracción pórtico.



Elaboración propia en Robot

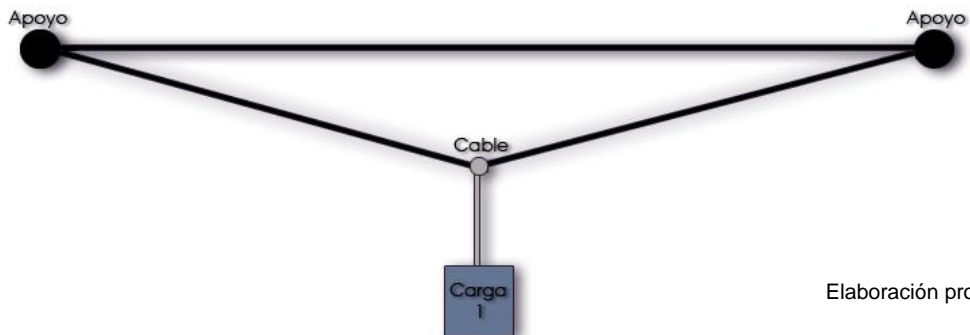
Gracias al estudio estructural anteriormente señalado se confirma la hipótesis de que al reducir una luz en luces más pequeñas, el momento flector también se reduce disminuyendo significativamente el volumen de material.

7.4 Estructuras colgantes en el proyecto

Este tipo de estructuras no tienen rigidez a la flexión debido a que su sección es pequeña en relación con su longitud, y de acuerdo a la carga que se aplique el cable cambia la forma en que se deforma. Engel denominó este sistema como Forma Activa ya que se refiere a estructuras que actúan esencialmente mediante su forma material y es la carga la que se transforma en tracción.

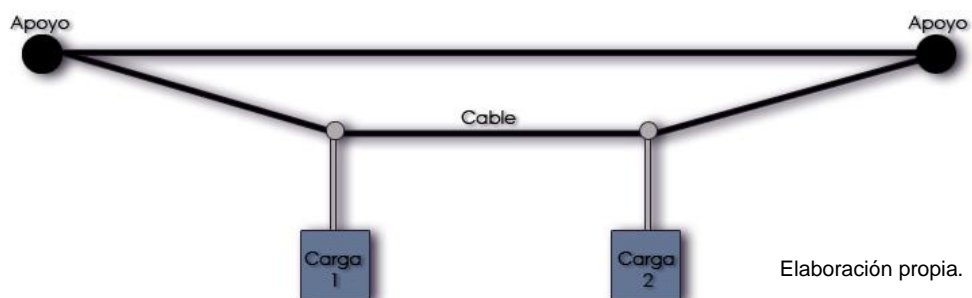
Una de las principales características de los sistemas estructurales de forma activa es que estos vuelven a guiar las fuerzas externas por medio de simples tensiones normales: en el cable por medio de la tracción, que es su esfuerzo fundamental, que hace del sistema muy económico para cubrir luces ya que es uno de los esfuerzos que menor volumen de material consume teniendo en cuenta la relación peso/luz.

Fig.45 Características estructurales de forma activa.



Debido a que su sección es reducida en relación con su longitud, el cable no puede resistir la flexión, así que modifica su forma para cada nueva carga que se agregue. Por ejemplo con dos cargas idénticas con una ubicación simétrica cambia su forma a tres tramos rectos, si se aumenta el numero de cargas el cable toma nuevas formas siempre en equilibrio y en tramos rectos entre las cargas.

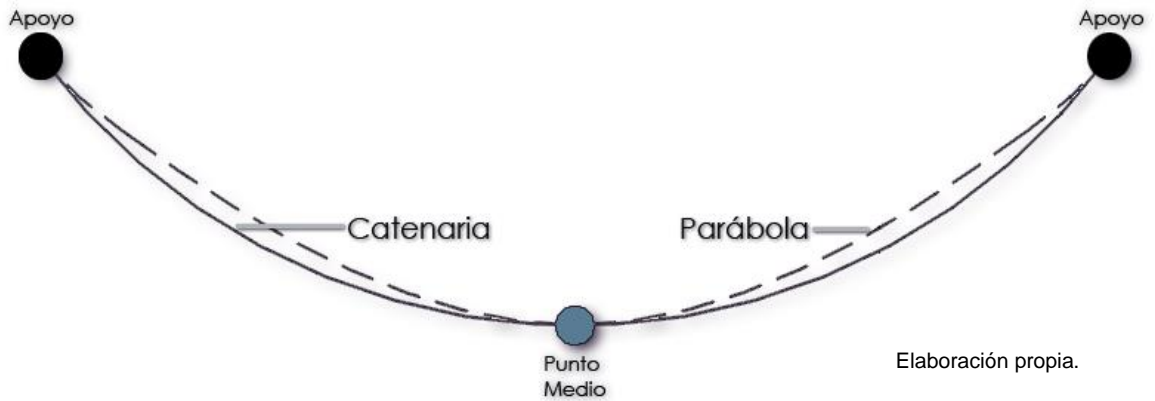
Fig.46 Características estructurales de forma activa.



Cuando se aplican dos o más fuerzas en el cable, éste adopta la forma de una funicular. Y a medida que el número de cargas aumenta, la curva funicular se segmenta en una mayor cantidad de tramos mas pequeños y se aproxima así a la forma de una curva.

Pero cuándo las cargas se apliquen y distribuyan uniformemente a lo largo del cable, la forma que adopta el cable es de una curva catenaria. En ambos casos las curvas coinciden en tres puntos: los dos puntos de apoyo del cable y en el punto medio.

Fig.47 Características estructurales de forma activa.

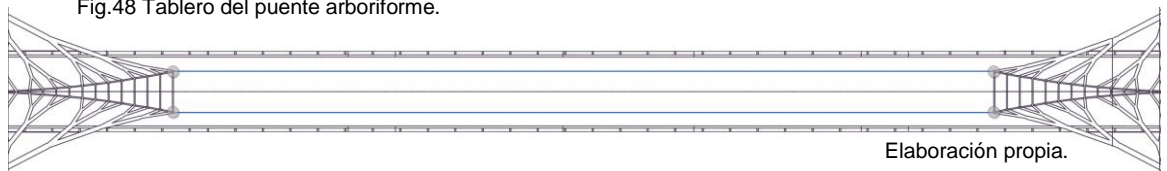


En conclusión en el sistema de cables la forma responde a las cargas aplicadas, y asimismo cualquier cambio en las condiciones de carga afecta la forma, también carecen de rigidez, y una ventaja es que las cargas pueden ser muy grandes en relación al peso propio pero no es una estructura auto portante.

En nuestro proyecto de grado este sistema esta presente y combinado con estructuras arboriformes aprovechando las ventajas que cada uno brinda para la disminución de las luces y para obtener una solución integral.

En este, el tablero en las partes intermedias entre los módulos se encuentra suspendido mediante cables de acero dispuestos en sentido vertical que se desprenden de la curva funicular del cable que une los dos módulos y que está descrita por una parábola ya que la carga esta repartida a lo largo del cable que son es el encargado de transmitir una parte importante de la carga que tiene que soportar la estructura.

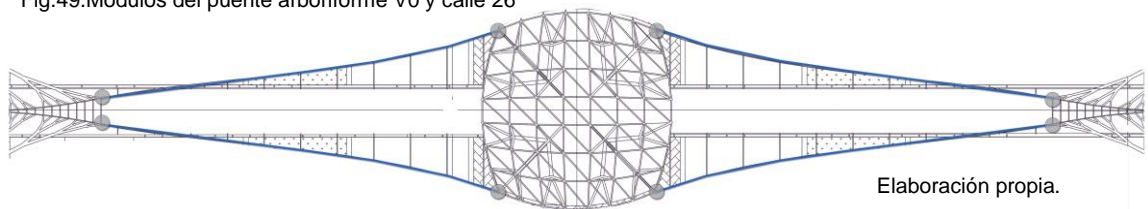
Fig.48 Tablero del puente arboriforme.



Los cables están sometidos principalmente a tracción por lo que el tablero no trabaja de manera significativa, lo anterior puede comprobarse en el prototipo de vía V1 en el que los cables son paralelos respecto al punto medio del tablero y los apoyos de origen y apoyos de llegada están situados en los mismos puntos y a la misma distancia entre sí.

Mientras que en el perfil de vía V0 y Calle 26 al sujetarse desde módulo espacial central hasta el módulo plano los cables deben cambiar su trayectoria y en un extremo se abren para apoyarse en el módulo arboriforme espacial y en otro se cierran para apoyarse del módulo arboriforme plano, en este caso aún siguen trabajando a tracción, pero esto implica que el comportamiento del tablero puede variar y puede trabajar a compresión en algunos de sus segmentos.

Fig.49. Módulos del puente arboriforme V0 y calle 26



El cable en cada uno de los casos fue calculado de manera independiente con la ayuda de un software llamado SmartForm que simula los fenómenos físicos.

Para obtener la curva funicular parabólica fue necesario primero determinar los apoyos en el modelo (Ver Color amarillo) de los cuáles se vale el programa para determinar donde están cargas (Ver Color Violeta), posteriormente se deforma en el sentido en que se aplicaron.

Fig.50. SmartForm

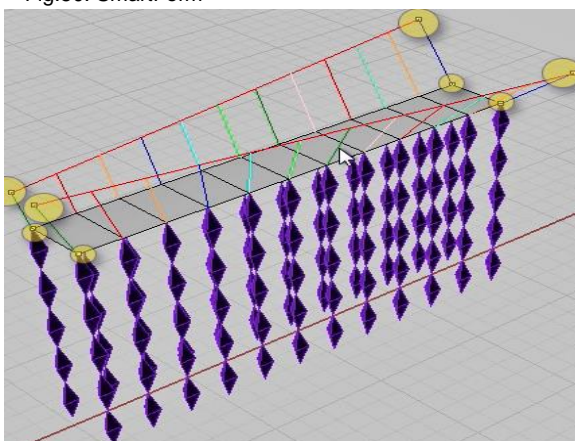
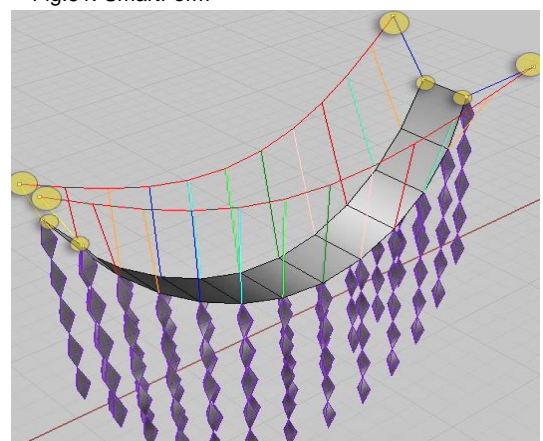
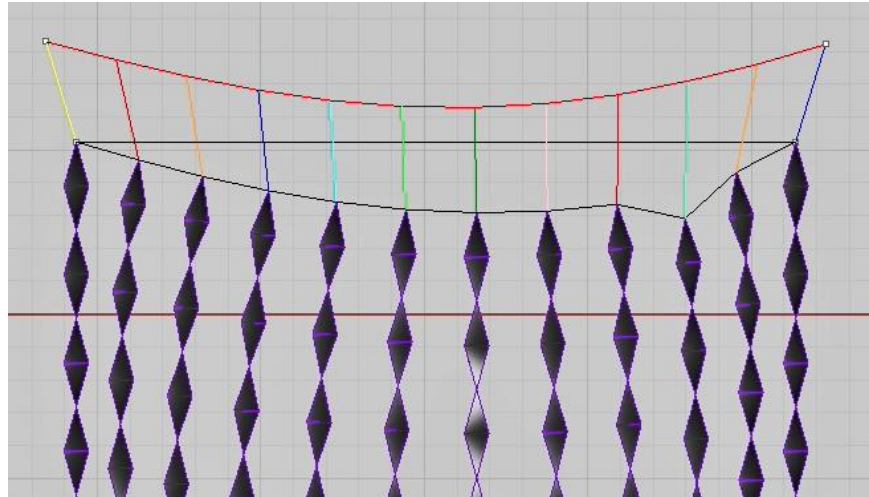


Fig.51. SmartForm



En cada uno de los elementos la rigidez está por defecto en 1 por lo que es necesario asegurarse de que en todos se encuentre en 100 para lograr con realismo el comportamiento del material, ya que son cables en acero. En este punto ya se presenta una curva en el cable, pero las cargas están deformando el tablero por debajo de la línea horizontal:

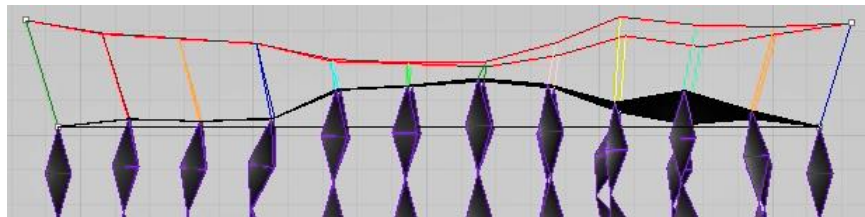
Fig.52. SmartForm



Elaboración propia.

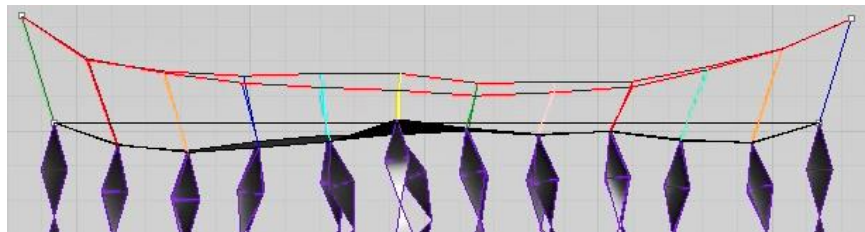
Para lograr poner en sentido lineal el tablero hace falta determinar la longitud de cada uno de los cables con respecto a la horizontal para que las cargas estén uniformemente repartidas, pero en algunos casos mientras se cambia la longitud en un extremo, el otro puede desestabilizarse como se observa:

Fig.53. SmartForm



Elaboración propia.

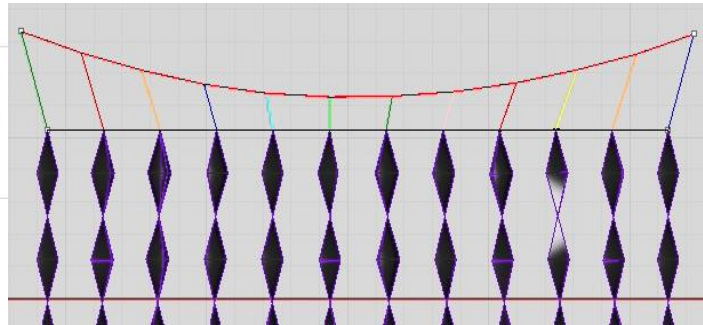
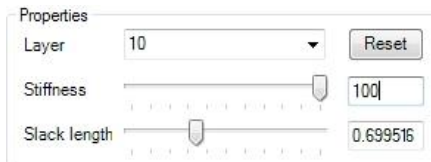
Fig.54. SmartForm



Elaboración propia.

Cuando el tablero esta más cerca de la línea horizontal, se hace necesario aumentar la longitud de los cables transformando el valor de manera manual aumentando y disminuyendo los números, teniendo hasta seis dígitos decimales, esto asegura que el margen de error sobre la horizontal sea mínimo.

Fig.55. SmartForm

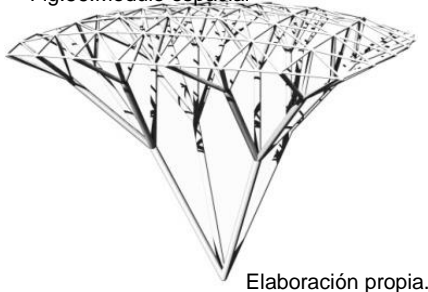


Elaboración propia.

7.5 Descripción

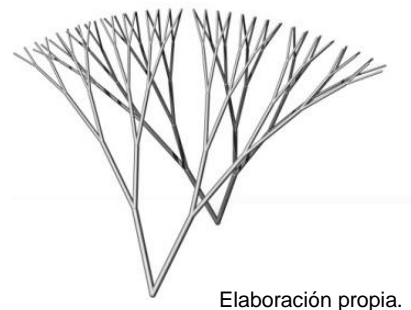
En base de los resultados anteriores, se proponen dos prototipos de módulos uno espacial en el centro (Ver imagen 56) que cuenta con 3 ramificaciones, y un entramado de tubos de forma ovalada como cubierta la cual se apoya en 64 barras, y dos planos unidos por medio de cables en cada extremo, cada una de las partes que conforman este módulo cuenta con 4 ramificaciones y este par con una cubierta rígida que se encuentra ubicada en la parte superior del módulo conformado por dos arboriformes planas (Ver imagen 57) en la cual se apoya en 32 barras que reparte las cargas a una menor cantidad de puntos hasta llegar a los apoyos. Estos módulos se encuentran separados a lo largo del tablero, pero estructuralmente trabajan de manera conjunta ya que están unidos por medio de cables.

Fig.56.Modulo espacial



Elaboración propia.

Fig.57.Modulos planos.



Elaboración propia.

La actividad de un puente es la circulación de las personas al generarse el módulo central permite crear un espacio, que no solo es de transición, sino también un lugar de permanencia que permite tener otro tipo de actividades dependiendo las necesidades de cada vía y el entorno urbano, como por

ejemplo una caseta de información, un mirador, un comercio controlado, un café, entre otras cosas que permiten que el puente sea más que un puente un ordenador en la ciudad.

Se obtienen tres prototipos de puentes para diferentes perfiles viales (26 con 68B- Bis 136 m ,V0 100m, V1 60m) según la manipulación de la disposición de los módulos en el tablero (Ver imagen 58, 59 y 60)

Fig.58. Perfil de la calle 26 con 68b- Bis



Elaboración propia.

Fig.59. Perfil vial V0



Elaboración propia.

Fig.60. Perfil vial V1.



Elaboración propia.

Volviéndose un referente arquitectónico al ser un elemento iconográfico que hace parte de la ciudad, además debido a su forma se hace una analogía con

la imagen ambiental de un árbol que en contenido tiene que ver con la reducción de material y en figura con la expresión de una imagen

Fig.61. Espacialidad puente arboriforme.

Fig.62. Espacialidad puente arboriforme.



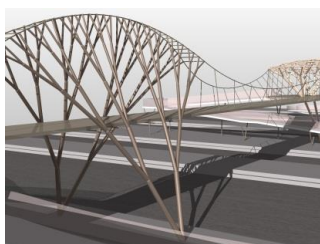
Elaboración propia.

Elaboración propia.

Al tener este proyecto de grado el propósito de proyectar técnica y funcionalmente el diseño de un puente peatonal para ampliar el marco de posibilidades explorando el potencial de la tipología arboriforme se hace evidente la necesidad de partir de la técnica y ponerla al servicio de la arquitectura.

Para asegurar la comprensión de lo que se quiere lograr en general en cuanto a contenido se refiere, se emplea una analogía que aclara y permite de forma inteligible que sea asimilada ya que cuando se lleva un concepto al nivel de un problema técnico se puede llegar a convertir en una solución simbólica. Es decir, en contenido tiene implícito la disminución del volumen de material (Imagen 63) y en cuanto a figura tiene que ver con la expresión ambiental de un árbol (imagen 64).

Fig.63 Estructura arboriforme



Elaboración propia.

Fig.64 Expresión de un arbol



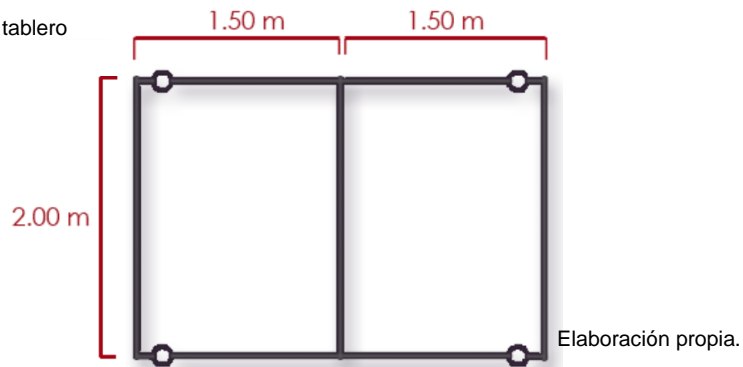
<http://www.geograph.org.uk/photo/158951>

7.6 Modulación

Ya que uno de los objetivos del proyecto es que sea desmontable, con posibilidad de ampliación y reubicación se lleva a cabo la modulación de los elementos que conforman el puente para así darle esta característica.

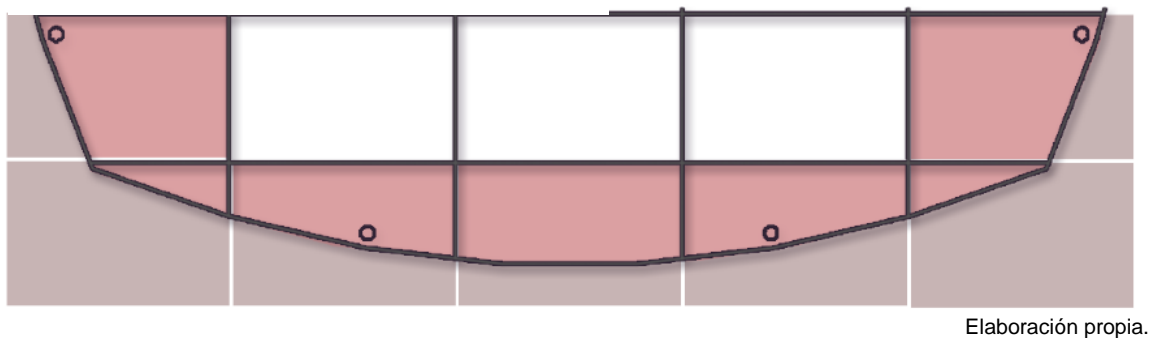
La mayoría de los módulos que conforman el tablero son rectangulares y tienen dimensiones de 2.00mx1.50m y en la parte octogonal del tablero cada par cubre el total del ancho del tablero. (Ver imagen 65)

Fig.65 Modulo tablero



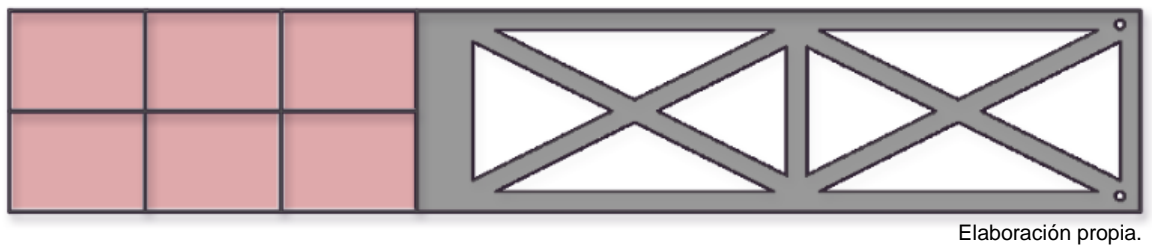
En la parte central del tablero que aparece en el prototipo de la Calle 26 y la V0, la mitad de esta conformada por los mismos módulos rectangulares y la otra mitad por módulos rectangulares que fueron modificados para conseguir adaptarse a la forma de esta sección del tablero. (Ver imagen 66)

Fig.66 Modulo en la parte central del tablero.



En el perfil de vía V1, el tablero es lineal en su totalidad y lo conforman 26 pares de módulos rectangulares. En sus extremos este perfil remata con perfiles en equis a la vista que primero se elimina la carga viva presente en este sector y segundo otorga estabilidad al sistema. (Ver imagen 67)

Fig.67 Extremo del tablero arboriforme.



La modulación básicamente puede dividirse en tres parte fundamentales que pueden transformarse (Adicionar o extraer) para armar un perfil de vía V1, V0 o Calle 26 ya que los tres casos de vía tienen dimensiones pares. La primera es la parte de las equis a la vista presente en todos los prototipos con excepción del perfil de la Calle 26 en el cuál por decisiones de diseño solo esta presente en uno de sus extremos.

La segunda es la parte lineal del tablero de la cuál para:

- Transformar un Prototipo vial de la calle 26 en una V0 es necesario extraer del lado derecho del modulo central 8 pares de módulos (Ver imagen 68) y del lado izquierdo 13 pares de módulos. (Ver imagen 69)

Fig.68. Módulos para extraer y convertirse en un V0

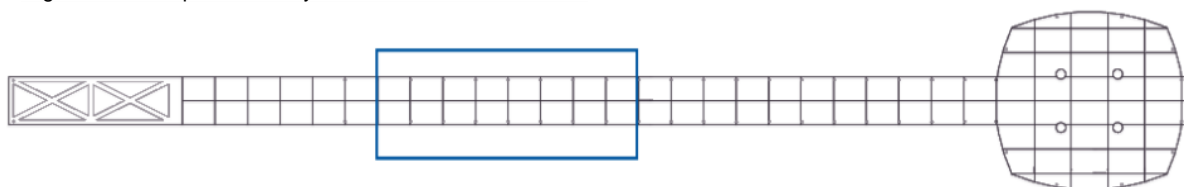
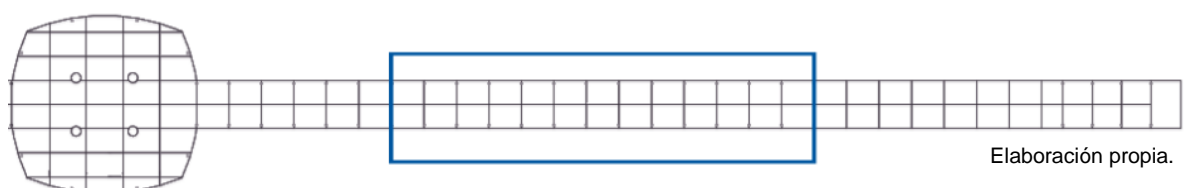
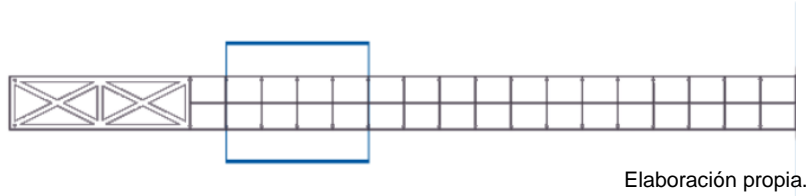


Fig.69. Módulos para extraer y convertirse en un V0



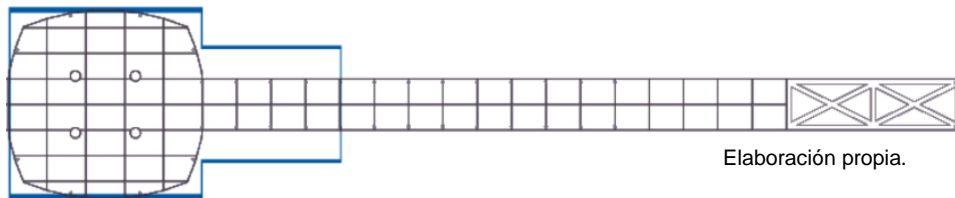
- Transformar un Prototipo vial V0 en un Prototipo vial V1 es necesario extraer del lado derecho de la parte central 4 pares de módulos. (Ver imagen 70)

Fig.70.modulación para extraer y convertir una V0 en una V1



Además se anula la parte central del tablero que rompe su linealidad y en el lado derecho de este se quitan también 4 pares de módulos, posteriormente de unen las partes resultantes del tablero. (Ver imagen 71)

Fig.71.modulación para extraer y convertir una V0 en una V1

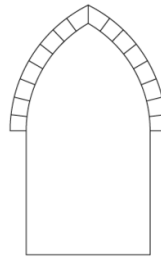


El tercer y último elemento que hace parte de la modulación del puente se refiere a la sección central del tablero en el que se ensancha que solo esta presente en el prototipo de Vía de la Calle 26 después del Par de módulos número 25. Y en el prototipo de vía V0 ubicado exactamente en la mitad de los 32 pares de módulos que configuran este modelo.

7.7 ANALOGÍA

Las limitaciones en cuanto a materiales de construcción que existían en el medioevo, dieron pie para explorar nuevas formas de optimizar la utilización de la mampostería, de la cual su uso de había extendido para solucionar el problema de cubrir grandes y medianas luces. Esta búsqueda implicó un desarrollo técnico que dio paso al arco ojival que es un objeto simbólico de la arquitectura que nace de la técnica, ya que está pensado gracias a su verticalidad para reducir los empujes laterales permitiendo gracias a la disposición de sus elementos cubrir mayores luces que los arcos convencionales usados antes de su descubrimiento. Permitiendo otorgarle un plus a la arquitectura y poniéndola al servicio de esta, como se puede observar este arco es parte de la imagen representativa en las catedrales góticas de este periodo. (Ver imagen 72 y 73)

Fig.72..Arco ojival.



https://es.wikipedia.org/wiki/Arco_apuntado

Fig.74.Abstracción de un árbol



http://www.freepik.es/vector-gratis/vectorial-abstracto-arbol_334022.htm

Fig.73. Catedral Gótica



<http://danir1342.blogspot.com/2012/04/catedral-gotica-de-leon.html>

Fig.75. Puente arboriforme



https://www.google.com.co/search?q=puente+arboriforme&bav=on.2,or.r_qf.&bvm=bv.49405654,d.dmg,pv.xjs.s.en_US.QXiTEk6XjhM.O&biw

Esto es lo mismo que se quiere lograr con este trabajo de grado, partir desde la parte técnica, desde el problema de lograr *más* (eficiencia, seguridad y belleza estructural) con *menos* (Optimización de los recursos: Volumen de material) con estas estructuras arboriformes, las cuales se busca ponerlas al servicio de la arquitectura actual ampliando las posibilidades de un diseño estructural para puentes peatonales, que vayan más allá de estructuras que cumplen la función, que sean más que un puente y se conviertan en un referente iconográfico que contribuya a mejorar la imagen de ciudad. (Ver imagen 74 y 75)

8. CONCLUSIONES

- Las estrategias formuladas para la comprobación de la hipótesis de resolver las medianas luces disminuyendo el momento flector se resuelven a partir de la teoría de Frei Otto el cual afirma que menor número de puntos de aplicación de fuerza que transmita la carga directamente al apoyo, la cubierta, como un sistema estructural, estará sometida a flexión; Si la distancia entre estos puntos aumenta, la luz aumenta y por tanto la flexión también. Al aplicar esta teoría a la solución de los prototipos de puentes peatonales se dividen las luces de los diferentes tableros, con la ayuda tanto de las estructuras arboriformes como de los cables, dando como resultado la disminución del momento flector.
- Se amplía el marco de posibilidades explorando el potencial de la tipología arboriforme se hace evidente la necesidad de partir de la técnica y ponerla al servicio de la arquitectura que tiene como objetivo proyectar un puente peatonal que en contenido tiene que ver con la disminución del volumen de material y en cuanto a figura con la expresión ambiental de un árbol que da como resultado un nuevo perfil a la ciudad.
- Las vías V0, V1 y calle 26 son resueltas con la modulación del tablero de esta forma se obtiene la adaptabilidad de este tipo de estructuras a los diferentes perfiles viales, cumpliendo el objetivo general que tiene que cumplir con las características de ser liviano, eficiente, desmontable, y con posibilidad de ampliación.

9. BIBLIOGRAFÍA

BALMOND, Cecil. Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea. Madrid: 2007. Disponible online: http://oa.upm.es/910/1/Alejandro_Bernabeu_Larena.pdf.

MAURY, Marcel Antonio. La esencia del árbol. Bogota: Punto aparte, Universidad Nacional de Colombia, 2009.

MALMANGER, Nelly: "80 años de Frei Otto", Boletín de información técnica N° 237, Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera. Se encuentra en: http://www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo_4992_23325.pdf octubre 2011

GÓMEZ JÁUREGUI, Valentín : "Tensegrity Structures and their Application to Architecture", Queen's University Se encuentra en: http://www.tensegridad.es/Publications/MSc_Thesis-Tensegrity_Structures_and_their_Application_to_Architecture_by_GOMEZ-JAUREGUI.pdf Octubre 2011.

Grupo de trabajo Universidad Nacional de Rosario, Monografía de Análisis de autores, Frei Otto. Rosario: 2010. Se encuentra online en http://www.fceia.unr.edu.ar/darquitectonico/darquitectonico/data/pdf/Frei_Otto.pdf.

Generalidades sobre estructuras. 2007 Disponible online http://www.fceia.unr.edu.ar/darquitectonico/darquitectonico/data/pdf/Frei_Otto.pdf.

SINOSIAIN, Javier. Bio-Architecture. Mexico: Architectural Press Publ. 2003.

SONGEL, Juan María Una conversación con Frei Otto, Alemania: GG, 2004.

CONRAD, Ronald, Frei Otto: Structures. Gustavo Gili, Alemania: 1965

PEARCE, Peter. Structure in Nature is a Strategy for Design. Library of congress cataloging in publication Data. 1990.

Definición construida a partir de “Definición de estructuras” disponible online:
<http://www.arqhys.com/casas/estructuras-definicion.html>.

Definición elaborada a partir wikipedia disponible online:
<http://es.wikipedia.org/wiki/Empuje>.

Definición elaborada a partir de
<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/5000155/lecciones/lec1>.

Definición elaborada a partir wikipedia disponible online:
<http://es.wikipedia.org/wiki/Empujem>.

Definición elaborada a partir del Diccionario de arquitectura y construcción,
disponible online: <http://www.parro.com.ar/definicion-de-curva+funicular>.

Definición elaborada a partir de
<http://docente.ucol.mx/grios/aritmetica/razon%20y%20proporcion.htm>.

Definición elaborada a partir de “la caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos”, disponible online:
http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/1774/01.MGB_INTRODUCCION.pdf;jsessionid=3E25A2876BEEE0A8651CDEAE6B7BCD99.tdx2?sequence=2.

Definición elaborada a partir de
http://catedu.es/matematicas_mundo/PROBLEMAS/problemas_ semejanza_ analogia.htm.

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 9 <http://www.dezeen.com/2009/12/07/the-tote-by-serie-architects/>

Imagen 10 <http://saberlibre.net/mallorcaweb/rene/akademy.html>

Imagen 11 http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_colgante_de_Menai

Imagen 12 <http://www.minube.com/rincon/el-puente-de-hammersmith-a66763>

Imagen 13 <http://www.furgovw.org/furgallery/?page=10&usuario=7745>

Imagen 14 y 15 Tomadas del libro: Javier Sinosiain. (2003) Bio-Architecture: Architectural Press Publ

Imagen 16 y 17 Tomado del libro Ronald Conrad . (1965) Frei Otto: Structures. Gustavo Gili

Imagen 18,y 19 Tomadas de la cartilla del espacio publico del Idu - http://www.idu.gov.co/web/guest/tramites_doc_especificacion

Imagen 21 <http://elcomercio.pe/turismo/1389935/noticia-emblematico-puente-bahia-sidney-cumplio-80-anos>

Imagen 22 <http://www.citypictures1.com/San-Francisco-Pictures/Golden-Gate-Bridge-52-847-picture.htm>

Imagen 23

<http://latidobuenosaires.com/fotoslabocavueltaerochapuentettransbordadorbuenosairesargentina.html>

Imagen 24 Cuadro tomado del libro: Marcel Antonio Maury. (2009) La esencia del árbol. Editorial Punto aparte

Imagen 25, 26 y 27 Tomadas de: I.E.S. Cástulo Web Site. Departamento de Tecnología, Antonio Huertas Montes

Imagen 28 y 29 tomadas del libro: Marcel Antonio Maury. (2009) La esencia del árbol. Editorial Punto aparte

Imagen 71 <http://estrella-ana-maria.blogspot.com/2011/09/simbologia-alquimista-catedrales.html>

Imagen 72 <http://www.veengle.com/s/ARBORIFORME.html>

