



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO.**

Programa Único en Especialidades en Arquitectura.  
Especialización en Diseño de Cubiertas Ligeras.  
Facultad de Arquitectura.

**Proyecto Estructural para la Cubierta sobre el Edificio I en la Zona  
Arqueológica de El Tajín, Veracruz.**

Trabajo Terminal que para obtener el grado de  
Especialista en Diseño de Cubiertas Ligeras.

**Presenta:**

Arq. Fernando Urióstegui Díaz.

**Director de Trabajo Terminal:**

Arq. José Luis Rincón Medina.

**Sinodales Propietarios:**

Arq. ECL. Marcos J. Ontiveros Hernández.

Dr. Agustín Hernández Hernández.

**Sinodales Suplentes:**

Dr. Juan Ignacio del Cueto Ruíz Funes.

Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas.

Ciudad Universitaria. Cd. Mx., 2020.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Agradecimientos.**

A mi madre.

María Guadalupe Díaz Sánchez por su gran amor. Siempre me contemplas por cada paso que doy y ante la adversidad que se presente, tu regazo se convierte en una especie de cabecera en donde apoyarme.

A mi padre.

Ofrocino Urióstegui Gonzaga por su afecto y dedicación en el cuidado que implico mi formación académica y personal. Los viajes que realizamos a las diferentes partes del país se convirtieron en mi primer acercamiento a la arquitectura.

A mi hermana.

Briseida Magali Urióstegui Díaz por su enorme confianza, apoyo y cariño en cada etapa de mi vida.

Al Arq. José Luis Rincón Medina.

Por aceptar dirigir este documento. Por su generosidad en compartir sus conocimientos y su paciencia, dedicación y entrega como profesor de la Facultad de Arquitectura.

Al distinguido jurado.

Por sus enseñanzas como profesores de la especialidad. Por su amabilidad, sus consejos y comentarios para la realización de este documento.

A la Mtra. Dulce María Grimaldi Sierra.

Por darme la oportunidad de trabajar en el Proyecto de Conservación de la Pintura Mural y otros Acabados Arquitectónicos de la Zona Arqueológica de El Tajín, Veracruz.

A la Arq. Guadalupe Leslie Santiago Vázquez y al Rest. Néstor Omar Torres Cuervo.

Por brindarme su hospitalidad durante el periodo en que curse la especialidad.

Al Hist. José Luis Pérez González y a Ana María Álvarez.

Por su asesoría en la consulta del acervo de la Fototeca de la CNCPC-INAH.

Al Arqlogo Rogelio Rivero Chong.

Por los permisos concedidos para la revisión del trabajo terminal.

A la UAM-X.

*Mi Alma Mater.*

A la UNAM.

Por la oportunidad de haber realizado mis estudios de posgrado en esta institución.

A los amigos y compañeros de la UAM-X, de la Especialidad en Diseño de Cubiertas Ligeras y de la CNCPC-INAH.

## Contenido

Introducción.....	4
I.- Planteamiento del problema.....	6
I.1.-Antecedentes.....	6
I.1.1.- Contexto geográfico y ambiental.....	6
I.1.2.- Descripción del sitio arqueológico.....	7
I.2.-Problemática del sitio.....	9
I.3.-Objetivos y metas del trabajo terminal.....	12
I.4.-Justificación.....	13
II.- Proyecto Arquitectónico.....	14
II.1.-Planteamiento de Diseño.....	14
II.2.- Casos de Estudio o Análogos.....	17
II.2.1.- Caso Herculano. (Cuarto de Mármol en la Casa del Relieve de Telephus y atrio de la Casa de la Gema). Campania, Italia.....	17
II.2.2.- Caso Piazza Armerina. (Villa del Casale), Sicilia, Italia.....	19
II.2.3.- Caso Copán. (Escalinata de Jeroglíficos). Copan, Honduras.....	21
II.2.4.- Conclusiones.....	22
II.3.- Desarrollo del proyecto.....	24
II.3.1.- Concepción geométrica.....	24
II.3.2.- La Elipse.....	26
II.3.2.a- Método gráfico.....	26
II.3.2.b- Método analítico.....	28
II.3.2.c- Longitud de la curva.....	31
II.4.- Descripción general de la propuesta.....	35

III.-Sistema Estructural.....	41
III.1.-Análisis de Materiales.....	41
III.1.1.-Madera.....	42
III.1.1.a- Propiedades mecánicas.....	43
III.1.2.-Bambú.....	47
III.1.2.a- Propiedades mecánicas.....	48
III.1.3.-Palma.....	51
III.2.-Sistema Funicular.....	52
III.2.1.-Definición.....	52
III.2.2.-Arcos.....	52
III.2.3.-Funicular de fuerzas.....	54
III.3.-Fuerzas internas del arco.....	58
III.3.1.-Definición.....	58
III.3.2.-Momentos del arco.....	58
III.3.2.a- Método gráfico.....	59
III.3.2.b- Método analítico.....	62
III.3.3.-Esfuerzos de la sección.....	66
III.3.3.a- Tangentes de la elipse.....	67
III.3.3.b- Esfuerzos normales N y tangenciales Q.....	71
III.4.-Fuerzas externas del arco.....	73
III.4.1.-Introducción.....	73
III.4.2.- Viento.....	73
III.4.3.-Calculo por viento.....	78
III.4.4.-Funicular de fuerzas por viento.....	84
III.4.4.a-Descomposición de las fuerzas.....	85

III.4.4.b-Funicular de fuerzas verticales.....	88
III.4.4.c-Funicular de fuerzas horizontales.....	89
III.4.5.-Determinación del momento máximo.....	94
III.4.6.-Modulo de Sección.....	99
III.5.- Cimentación de la cubierta.....	101
III.5.1.-Propuesta de cimentación.....	103
Conclusiones.....	106
Alcances.....	106
Contribuciones.....	108
Limitantes.....	108
Perspectivas.....	109
Índice de particulares.....	111
Índice de gráficos.....	111
Índice de tablas.....	112
Índice de planos.....	113
Índice de figuras.....	114
Anexos.....	117
Anexo 1. La elipse y sus componentes.....	117
Anexo 2. Regla para Clasificar Estructuralmente Madera de Latifoliadas o Tropicales.....	118
Bibliografía.....	119

## Introducción

En la actualidad, el ejercicio de la arquitectura requiere de la especialización en determinadas áreas de conocimiento donde su participación sea activa para la búsqueda de soluciones a determinados problemas que involucran a diversos profesionistas en equipos multidisciplinarios. En este sentido, el arquitecto especialista en Diseño de Cubiertas Ligeras pueda brindar sus conocimientos y sus habilidades en el ámbito del diseño y construcción de estructuras.

La problemática que presentan el uso de cubiertas en contextos arqueológicos, se encuentra entre el dilema de preservar el elemento arqueológico y el de presentarlo *in situ*, ya que en muchas ocasiones cualquier acción mal planeada y ejecutada, puede ocasionar efectos irreversibles tanto al elemento a proteger como al contexto donde se ubica, dando como resultado estructuras que causan daños a los edificios arqueológicos, la generación de microclimas dentro de los espacios cubiertos que afectan tanto a pintura mural como a modelados en estuco o relieves, así como una deficiente protección ante los embates del clima. Muchos de estos problemas son consecuencias del desconocimiento de las particularidades que presenta cada sitio arqueológico debido a su ubicación geográfica además de la falta de criterios para el diseño de cubiertas y la poca sensibilidad cuando se trabaja con patrimonio.

El presente trabajo desarrollado a lo largo de toda la Especialización, está enfocado en solo ofrecer una solución estructural eficiente que logre ser una alternativa a sitios arqueológicos con recursos limitados o de difícil acceso, una problemática que se presenta en las cubiertas arquitectónicas a nivel nacional. Para esto, se expone una metodología dividida en tres partes; la primera es la descripción del problema, los antecedentes del sitio, su contexto geográfico y ambiental, el objetivo y propósito del trabajo así como la justificación que dio origen a este tema.

La segunda parte consta de la descripción del proyecto, donde se hace un planteamiento del diseño donde se busca el obtener una cubierta cuyo diseño estructural responda a una forma geométrica adecuada, es decir, a estructuras que no solamente trabajen por forma, sino a cubiertas cuyas formas se integren a los contextos

arqueológicos a proteger, se analizan diferentes casos de estudio, entendiendo sus aciertos y evitando sus fallas. La concepción geométrica de la cubierta y los métodos que se usaron para dibujarla y comprobar numéricamente los trazos de las curvas, así como la descripción del proyecto.

La tercera sección del documento, está enfocada al ámbito estructural de la cubierta, donde se explica la definición de un arco y su comportamiento estructural, una breve descripción y análisis de los materiales a utilizar, el uso de la estática gráfica con especial énfasis en el método gráfico de los funiculares para determinar los momentos y fuerzas de compresión y cortantes presentes en un arco y los cálculos por acciones por viento a los cuales estará sometida la estructura. Por último, se describen los resultados y las conclusiones a las que llegó el autor de este trabajo terminal.

Esto no quiere decir que este documento se lea como una receta, manual o guía donde se tenga que seguir una serie de pasos al pie de la letra. Lo que se quiere resaltar con este escrito, es el demostrar que con base a una geometría adecuada, una metodología y un proceso gráfico en el análisis estructural, se pueden concebir cubiertas que sean estructuralmente eficientes por forma para la protección y conservación del patrimonio que pertenece no solo a la nación, sino a la humanidad.



# I.- Planteamiento del problema.

## I.1.-Antecedentes.

### I.1.1.- Contexto geográfico y ambiental.

Cerca de las ciudades de Papantla y Poza Rica, ubicado en la parte norte de lo que actualmente es el estado de Veracruz, en las coordenadas 0° 28' 35" de latitud norte y 97° 22' 39" de longitud oeste, El Tajín se construyó en el ambiente húmedo de la costa del Golfo de México, en un paisaje de lomeríos rodeado por dos arroyos y una vegetación exuberante<sup>1</sup>. Su cercanía a la costa (a 30 km en línea recta) y a dos ríos principales (el Tecolutla y el Casones) lo volvieron un punto clave por el cual se asentó y se desarrolló la ciudad prehispánica.

El clima es cálido y húmedo, del tipo senegalés AWA según la clasificación Köppen-Geiger<sup>2</sup>. Las condiciones meteorológicas del sitio son de considerar por la siguiente razón; Existe una fuerte precipitación pluvial, además de estar cerca de la costa (aproximadamente a una hora), lo que lo hace vulnerable a los huracanes o tormentas tropicales. Sin mencionar las altas temperaturas que se registran (temporada seca de marzo a septiembre), la alta humedad que se concentra en la región y las precipitaciones pluviales (de octubre a febrero). Si bien la zona no es altamente sísmica, el suelo suele ser un problema por la siguiente razón:

*“Ya que posee una capa de depósito e arcillas amarillas que sirven de asiento a los edificios. Esto da un sustento muy inestable a los cimientos, pues las intensas lluvias en la región suben el nivel freático, aunque son suficientes pocos días sin lluvia para bajarlo de manera importante. Los cambios sucesivos e imprevistos desestabilizan el subsuelo y provocan movimientos que afectan la estabilidad de las pirámides”.*<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> (Ladrón de Guevara, 2010, pág. 17)

<sup>2</sup> (Ladrón de Guevara, 2010, pág. 19)

<sup>3</sup> (Ladrón de Guevara, 2010, pág. 20)

### I.1.2.- Descripción del sitio arqueológico.

La zona arqueológica de El Tajín, Veracruz, cuyo periodo de ocupación va del 600 al 1200 d.C., se asienta en el poco espacio plano entre la cañada del arroyo Tlahuanapa<sup>4</sup> y los lomeríos que circundan a la zona, lo que hace que su traza urbana sea atípica, ya que en vez de optar por un trazo longitudinal como en Teotihuacán o dividido en cuadrantes como era la tendencia mesoamericana, se construyeron tantos edificios como fue posible por las limitaciones espaciales (Ladrón de Guevara, 2010, pág. 53), sin embargo, esto no quiere decir que su crecimiento urbano se hiciera de manera descontrolada. El terreno asciende de sur a norte, en unos 140 m hasta la cima de los cerros, el más alto a unos 270 msnm, donde se erigieron edificios (Morante López, 2010, pág. 48). Esta particularidad del terreno, generó una diferenciación funcional de la ciudad que se traduce en una marcada estratificación social, los espacios residenciales y templos donde vivían los sacerdotes y la elite gobernante, al ser de un acceso restringido, se encuentran en las partes más altas del sitio, el resto de la población se reunía en las zonas más bajas y amplias para presenciar ritos, juegos de pelota o mercadeo.

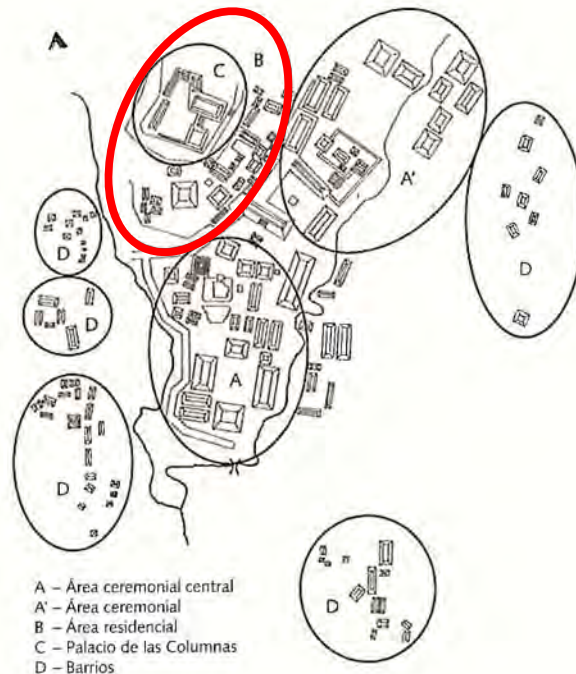


Figura 1.- Mapa general del sitio arqueológico. “Tajín chico” se ubica dentro del sector identificado como Área residencial B (color rojo). Croquis tomado de Ladrón de Guevara, 2010, pág. 53.

<sup>4</sup> (Morante López, 2010, pág. 48)

Al norte de la ciudad prehispánica, encontramos un asentamiento elevado del resto del conjunto conocido como **“Tajín Chico”** donde se desplantan basamentos de menor altura y extensos lo cual permitía la construcción de cámaras en su interior, interconectados entre sí y un acceso bastante restringido por medio de escalinatas. La clasificación de este sitio se realizó por medio de letras siendo el edificio I el caso de estudio.



Figura 2.- Izquierda: Vista aérea<sup>5</sup> de la zona residencial **“Tajín Chico”** donde se encuentra el Edificio I (recuadro color amarillo). Derecha: Vista actual de la subestructura. Foto cortesía de la CNCPC-INAH.

Dentro del edificio, se encuentran los vestigios de pintura mural *In Situ* dentro del complejo de Tajín Chico los cuales representan complejos diseños y figuras en miniatura con trazos finos y una amplia gama de colores (Blaisot, 2014, pág. 4). Los murales están asociados a una subestructura que pertenece al periodo de esplendor de la ciudad entre los años 850 a 1000 d.C. (Blaisot, 2014, pág. 4). El significado de las pinturas es aún desconocido aunque se ha identificado una posible representación de Ehécatl. (Ladrón de Guevara, 2010, pág. 115).

---

<sup>5</sup> Imagen satelital disponible en:  
<https://earth.google.com/web/@20.44935303,97.37755554,151.72380192a,916.0964689d,35y,0.00000001h,0.0935755t,0r>.



**PUEA** PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA

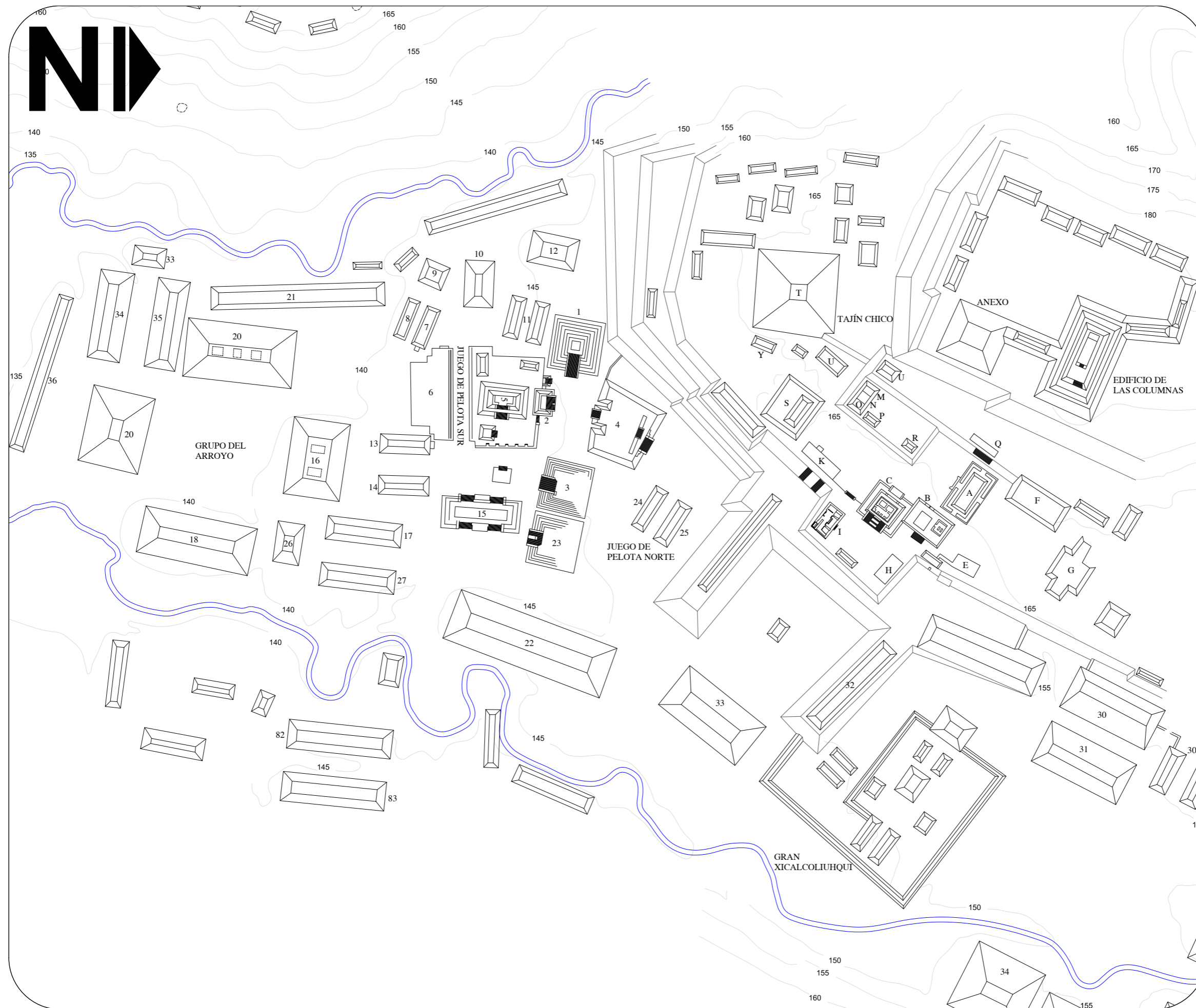
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN

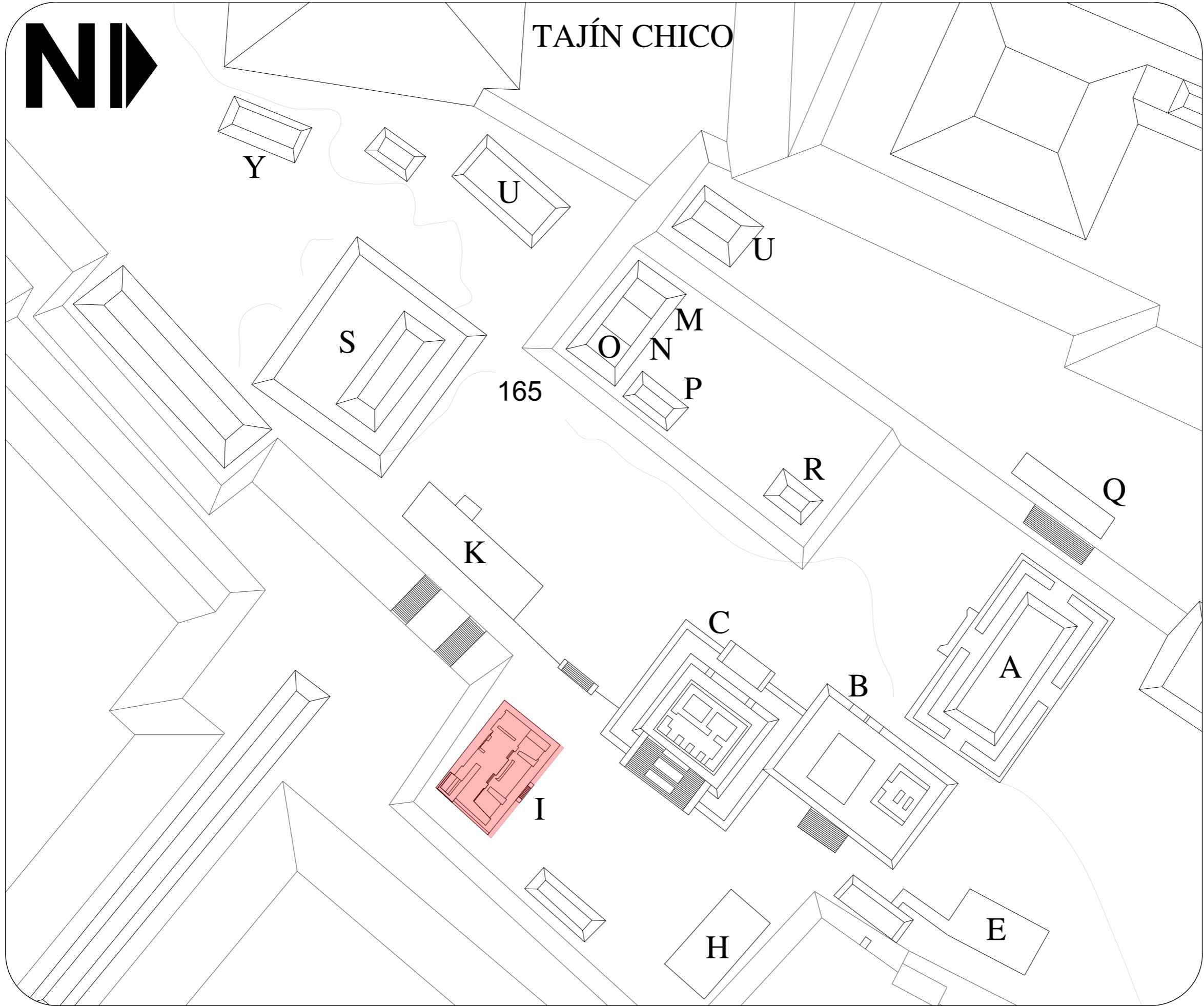


SIMBOLOGÍA

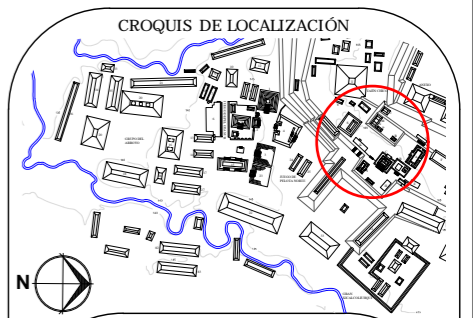
Nota:  
Levantamiento y dibujos realizados por los Arquitectos Roberto Magdaleno Olmos y Raúl A. Hernández Estrada durante la temporada de trabajo en el año del 2010 dentro de las actividades programadas del Proyecto de Conservación de la Pintura Mural de la Zona Arqueológica de El Tajín. CNCPC-INAH

PROYECTO: <b>PROPUESTA ESTRUCTURAL PARA LA CUBIERTA EN EL EDIFICIO I.</b>	
UBICACIÓN: Zona de Monumentos Arqueológicos de El Tajín.	ESCALA:
ELABORADO POR: Arq. Fernando Urióstegui Díaz	CLAVE DE PLANO: <b>L-00</b>
TIPO DE PLANO: Levantamiento arquitectónico	FECHA:
PLANO DE: Sitio	AÑO DE TRABAJO: <b>2019</b>
ASESOR DE TRABAJO: Arq. José Luis Rincón Medina	UNIDAD DE MEDIDA: METROS
ESCALA: 1:2,500	OTROS DATOS: Cotas rigen a dibujo.





**PUEA** PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA

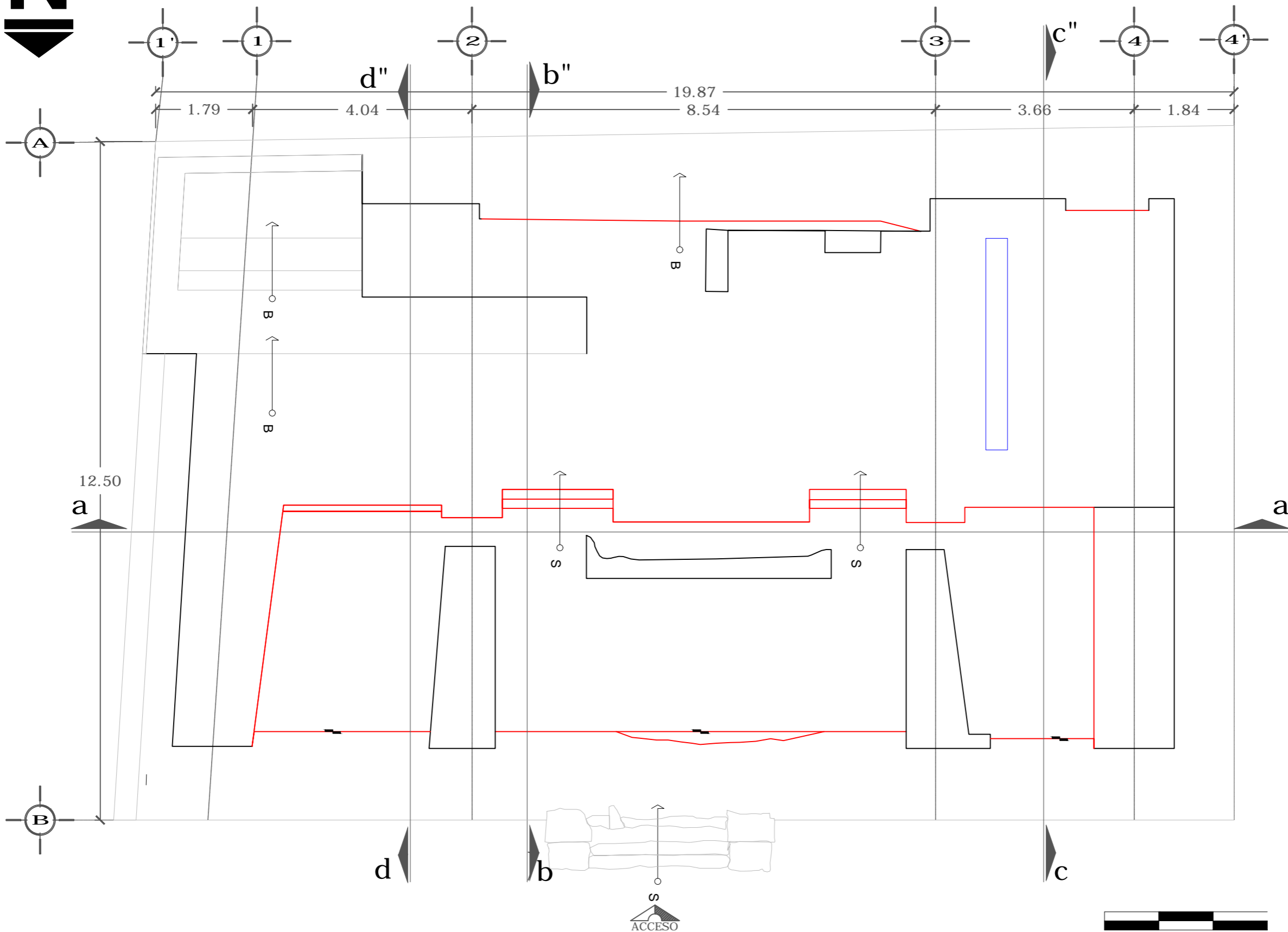


SIMBOLOGIA

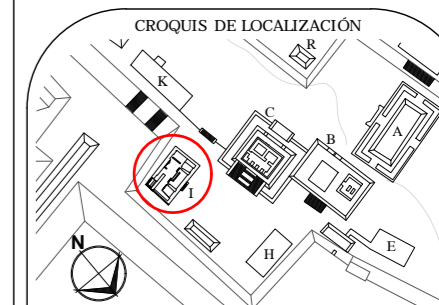
Área correspondiente al Edificio I.

Nota:  
Levantamiento y dibujos realizados por los Arquitectos Roberto Magdaleno Olmos y Raúl A. Hernández Estrada durante la temporada de trabajo en el año del 2010 dentro de las actividades programadas del Proyecto de Conservación de la Pintura Mural de la Zona Arqueológica de El Tajín. CNCPC-INAH

<b>PROYECTO</b>	
<b>PROPUESTA ESTRUCTURAL PARA LA CUBIERTA EN EL EDIFICIO I.</b>	
UBICACIÓN	Zona de Monumentos Arqueológicos de El Tajín.
PROYECTANTE Y TÍTULO DE ESPECIALIDAD EN SU SECTOR DE COMPETENCIA PROFESIONAL	Arq. Fernando Urióstegui Díaz
TIPO DE PLANO	Levantamiento arquitectónico
PLANO DE	Ubicación Tajín Chico
AUTOR DE DISEÑO	Arq. José Luis Rincón Medina
ESCALA	1:2,500 METROS
FECHA	2019



**PUEA** PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA



**SIMBOLOGIA**

- Indica nivel en planta
- Indica nivel en alzado
- N.P.T. Nivel de Piso Terminado
- Cambio de nivel
- Indica corte y número del mismo
- Indica sube o baja en rampas o escaleras

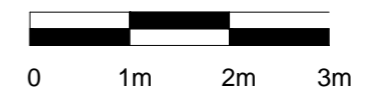
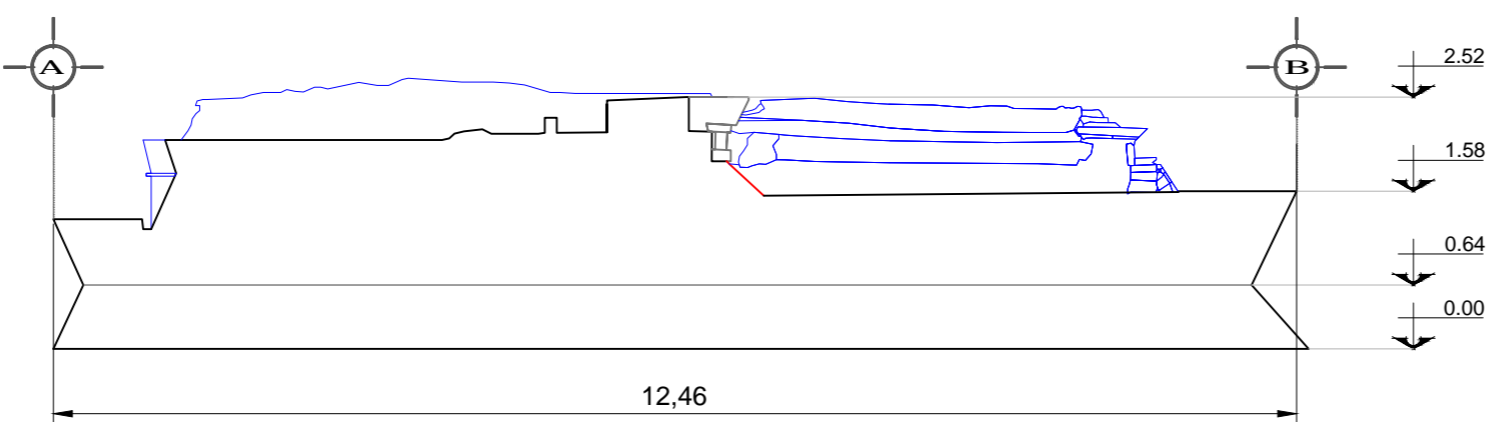
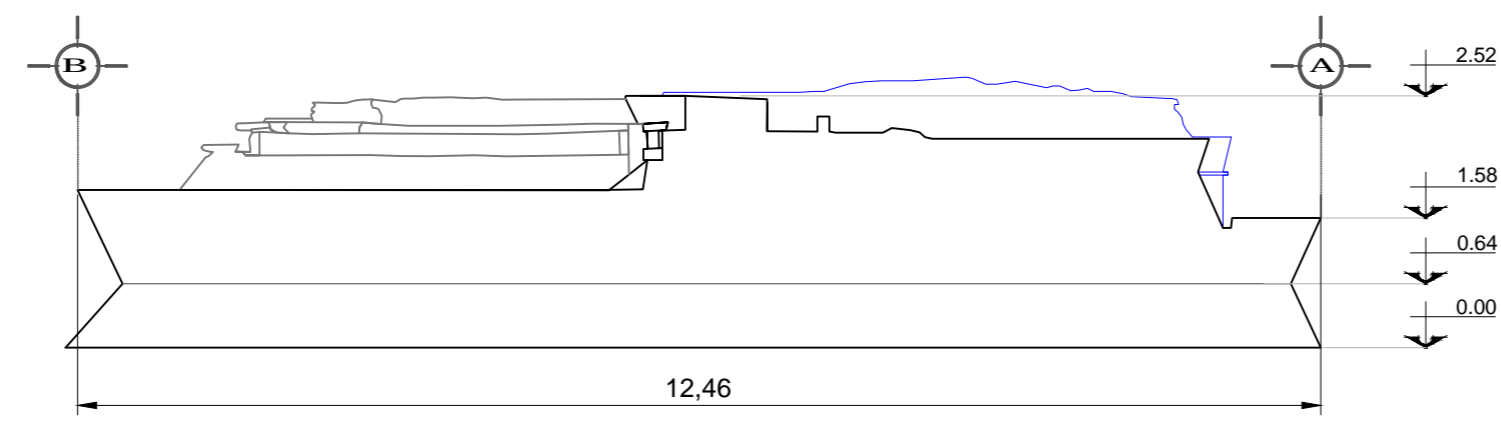
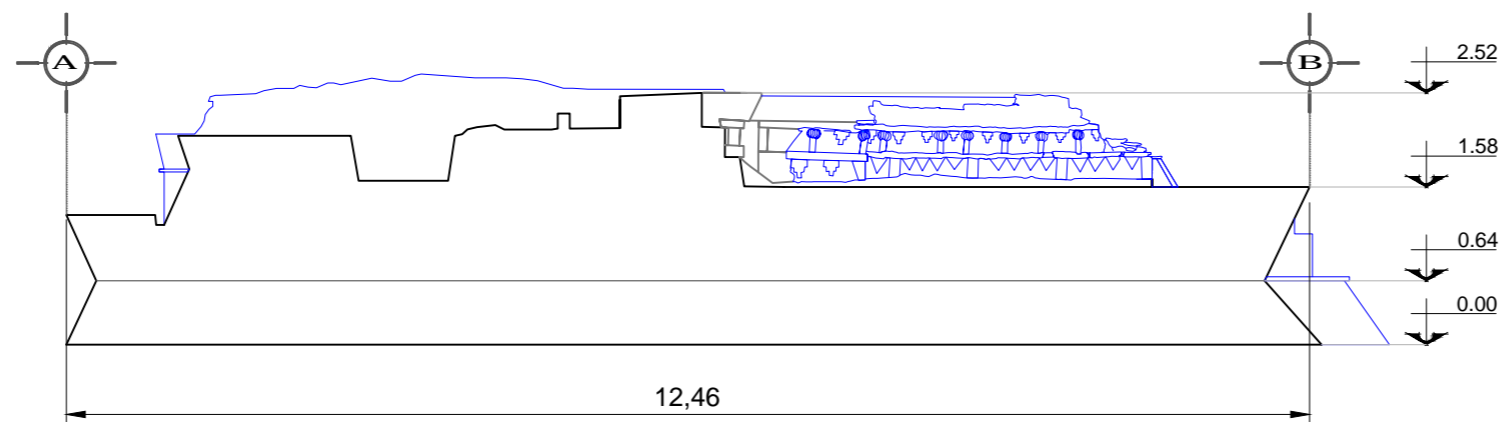
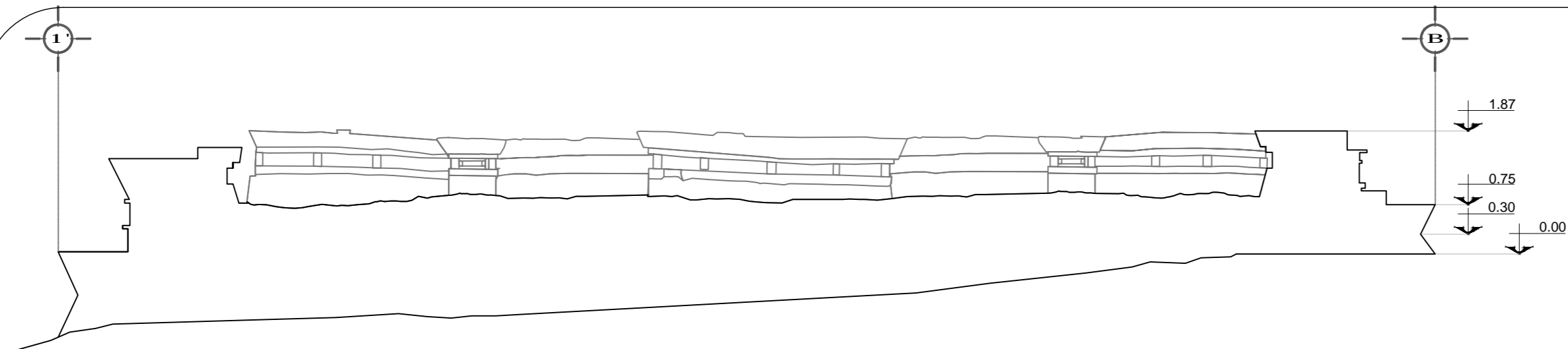
Nota:  
Levantamiento y dibujos realizados por los Arquitectos Roberto Magdaleno Olmos y Raúl A. Hernández Estrada durante la temporada de trabajo en el año del 2010 dentro de las actividades programadas del Proyecto de Conservación de la Pintura Mural de la Zona Arqueológica de El Tajín. CNCPC-INAH

**PROYECTO**  
**PROPUESTA ESTRUCTURAL PARA LA CUBIERTA EN EL EDIFICIO I.**

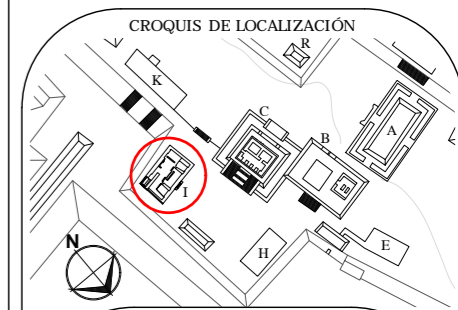
UBICACIÓN: Zona de Monumentos Arqueológicos de El Tajín.	ÁREA: 248.37 m <sup>2</sup>
PROYECTANTE A TÍTULO DE ESPECIALISTA EN DISEÑO DE CUBIERTAS LOCAS: Arq. Fernando Urióstegui Díaz	CLASE DE PLANO: L-02
TIPO DE PLANO: Levantamiento Arquitectónico	FECHA: 2019
PROYECTO DE LA TERCERA: Planta Arquitectónica Edificio I	PROYECTANTE: Arq. José Luis Rincón Medina
ESCALA: 1:75	UNIDAD DE MEDIDA: METROS

Notas: Cotas rigen a dibujo.





**PUEA** PROGRAMA  
ÚNICO DE  
ESPECIALIZACIONES  
EN ARQUITECTURA



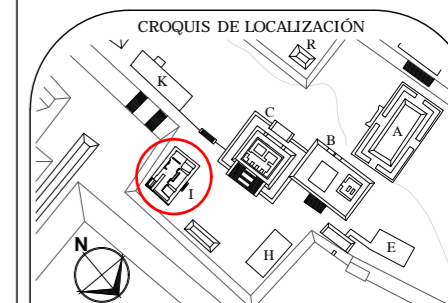
- SIMBOLOGIA**
- Indica nivel en planta
  - Indica nivel en alzado
  - N.P.T. Nivel de Piso Terminado
  - Cambio de nivel
  - Indica corte y número del mismo
  - Indica sube o baja en rampas o escaleras

Nota:  
Levantamiento y dibujos realizados por los Arquitectos Roberto Magdaleno Olmos y Raúl A. Hernández Estrada durante la temporada de trabajo en el año del 2010 dentro de las actividades programadas del Proyecto de Conservación de la Pintura Mural de la Zona Arqueológica de El Tajín. CNCPC-INAH

<b>PROYECTO:</b> PROPUESTA ESTRUCTURAL PARA LA CUBIERTA EN EL EDIFICIO I.	
<b>UBICACIÓN:</b> Zona de Monumentos Arqueológicos de El Tajín.	<b>ÁREA:</b> 248.37 m <sup>2</sup>
<b>PROFESOR A TÍTULO DE ESPECIALISTA EN DISEÑO DE CUBIERTAS:</b> Arq. Fernando Urióstegui Díaz	<b>CLAVE DE PLANO:</b> L-03
<b>TÍTULO DE PLANO:</b> Levantamiento Arquitectónico	<b>FECHA:</b> Cortes Edificio I
<b>PROFESOR DE LA TERCERA:</b> Arq. José Luis Rincón Medina	<b>AÑO:</b> 2019
<b>ESCALA:</b> 1:75	<b>UNIDAD:</b> METROS



**PUFA** PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA



SIMBOLOGIA

- Indica nivel en planta
- Indica nivel en alzado
- N.P.T. Nivel de Piso Terminado
- Cambio de nivel
- Indica corte y número del mismo
- Indica sube o baja en rampas o escaleras

Nota:  
Levantamiento y dibujos realizados por los Arquitectos Roberto Magdaleno Olmos y Raúl A. Hernández Estrada durante la temporada de trabajo en el año del 2010 dentro de las actividades programadas del Proyecto de Conservación de la Pintura Mural de la Zona Arqueológica de El Tajín. CNCPC-INAH

**PROYECTO: PROPUESTA ESTRUCTURAL PARA LA CUBIERTA EN EL EDIFICIO I.**

UBICACIÓN: Zona de Monumentos Arqueológicos de El Tajín.	ÁREA: 248.37 m <sup>2</sup>
PROYECTANTE A TÍTULO DE ESPECIALISTA EN DISEÑO DE CUBIERTOS LEGADOS: Arq. Fernando Urióstegui Díaz	CLASE DE PLANO: <b>L-04</b>
TÍTULO DE PLANO: Levantamiento Arquitectónico	
SECCIÓN DE: Secciones Edificio I	
ELABORADO POR: Arq. José Luis Rincón Medina	FECHA: <b>2019</b>
ESCALA: 1:75	UNIDAD DE MEDIDA: METROS

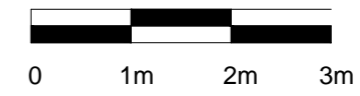
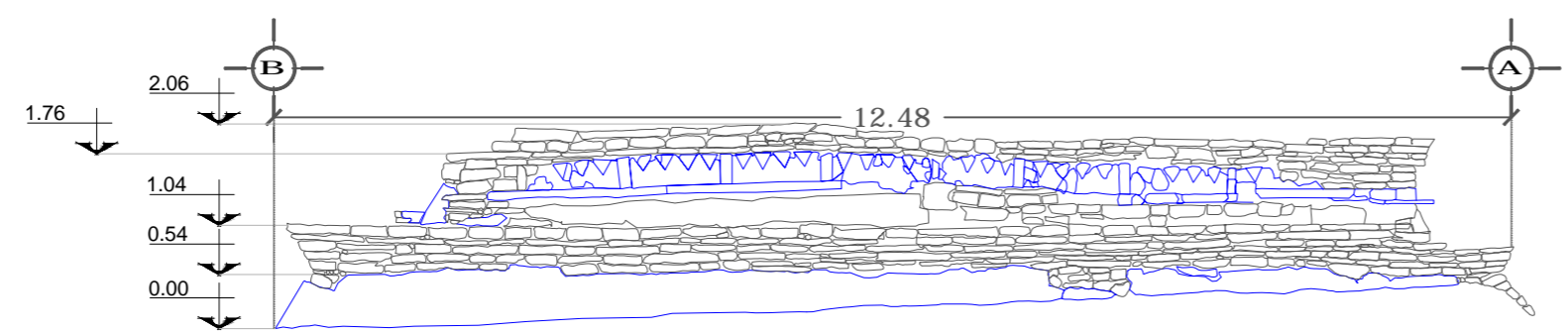
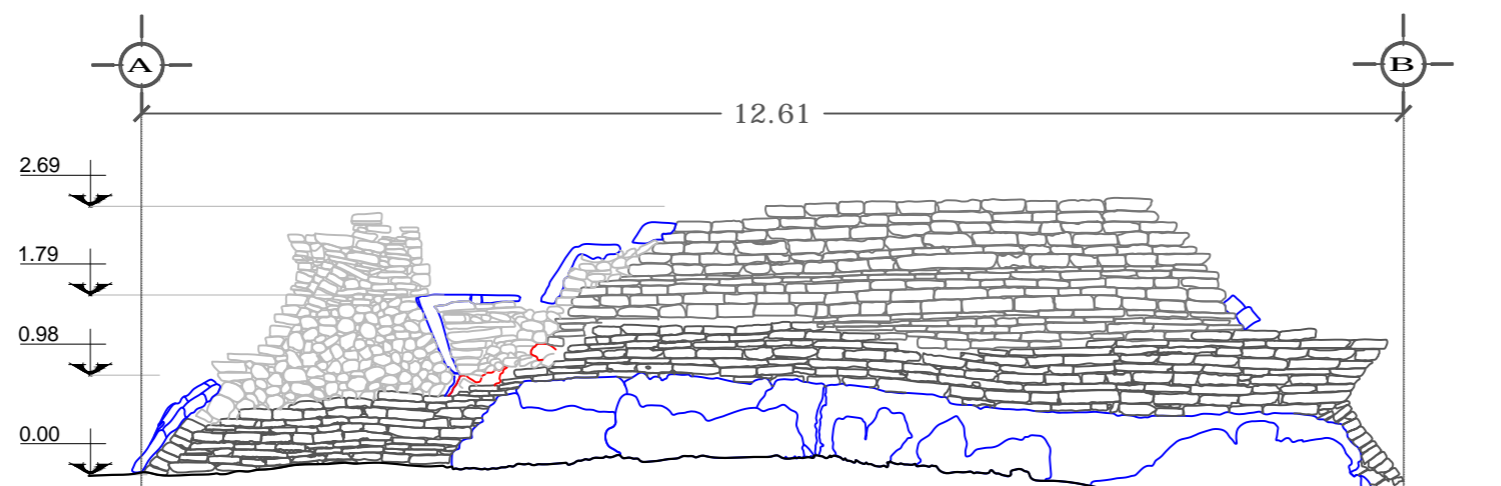
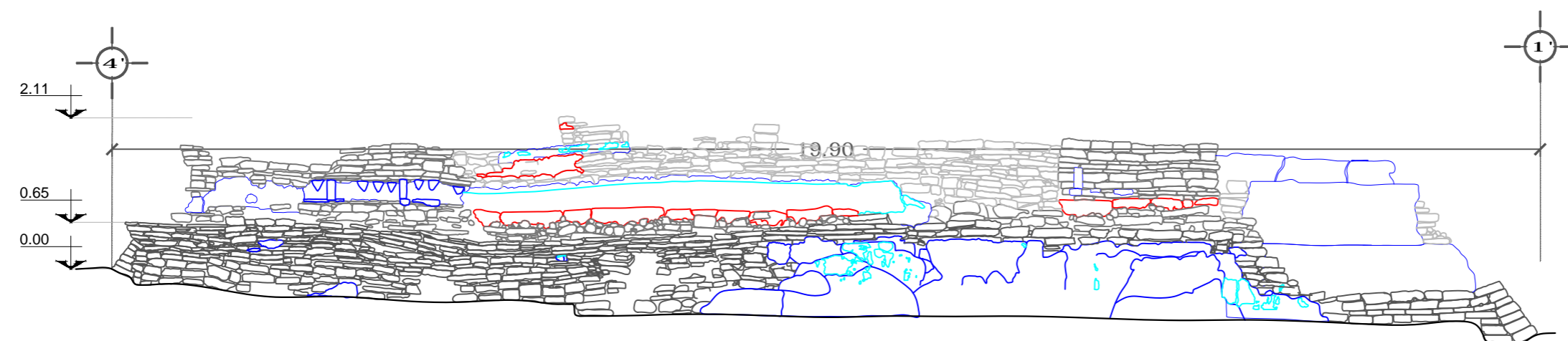
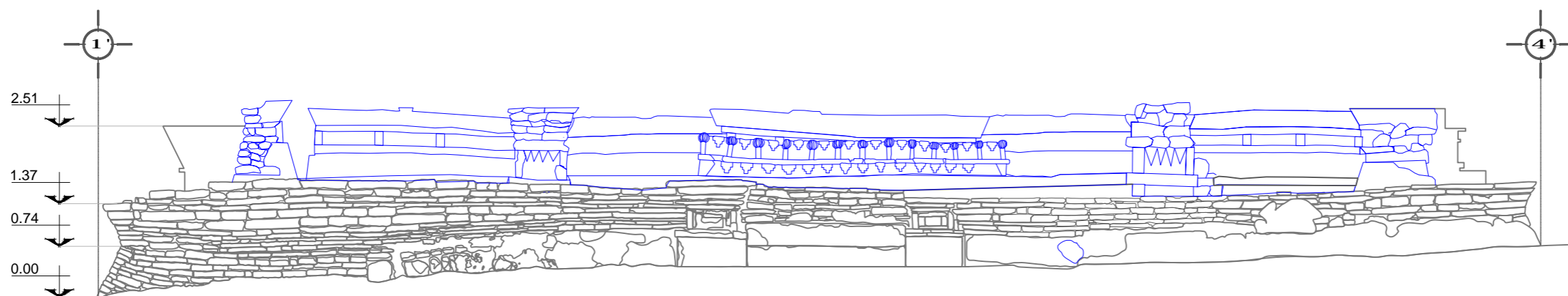






Figura 3.- Forma antropomorfa reptando. Esta figura se repite de manera constante en todo un frente del mural.  
Foto cortesía de la CNCPC-INAH.

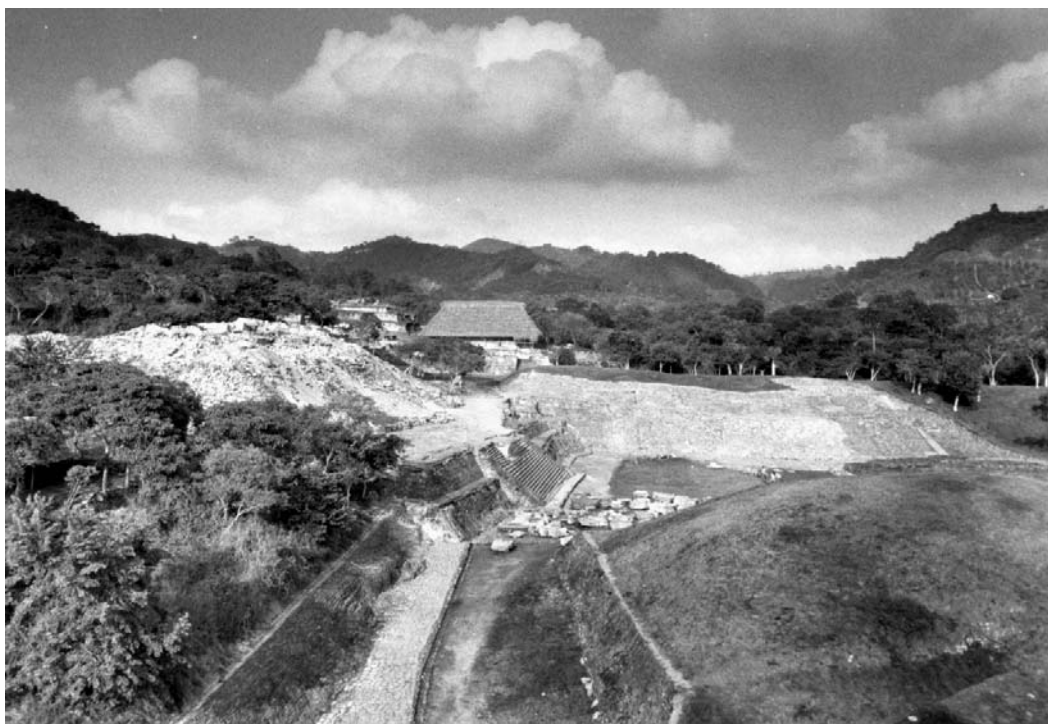
## I.2.-Problemática del sitio<sup>6</sup>.

En 1939, la Dirección de Monumentos Prehispánicos, comisionó al arqueólogo José García Payón los trabajos de restauración de algunos edificios explorados por Agustín García Vega. En la década de los 50, consolido algunos edificios de Tajín Chico (los edificios H, I y K) donde almaceno fragmentos de pintura encontrados.

Para la década de los 90, durante el Proyecto Tajín dirigido por el Dr. Jurgen Brueggemann, se hicieron trabajos de restauración, conservación y registro al edificio I a cargo del arqueólogo Juan Sánchez Bonilla. Dentro de los trabajos de liberación y exploración, se contempló y construyo la colocación de una palapa de madera y palma para proteger los murales que constaba de 22 horcones perimetrales. Debido a las dimensiones de la subestructura, se colocaron 15 postes intermedios sobre los vestigios arqueológicos, procurando el no acomodar estos elementos sobre algún piso estucado o muro con restos de pintura mural.

---

<sup>6</sup> Información tomada del informe "Proyecto de Sutipución de la Palapa del Edificio I en la Zona Arqueológica El Tajín, Veracruz. Veracruz, México. Rest. Benjamín Jean-Marc Blaisot. CNCPC-ZMAET-INAH. México 2014. Págs. 6 – 20.



**Figura 4.-** Vista de Tajín Chico desde la pirámide de Nichos. Al centro se ve la palapa donde se encuentra el Edificio I colocada durante el Proyecto Tajín. Foto J.L. Morales. Temporada 1992. Fototeca de la CNCPC-INAH.

En 2008, debido a los fenómenos meteorológicos causados por el huracán *Dean*, el estado de conservación de la pintura mural se encontraba bastante afectado. Los peritajes realizados por la Mtra. Dulce María Grimaldi Sierra, restauradora perito por parte de la CNCPC-INAH, determinaron que la problemática de los murales estaba directamente relacionada con la cubierta, por lo que se sustituyó usando los mismos puntos de apoyo de la cubierta anterior.

En 2012, se detectan varios puntos donde algunos elementos estructurales principales y secundarios de la cubierta presentan daños que comprometen la estabilidad de la estructura. El ataque biológico que afecta a los horcones es otro factor, por lo que se hace un diagnóstico del estado de conservación de la cubierta, sin embargo, es hasta 2014 que se sustituye la cubierta por la que actualmente se encuentra protegiendo al edificio I.

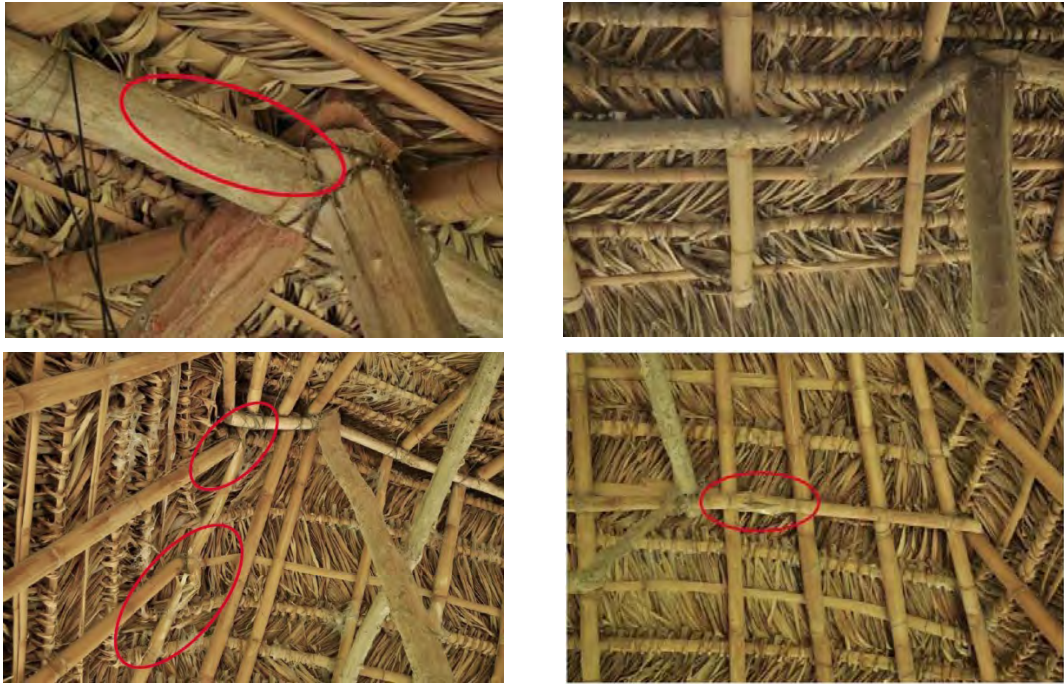


Figura 5.- Imágenes donde se observan los daños que presentó la cubierta en 2012. Fotos: Benjamín Blaisot.

Si bien la cubierta ha cumplido en buena parte con el proteger a la pintura mural que ahí se encuentra, **la colocación de apoyos sin una lógica estructural sobre el vestigio arqueológico y la mala construcción de la cubierta, ha llevado a tener fracturas en sus elementos estructurales.**

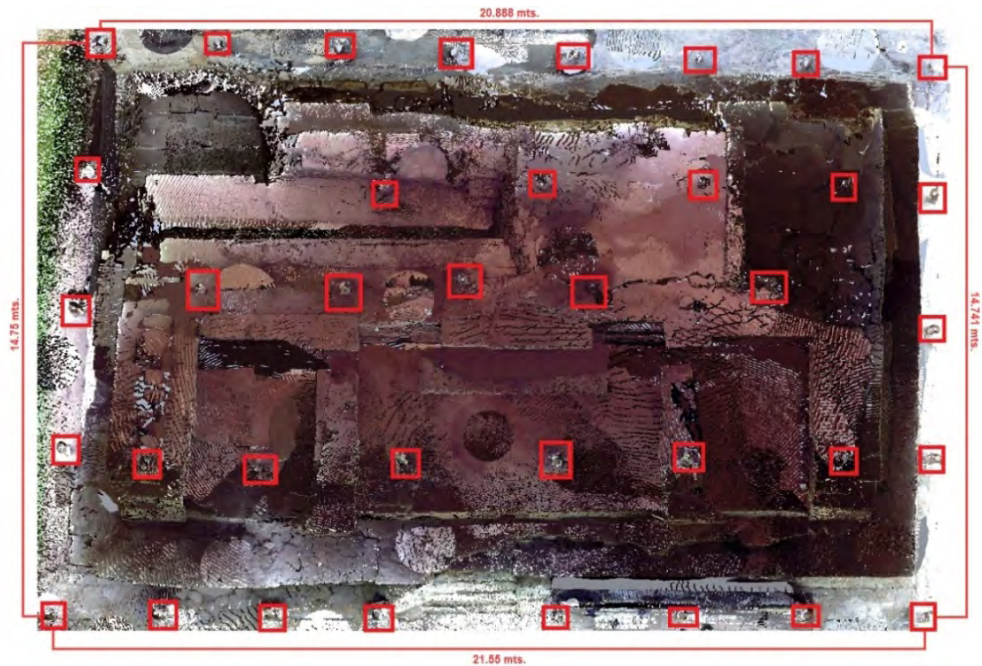


Figura 6.- Imagen a partir de una nube de puntos donde se marca la ubicación de los apoyos de la cubierta. Cortesía de ZMAET- CNCPC/INAH.

Los materiales utilizados en la cubierta actual, responde de manera positiva a las condiciones climáticas del sitio, al no generar microclimas que pueden causar daños en los elementos decorativos de la subestructura (aplanados, pintura mural), por esta razón, se considera en usar los mismos materiales regionales para la estructura de nueva propuesta de cubierta ligera bajo una concepción geométrica de diseño con la finalidad de evitar el uso de apoyos intermedios que comprometan a la subestructura, que garantice su estabilidad ante acciones accidentales y se integre de manera armónica y respetuosa a la zona arqueológica.

### **I.3.-Objetivos y metas del trabajo terminal.**

#### **Objetivos:**

- Analizar las soluciones planteadas y realizadas en diferentes sitios arqueológicos.
- Conocer la normativa y las recomendaciones que hacen diferentes profesionistas sobre el tema de las cubiertas sobre contextos arqueológicos.
- Comprender la geometría y su aplicación en el diseño de una cubierta.
- Comprender la mecánica vectorial y el comportamiento estructural de los sistemas funiculares (*arcos*).

#### **Metas:**

- Diseñar una cubierta resistente por forma mediante el uso de curvas.
- Integración de la cubierta al contexto arqueológico enmarcando al edificio.
- Demostrar la estabilidad estructural de la cubierta mediante el uso de la estática gráfica y cotejar los resultados por cálculo numérico.
- Crear cubiertas que sean fácilmente reversibles, de menor costo, menor impacto en el entorno, integrando conocimientos y materiales locales.

#### **I.4.-Justificación.**

La elección y desarrollo de este tema, responde a los siguientes puntos que se fueron detectando a lo largo del quehacer profesional en el área de la conservación y restauración:

- La falta de interés en desarrollar este tema dentro del área de la conservación del patrimonio.
- La falta de personal calificado y especializado en el diseño y construcción de estructuras ligeras que protejan al patrimonio.
- El desconocimiento y la falta de actualización en los siguientes temas; diseño mediante geometría, manejo de programas para la obtención y manipulación de la forma y su cálculo de fuerzas, tipos de materiales constructivos y sistemas estructurales.
- Presupuestos limitados para la construcción y mantenimiento de cubiertas arquitectónicas.
- La falta de una línea de investigación sobre cubiertas en edificios patrimoniales, su impacto directa e indirectamente sobre los mismos y su integración al medio.
- La poca continuidad de seminarios y talleres sobre el tema de cubiertas.
- Falta de sensibilidad por parte de arquitectos ante la problemática.
- La ignorancia de las condiciones ambientales y culturales donde se encuentra el elemento o estructura a proteger.
- El ser un problema generalizado en casi todas las zonas arqueológicas del país.

## **II.- Proyecto Arquitectónico.**

### **II.1.-Planteamiento de Diseño.**

Antes que nada, veamos la definición de una cubierta. Una cubierta es un elemento de protección, de cubrición (sic), cuya función es la de tapar un elemento o determinada área, o bien resguardando de todo aquello que se suscite en la parte superior hacia el exterior (Medina Gonzáles, 2011, pág. 180). Entendiendo este término, podríamos decir que una cubierta puede ser de cualquier tipo y material si cumple con el cometido de proteger y delimitar el espacio interno del exterior y sus inclemencias climáticas sin importar su origen (natural o artificial), ni su forma. Ante un concepto con una interpretación muy amplia, cabe preguntarnos ¿Cómo podríamos desarrollar una cubierta para un sitio arqueológico?, ¿Qué lineamientos, normatividad o criterios existen para delinear y delimitar su diseño y construcción?

En la carta de Venecia, leemos que en el apartado dedicado a la Conservación, se menciona en uno de sus artículos lo siguiente:

*“Artículo 6. La conservación de un monumento implica la de un marco a su escala. Cuando el entorno tradicional subsiste, este será conservado, y toda construcción nueva, toda destrucción y todo arreglo que pudiera alterar las relaciones de los volúmenes y de los colores, deben ser prohibidos”<sup>7</sup>.*

Es decir, cualquier intervención u obra nueva que incluyamos como medida de protección al monumento, debe estar en armonía con el entorno para tener una lectura legible del lugar, ya que el edificio o estructura no puede ser visto como un objeto aislado e independiente como si se tratara de una pieza de museo que se exhibe dentro de una vitrina. Al ser un elemento arquitectónico, su relación con el ámbito que lo rodea se vuelve primordial al ser el contexto urbano o ambiental el que resalta su importancia y su valor histórico.

Otro artículo relacionado con nuestro tema, lo encontramos en el mismo documento en el apartado correspondiente a la restauración el cual enuncia lo siguiente:

---

<sup>7</sup> (Díaz-Berrio Fernández, 2005, pág. 23)

*“Artículo 13. Los agregados no pueden ser tolerados más que en la medida en que respeten todas las partes interesantes del edificio, el entorno tradicional, el equilibrio de su composición y sus relaciones con el medio ambiente”<sup>8</sup>.*

Lo que especifica este artículo, es el considerar factores como **“las relaciones con el medio ambiente”, “el entorno tradicional”** y **“el equilibrio de su composición”** a la hora de concebir una nueva intervención. Estos factores se traducen en dimensiones, formas, volúmenes, texturas, materiales y procesos constructivos, de tal forma que su relación entre sí y con el medio deben ser lo más equilibrada.

En base a estos artículos, sabemos que la cubierta a proyectar debe ser respetuoso con el entorno a través de sus características y materiales, evitando a toda costa el transgredir dicho equilibrio que existe entre el inmueble a proteger y su medio ambiente, sin embargo, no se mencionan especificaciones en cuanto cual debería de ser los materiales a usar, ni las restricciones en cuanto a las dimensiones de la cubierta y la forma que debería tener.

Como se mencionó en el apartado **I.2.-Problemática del sitio.**, la propuesta de cubierta se ubicara en el Edificio I que se encuentra dentro del grupo de estructuras conocido como Tajín Chico ubicado en la parte norte dentro de la zona de monumentos arqueológicos de El Tajín (**ZMAET**). La planta de forma rectangular cuyas dimensiones son de 19.87 m x 12.50 m representa un reto en proteger un área de 248.37 m. La cubierta, pretende ser una alternativa estructural y de diseño diferente a la existente, al estar solucionado la eficiencia estructural en base a formas geométricas, lo que evitaría el uso de apoyos intermedios sobre la estructura arqueológica, logrando cubrir el mismo claro.

En uno de los puntos marcados en el taller sobre lineamientos para la implementación de cubiertas arquitectónicas en contextos arqueológicos<sup>9</sup>, señala lo siguiente:

---

<sup>8</sup> (Díaz-Berrio Fernández, 2005, pág. 33)

<sup>9</sup> Celebrado en Palenque, Chiapas del 2 al 8 de octubre de 2009. Patrocinado por CONACULTA, INAH, FCB, WMF.

*“Se recomienda evitar al máximo soldar, incrustar y colocar pilotes (postes) sobre las estructuras arqueológicas para la instalación, reparación o mantenimiento de techumbres temporales o permanentes. Especial cuidado se debe tener en los anclajes, en el uso de morteros o sistemas de fijación no compatibles que puedan generar daños a los bienes culturales”<sup>10</sup>.*

Aunado a esto, el énfasis que se pone en una cubierta cuya resistencia se obtenga en base a su forma, es con la finalidad de garantizar su estabilidad sin recurrir a profundas cimentaciones. Los suelos arqueológicos albergan evidencias materiales en diferentes estratos que debe evitarse alterar (Villalobos Jaramillo, 2011, pág. 44).

Lo que se protege por medio de una cubierta pertenece a un discurso, razón suficiente para que su permanencia en el sitio se vuelva fundamental. Esto condiciona la forma de la cubierta. [...] no debe ser más importante que el elemento a cubrir, debe proteger y a la vez enmarcar el elemento arqueológico y beneficiar la interpretación del mismo (Rivero Weber, Robles García, Guilliem Arroyo, & Rivero Chong, 2011, pág. 29).

Dentro de la concepción del diseño, se considera la reversibilidad de la cubierta, ya que dentro de sus recomendaciones señala:

*“Las cubiertas deberán ser reversibles y se evitaren procedimientos constructivos que impliquen la afectación y daño de los sitios arqueológicos o de los elementos naturales, como formaciones geológicas o arboles con características especiales integradas a los sitios”<sup>11</sup>.*

En sus recomendaciones técnicas comentan: deben ser de construcción sencilla, resistentes a diferentes cargas, de mantenimiento mínimo, de escala adecuada además de considerar en su diseño y realización, el equilibrio climático, los parámetros de temperatura y humedad. (Rivero Weber, Robles García, Guilliem Arroyo, & Rivero Chong, 2011, págs. 32-33).

Hay que mencionar que el cierre del Edificio I a la visita pública, se debe más por cuestiones de conservación de pisos, aplanados y pintura mural ante el daño que

---

<sup>10</sup> (Rivero Weber, Robles García, Guilliem Arroyo, & Rivero Chong, 2011, pág. 29)

<sup>11</sup> (Rivero Weber, Robles García, Guilliem Arroyo, & Rivero Chong, 2011, pág. 31).



representa el turismo que por las condiciones de la estructura de protección, por lo que la función principal de la cubierta es la de proteger solamente al elemento arqueológico y sus acabados que alberga en su interior de los embates del clima.

En resumen, las recomendaciones que hacen los especialistas son las siguientes:

- De forma sencilla y que no opaque al sitio.
- Evitar al máximo la colocación de apoyos intermedios.
- Evitar cimentaciones profundas en área de carácter arqueológico.
- Reversibles.
- Mínimo mantenimiento.
- Se integren al contexto y/o medio ambiente.

Sin embargo, quedan ciertas interrogantes en cuanto al tipo de material que sería idóneo para una cubierta en una zona arqueológica o que restricciones en cuanto a las dimensiones o formas recomendables para integrarse al sitio. Es por esto que en el capítulo siguiente, se analizarán tres casos de estudio de cubiertas en diferentes contextos arqueológicos, identificando aciertos y errores que se presentaron en el diseño y/o construcción de las cubiertas con la finalidad de poder desarrollar una propuesta acorde a las necesidades y características del lugar.

## **II.2.- Casos de Estudio o Análogos<sup>12</sup>.**

### **II.2.1.- Caso Herculano. (Cuarto de Mármol en la Casa del Relieve de Telephus y atrio de la Casa de la Gema). Campania, Italia.**

En el sitio de Herculano, muchos de los acabados originales fueron concebidos para estar en interiores, sin embargo, actualmente se encuentran en el exterior, lo que ha provocado su deterioro. Bajo la premisa de colocar una protección, surgió el dilema entre colocar una cubierta nueva que se apoye sobre la estructura original o una reconstrucción del techo original, lo que se consideraron cuatro puntos:

---

<sup>12</sup> Todos los casos de estudio fueron tomados de Rizzi, 2011, págs. 213-225.

- 1.-La zona excavada está en un distrito antiguo, lo que le da un valor muy importante en el ámbito urbano.
- 2.-Al llegar al sitio, el visitante tiene una primera impresión en general de la ciudad de Herculano.
- 3.-Los apoyos de una cubierta, tienen que ser planteados con sumo cuidado, ya que existen acabados tanto en exteriores como en interiores.
- 4.-Cada intervención, genera un conflicto entre los vestigios arqueológicos de la antigua ciudad de Roma y las anteriores restauraciones que han llevado a la apariencia actual de la ciudad.

Las condicionantes para el diseño de las cubiertas fueron:

- Proteger de la lluvia permitiendo la circulación del aire.
- Evitar generar microclimas.
- Integrarse al contexto arqueológico.
- Permitir el acceso a los cuartos.
- Los elementos de la cubierta deben de ser elementos pequeños y fácilmente transportables.
- No requerir de mano especializada para su colocación.
- La reconstrucción de muros originales debe de ser mínima.

El resultado obtenido fue que **entre más tradicional fuera la construcción, resulto ser más simple y el equilibrio entre el costo y beneficio resulto ser el óptimo**. También el colocar cubiertas específicas a cada espacio, generaba que el visitante tuviera una lectura clara del sitio.

Para el *Cuarto de Mármol en la Casa del Relieve de Telephus* se construyó una cubierta con pendiente a base de una armadura con forma de cuadrícula, los cuales fueron colocados muy cerca uno del otro y así evitar la necesidad de colocar una segunda estructura a base de vigas. Los apuntalamientos se apoyan sobre una viga perimetral que consta de marcos situados en correspondencia con las áreas de puerta y ventanas.

En el atrio de la *Casa de la Gema* se construyó una cubierta que toma la técnica romana original, pero colocada sobre el muro existente. Retomando la idea de usar piezas pequeñas y fácilmente transportables, se usaron viguetas de madera de menores dimensiones, los cuales se unían en sitio hasta 5 piezas para formar una viga que abarcara la anchura del atrio.

Las pendientes fueron hechas con tablonos Sterling 'OSB unidas a placas impermeables con un recubrimiento a base de cobre en la cara externa, lo que le da una larga vida útil a los tablonos y al envejecer la capa de cobre, da una apariencia agradable.



Figura 7.- Imagen de la izquierda vemos el modelo 3D de la cubierta. La imagen de la derecha corresponde al estado actual sobre el sitio arqueológico. Imagen tomada de Rizzi, 2011, pág. 216-217.

### II.2.2.- Caso Piazza Armerina. (Villa del Casale), Sicilia, Italia.

La Villa del Casale en Piazza Armerina en Sicilia, es una casa romana con casi cuatro mil metros cuadrados de mosaicos. A finales de los años cincuenta se decidió proteger los acabados con una cubierta, esta consistía en una estructura transparente de plástico y vidrio. Al estar hecha de materiales más modernos, era claramente distinguible de los vestigios, sin embargo, la cubierta se encontraba bastante deteriorada por lo que plantearon varias propuestas; la primera consistía en reconstruir los muros para colocar una cubierta que imitara al original, la otra propuesta consistía en edificar un gran domo que protegiera toda el área, otra opción era la de restaurar la cubierta existente al ser una estructura "histórica".

Ante este panorama, el autor del texto y del proyecto de la cubierta, menciona las desventajas de cada propuesta:

*“La primera propuesta, consiste en hacer una reconstrucción idéntica al monumento por lo que **fue descartada por requerir de una extensiva reconstrucción para la cual no se contaría con suficientes evidencias,** además de que obligaría a los visitantes a caminar sobre los mosaicos.*

*La segunda propuesta consiste en la colocación de un domo geodésico que cubriera el sitio por completo, la cual fue rechazada por razones ambientales y estructurales: **una cubierta de 140 metros de diámetro requeriría de una cimentación muy grande que forzosamente se habría tenido que realizar sobre el contexto arqueológico que no se había excavado.***

*Finalmente, la idea de restaurar la estructura existente, muy apoyada por algunos expertos, fue rechazada por las razones siguientes: la condición actual de la cubierta diseñada por Minissi (el arquitecto responsable del diseño de la cubierta hecha a finales de la década de los cincuenta) es peor de lo que los expertos que apoyan su conservación han declarado. La inspección de sus condiciones revela inmediatamente que la estructura de metal presenta problemas serios de oxidación y las láminas de vidrio y plástico, ya amarillentas, permiten la entrada de agua. Además, la estructura es muy pequeña e inestable como para soportar la acción de los vientos y los terremotos<sup>13</sup>”*

Por consiguiente, **la creación del nuevo proyecto tendrá que hacer uso de reconstrucciones en lo mínimo posible**, con el fin de evitar alterar la autenticidad del sitio pero podrá sugerir una distribución espacial original, por medio de la colocación de una cubierta opaca y ventilada, cubierta en su exterior con una capa de cobre y la colocación de paneles enlucidos verticales en todo el perímetro que asemejen la técnica de enlucido original, con una ligera separación entre ellos, con el fin de obtener una iluminación similar a la que pudo haber existido originalmente, además de mejorar las condiciones climáticas al interior del edificio.

---

<sup>13</sup> (Rizzi, 2011, págs. 218-219)



Figura 8.- Vista 3D del proyecto. Imagen tomada de Rizzi, 2011, pág. 220.

### **II.2.3.- Caso Copán. (Escalinata de Jeroglíficos). Copan, Honduras.**

A iniciativa del Instituto Getty de Conservación (GCI) se propuso proteger la escalinata jeroglífica de Copán en Honduras, la cual nunca ha tenido una cubierta para su protección. Ante lo altamente deteriorados que se encuentran los glifos mayas esculpidos en piedra volcánica suave, se determinó, en base a un análisis científico realizado a la escalinata, que para evitar daños futuros es necesario que los escalones se mantengan protegidos de la lluvia. Para la colocación de una cubierta que minimizara este impacto, se tomaron algunos parámetros que son:

- Proteger la escalinata de la lluvia.
- Proteger la escalinata de incidencia directa de luz.
- Mantener estable la temperatura en la superficie.
- Prevenir la acumulación de hojas.
- Tener un impacto mínimo en la apreciación de la zona arqueológica.
- Resistir el clima local.
- Ser fácil de mantener y remplazar.
- Mantener un buen grado de iluminación.
- Proveer de circulación de aire para la comodidad de los visitantes.

- Su instalación se deberá minimizar el contacto con los escalones y ser seguro para las personas que lo instalen.
- Considerar el impacto estético que tendrá en el paisaje.



Figura 9.- Maqueta de la cubierta para la escalinata. Imagen tomada de Rizzi, 2011, pág. 223.

#### II.2.4.- Conclusiones.

La colocación de cubierta en sitios arqueológicos, resulta ser un tema demasiado delicado. Por un lado, se establece la prioridad de proteger el patrimonio que se encuentra expuesto (sea mosaicos, relieves, pintura mural, etc.) por medio de una estructura temporal, reversible y que se diferencie claramente de los vestigios tanto en su sistema constructivo como de los materiales sin llegar a opacar al sitio, es decir, deben de enmarcarlo, pero también se menciona que las cubiertas se deben de integrarse al entorno sin aparentar ser originales.

En los casos antes descritos, si bien están ubicados en sitios diferentes (Honduras e Italia) tienen puntos en común:

- El uso de materiales locales y de dimensiones menores para su fácil manejo.
- El uso de sistemas constructivos sencillos que no requieran mano de obra calificada.

- Buscan una integración al sitio por medio de la forma.
- Intentan diferenciarse del sitio por medio del sistema constructivo o estructural y no tanto por los materiales que usan.
- Fácilmente reversibles.
- No requieren grandes inversiones ni grandes intervenciones para su colocación.
- Toman en cuenta la impresión que tendrá el visitante al contemplar la cubierta sobre los vestigios que protege, tratando de no confundirlo ni engañarlo.

Es claro que los puntos antes mencionados, se vuelven ejes rectores que marcaran el rumbo de la concepción, diseño y de ser posible, su futura construcción de la cubierta para el Edificio I en la zona arqueológica de El Tajín, Veracruz. Sin embargo, también los casos nos muestran detalles importante que han que considerar y evitar a toda costa (el uso de cobre en la parte exterior de la cubierta, si bien se encuentra en la parte superior de la estructura, sin el debido tratamiento y mantenimiento, al deteriorarse se oxidan y por consiguiente, al presentarse humedad o lluvia harán que el óxido se escurra y se filtre por la misma cubierta, lo que provocara daños a los vestigios), o como en el caso de la propuesta de la cubierta de la escalinata, que si bien el propósito es el de la protección de los elementos esculpidos, no justifica el realizar varias perforaciones a las plataformas que integran a la pirámide.

## **II.3.- Desarrollo del proyecto.**

### **II.3.1.- Concepción geométrica.**

Desde el inicio, las condicionantes para diseñar la cubierta son las siguientes; ser de una construcción sencilla y que incorpore mano de obra local, una forma que pueda integrarse fácilmente al sitio arqueológico enmarcando al vestigio, una cimentación poco profunda y que la cubierta sea fácilmente reversible. El uso de formas geométricas simples responde a dos premisas; la primera es que las curvas son formas geométricas sencillas que fácilmente se pueden integrar e identificar en el contexto donde se ubiquen. Por otra parte, la elección de estas formas, responde a la filosofía del diseño de las cubiertas ligeras, es decir, estructuras que logren su estabilidad y resistencia por forma y no por el aumento en su masa.

*“Del esfuerzo por entender el mundo en que vivimos, desarrollamos la geometría; y del rigor de sus demostraciones, aprendimos a plantear, analizar y concluir las leyes que organizan nuestra percepción del mundo. Así la geometría es un lenguaje en el que percibimos orden, solidez y armonía en nuestro trabajo, valores que compartimos con todos, los cuales son atemporales y universales.”<sup>14</sup>*

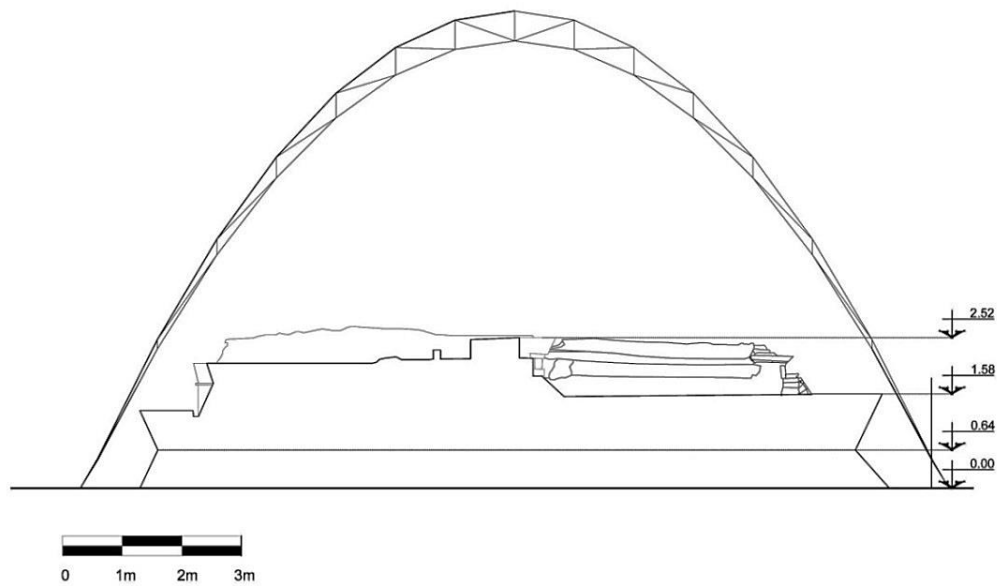
A través de la historia de la arquitectura, el uso de una geometría estructural ha demostrado su funcionalidad y estabilidad, dotando de orden y belleza a las estructuras y brindando aportes a nuestra cultura tectónica. Es por esto que el uso de la geometría aplicada a las estructuras y a la construcción se vuelve fundamental en el desarrollo de la propuesta que busca, como objetivo principal, la estabilidad estructural sin comprometer al recinto arqueológico usando materiales y las habilidades constructivas típicas de la región.

En un primer ejercicio, se realizó un acercamiento mediante el uso de una parábola, sin embargo, los riñones del arco se encontraba demasiado cerca del talud invertido y al aumentar dicha separación, aumentaba el claro y la altura de la cubierta, lo que se traduce como una estructura de dimensiones excesivas, por lo que se este tipo de curva se desechó.

---

<sup>14</sup> (López Carmona & Hernández Hernández, 2017, pág. 48)





**Figura 10.- Primer acercamiento mediante el uso de arcos parabólicos.** Dibujo del autor.

Otra opción pudo haber sido el usar una curva de media circunferencia, ya que esta permite aumentar el claro sin que la flecha varié demasiado, pero en la temporada de lluvias, se necesita una mayor pendiente y preocupaba que en la parte superior de una cubierta de media circunferencia, la lluvia se acumulara ante la poca inclinación que tendría, por lo que se optó por la elipse que cumplía con las dimensiones deseadas y además su forma nos da una pendiente pronunciada para el desalojo de agua pluvial.

Para obtener las dimensiones deseadas de la elipse que cumplan con los requerimientos que exige el proyecto, se usaron los métodos gráfico y numérico o analítico, con la finalidad de realizar un correcto trazo de la elipse y comprobar numéricamente, la precisa ubicación de los puntos donde se realiza el trazo.

### II.3.2.- La Elipse.<sup>15</sup>

La elipse es una curva plana que se obtiene por el corte oblicuo de un plano a un cono circular recto.

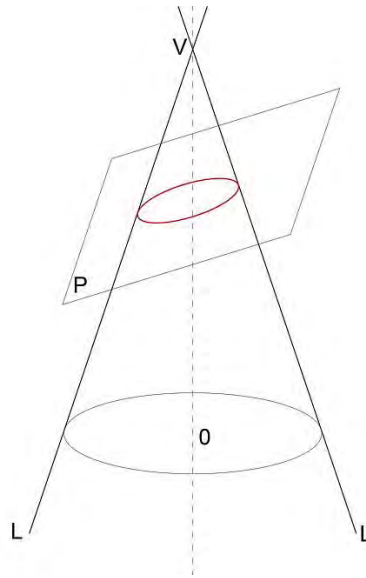


Figura 11.- Obtención de la elipse mediante el corte a un cono con un plano oblicuo a su eje de simetría.  
Dibujo del autor.

Lehmann define a esta curva plana de la siguiente forma:

*“Una elipse es el lugar geométrico de un punto que se mueve en un plano de tal manera que la suma de sus distancias a dos puntos fijos de ese plano es siempre igual a una constante, mayor que la distancia entre los dos puntos<sup>16</sup>.”*

Para el trazo de la curva elíptica para el diseño de nuestra cubierta se utilizaron dos métodos que explicaremos a continuación.

#### II.3.2.a- Método gráfico<sup>17</sup>.

Para obtener una curva elíptica adecuada, primero se obtendrá de la forma gráfica, planteando los siguientes valores; tenemos un claro en su sección transversal de 15 m y una altura de 8 m lo que nos da tres puntos por los cuales debe pasar nuestra elipse; los

---

<sup>15</sup> Las partes que componen a una elipse ver Anexos  
Anexo 1. La elipse y sus componentes.

<sup>16</sup> (Lehmann, 1980, pág. 173)

<sup>17</sup> Metodología usada para el trazo de la elipse, en base a los apuntes que nos proporcionó el Arq. José Luis Rincón Medina, asesor de esta tesis.

puntos A y B que son los puntos que delimitan al segmento de nuestro claro y el punto C que corresponde a la altura.

1. Se traza una circunferencia (color rojo) que paso por el punto **C**.
2. Prolongar la línea **A-B** hasta que toque un punto de la circunferencia de radio mayor **a** para así obtener el punto **D**.
3. Una vez establecido dicho punto, trazamos una línea que vaya del centro **O** hasta el punto **D**.
4. Sobre el punto **A** trazamos una línea recta vertical que pase por la línea **O-D**. La intersección que se produce entre esas dos líneas se conoce como punto **E**.
5. La distancia **O-E** será el radio menor **b** de la circunferencia.
6. Trazamos varias líneas que partan desde el punto **O** (líneas punteadas color gris) y que toquen diferentes puntos de la circunferencia de radio mayor **a** (**O-a**) y por consiguiente, pasaran también por la circunferencia de radio menor **b** (**O-b**).
7. En los puntos que tocan a la circunferencia de radio mayor **a**, trazamos una línea recta horizontal (líneas punteadas de color rojo). En los puntos donde se intersecta con la circunferencia de radio menor **b** trazamos una línea vertical (líneas punteadas color azul).
8. La intersección de las líneas horizontales y verticales nos dará como resultado los puntos donde pasara el trazo de nuestra elipse.

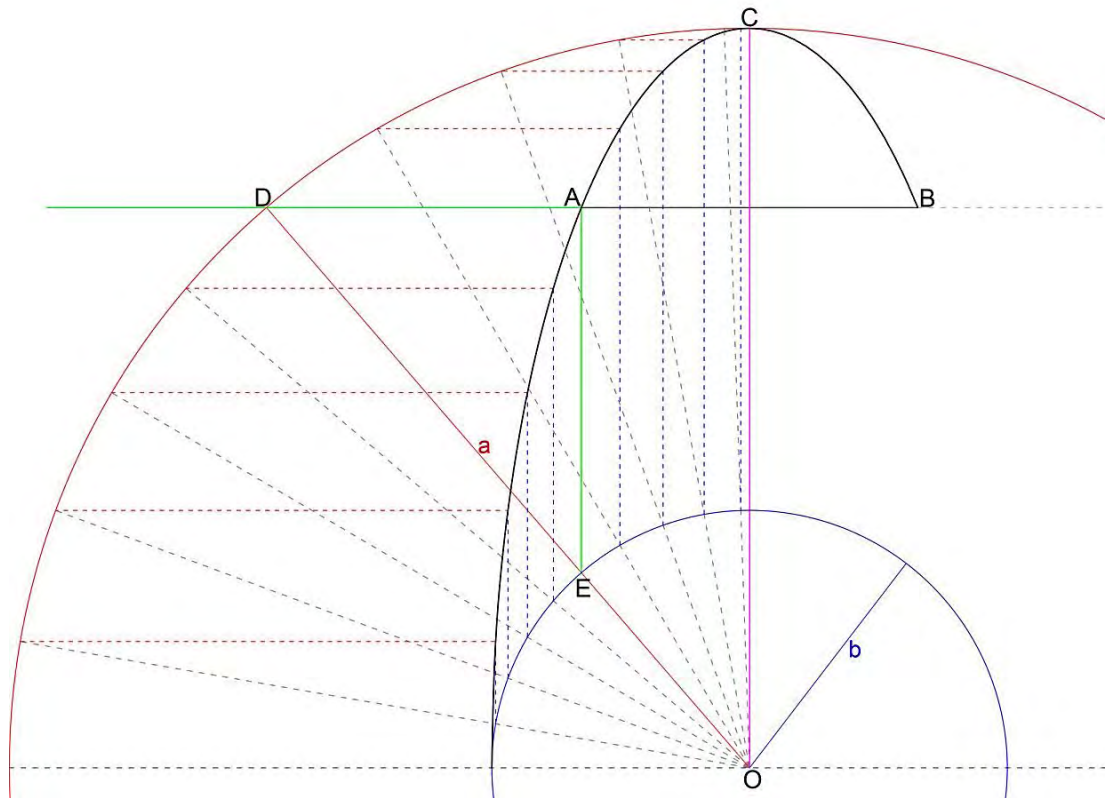


Figura 12.- Trazo de la elipse que paso por los puntos A, B y C. Dibujo del autor.

### II.3.2.b- Método analítico.

Una vez obtenida de manera gráfica la elipse que pasa por los puntos deseados, ahora comprobaremos de manera algebraica las distancias de los puntos que nos sirven de guía para el dibujo de la elipse, con la finalidad de obtener una mayor precisión de nuestro trazo.

La ecuación de la elipse es la siguiente:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Despejamos:

$$\frac{x^2}{a^2} = 1 - \frac{y^2}{b^2} \longrightarrow x^2 = \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)a^2 \longrightarrow x = \sqrt{a^2\left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)}$$

$$x = a \sqrt{\left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)}$$

Para poder usar esta ecuación, giramos nuestro dibujo 90° para invertir los ejes coordenados y así poder sustituir los valores en la ecuación, es decir, los valores que estaban en el eje coordenado **X** pasaran a ser los valores del eje **Y** y viceversa.

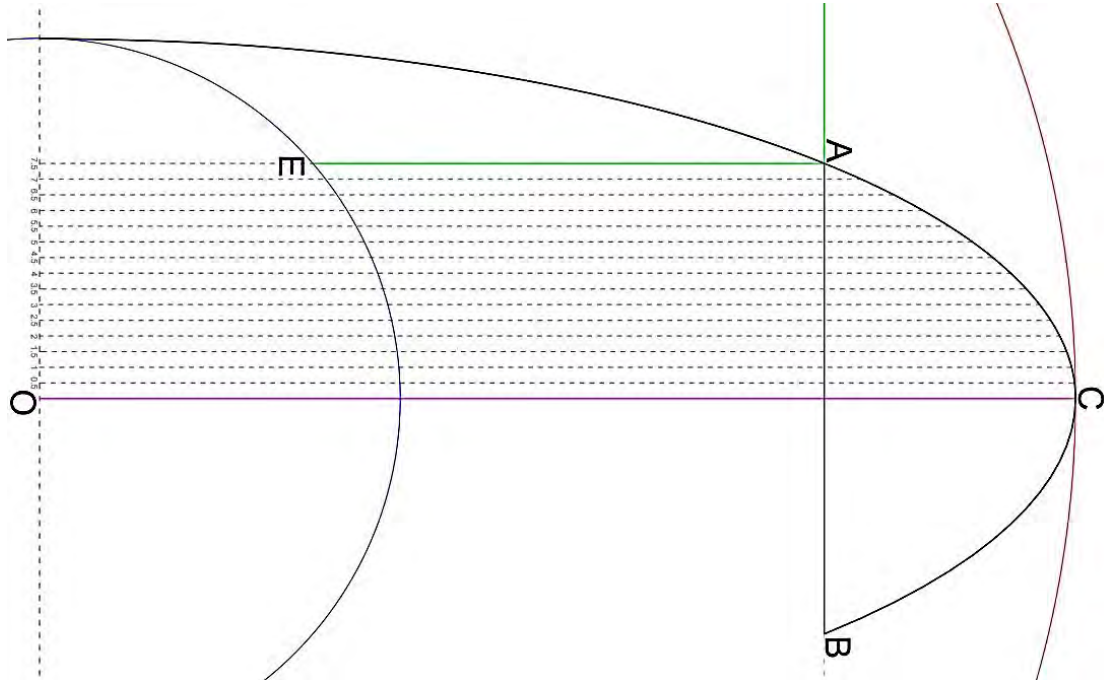


Figura 13.- Giro de la elipse. En este caso, el giro se hace con la finalidad de invertir los ejes coordenados de la elipse y así poder hacer uso de la ecuación  $x = a\sqrt{(1 - y^2/b^2)}$ . Ahora sobre nuestro actual eje Y, el punto A se encuentra a 7.5 m respecto al eje Y. Lo que queremos saber es la distancia del punto A con respecto al eje X. A su vez, sobre el mismo eje Y, se divide a cada 0.50 m la distancia que hay entre 0 a 7.5 m para determinar las distancias en X de cada punto que toca a la sección de la curva elíptica A-C. Dibujo del autor.

Sabemos que los radios de las dos circunferencias son los siguientes:

- Circunferencia de radio mayor **a**: 33 m.
- Circunferencia de radio menor **b**: 11.49 m.

Sustituyendo esos valores en la ecuación:

$$x = 33 \sqrt{\left(1 - \frac{y^2}{(11.49)^2}\right)}$$

Cada valor que sustituamos en  $y^2$ , corresponde a cada 0.50 m hasta llegar a 7.5 m.

Elipse 1. Dimensiones 8 x 15 m.		
Punto	Y (metros)	X (metros)
A	0	33
B	0.5	32.9687
C	1	32.8747
D	1.5	32.7175
E	2	32.4962
F	2.5	32.2093
G	3	31.8553
H	3.5	31.4317
I	4	30.9357
J	4.5	30.36
K	5	29.7116
L	5.5	28.9737
M	6	28.1432
N	6.5	27.2119
O	7	26.1689
P	7.5	25.0001

Tabla 1.- Resultados obtenido en X a partir de la sustitución en  $y^2$ .

Este mismo procedimiento se repite para el método analítico de la segunda elipse, por lo que los radios de las dos circunferencias son los siguientes:

- Circunferencia de radio mayor **a**: 33 m.
- Circunferencia de radio menor **b**: 12.07 m.

Sustituyendo esos valores en la ecuación:

$$x = 33 \sqrt{\left(1 - \frac{y^2}{(12.07)^2}\right)}$$

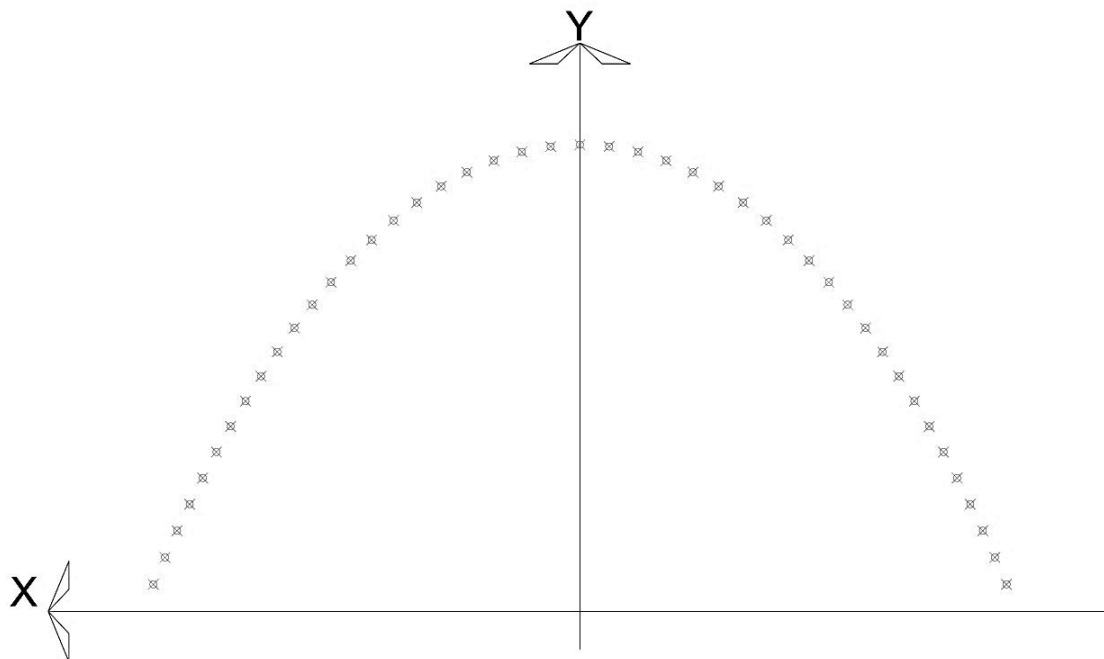
Cada valor que sustituamos en  $y^2$ , corresponde a cada 0.50 m hasta llegar a 7.88 m (que es la mitad del claro de los 15.76 metros en total de los arcos elípticos que se intersectan entre sí).

Elipse 2. Dimensiones 8 x 15.76 m.		
Punto	Y (metros)	X (metros)
A	0	33
B	0.5	32.9716
C	1	32.8865
D	1.5	32.7441
E	2	32.5438
F	2.5	32.2843
G	3	31.9644
H	3.5	31.5821
I	4	30.1351
J	4.5	30.6207
K	5	30.0353
L	5.5	29.3748
M	6	28.6338
N	6.5	27.8061
O	7	26.8835
P	7.5	25.8559
Q	7.88	24.9968

Tabla 2.- Resultados obtenido en X a partir de la sustitución en  $y^2$ .

### II.3.2.c- Longitud de la curva.

Para determinar de manera aproximada la longitud de la curva elíptica, dividimos la sección de curva en 46 segmentos. La unión de cada segmento forma un punto, así que la suma de todas estas uniones nos da un total de 45 puntos. Estos puntos no se escogieron al azar, representan la posición de las alfajillas horizontales de bambú y su intersección con ambos arcos. Más adelante se expondrá las ventajas de definir la posición de los puntos de las alfajillas.



**Figura 14.- Puntos sobre la curva elíptica. Al dividir la curva en segmentos de línea, generan puntos en sus intersecciones con las otras líneas colindantes. Estos representan la posición y la distancia a la que se encontrarán las alfajillas de bambú, lo que será de gran utilidad para la cuestiones de cálculo estructural. Dibujo del autor donde se modificó la apariencia de los puntos para fines de representación. Dibujo del autor.**

Obtenidos los puntos, se procede a identificar su posición en el eje de coordenadas X-Y. Después de identificar las coordenadas de todos nuestros puntos, establecemos lo siguiente; si dibujamos dos líneas que tengan como origen un mismo punto, una de estas líneas que es paralela al eje de las abscisas se prolonga hasta formar un punto de intersección con la línea paralela al eje de las ordenadas del punto anterior. De igual manera, la otra línea que es paralela al eje de las ordenadas se prolonga hasta terminar intersectando con la línea que es paralela al eje de las abscisas del punto siguiente.

La unión de estas líneas forma pequeños ángulos rectos que al unirse los otros dos extremos con una línea diagonal (*Figura 16 en color rojo*), forman un triángulo rectángulo. Podemos saber el valor de estas líneas diagonales usando el Teorema de Pitágoras, con el objetivo de sumar todas las hipotenusas de cada una de las figuras y así conocer la longitud de curva de nuestras elipses, ya que las diagonales o hipotenusas, corresponden a cada segmento de curva entre dos puntos, aunque de manera aproximada al no coincidir con el segmento de curva elíptica.



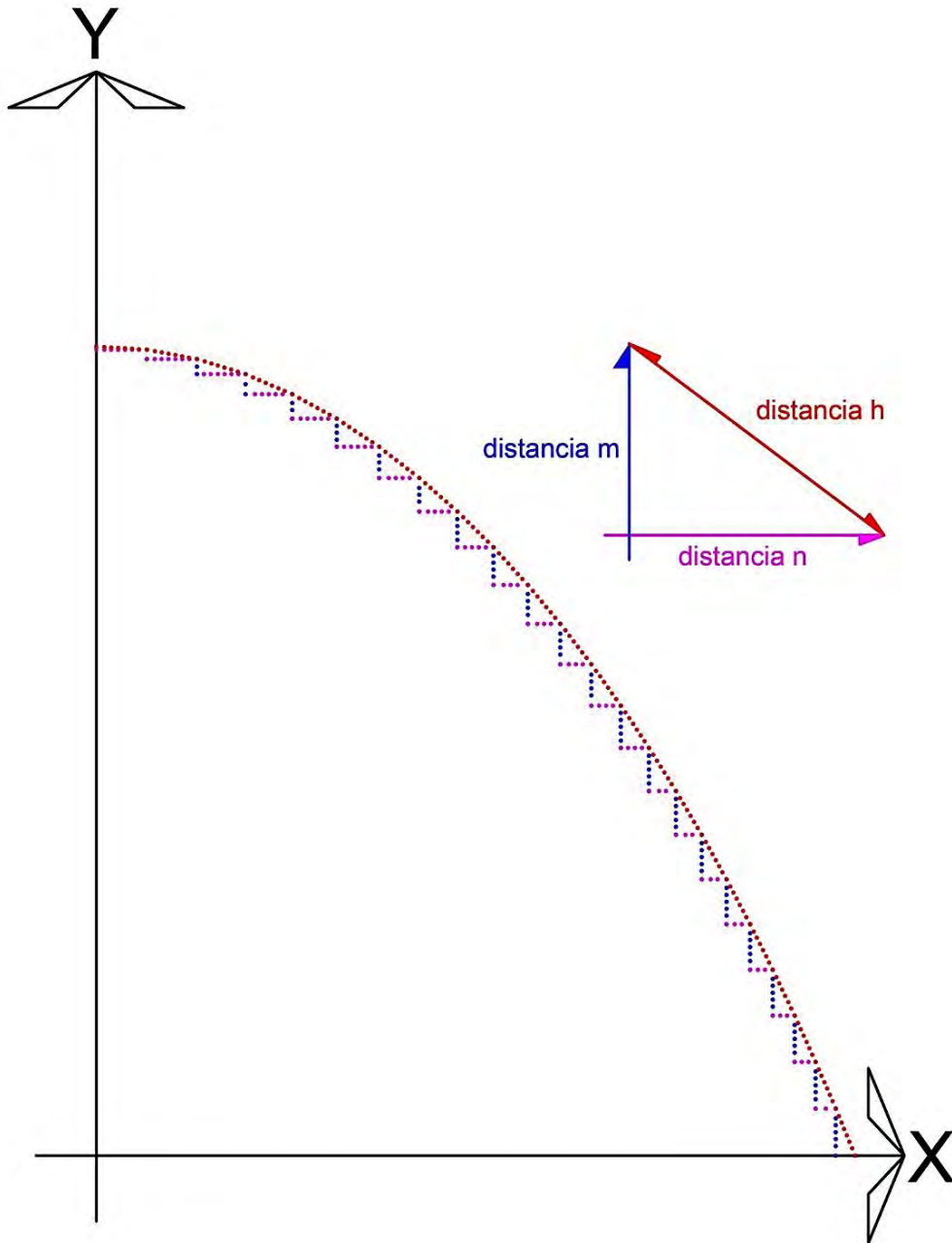


Figura 15.- Prolongación e intersección de líneas **m** (color azul) paralelas a las ordenadas y líneas **n** (color magenta) paralelas a las abscisas. Dibujo del autor.

Sin embargo, antes de hacer uso del teorema de Pitágoras, tenemos que saber el valor de los catetos. A las líneas horizontales o catetos opuestos los identificaremos con la letra **n** mientras a las líneas verticales o catetos adyacentes, les asignaremos la letra **m**. Para conocer la longitud de las líneas **n** y **m**, realizamos la siguiente operación:

1.- Teniendo ubicados los puntos de unión de los segmentos de curva en nuestro plano cartesiano, registramos en una tabla su posición en **X** y en **Y**.

2.- Para obtener cada una de las longitudes de las líneas **n**, formulamos la siguiente resta:

$$n = X_{P0}, n_{P1} = X_{P1} - X_{P0}, n_{P2} = X_{P2} - X_{P1}, n_{P3} = X_{P3} - X_{P2} \dots n_{P23} = X_{P23} - X_{P22}.$$

3.- Ahora queremos saber la longitud de cada una de las líneas **m**, formulamos lo siguiente:

$$m = Y_{P0}, m_{P1} = Y_{P1} - Y_{P0}, m_{P2} = Y_{P2} - Y_{P1}, m_{P3} = Y_{P3} - Y_{P2} \dots m_{P23} = Y_{P23} - Y_{P22}.$$

Podemos rectificar estos datos en nuestro dibujo, tomando las medidas correspondientes en cada una de las líneas horizontales y verticales o catetos de cada uno de los triángulos rectángulos.

4.- El teorema de Pitágoras establece que la suma del cuadrado de los catetos nos da el cuadrado de la hipotenusa:

$$a^2 + b^2 = c^2$$

Para conocer la hipotenusa, despejamos de la fórmula el valor **C**:

$$C = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Realizado el despeje, procedemos a sustituir en las incógnitas **a** y **b** los valores **n** y **m** de cada punto, teniendo como resultado:

- Longitud de la elipse 1 (*Dimensiones 8 x 15 m.*): 23.1150 m.
- Longitud de la elipse 2 (*Dimensiones 8 x 15.76 m.*): 23.6597 m.

## II.4.- Descripción general de la propuesta.

La propuesta de la cubierta consta principalmente por una sucesión de arcos elípticos a base de madera, separados a cada 2 metros los cuales forman un cañón corrido. Sobre de estos descansaran los elementos estructurales secundarios o alfajillas de bambú que servirán de soporte para el recubrimiento de palma.

Teniendo en cuenta que las superficies cilíndricas se forman a partir de una línea curva como directriz y con generatrices paralelas a un plano director entre sí. En este caso la directriz de la cubierta son los arcos elípticos y la generatriz se compone de las alfajillas que se proyectan paralelamente hacia los arcos elípticos, dándonos como resultado, una superficie cilíndrica de perfil elíptico. En base a la clasificación de las curvas que hace Gauss<sup>18</sup>, tenemos que nuestra cubierta es de curvatura nula ya que las directrices son líneas rectas o lo que equivale decir que su radio es infinito.

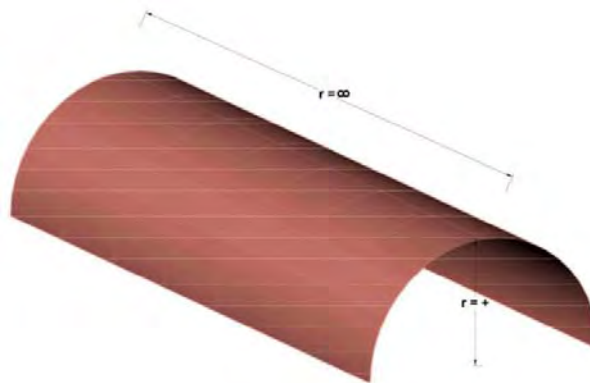


Figura 16.- Ejemplo de una superficie cilíndrica. Modelo 3D del autor.

La estructura permite librar el claro sin necesidad de apoyos intermedios. Las alfajillas de bambú, separadas entre sí a cada medio metro, le dan unidad a los arcos elípticos haciendo que la estructura trabaje como un conjunto. En la siguientes páginas, se muestran los planos de cortes y alzados y fotos de la maqueta de la primera propuesta.

---

<sup>18</sup> Carl Friedrich Gauss (*Brunswick 1777 - Gotinga 1855*), matemático alemán que realiza varias aportaciones al campo de las matemáticas, principalmente con su teoría de los números. En 1827 publica su "*Disquisiciones generales sobre superficies curvas*" donde establece una clasificación de las superficies en base a su curvatura como resultado del producto de sus radios. Una superficie positiva o *Sinclástica*, consiste en curvas generatrices que son cóncavas en un mismo sentido. Las superficies negativas o *Anticlástica* son generatrices perpendiculares entre sí pero cóncavas en diferentes direcciones. Por último, en las superficies de curvatura nula, sus generatrices son cóncavas en un sentido pero las directrices son líneas rectas.

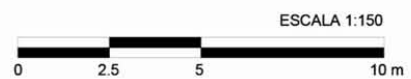
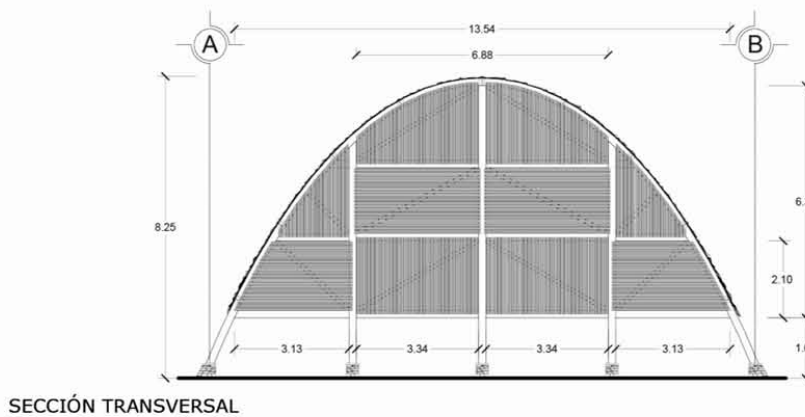
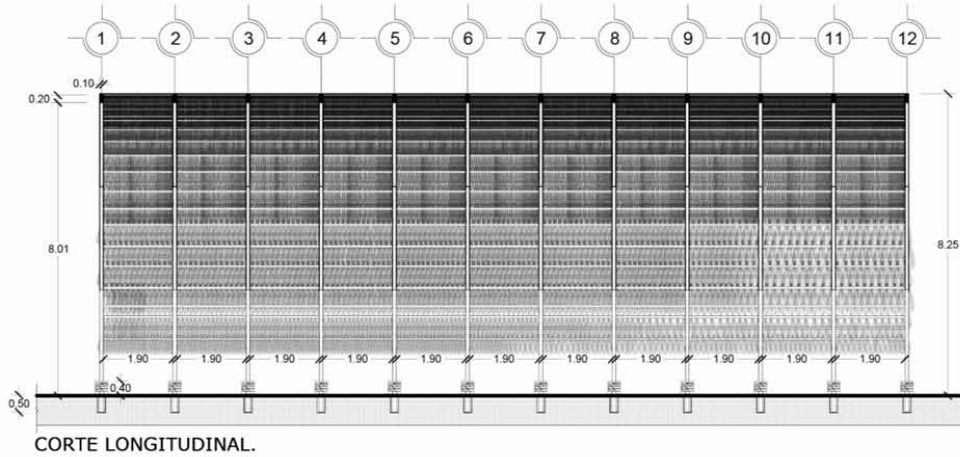
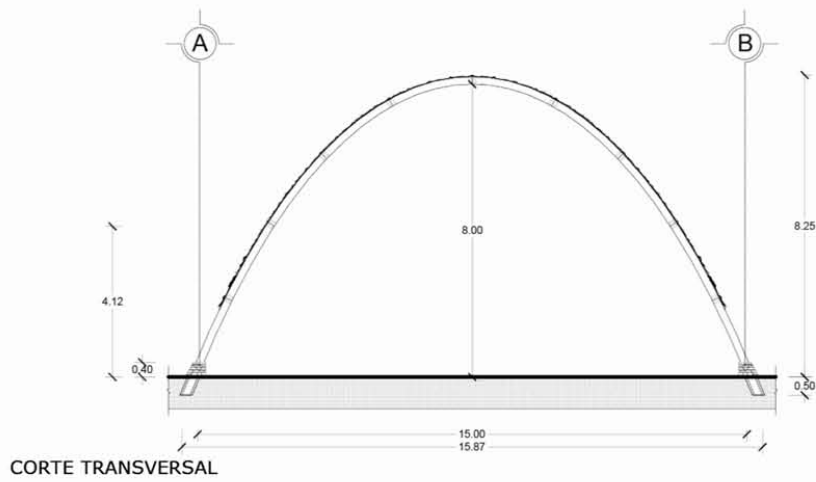


Figura 17.- Cortes y sección de la primera propuesta de cubierta para el edificio I. Dibujos del autor.

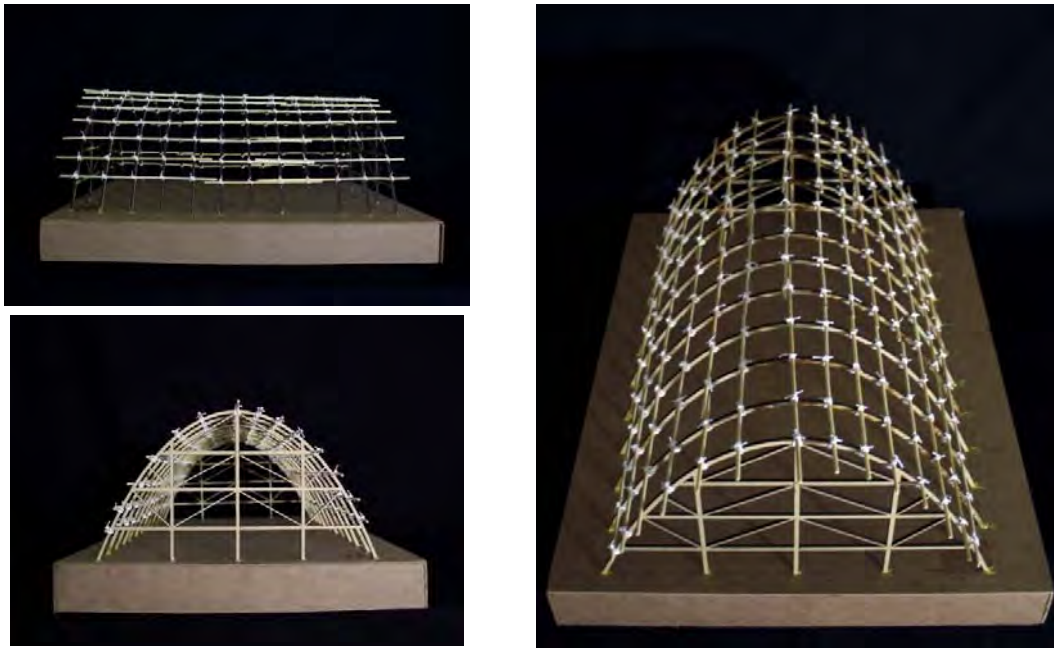


Figura 18.- Diferentes vistas de la maqueta de la primera propuesta. Fotos del autor.

Si bien la forma de la cubierta, evitaba el uso de apoyos intermedios sobre la estructura arqueológica, la cantidad de apoyos perimetrales era excesiva. Cabe agregar que si bien la cubierta podría resistir cargas muertas y vivas de manera eficiente, ante acciones accidentales como viento, presentará poca resistencia. Considerando la proximidad de la zona arqueológica con la costa del Golfo (a una hora en línea recta) se muestra vulnerable ante dichas fuerzas.

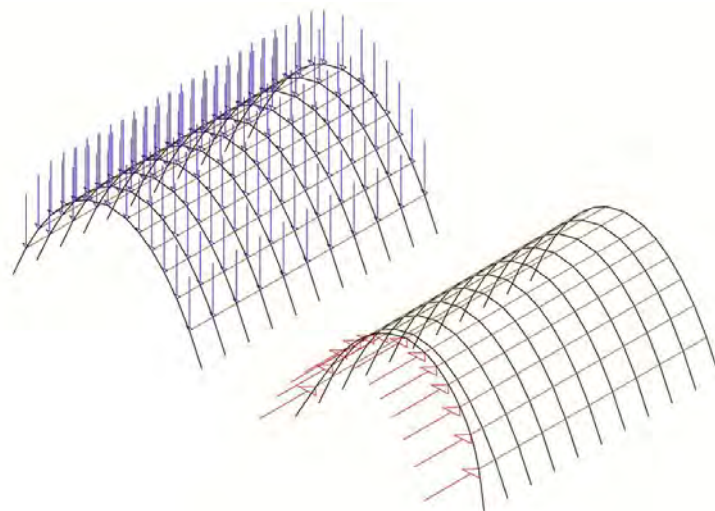
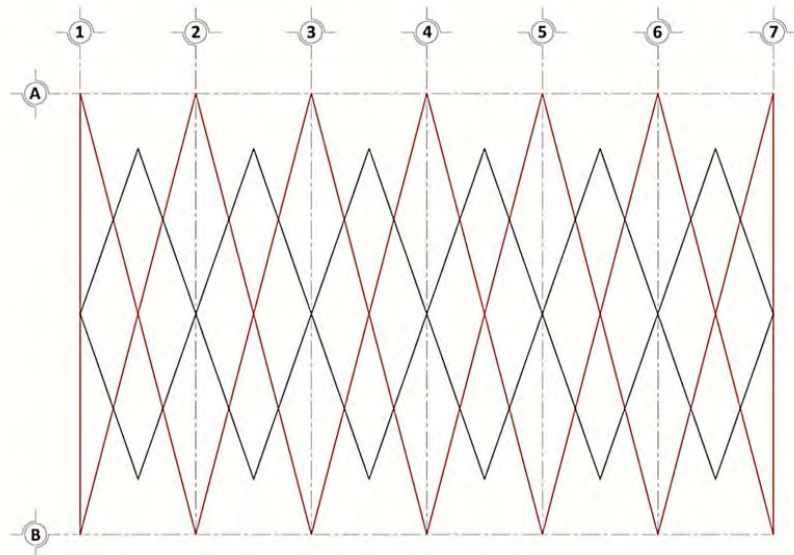


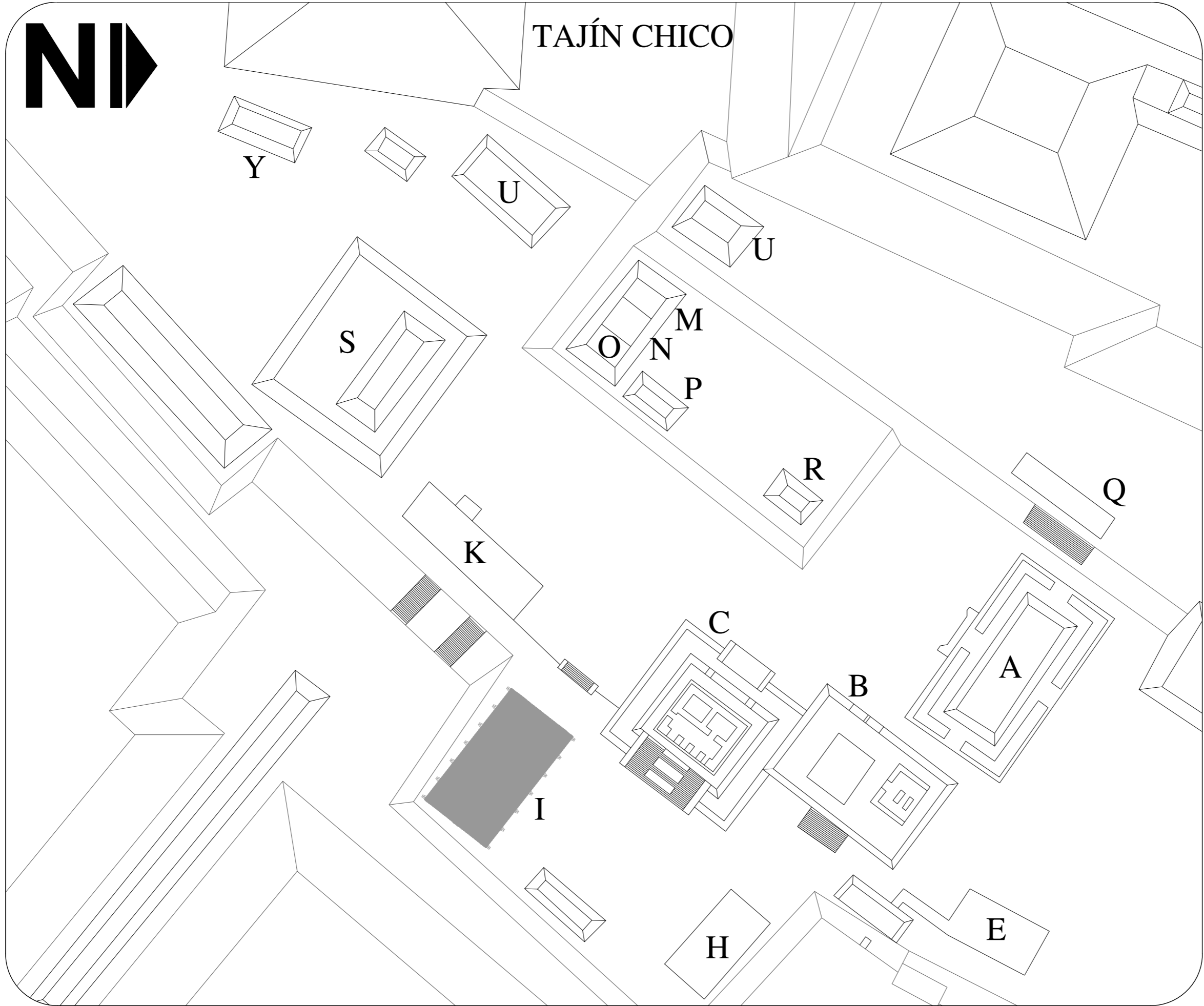
Figura 19.- Modelo 3D esquemático. La forma de la estructura es resistente a las cargas gravitacionales (*imagen superior izquierda*), sin embargo, ante fuerzas accidentales como viento presenta poca resistencia ante estas acciones (*imagen inferior derecha*). Dibujo del autor.

Estos factores llevaron a una modificación de la propuesta que pudieran cumplir dos cosas; reducir número de apoyos y garantizar una resistencia a las acciones del viento por lo que se optó por usar los mismos arcos elípticos intermedios en una disposición diagonal, intersectándose un arco con otro a manera de las bóvedas de crucería. De esta manera se reduce el número de apoyos y le brinda una mayor resistencia. Sin embargo, para darle todavía una mayor estabilidad y eficiencia estructural, se colocan varas de bambú de manera diagonal que se intersectan con los arcos elípticos y se unen con otras varas de bambú o con los arcos a través del uso de nodos, con el propósito de repartir las cargas de una manera más eficiente. Por último, se colocarían las alfajillas que van en sentido horizontal a los cuales van a ir amarrada la palma real como recubrimiento final de la cubierta.



**Figura 20.-** Nuevo planteamiento estructural. El uso de arcos elípticos diagonales (*color naranja*), responde a la necesidad de reforzar la estructura ante acciones como viento además de reducir el número de apoyos perimetrales. Para una mejor distribución de las cargas, se adiciona el uso de elementos estructurales secundarios (*rombos de color negro*) hechos de bambú. Dibujo del autor.

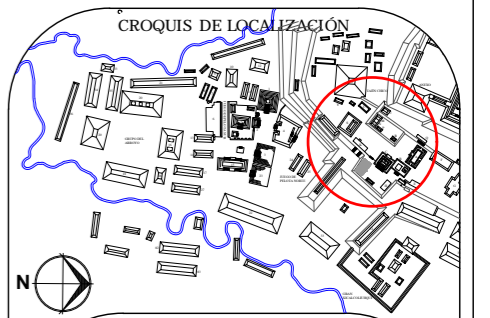
La disposición de estos elementos, se asemeja a los sistemas de bóvedas entramadas que consisten en una serie de arcos oblicuos que se intersectan para formar patrones cortos comúnmente en forma de diamante. Al realizar dicha modificación, no solo se da resistencia ante las fuerzas del viento, sino de facilitar su construcción debido a que para formar el entramado se necesitan elementos cortos, lo que facilita su traslado, manejo y montaje. A continuación, se incluyen los planos y fotografías de la maqueta de la nueva propuesta de la cubierta para el Edificio I.




# TAJÍN CHICO



**PUEA** PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA

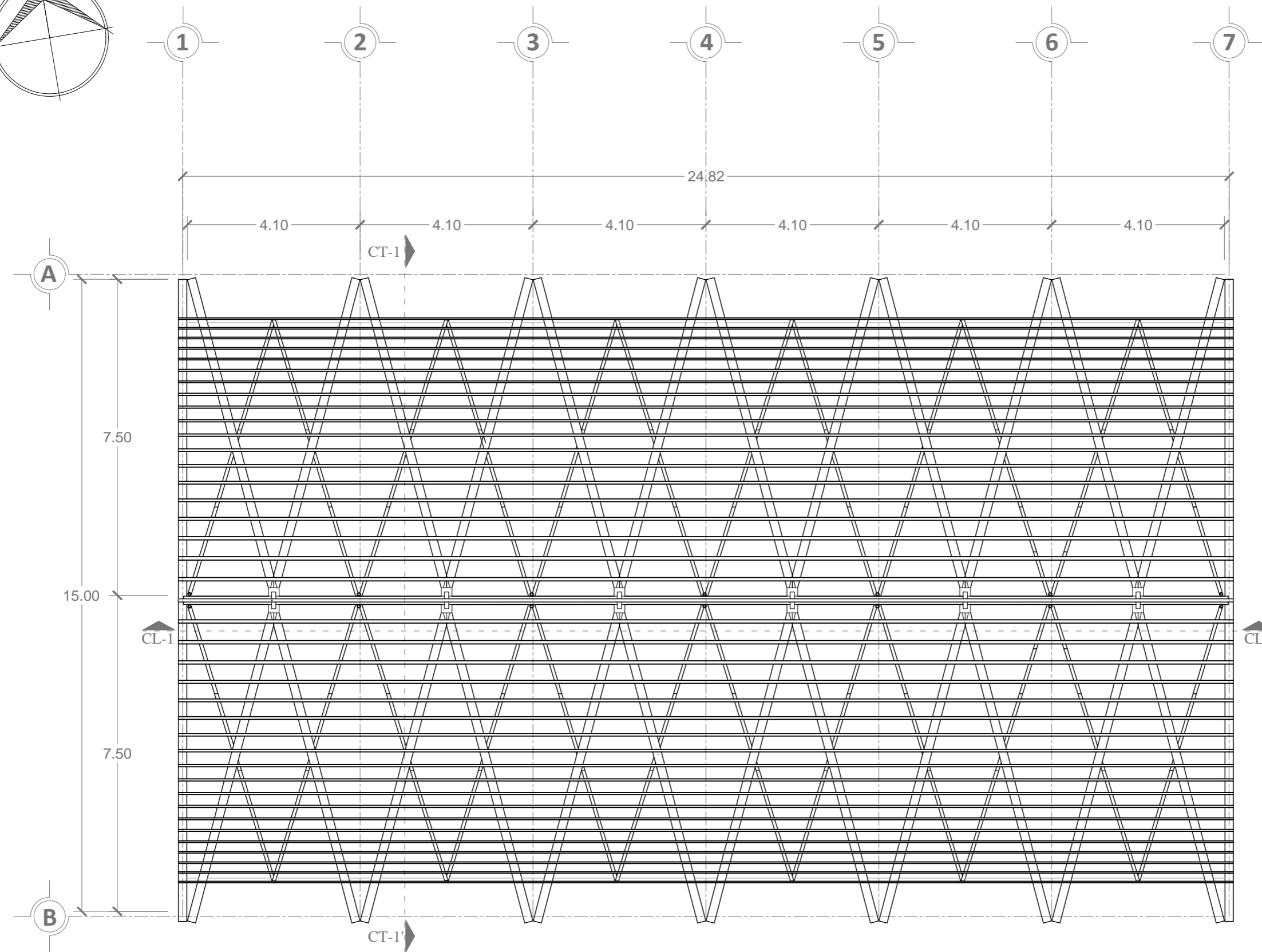
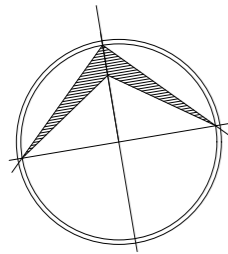


### SIMBOLOGIA

 Cubierta de protección para el Edificio I dentro del conjunto de Tajín Chico

Nota:  
Levantamiento y dibujos realizados por los Arquitectos Roberto Magdaleno Olmos y Raúl A. Hernández Estrada durante la temporada de trabajo en el año del 2010 dentro de las actividades programadas del Proyecto de Conservación de la Pintura Mural de la Zona Arqueológica de El Tajín. CNCPC-INAH

<b>PROYECTO</b>		<b>PROPUESTA ESTRUCTURAL PARA LA CUBIERTA EN EL EDIFICIO I.</b>	
<small>UBICACIÓN</small>	Zona de Monumentos Arqueológicos de El Tajín.	<small>ÁREA</small>	372.3 m <sup>2</sup>
<small>RESPONSABLE DE PROYECTO</small>	Arq. Fernando Urióstegui Díaz	<small>CLASE DE PLANO</small>	A-00
<small>TIPO DE PLANO</small>	ARQUITECTÓNICO		
<small>PLANO DE</small>	UBICACIÓN		
<small>PROYECTO</small>	Arq. José Luis Rincón Medina	<small>AÑO</small>	2019
<small>ESCALA</small>	1:2,500	<small>UNIDADES</small>	METROS
		<small>Cotas según a dibujo</small>	

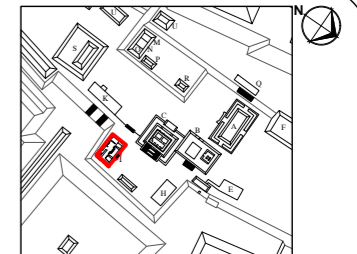


Escala Gráfica.



**UNAM** PROGRAMA  
ÚNICO DE  
ESPECIALIZACIONES  
EN ARQUITECTURA

CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGIA



PROYECTO:  
**PROPUESTA ESTRUCTURAL PARA LA  
CUBIERTA EN EL EDIFICIO I.**

UBICACIÓN: Zona de Monumentos Arqueológicos de El Tajín. ÁREA: 372.3 m<sup>2</sup>

RESPONSABLE DE PROYECTO: Arq. Fernando Urióstegui Díaz. CLAVE DE PLANO:

ESPECIE DE PLANO: ARQUITECTÓNICO. **A-01**

PLANO DE: CUBIERTA (Estructural)

PROYECTO: Arq. José Luis Rincón Medina. FECHA:

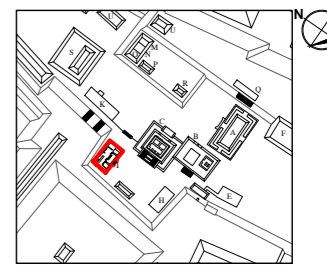
ESCALA: 1:100. UNIDADES: METROS. Cotas rigores a dibujo. **2019**





**PUEA** PROGRAMA  
ÚNICO DE  
ESPECIALIZACIONES  
EN ARQUITECTURA

CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGIA

CL-1 CL-1 Corte Longitudinal  
CT-1 CT-1 Corte Transversal

PROYECTO:  
**PROPUESTA ESTRUCTURAL PARA LA CUBIERTA EN EL EDIFICIO I.**

UBICACIÓN: Zona de Monumentos Arqueológicos de El Tajín. Área: 372.3 m<sup>2</sup>

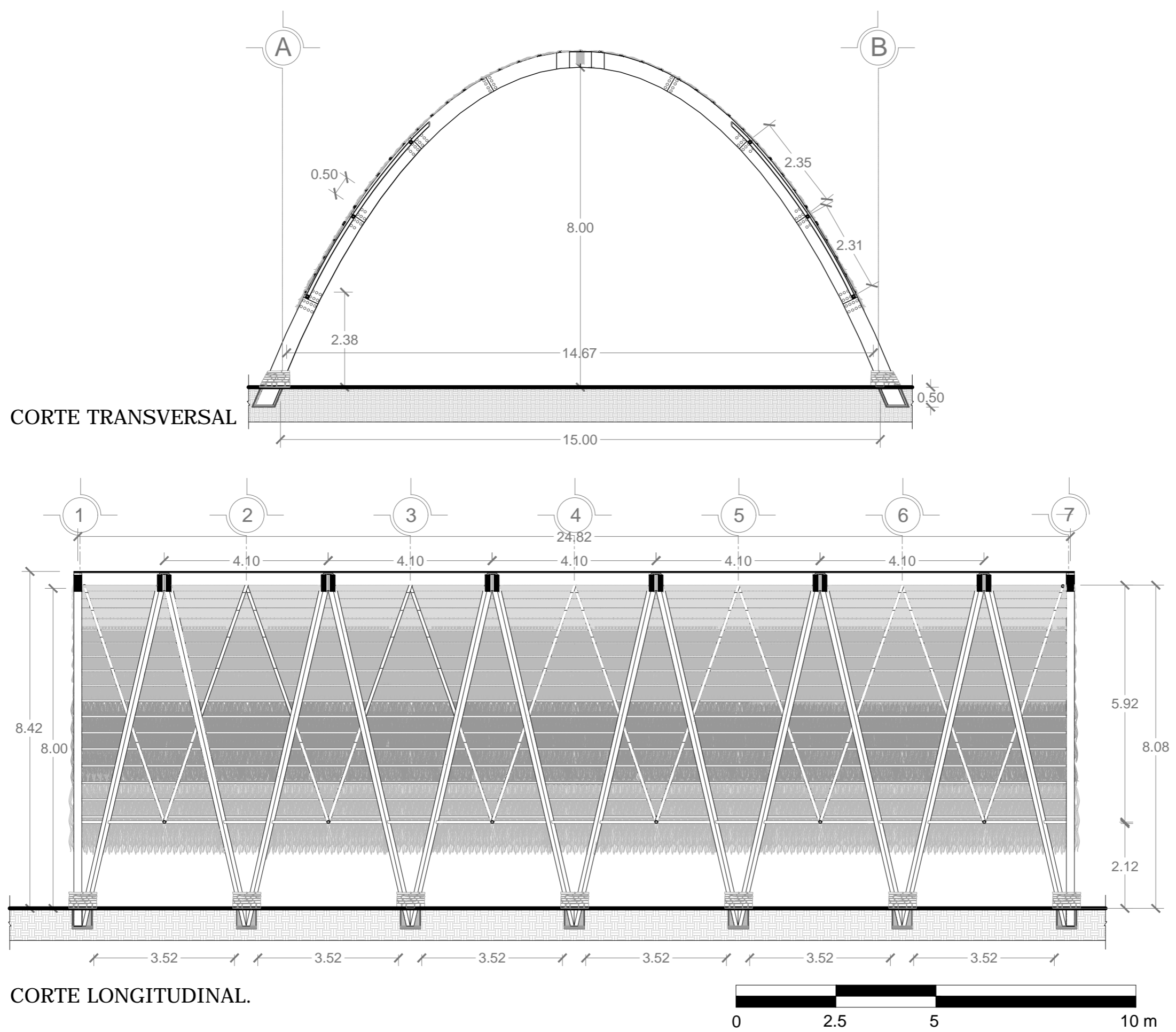
RESPONSABLE DE PROYECTO: Arq. Fernando Urióstegui Díaz. CLAVE DE PLANO:

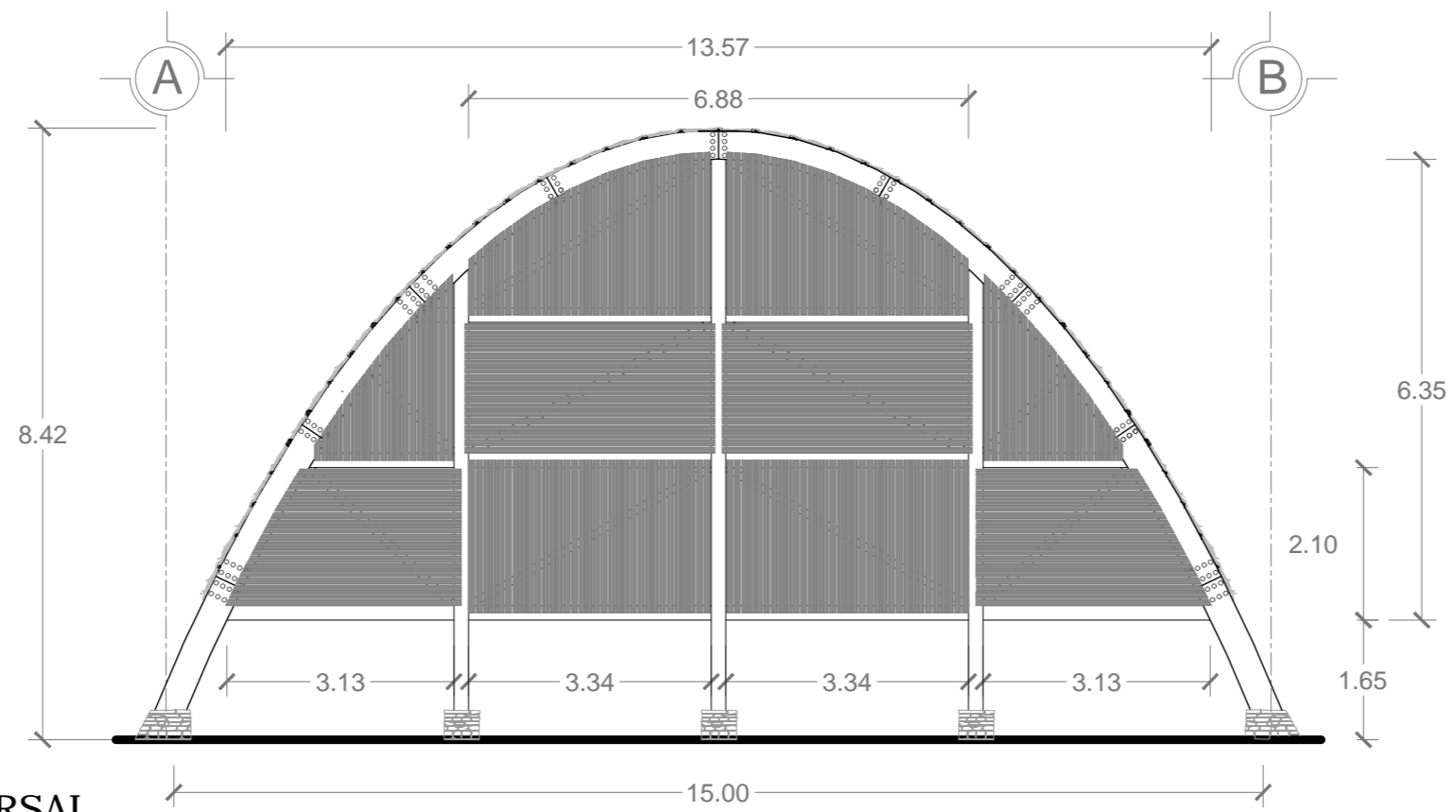
TIPO DE PLANO: ARQUITECTÓNICO. **A-02**

PLANO DE: CORTES

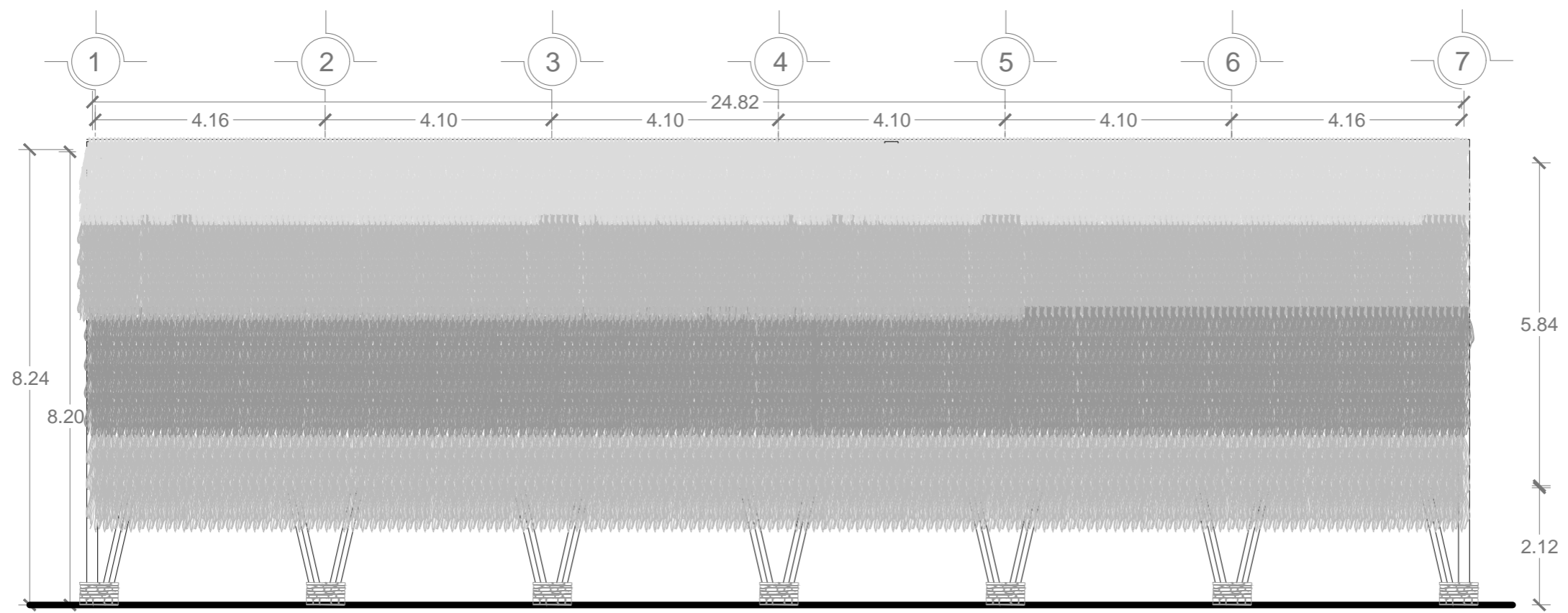
REVISOR: Arq. José Luis Rincón Medina. AÑO: 2019

ESCALA: 1:100. UNIDADES: METROS. Cotas rigien a dibujo.



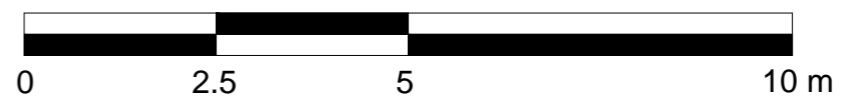


ALZADO TRANSVERSAL



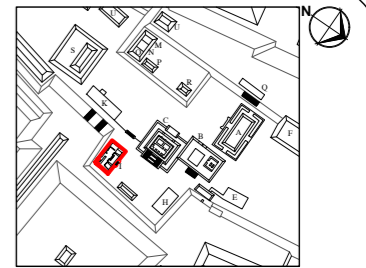
ALZADO LONGITUDINAL.

Escala Gráfica.



**PUEA** PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA

CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGIA

CL-I CL-I' Corte Longitudinal  
 CT-I CT-I' Corte Transversal

PROYECTO: PROPUESTA ESTRUCTURAL PARA LA CUBIERTA EN EL EDIFICIO I.

UBICACIÓN: Zona de Monumentos Arqueológicos de El Tajín. ÁREA: 372.3 m<sup>2</sup>

RESPONSABLE DE PROYECTO: Arq. Fernando Urióstegui Díaz. ESCALA DE PLANO:

TIPO DE PLANO: ARQUITECTÓNICO. **A-03**

PLANO DE: ALZADOS

REVISOR: Arq. José Luis Rincón Medina. FECHA:

ESCALA: 1:100. UNIDAD: METROS. Cotas rigen a dibujo. **2019**

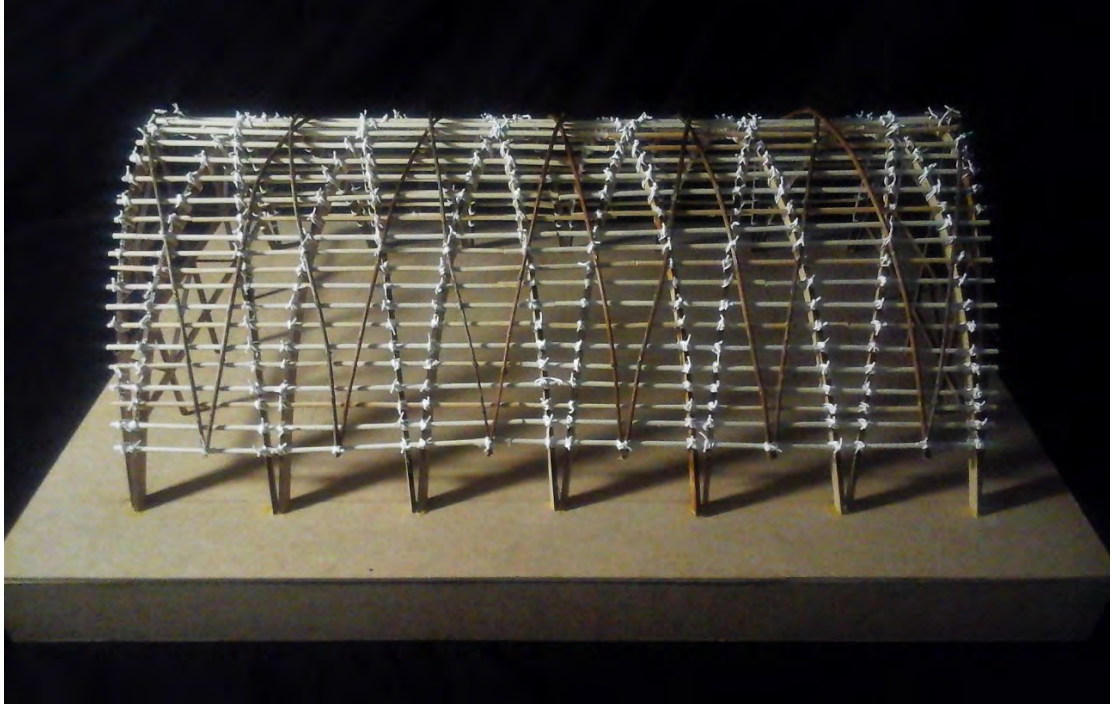


Figura 21.- Vista lateral de la maqueta. Fotos del autor.



Figura 22.- Vista frontal de la maqueta. Fotos del autor.

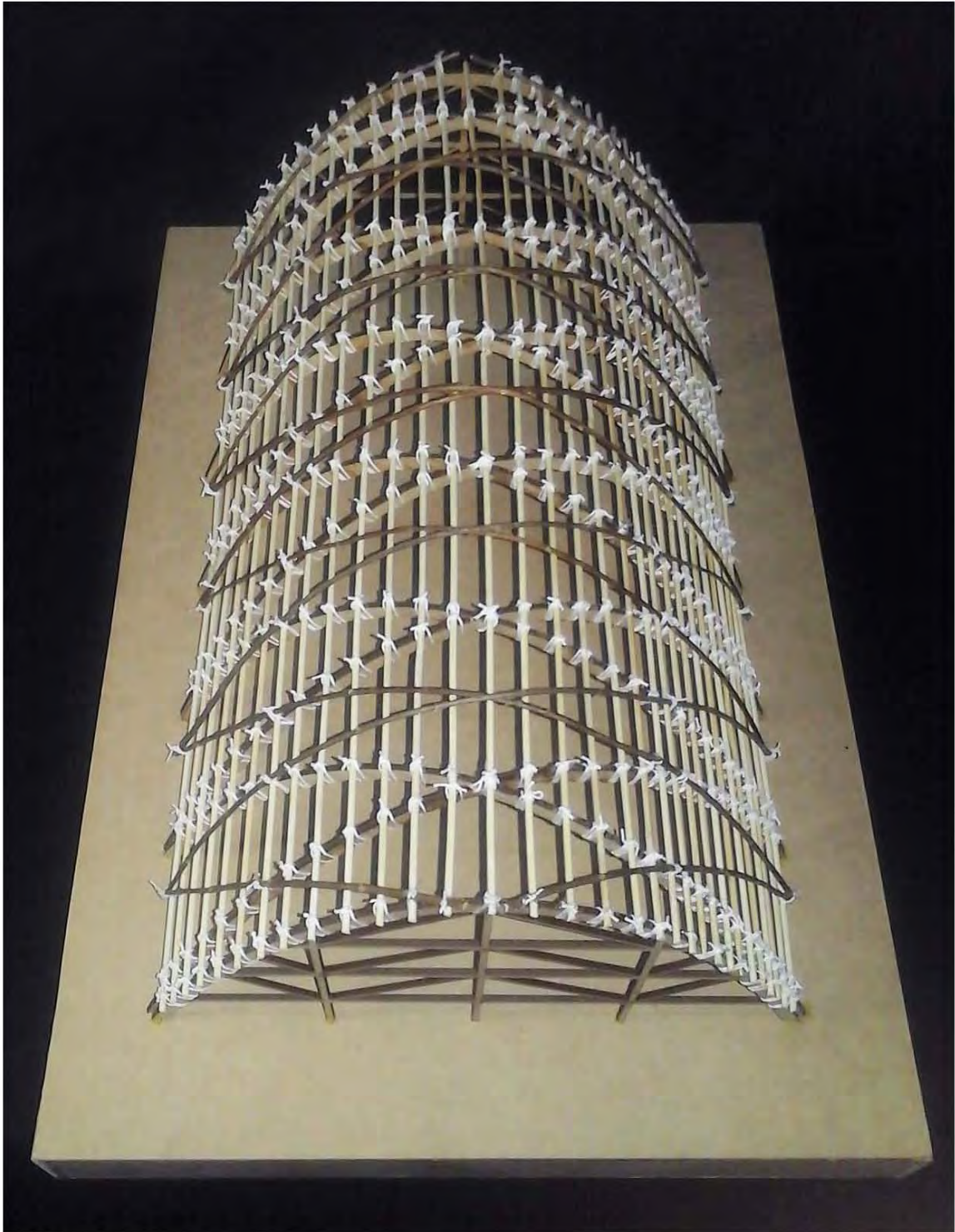


Figura 23.- Vista aérea de la maqueta. Fotos del autor.

### III.-Sistema Estructural

#### III.1.-Análisis de Materiales.

Los materiales que se pretende utilizar para la construcción de la cubierta, son madera y bambú de la región. A continuación se enlistan las variedades de cada uno:

- Madera: De Coco, Chijol, Zapote o Moral<sup>19</sup>.
- Bambú: Tarro, Ojote, Caña mansa<sup>20</sup>.
- Recubrimiento o acabado final: Palma “Apachite”<sup>21</sup>

La utilización de estos materiales, responde a que se adaptan muy bien al medio ambiente del lugar, ya que una estructura de acero, tendría a oxidarse por la alta humedad de la región. Entre las ventajas y desventajas en base a la evaluación comparativa de cubiertas<sup>22</sup> son las siguientes:

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"><li>• Utilizan los materiales de la región.</li><li>• Aprovechan las técnicas de manufactura locales.</li><li>• Los materiales son reciclables y no generan contaminación.</li><li>• Generan cubiertas fácilmente removibles.</li><li>• Pesan Poco.</li><li>• Representan cargas mínimas en el terreno, no requieren de cimientos profundos o fundaciones.</li><li>• Son buenos aislantes térmicos, frescos y no irradian calor.</li><li>• Se mimetizan con el paisaje.</li><li>• Requieren de mantenimiento cada 3 años. Si están bien hechos duran hasta 10 años.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Poca durabilidad relativa.</li><li>• Alojados nidos de pájaros, arañas e insectos.</li><li>• Presentan problemas de incendios.</li><li>• Propician la deforestación.</li><li>• Si tienen poco mantenimiento generan residuos orgánicos en descomposición sobre los edificios.</li><li>• A su estructura de madera la ataca las polillas.</li><li>• Si no están bien hechos, dan aspectos de temporales o baratos.</li><li>• Pueden confundir al visitante creyendo que es el techo original.</li></ul>

Tabla 3.- Tabla comparativa donde se muestran las ventajas y desventajas de las cubiertas hechas con materiales orgánicos.

<sup>19</sup> (Blaisot, 2014, pág. 14)

<sup>20</sup> (Blaisot, 2014, págs. 34-35)

<sup>21</sup> (Blaisot, 2014, pág. 36)

<sup>22</sup> (Medina Gonzáles, 2011, pág. 186)

El mantenimiento de los materiales debe considerar aspectos como ubicación en sitios remotos, o de difícil acceso, así como en función de la disponibilidad de los materiales y la capacidad de la mano de obra requerida para su mantenimiento y los recursos para proporcionar una atención adecuada a la cubierta conforme a un manual de mantenimiento para cada caso (Rivero Weber, Robles García, Guilliem Arroyo, & Rivero Chong, 2011, pág. 31).

La combinación de madera y bambú, garantiza un mejor comportamiento estructural de la cubierta, integrando ambas cualidades estructurales. La ventaja de ambos materiales, es que son renovables, no requieren una especialización para su uso y lo más importante, ambos se dan en la región, lo que involucra el conocimiento local que se tiene sobre el manejo de estos materiales.



Figura 24.- Construcción de una casa típica de la región. Nótese que los materiales considerados para la cubierta son los mismos que se utilizan para la fabricación de sus viviendas por lo que la disponibilidad del material y mano de obra se vuelven factores a considerar en la proyección de la cubierta. Fotos del autor.

### III.1.1.-Madera.

Este material tiene varias cualidades; ligero, resistente y renovable. A continuación se mencionan sus cualidades estructurales como material:

*“Su comportamiento es relativamente frágil en tensión y aceptablemente dúctil en compresión, en que la falla se debe al pandeo progresivo de las fibras que proporcionan la resistencia. El material es*

*fuertemente anisotrópico, ya que su resistencia es notablemente mayor en la dirección de las fibras ortogonales a ésta”<sup>23</sup>*

La madera, se puede clasificar en dos tipos en base a su morfología y composición: Coníferas y Latifoliadas.

Coníferas	Latifoliadas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hojas en forma de aguja.</li> <li>• Células más grandes y largas.</li> <li>• Fibras más uniformes.</li> <li>• Troncos rectos y menor cantidad de ramas.</li> <li>• Semillas alojadas en conos.</li> <li>• Sus anillos de crecimiento se distinguen claramente y de mayor tamaño.</li> <li>• Suelen preferirse para sistemas estructurales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hojas anchas perennes.</li> <li>• Células cortas.</li> <li>• Semillas alojadas en frutos.</li> <li>• Fibras no tan uniformes.</li> <li>• Anillos de corto crecimiento y no se distinguen fácilmente.</li> <li>• Se usan en acabados y en menor medida para fines estructurales.</li> </ul>

Tabla 4.- Tipos de madera según su composición y morfología.

En cuanto a su dureza, se pueden clasificar en 5 tipos<sup>24</sup>:

- Extremadamente duras: Guayacán, palo fierro y ébano.
- Muy duras: Mezquite y encinos.
- Duras: Tzalam.
- Blandas: la mayoría de los pinos, el oyamel y los cedros.
- Muy blandas: la parota y la madera balsa.

### III.1.1.a- Propiedades mecánicas.

Dentro del interior de la madera, existen conductos alargados llamados lúmenes los cuales están delimitados por paredes celulares que albergan agua en su interior. Cuando la madera es cortada, el agua almacenada en los lúmenes se evapora durante el proceso de secado, sin embargo, la humedad en el interior de las paredes se ira modificando durante el mismo proceso de secado, lo que se traduce en un cambio en sus propiedades mecánicas y su resistencia al ataque de hongos.

<sup>23</sup> (Meli Piralla, 2016, pág. 278)

<sup>24</sup> (Ortiz Bobadilla, 2015, pág. 17)

Hay que tener claro, que al ser un material orgánico, propiedades estructurales de la madera son muy variables según la especie y según los defectos que puede presentar una pieza dada<sup>25</sup>, por lo que su elección, corte y proceso de curado debe ser sumamente cuidadoso. Estas diferencias se deben a diversos factores<sup>26</sup>:

- a) Peso Específico.
- b) Contenido de humedad.
- c) Características del crecimiento (Rapidez de crecimiento, nudos, desviaciones en la dirección de las fibras, bolsas de resina, madera de reacción, rajaduras durante el crecimiento).
- d) Defectos artificiales (Gemas, desviación de las fibras, rajaduras debido al secado, alabeo, colapso, apanalamiento).
- e) Temperatura
- f) Tiempo del material.

La disposición de las células vegetales de la madera, también es un factor a considerar, sin embargo, dependiendo de la dirección de las cargas o acciones a las que se encuentre sometida la pieza, mostrara una mayor o menor resistencia.

*“[...], las diferencias en el comportamiento de la madera, cuando las acciones mecánicas se aplican paralelas a los ejes radial y tangencial son pequeñas, comparadas con las que se obtienen cuando las acciones se aplican paralelamente al eje longitudinal, por lo que generalmente se indican solo las propiedades en dos direcciones: paralela a las fibras (eje longitudinal) y perpendicular a ellas.”<sup>27</sup>*

Las acciones son las mismas, es decir, las piezas estarán sometidas bajo esfuerzos de tensión, compresión, cortante y flexión. La diferencia de su resistencia radica al sentido de las fibras con respecto a la dirección de los esfuerzos antes mencionados. Estos se

---

<sup>25</sup> (Meli Piralla, 2016, pág. 279)

<sup>26</sup> Tomado de Robles Fernández-Villegas & Echenique-Manrique, 1983, págs. 87-95

<sup>27</sup> (Comisión Forestal de America del Norte (COFAN), 1994, pág. 23)



describirán a continuación, con base a lo señalado por el Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera<sup>28</sup>:

**Tensión paralela a la fibra.-** Los esfuerzos son transmitidos de una célula a otra por medio de los esfuerzos de adherencia que realizan por medio de sus traslapes. Las distancias longitudinales de estos últimos, y la gran resistencia que muestran las paredes celulares le dan a la madera, una gran resistencia a esta acción.

**Tensión perpendicular a la fibra.-** Contrario a la tensión paralela, los valores de resistencia del material disminuyen ya que ante el esfuerzo en esta dirección, el papel que juegan los elementos que integran a las paredes celulares es menor.

**Compresión paralela a la fibra.-** El comportamiento de las células de madera ante la compresión paralela, se asemeja a una serie de cilindros huecos paralelos entre sí. Las fallas que se pueden presentar son por lo general en las zonas débiles de las paredes celulares.

**Compresión perpendicular a la fibra.-** Esta acción presiona las células de la madera perpendicularmente con respecto a su eje longitudinal, lo que lleva a manifestar cambios en su sección transversal. Su resistencia es muy dúctil a la compresión perpendicular al no mostrar una falla debido al aplastamiento de las hileras sucesivas de células. La resistencia es de 1/10 en comparación con la compresión paralela.

**Cortante.-** Existen 3 tipos de cortante acordes al plano donde se apliquen las cargas. El de mayor resistencia es el que se presenta en el plano perpendicular a la dirección de las fibras. El cortante paralelo a las fibras es de una resistencia de 1/3 del cortante perpendicular. El último caso es el que se aplica paralelo al eje de las fibras, sumando un cortante aplicado en la dirección radial o tangencial, lo que genera un “rodamiento” de unas fibras sobre otras por lo que este tipo de cortante, afecta demasiado a una pieza de madera.

**Flexión.-** La falla comienza por un aplastamiento a compresión de las fibras externas en la parte superior del elemento, después la tensión genera una rotura de las fibras en

---

<sup>28</sup> Comisión Forestal de America del Norte (COFAN). *Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera*. Consejo Nacional de la Madera en la Construcción, A.C. México D.F., México. 1994.

su parte inferior. Si la pieza tiene diferencias en su densidad o presenta grietas internas o rajaduras en su exterior, se puede presentar una falla por cortante en esos puntos. En algunos tipos de maderas extremadamente duras o muy duras, las acciones de compresión y tensión pueden ser a la inversa.

Otro aspecto a considerar son las conexiones ya que el aspecto principal del diseño sísmico de estas estructuras es el detallado de las conexiones para proporcionarles capacidad de transmitir tensiones (Meli Piralla, 2016, pág. 297).

Una de las desventajas que presenta la madera, es su fragilidad ante la intemperie y los insectos, por lo que se debe de dar un tratamiento para otorgarle una resistencia al desgaste producido por el medio ambiente y por los agentes biológicos. Existen muchas “recetas” para tratar la madera tanto para interior como para exterior. En el libro ***Madera: Pre dimensionamiento de alfarjes y armaduras de madera para arquitectos*** de la Dra. Inés Ortiz Bobadilla<sup>29</sup>, sugiere un método de protección para madera en exteriores que a continuación se cita:

***“PROTECCION PARA LA MADERA EXTERIOR***

*Materiales por utilizar (para preparar aproximadamente un litro de producto):*

<i>Aceite de cedro</i>	<i>500 ml</i>
<i>Cera pura de abeja</i> <i>(Blancas en escamas)</i>	<i>700 gr</i>
<i>Resina damar (goma damar)</i>	<i>300 gr</i>
<i>Esencia de trementina rectificada</i> <i>(Aguarrás puro de pino)</i>	<i>500 ml</i>

*Preparación de una crema para proteger la madera y darle un acabado satinado:*

*1.- En una parrilla eléctrica se funde la resina damar en un recipiente de metal; por separado se funde la cera de abeja a baño María. Una vez fundidos ambos materiales, se vierte la resina damar en el recipiente donde está la cera fundida.*

---

<sup>29</sup> Ortiz Bobadilla, Inés. *Madera: Pre dimensionamiento de alfarjes y armaduras de madera para arquitectos*. UAM Xochimilco. México DF. 2015.

2.- Inmediatamente se pasará esta mezcla a un recipiente limpio, colocándola con una malla para eliminar basuras e impurezas que contengan los materiales (se puede utilizar como colador una malla similar o unas medias) y se le agregará lentamente los 500 ml de esencia de trementina, manteniendo caliente la mezcla y moviendo constantemente con una pala de madera; con este procedimiento se obtendrá una crema. Se deja enfriar y se cubre para evitar que le caiga polvo.

3.- Después de cepillar y lijar la superficie de madera, se limpiara para eliminar cualquier residuo de polvo; si es posible, frotar con algún cepillo duro de ixtle, ya que se prepara mejor para recibir la capa de aceite de cedro que se aplicará con una brocha. Para un mejor resultado se recomienda aplicarlo 24 h durante tres días.

4.- Se deja reposar por dos días para aplicar posteriormente la crema de cera con resina, con una brocha de cerda de pelo corto. La capa debe de ser homogénea y delgada.

5.- Dejar reposar, de dos a tres días para que se evapore el aguarrás y posteriormente pulir la madera con un cepillo de cerda, para lograr un brillo satinado en la superficie.

6.- Este tratamiento en la madera será conveniente aplicarlo una vez al año antes de la temporada de lluvias, época en la que la madera estará seca y permitirá absorber estos materiales orgánicos y compatibles con la madera.”<sup>30</sup>

### **III.1.2.-Bambú.**

El uso del bambú se ha vuelto popular en estos últimos años bajo la tendencia de arquitectura sustentable o ecológica, sin embargo, en varias regiones del país, el uso de este tipo de material ya se daba desde antes con especies regionales. La factibilidad de este material en su empleo en la construcción se debe por varias razones:

- Flexible.
- Ligero
- Resistente a sismos.
- Alta velocidad de crecimientos.
- Su manejo es sencillo.

---

<sup>30</sup> Ortíz Bobadilla, 2015, págs. 21 – 22.

### III.1.2.a- Propiedades mecánicas.

Al igual que la madera, sus propiedades se basan mucho en los factores climáticos y geográficos de la región en donde crezca, por lo que la humedad relativa y la contracción del material durante el secado son factores primordiales. En estado de crecimiento puede contener un 70% de contenido de humedad, este porcentaje se reduce hasta un 20% después de haberse endurecido<sup>31</sup>. Durante el secado, el largo de una vara de bambú puede contraerse de entre el 4% y 14% mientras que su diámetro la contracción se ubica entre el 3% al 12%<sup>32</sup>.

Los esfuerzos admisibles del bambú, dependerá de algunos factores<sup>33</sup> como:

- Tipo de fuerza aplicada.
- El factor de duración de la carga.
- Factor de seguridad.
- Contenido de humedad.
- Temperatura.
- Valor promedio de los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio.
- El número de ensayos realizados (mínimo 20).

Sin embargo, en el **Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)**, en el **Título G – Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua**, Capítulo **G.12 Estructuras de Guadua**, apartado **G.12.7 - Método de Diseño Estructural** inciso **G.12.7.3 – Esfuerzos Admisibles y Modulo de Elasticidad**, se muestra la tabla con los valores de los esfuerzos admisibles en el bambú con un contenido de humedad del 12% (CH=12%). Cabe aclarar que estos valores corresponden con la especie *Guadua Angustifolia Kunth*, ya que en el propio reglamento no se contempla la posibilidad de utilizar otras especies para fines estructurales<sup>34</sup>.

---

<sup>31</sup> Minke, 2012, pág. 21.

<sup>32</sup> *Ibid.*

<sup>33</sup> Minke, 2012, pág. 22

<sup>34</sup> Para mayor información, ver el **Apartado G.12.3 – Materiales** inciso **G.12.3.1 – Requisitos de calidad para Guadua Estructural**.

<b>Esfuerzos Admisibles <math>F_i</math> (MPa), CH=12%</b>				
<b><math>F_B</math> Flexión</b>	<b><math>F_t</math> Tracción</b>	<b><math>F_c</math> Compresión II</b>	<b><math>F_{p^*}</math> Compresión <math>\perp</math></b>	<b><math>F_v</math> Corte</b>
<b>15</b>	<b>18</b>	<b>14</b>	<b>1.4</b>	<b>1.2</b>
<p>II = Compresión paralela al eje longitudinal.  <math>\perp</math> = Compresión perpendicular al eje longitudinal.  *La resistencia a la compresión perpendicular está calculada para entrenudos rellenos con mortero de cemento.</p>				

Tabla 5.- Esfuerzos admisibles del Bambú.

La madera y el bambú son muy susceptibles a ser atacados por plagas por lo que el curado se vuelve necesario. También la especie de bambú marca una diferencia importante ya que no todos los tipos de bambú funcionan para cuestiones estructurales.

Para la selección de las varas de bambú adecuadas para la construcción de la cubierta, se dan las siguientes recomendaciones<sup>35</sup>

- Usar solo bambú seco y maduro, normalmente de entre unos 4 a 6 años de edad.

<sup>35</sup> Minke, 2012, pág. 29. Original en inglés:

- Use only mature and dry bamboo, normally between four and six years of age.
- Canes with cracks that go from one internode to another must not be used.
- The canes must be straight or smoothly curved, but not with internal curves. If they are used as columns that transfer large forces, the eccentricity of the axial force must not be greater than 0.33% of the element's length (see Colombian regulation NSR-10, p.28).
- It is not recommendable to use canes that show damage caused by insects or fungus.
- Canes that have fungus and lichens must be cleaned before use.
- For columns, the first third of the stem should be used, where the nodes are closer together and the culm is thicker.
- Bamboos that grow in high altitudes and with drier soil normally have nodes spaced more closely together (shorter internodes), and are therefore stronger.
- Canes must not taper more than 1%.
- Canes used as beams must not have longitudinal fissures along the neutral axis of the element. If there are fissures, they must be located in the upper or lower external fibre.
- Canes must not have perforations caused by xylophagous insect attack (NSR-10).
- To avoid fungal attack, the relative moisture content must not be over 20% (NSR-10).

- Si las varas presenta grietas que van de nodo a nodo, es preferible no usarlos.
- La varas deben de ser lo más rectas posibles o ligeramente curvadas pero que no tengan curvas internas. Si son usadas para integrarlas a elementos estructurales verticales (columnas), la excentricidad de la fuerza axial no debe de ser más grande que un 0.33% del largo del elemento.
- No es recomendable usarlas cuando presentan daños causados por insectos u/o hongos.
- Si las varas presentan hongos, deben de limpiarse antes de usarse.
- Para columnas, el primer tercio del tallo debe ser usado, donde los nodos están más cerca entre si y el follaje es más tupido.
- Generalmente los bambús que crecen en las zonas de mayor altitud y con tierra muy seca, tienen una separación entre nodos muy corta por lo que les da una mayor resistencia.
- Las varas no deben de encogerse más del 1%.
- Las varas usadas como barras, no deben de presentar fisuras a lo largo del eje neutral del elemento. Si presentan fisuras, deben de estar localizadas en la parte externa superior o en la zona más baja de la fibra.
- Las varas no deben de presentar perforaciones causadas por ataque de insectos xilófagos.
- Para evitar un ataque por hongos, el contenido de humedad relativa no debe sobrepasar de un 20%.

Por último, hay que poner mucho énfasis en las uniones ya que no solamente es importante amarrarlos bien sino también moldear las partes en contacto<sup>36</sup>.

---

<sup>36</sup> (Van Lengen, 1983, pág. 308)



Figura 25.- Daño del bambú en la unión de elementos. Especial cuidado en las uniones no solo entre las varas del bambú, sino también con la madera, con el fin de evitar rupturas que pongan en riesgo la estabilidad de la estructura. Fotografía Benjamín Blaisot.

### III.1.3.-Palma.

El material para usarse como recubrimiento es la palma “*Apachite*” el cual es un tipo de hoja redonda y corta. La ventaja de las hojas de palma en la construcción deriva de varias circunstancias: su abundancia y gran tamaño; no requieren transformación para su uso; resultan impermeables, acanaladas, fibrosas y de lenta descomposición (*Prieto, Valeria, 1994, pág. 110*). Es un material que se encuentra en toda la región además de regenerarse constantemente, por lo que su precio es bajo y lo hace muy accesible.



Figura 26.- Detalle de palma recién cortada. Entre los habitantes de la localidad, existe el conocimiento para elegir los materiales ideales para la construcción. Para el caso de la palma, saben la manera en que debe de ser cortada y amarrada a la estructura. La palma se encuentra prácticamente en cualquier sitio, incluso muy cerca de la zona arqueológica. Fotografía del autor.

## III.2.-Sistema Funicular.

### III.2.1.-Definición.

Entendemos como sistema funicular, cuando una estructura toma una forma conforme a las fuerzas aplicadas sobre esta, con la finalidad de que su comportamiento estructural interno se traduzca a esfuerzos de compresión y/o tracción. Un ejemplo muy simple es el aplicar una carga puntual a un cable, al hacerlo, vemos que el cable toma una forma adecuada para trabajar solo a tracción. Si aplicamos otra fuerza, el cable se divide en tres partes ante la carga adicional. Si agregamos cargas continuas a lo largo del cable, tendremos que este adquiere una forma curva.

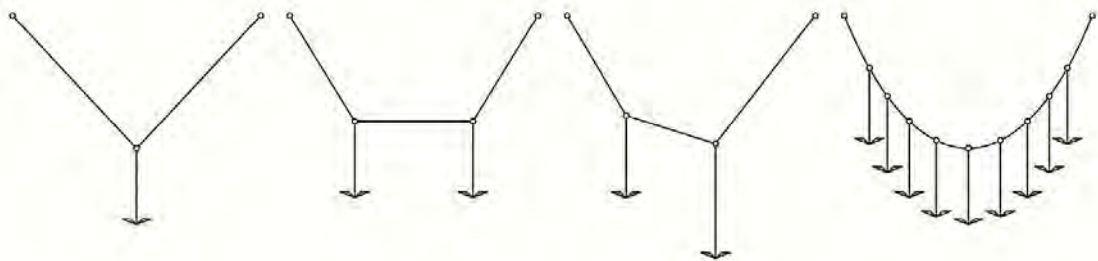


Figura 27.- Esquemas de sistemas funiculares. Vemos varios ejemplos que van desde una sola fuerza puntual (*extrema izquierda*) hasta una distribuida de forma continua (*extrema derecha*). Dibujos realizados por el autor tomados de Moore, 2000, pág. 165.

### III.2.2.-Arcos.

Ante la definición anterior, podemos decir que los arcos son sistemas estructurales que debido a las cargas, tendrán una forma donde solo exista la compresión<sup>37</sup>. La cubierta al estar compuesta a base de arcos, se pretende que trabaje sólo a compresión debido a que si la ley de reparto de cargas sobre él es fija, la directriz puede amoldarse al funicular de esas cargas (Torroja Miret, 2007, pág. 92), lo que conlleva a que la resultante de las fuerzas, coincida con la línea de empuje o el eje neutro de la estructura.

Sin embargo, al ser arcos exentos, se considera que el pandeo puede desestabilizar al funicular del arco y por consiguiente su inminente colapso ya que al estar fijos los

---

<sup>37</sup> Un arco funicular es el equivalente inverso compresivo de un cable de suspensión [...]. Moore, 2000: pág. 164.



arranques, el arco tiende a tomar una forma de pandeo más resistente que en el caso de un soporte, cuyos extremos pueden aproximarse al producirse el pandeo. (Torroja Miret, 2007, pág. 93).

El coceo o el empuje hacia los arranques es un trabajo que se presenta en todos los arcos, ya que las fuerzas siguen la tangente de la directriz. Si su flecha o altura es menor el coceo es mayor. En cierta medida, al usar una parte de la elipse donde su curva es cerrada, se evita que el empuje horizontal sea mayor, tratando de distribuir las fuerzas lo más vertical posible sobre la línea de empuje.

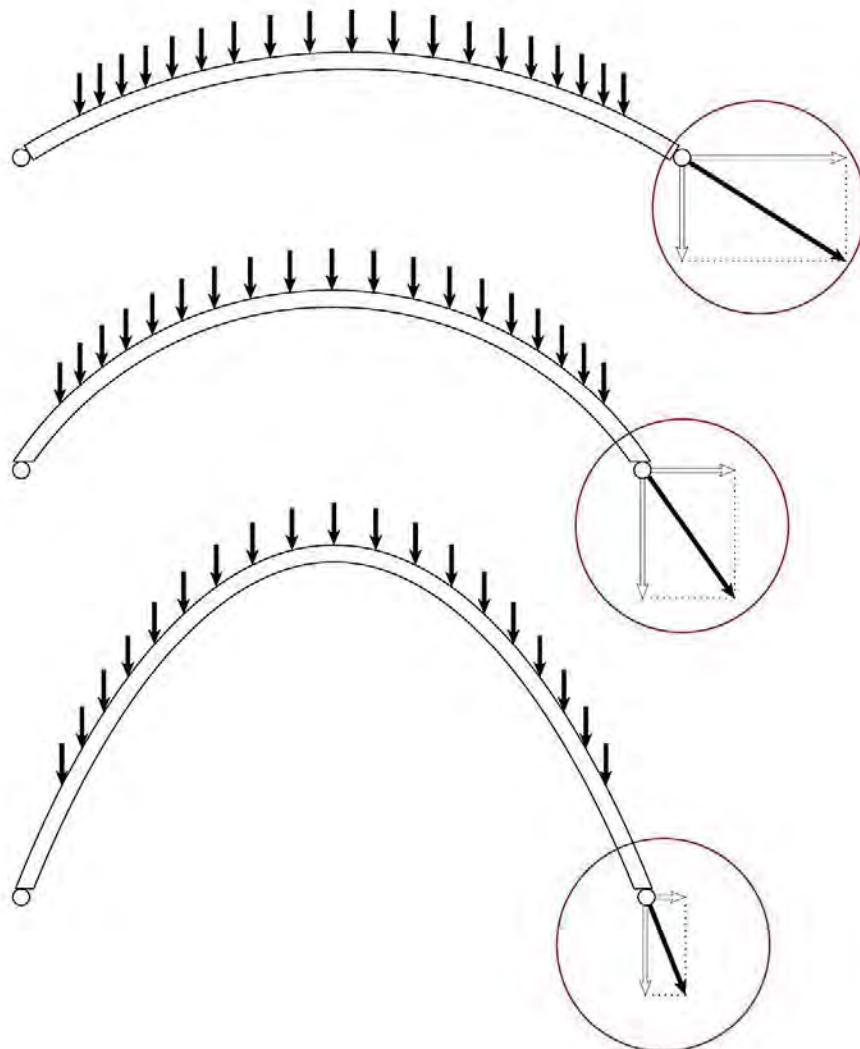


Figura 28.- Reacciones de empuje en diferentes tipos de arco. Un arco rebajado tiende a tener un resultante mayor que un arco con una mayor flecha. Dibujos realizados por el autor tomados de Moore, 2000, pág. 165.

### III.2.3.-Funicular de fuerzas.

Los funiculares de fuerzas, es la manera gráfica de cómo un sistema de fuerzas actúan sobre un elemento (sea un arco, un cable o una viga) y la forma que tomará en base a las acciones mismas y las condiciones de apoyo de la propia estructura. Siendo un método gráfico, nos permite darnos una idea clara e inmediata de los esfuerzos a los que estará sometido nuestro elemento estructural.

En este caso, se hizo el funicular de fuerzas en ambos arcos elípticos, teniendo en cuenta el elegir una escala cualquiera para medir sus distancias, el tener cuidado en representar correctamente la dirección de las fuerzas y su posición (Rincón Medina, 2014, pág. 207).

En un inicio, se estableció fuerzas de 100 kg/m que actúan de manera uniforme en todo el arco, estas fuerzas se representan en las 39 líneas verticales que coinciden en los puntos en que se dividió la curva elíptica. **Estos puntos no se escogieron al azar, representan la posición de las alfajillas horizontales de bambú y su intersección con ambos arcos, por lo que se considera como un nodo donde una de las 39 fuerzas propuestas estará actuando sobre nuestro elemento estructural** (ver II.3.2.c- Longitud de la curva.).

Establecidos los puntos, se elabora el polígono vectorial en el cual, representamos las magnitudes de las fuerzas y sus componentes en una escala cualquiera, esta puede ser diferente a la escala utilizada en el polígono funicular (Rincón Medina, 2014, pág. 207), Hay que tener en cuenta, que al empezar el funicular de fuerzas tomaremos como punto de partida el punto **A** del arco, donde partirá nuestro primer rayo polar correspondiente a la primera fuerza o  $F_1$  que tomamos del polígono de fuerzas. Al trasladar dicho rayo, este tendrá como punto inicial el punto A y como punto final la intersección de del rayo polar con la fuerza vertical  $F_1$  que establecimos con anterioridad al dividir el arco. Una vez realizado esto, tomaremos el segundo rayo polar del polígono de fuerzas y lo trasladamos nuevamente al funicular de fuerzas, teniendo como punto de partida la intersección anterior con  $F_1$  y como punto final la fuerza vertical  $F_2$ . La idea

es pasar cada rayo polar de nuestro diagrama del polígono de fuerzas al diagrama del funicular con el objetivo de que nuestro funicular pase por los puntos **A**, **C** y **B** del arco.

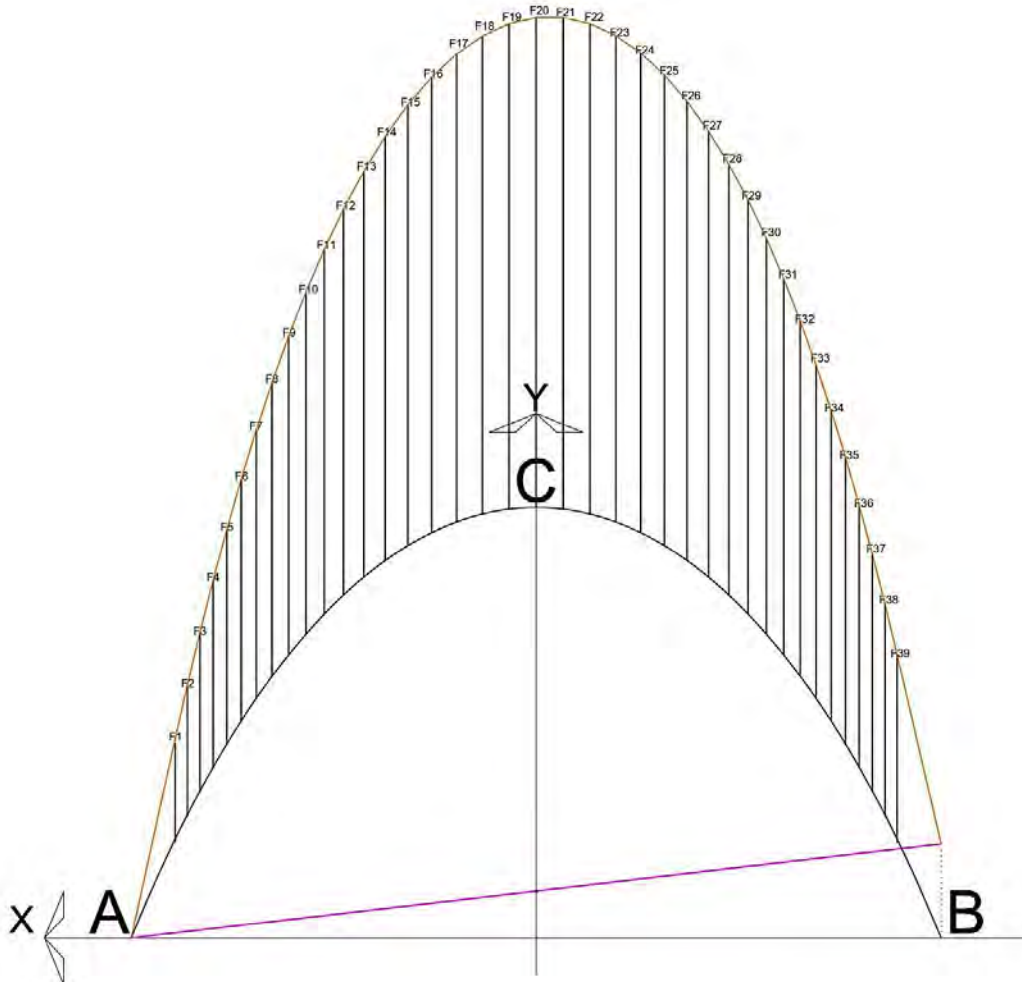


Figura 29.- Primer trazo del funicular de fuerzas de la elipse 1 (8 x 15 m).

En un primer intento por pasar por los puntos, se ubica el polo de manera arbitraria, sea izquierda o derecha de la línea de acción de las fuerzas. Después de haber hecho nuestro primer funicular (color amarillo), se traza una línea resultante que vaya del punto **A** hasta el punto donde se intersecte nuestro primer funicular y la línea vertical que inicie del punto **B** y cruce con nuestro funicular (color rosa). Esto con la finalidad de obtener la posición de nuestro segundo foco donde volveremos a repetir el mismo procedimiento.

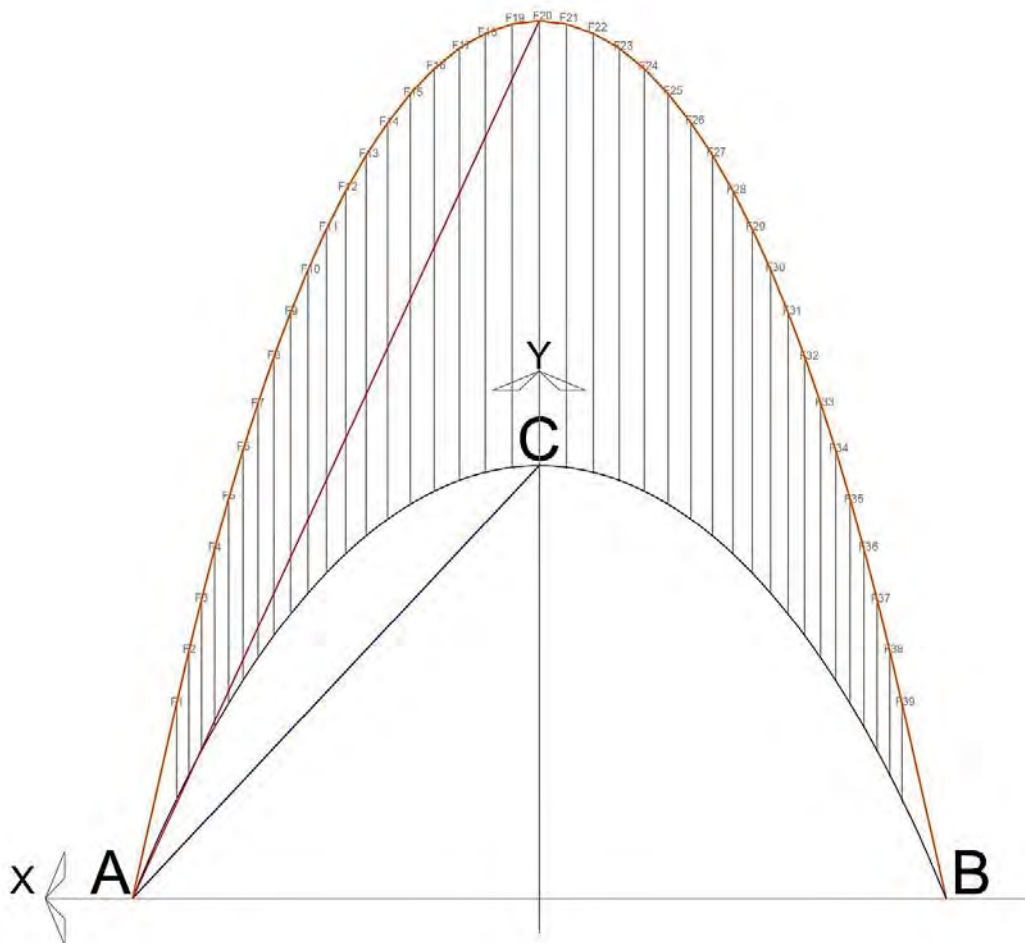


Figura 30.- Segundo trazo del funicular de fuerzas de la elipse 1 (8 x 15 m).

El segundo funicular (color naranja) pasa por los puntos **A** y **B** pero no cruzan por el punto **C**. Para ubicar un nuevo foco donde partan los rayos polares hacia la línea de acción de fuerzas y así poder pasar el funicular por los puntos **A**, **B** y **C**, se trazan dos líneas; una primera línea que parte del punto **A** hasta el punto **C** (color azul), la otra que también tiene como origen el punto **A** hasta tocar al segundo funicular en su intersección con la línea de fuerza  $F_{20}$  que se encuentra alineado al eje del punto **C** del arco (color rojo).

Una vez establecido las líneas con sus respectivos puntos, se trasladan al diagrama del polígono de fuerzas en el cual, la línea roja parte del segundo foco hasta tocar la línea de acción de fuerzas, una vez ubicado el punto exacto sobre la línea antes mencionada, establecemos como punto de inicio la línea azul que trasladamos de

nuestro segundo funicular de fuerzas y lo proyectamos hasta tocar un punto de la línea de polos donde se ubica el foco del segundo funicular. Una vez determinada la ubicación de nuestro nuevo polo, se repite el proceso hasta que pase por los puntos **A**, **C** y **B** (color verde) y así concluir nuestro funicular de fuerzas del arco. Este procedimiento se hizo en ambos arcos identificados como elipse 1 (8 x 15 m) correspondiente a los arcos paralelos que cierran el sistema de cubierta y la elipse 2 (8 x 15.76 m) cuyos arcos se intersectan entre si y dotar de mayor resistencia a cargas accidentales como se explicó en la sección

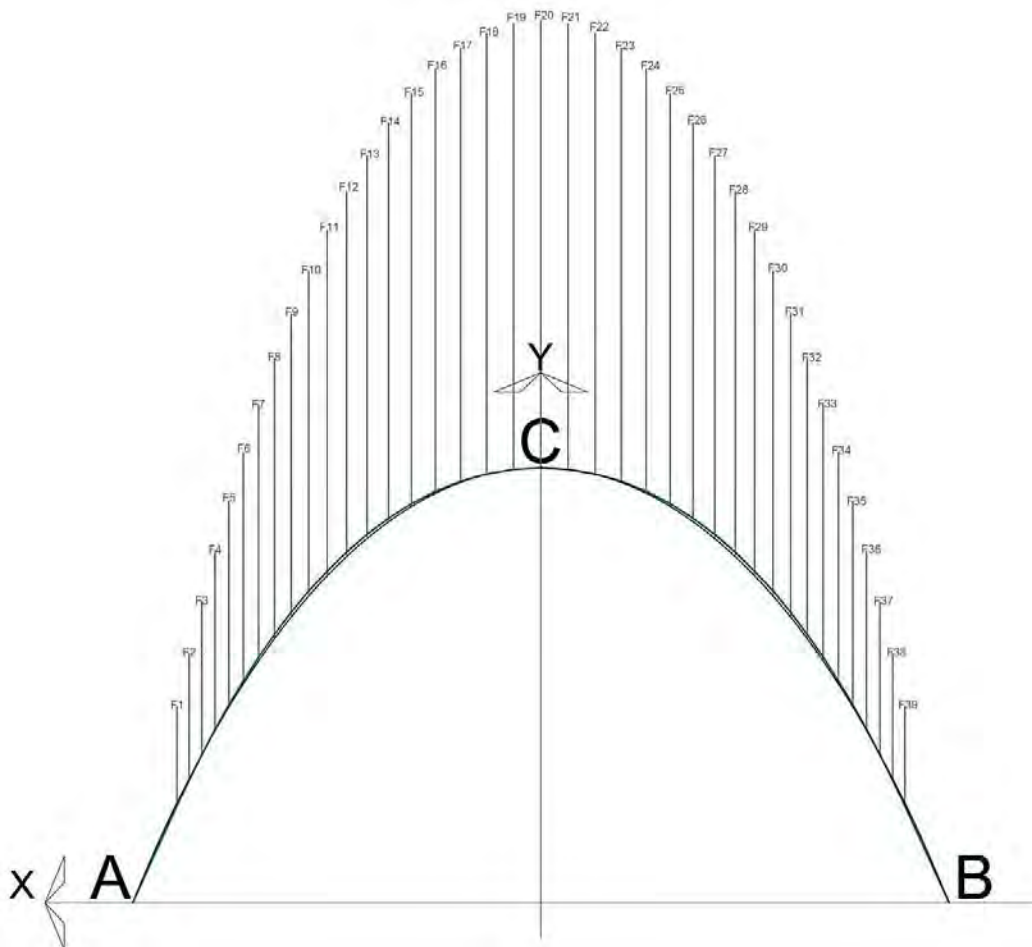
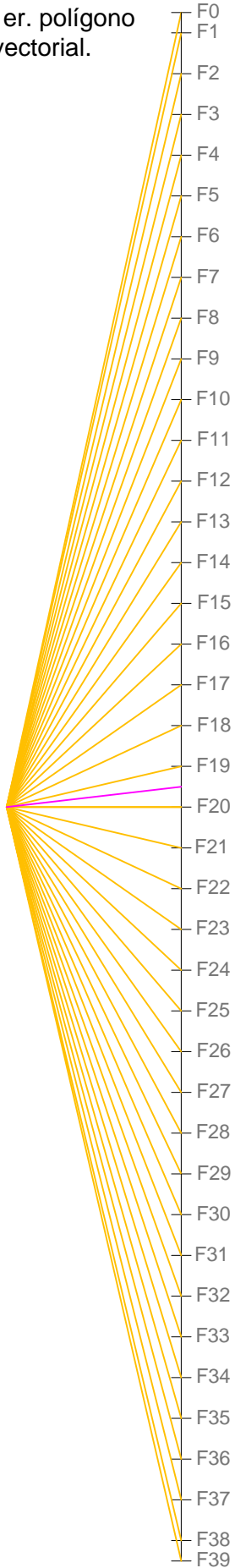


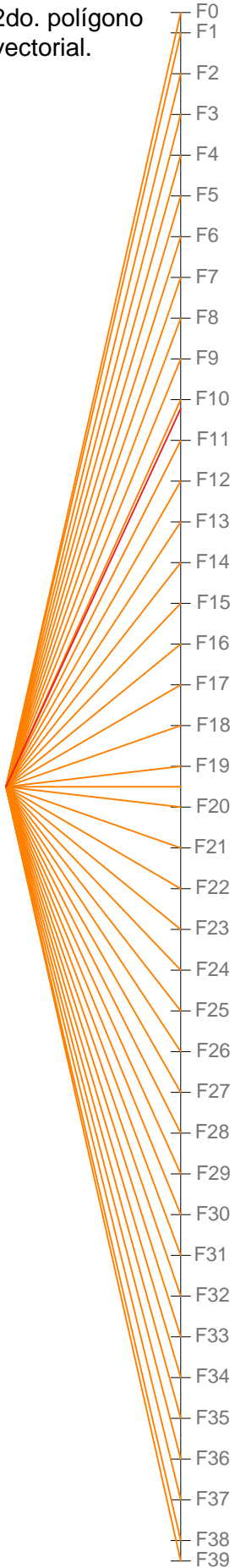
Figura 31.- Tercer trazo del funicular de fuerzas de la elipse 1 (8 x 15 m). Vemos que el tercer trazo del funicular casi coincide con el trazo de la elipse.

A continuación, se anexan los funiculares de fuerzas de los dos arcos y sus respectivos polígonos de fuerzas.

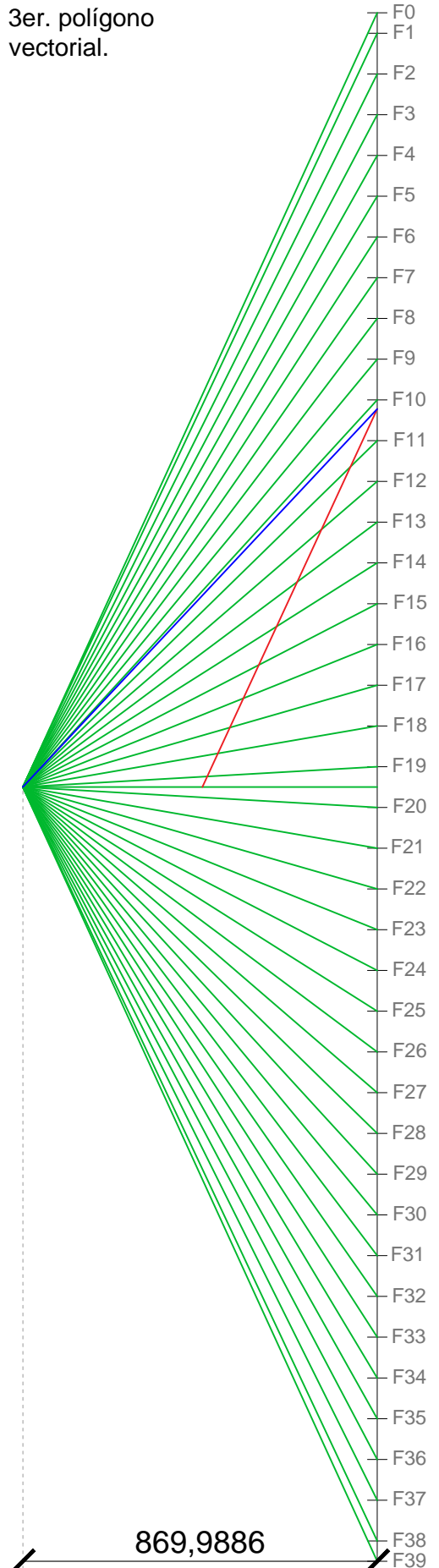
1er. polígono vectorial.



2do. polígono vectorial.



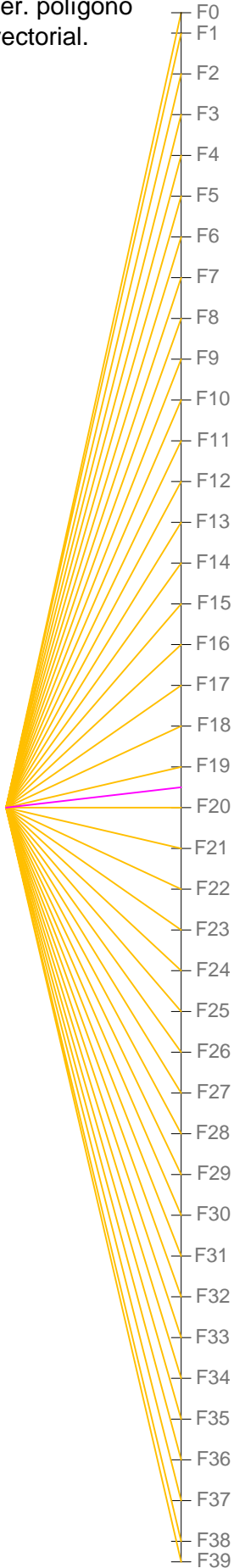
3er. polígono vectorial.



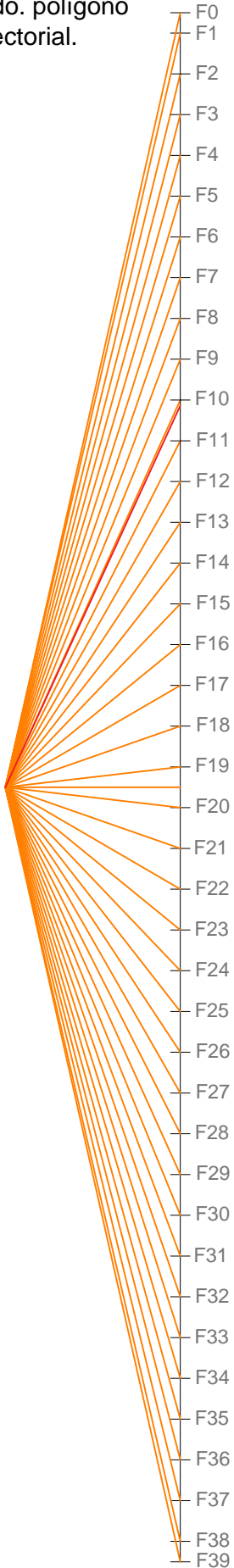
Elipse 1. Polígono vectorial. Análisis de fuerzas Gravitacionales (100 kg/m<sup>2</sup>).



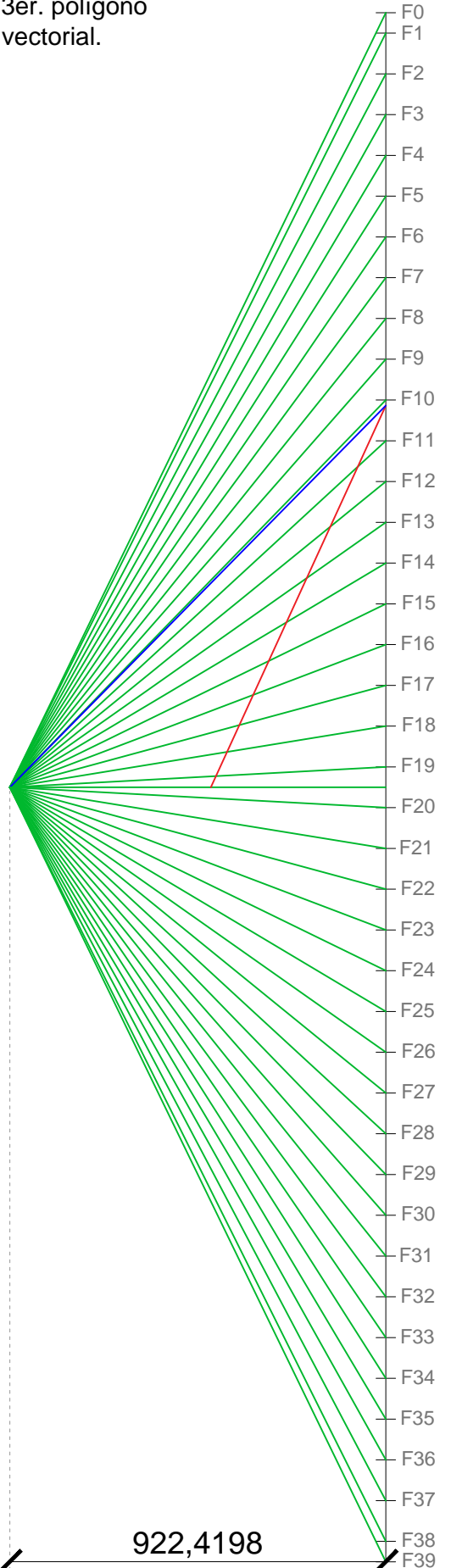
1er. polígono vectorial.



2do. polígono vectorial.





3er. polígono vectorial.

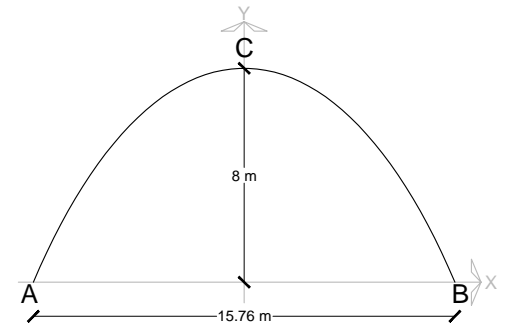
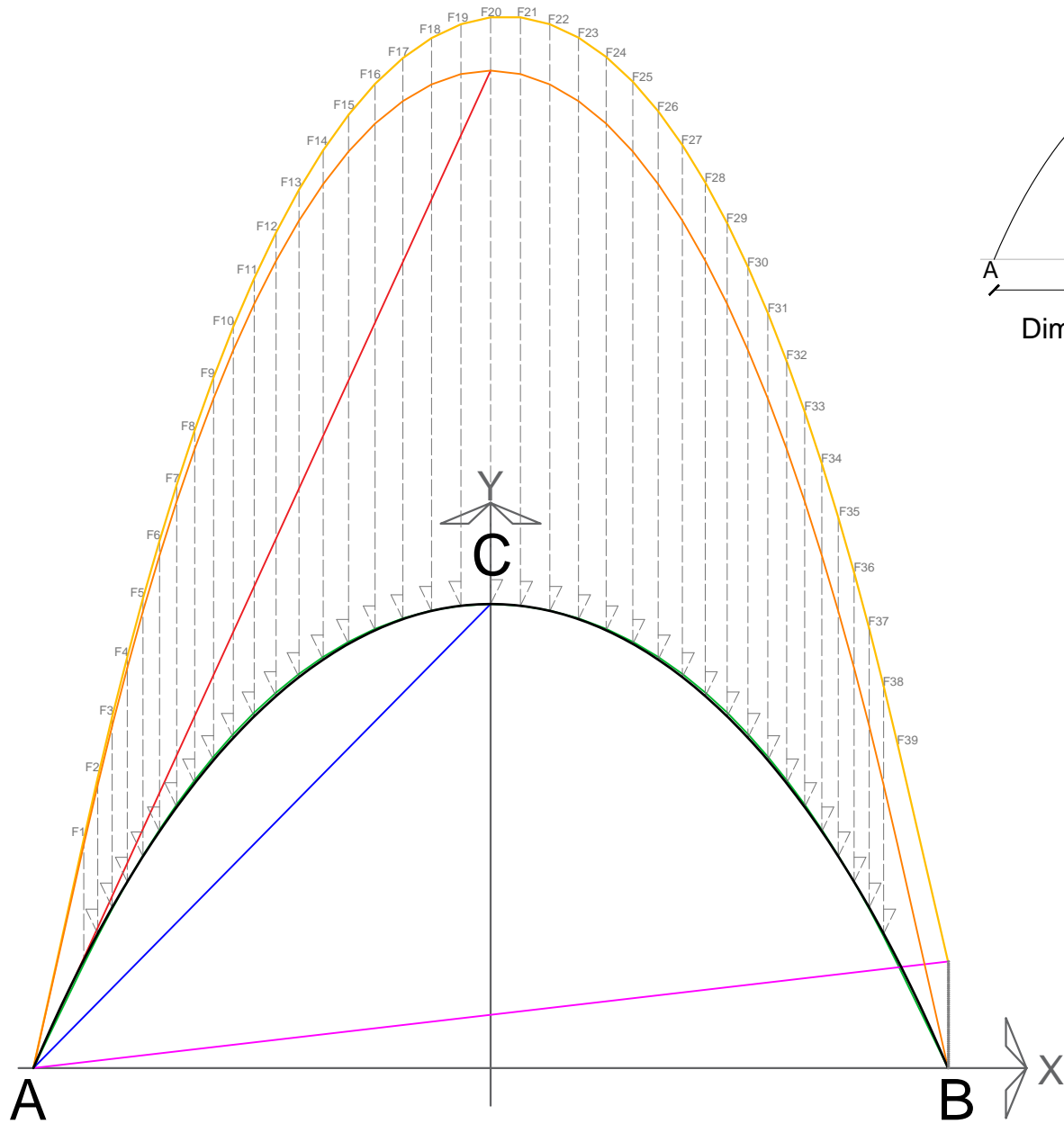


922,4198

Elipse 2. Polígono vectorial. Análisis de fuerzas Gravitacionales (100 kg/m<sup>2</sup>).



<b>Fuerza: 100 kg/m<sup>2</sup></b>	
Primer funicular	
Segundo funicular	
Tercer funicular	



Dimensiones de la Elipse 2.

## Elipse 2. Funicular de Fuerzas.

07 | ã ã Á Á ^ : æ Á | æ ã æ ã } æ ^ Á | ^ ^ } c ^ Á } Á | Á æ ã È

### **III.3.-Fuerzas internas del arco.**

#### **III.3.1.-Definición.**

La Mecánica considera a un cuerpo rígido como un elemento que no se deforma ante la acción de las cargas. Sabemos que en la práctica todos los cuerpos presenta una cierta deformidad sin que esto afecte su funcionamiento, sin embargo, estas deformaciones son de suma importancia con respecto a las estructuras y en específico a la resistencia de materiales. Una fuerza es la acción que aplica un cuerpo sobre otro. Sus características principales son magnitud, dirección y punto de aplicación. Aunque esta definición no varía tanto a partículas como a elementos, si encontramos diferencias con respecto al efecto que produce sobre ambos como su punto de aplicación o la línea de acción de la fuerza.

Las fuerzas las podemos clasificar en dos tipos en base a su acción sobre un cuerpo:

**Fuerzas externas.**- Son las responsables de que un cuerpo rígido se mueva o este en reposo. En pocas palabras condicionan su comportamiento externo.

**Fuerzas internas.**- Aquellas que le dan cohesión interna al cuerpo si está compuesto de varios elementos.

Para este caso, se analizara primero las fuerza internas del arco elíptico con la finalidad de saber el comportamiento estructural del arco ante la aplicación de las fuerzas a las que estará sometida.

#### **III.3.2.-Momentos del arco.**

Un momento es el producto de la fuerza por la distancia lo que se traduce como un giro. Para determinar la magnitud del momento que producirá ese giro en nuestro arco, se procederá de dos formas; la primera será obtener el resultado por medio del método gráfico usando los funiculares de fuerzas, con la finalidad de como los funiculares pueden ayudarnos en el análisis estructural y sobre todo ser un factor relevante en el diseño de cubiertas. El método analítico cumplirá dos funciones; demostrar de manera

precisa los momentos del arco y sobre todo, respaldar los resultados obtenidos por el método de los funiculares.

### III.3.2.a- Método gráfico.

Como se vio al final de la sección anterior, el tercer y último funicular coincide casi con el trazo de la elipse. Tomando este caso, vemos que existe un desfase en la parte superior del arco donde es más notorio esta diferencia entre el funicular y la elipse, sin embargo, en casi toda la curva elíptica existe una separación entre los elementos (arco y funicular) pero en menor medida.

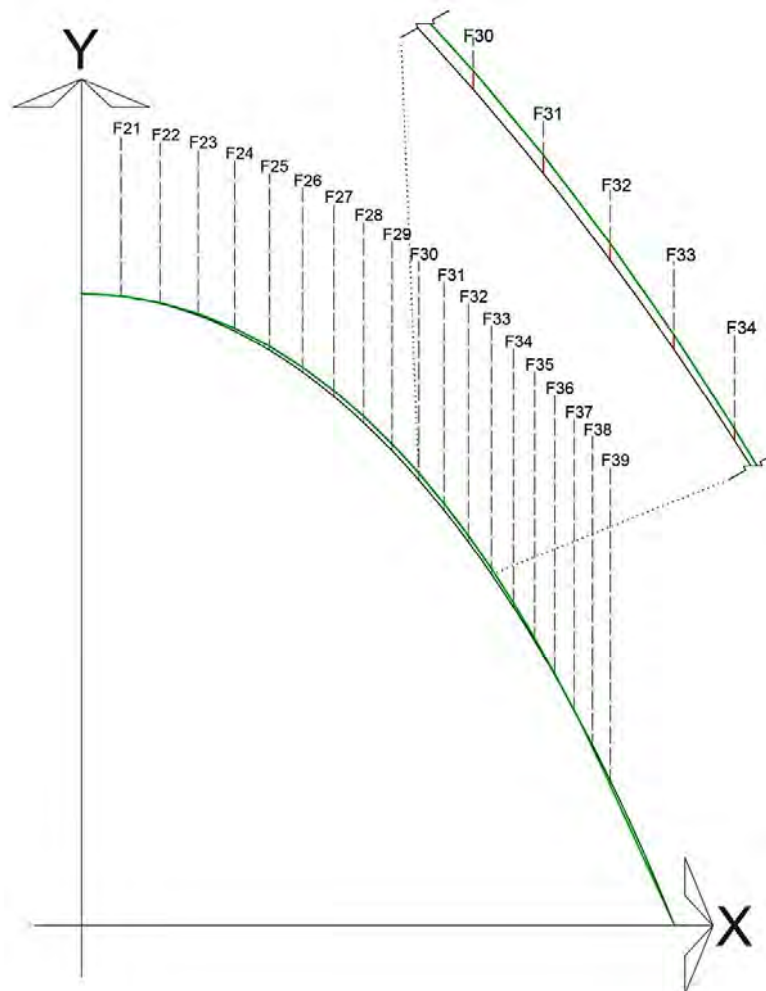


Figura 32.- Sección del tercer trazo del funicular de fuerzas de la elipse 1 (8 x 15 m). A partir de haber pasado los puntos en A, C y B, se procederá a localizar y medir la distancia (líneas en color rojo) entre funicular (color verde) y arco elíptico (color negro). En la parte superior derecha un acercamiento de una parte del arco para apreciar esta ligera diferencia. Dibujo del autor.

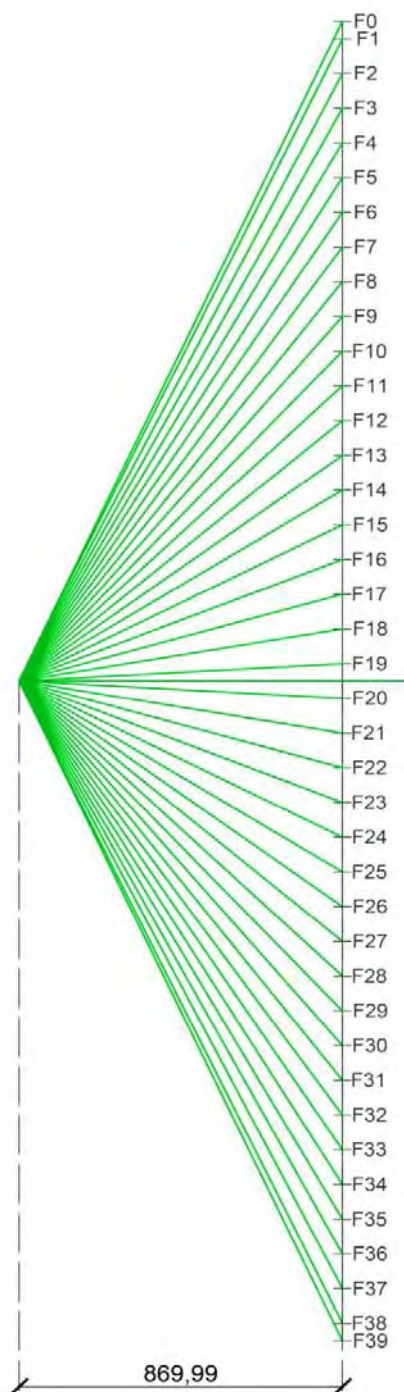


Figura 33.- Polígono de fuerzas de la elipse 1 con foco correspondiente al tercer funicular. La distancia entre el foco y el polígono nos da el componente H. Dibujo del autor.

Para determinar los momentos del arco en base a la información que nos proporciona el funicular de fuerzas, procederemos de la siguiente forma, tomaremos la distancia que existe entre ambos, registrando en una tabla dichas medidas<sup>38</sup>. Hay que señalar que la medición se hace sobre cada una de las fuerzas que se están aplicando sobre el arco y que coincide con los puntos en que se dividió, lo que representa la posición de las alfajillas de bambú como se explicó en la sección III.2.3.-Funicular de fuerzas. Al ser un arco cuya división y distribución de las cargas se hizo de manera simétrica, solo se tomara las medidas de la mitad del arco, considerando a la otra mitad con las mismas distancias. En este sentido, la numeración asignada a cada punto cambiara de sentido para facilitar dichos cálculos, es decir, el punto **P0** se ubica en la parte más alta del arco (el que antes correspondía a la fuerza **F20**) y el punto **P20** se encuentra en la parte final del medio arco.

<sup>38</sup> Para diferenciar esta información, le asignaremos la letra minúscula *h*.

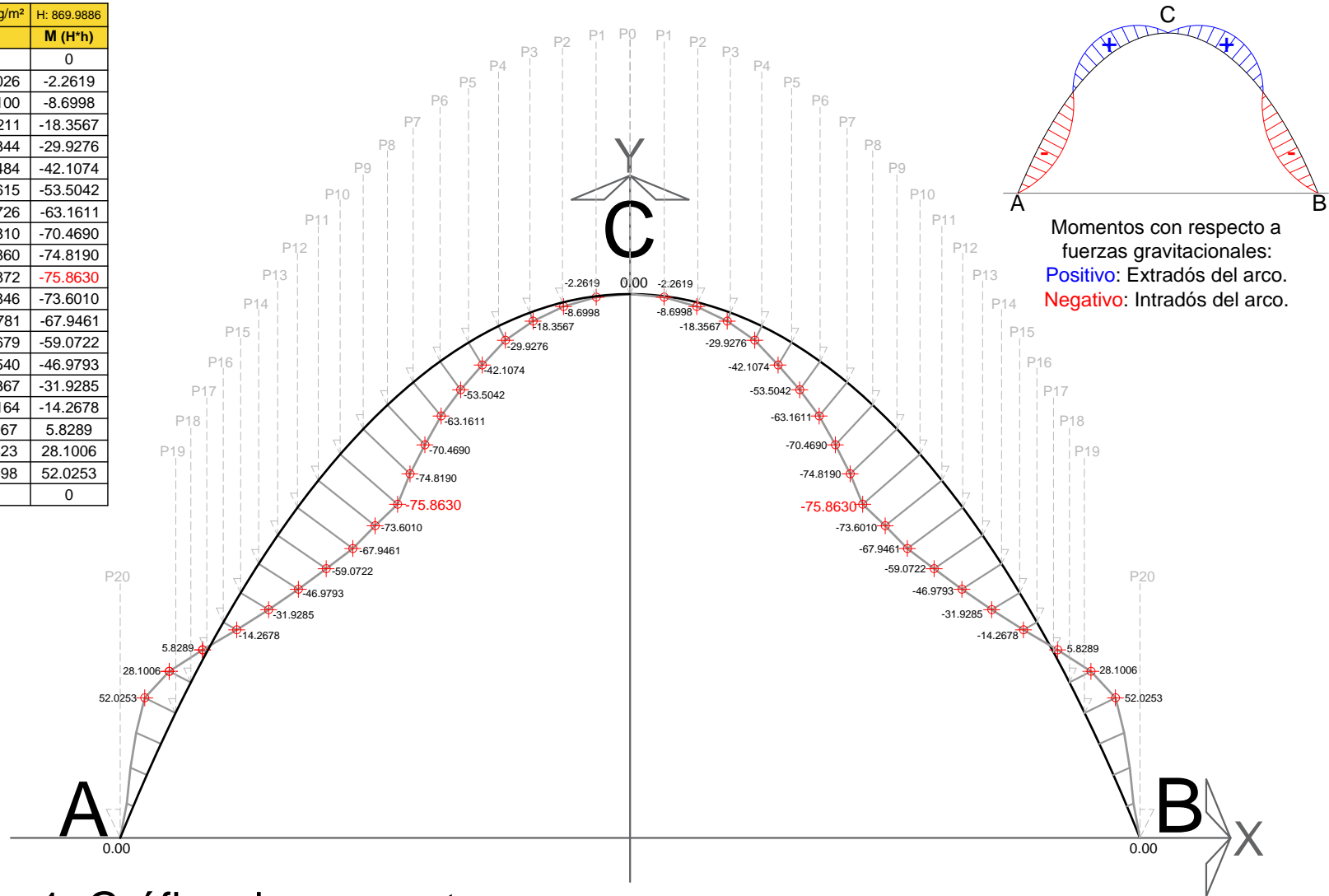
Una vez terminado el registro de estas distancias, volvemos a nuestro polígono de fuerzas donde ubicamos la posición del foco donde parten los rayos polares correspondientes al tercer funicular de fuerzas. Tomamos la medida que hay entre el foco y el polígono de fuerzas y obtenemos la distancia horizontal que existe entre ambos (**H**) que representa al empuje o fuerza horizontal (Ver figura 36).

Al tener este dato, se procederá a realizar una multiplicación entre la distancia resultante entre funicular y la curva (**h**) y la distancia horizontal entre foco y polígono de fuerzas (**H**). El producto obtenido representa la magnitud del momento en ese punto en específico.

Elipse 1. Dimensiones 8 x 15 m.		H=869.9886	Elipse 2. Dimensiones 8 x 15 m.		H=922.4198
Punto	h	M (H*h)	Punto	h	M (H*h)
P0	0	0	P0	0	0
P1	-0.0026	-2.2619	P1	-0.0020	-1.8448
P2	-0.0100	-8.6998	P2	-0.0078	-7.1948
P3	-0.0211	-18.3567	P3	-0.0164	-15.1276
P4	-0.0344	-29.9276	P4	-0.0268	-24.7208
P5	-0.0484	-42.1074	P5	-0.0376	-34.6829
P6	-0.0615	-53.5042	P6	-0.0478	-44.0916
P7	-0.0726	-63.1311	P7	-0.0562	-51.8399
P8	-0.0810	-70.4690	P8	-0.0623	-57.4667
P9	-0.0860	-74.8190	P9	-0.0654	-60.3262
P10	-0.0872	-75.8630	P10	-0.0653	-60.2340
P11	-0.0846	-73.6010	P11	-0.0618	-57.0055
P12	-0.0781	-67.9461	P12	-0.0548	-50.5486
P13	-0.0679	-59.0722	P13	-0.0446	-41.1399
P14	-0.0540	-46.9793	P14	-0.0311	-28.6872
P15	-0.0367	-31.9285	P15	-0.0147	-13.5595
P16	-0.0164	-14.2678	P16	0.0044	4.0586
P17	0.0067	5.8289	P17	0.0259	23.8906
P18	0.0323	28.1006	P18	0.0494	45.5675
P19	0.0598	52.0253	P19	0.0745	68.7202
P20	0	0	P20	0	0

Tabla 6.- Momentos gravitacionales. Resultados obtenido del producto de las distancias por la fuerza o empuje horizontal (H). Los números cuyo color de fuente es de color rojo, indican la magnitud del momento máximo que está ubicado en el punto de la fuerza F10 (elipse 1) y F9 (elipse 2). Concluimos por el método gráfico que los momentos presentes en nuestros respectivos arcos son mínimos.

Fuerza: 100 kg/m <sup>2</sup>		H: 869.9886
Punto	h	M (H*h)
0	0	0
1	-0.0026	-2.2619
2	-0.0100	-8.6998
3	-0.0211	-18.3567
4	-0.0344	-29.9276
5	-0.0484	-42.1074
6	-0.0615	-53.5042
7	-0.0726	-63.1611
8	-0.0810	-70.4690
9	-0.0860	-74.8190
10	-0.0872	-75.8630
11	-0.0846	-73.6010
12	-0.0781	-67.9461
13	-0.0679	-59.0722
14	-0.0540	-46.9793
15	-0.0367	-31.9285
16	-0.0164	-14.2678
17	0.0067	5.8289
18	0.0323	28.1006
19	0.0598	52.0253
20	0	0

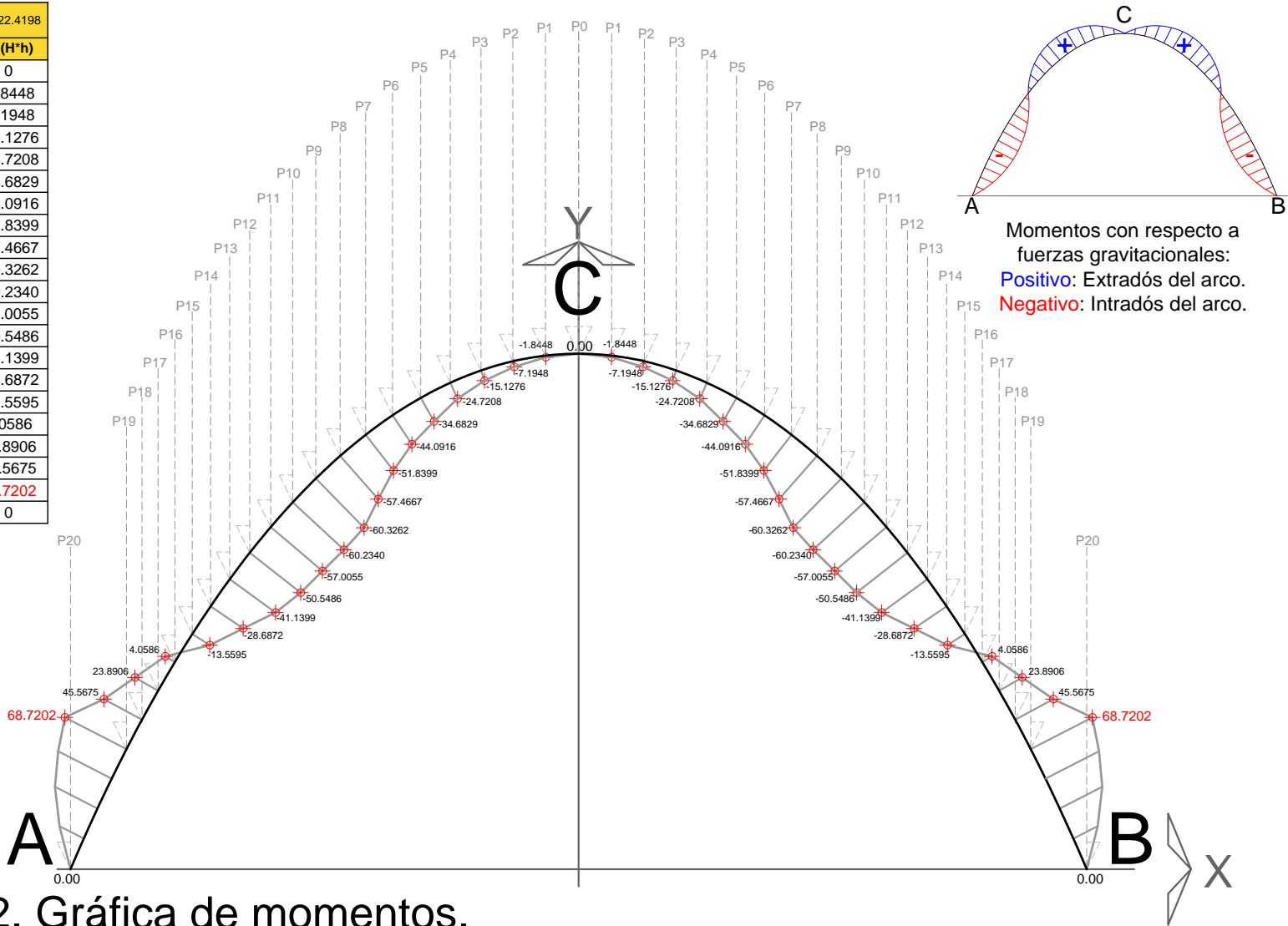


## Elipse 1. Gráfica de momentos.

Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.

S/ESC.

Fuerza: 100 kg/m <sup>2</sup>		H: 922.4198
Punto	h	M (H*h)
0	0	0
1	-0.0020	-1.8448
2	-0.0078	-7.1948
3	-0.0164	-15.1276
4	-0.0268	-24.7208
5	-0.0376	-34.6829
6	-0.0478	-44.0916
7	-0.0562	-51.8399
8	-0.0623	-57.4667
9	-0.0654	-60.3262
10	-0.0653	-60.2340
11	-0.0618	-57.0055
12	-0.0548	-50.5486
13	-0.0446	-41.1399
14	-0.0311	-28.6872
15	-0.0147	-13.5595
16	0.0044	4.0586
17	0.0259	23.8906
18	0.0494	45.5675
19	0.0745	68.7202
20	0	0



## Elipse 2. Gráfica de momentos.

Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.

S/ESC.

### III.3.2.b- Método analítico.

Para corroborar nuestros resultados obtenidos por el método gráfico, procederemos a realizar el método analítico que describiremos a continuación. Se explicara la totalidad del proceso, mediante una secuencia de cómo fueron computados los datos<sup>39</sup> para obtener el cálculo de los momentos por fuerza gravitacional.

1.- Empezamos ingresamos el nombre de la tabla que designa la actividad a realizar. Después, procedemos a señalar cuál de las dos elipses (elipse 1 o elipse 2) es la que se va a realizar las operaciones, así como su respectivo claro (**e**) y la altura o flecha (**f**). También se considera la carga (**w**) a la cual estarán sometidos los arcos de nuestra cubierta.

Como ya se mencionó en este trabajo (Ver II.3.2.c- Longitud de la curva.) la curva elíptica que representa la forma de la cubierta, fue dividida en puntos con una distancia de 50 cm de separación entre sí. Estos puntos deben de ser ubicados en el plano de coordenadas **X – Y** registrando su posición en base a las distancias vertical y horizontal del punto con respecto a los ejes.

2.- Ahora, en las siguientes dos columnas (**dj** y **hj**) de nuestra hoja de cálculo tendremos lo siguiente; en la primera columna (**dj**) formularemos en cada casilla una resta entre la distancia del punto **P1** menos el punto **P0**, obteniendo el primer resultado de **P1**. De esta forma continuaremos con las demás celdas hasta llegar a la fila correspondiente al punto **P20**. Ejemplo:

$$djP_0 = XP_0, \quad djP_1 = XP_1 - XP_0, \quad djP_2 = XP_2 - XP_1, \quad djP_3 = XP_3 - XP_2, \dots$$

Para la segunda columna (**hj**) formularemos en cada casilla una resta entre la distancia del punto **P0** menos cada uno de los puntos que se encuentran sobre la curva (**P0, P1, P2, P3... P20**)<sup>40</sup>, por ejemplo:

---

<sup>39</sup> Señalando que para realizar el vaciado de la información para su posterior cálculo, se utilizó hojas de cálculo del programa Microsoft Excel 2010® que viene incluido en la paquetería de Microsoft Office 2010®.

<sup>40</sup> Para esta columna, **P0** es una constante en cada resta, ya que es la altura máxima o flecha de nuestro arco por lo que equivale que sea nuestro punto de origen o cero (**0**).



$$h_{jP0} = Y_{P0}, \quad h_{jP1} = Y_{P0} - Y_{P1}, \quad h_{jP2} = Y_{P0} - Y_{P2}, \quad h_{jP3} = Y_{P0} - Y_{P3}, \quad h_{jP4} = Y_{P0} - Y_{P4}, \dots$$

3.- Los segmentos de arco o curva existente entre dos puntos les corresponde la mitad de cada fuerza (**W**) equivale a 100kg/m aplicada sobre cada uno de los puntos. Esta repartición de fuerzas permite en equilibrio interno del arco.

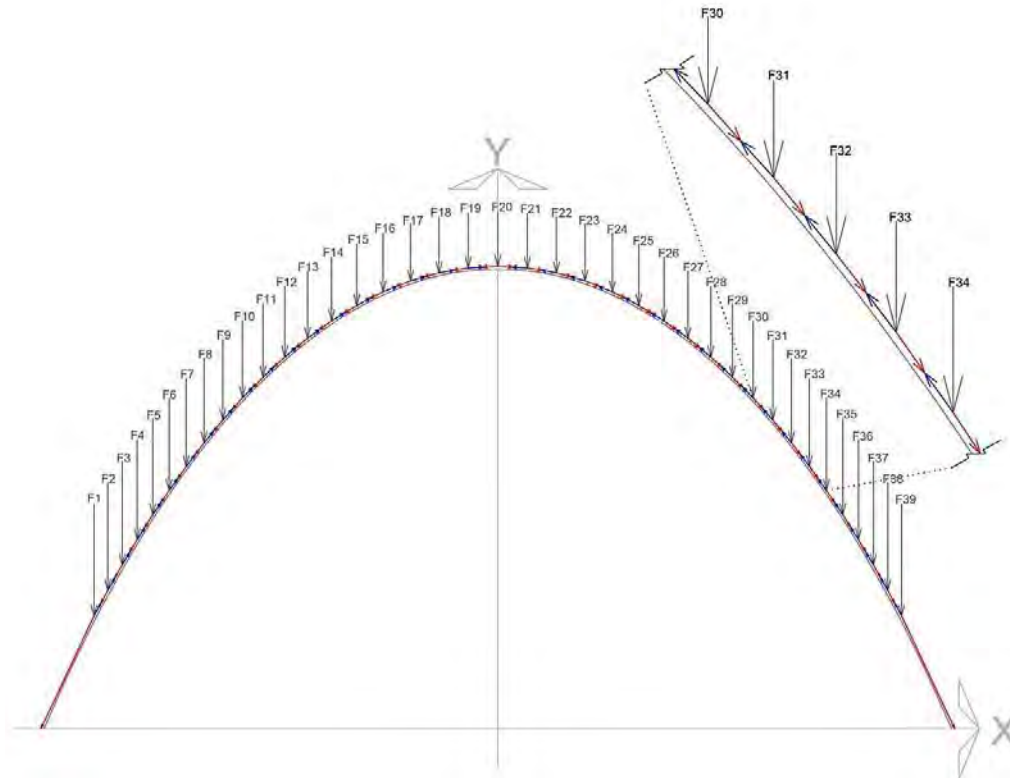


Figura 34.- Fuerzas distribuidas sobre el arco. En la parte superior derecha, vemos a detalle como las fuerzas gravitacionales que actúan sobre los puntos donde se ubican las alfileras, se distribuyen y anulan entre sí con otras fuerzas de igual magnitud pero sentido contrario. Dibujo del autor.

La fuerza vertical (**V**) corresponde a la suma de todas las fuerzas desde el punto **P0** hasta **P20**. En nuestra tabla, empezando en el punto **P0** con una carga de 50 kg/m, ya que los otros 50 kg/m correspondientes al punto inicial, están repartido en la otra sección del arco y al ser un arco con cargas simétricas, no es necesario calcular la totalidad del mismo. Una vez aclarado esto último, se formula la casilla del punto **P1** con la suma de la carga aplicada (100kg/m) más la suma de la carga del punto anterior obteniendo como resultado para ese punto, una carga de 150kg/m. Para el punto **P2**, se vuelve a realizar la misma operación obteniendo 250kg/m y así sucesivamente. Para el caso del punto **P20**, sucede un caso similar al punto inicial, la única diferencia es que al

repartirse la carga sobre este punto, la mitad se anula con la mitad correspondiente a la carga aplicada al punto anterior a esta (**P19**) pero la otra mitad, al no tener una fuerza equivalente en magnitud pero de sentido contrario, tiende a irse al terreno.

$$VP_0 = W/2, VP_1 = W + VP_0, VP_2 = W + VP_1, VP_3 = W + VP_2, VP_3 = W + VP_2, VP_{20} = W/2 + VP_{19}, \dots$$

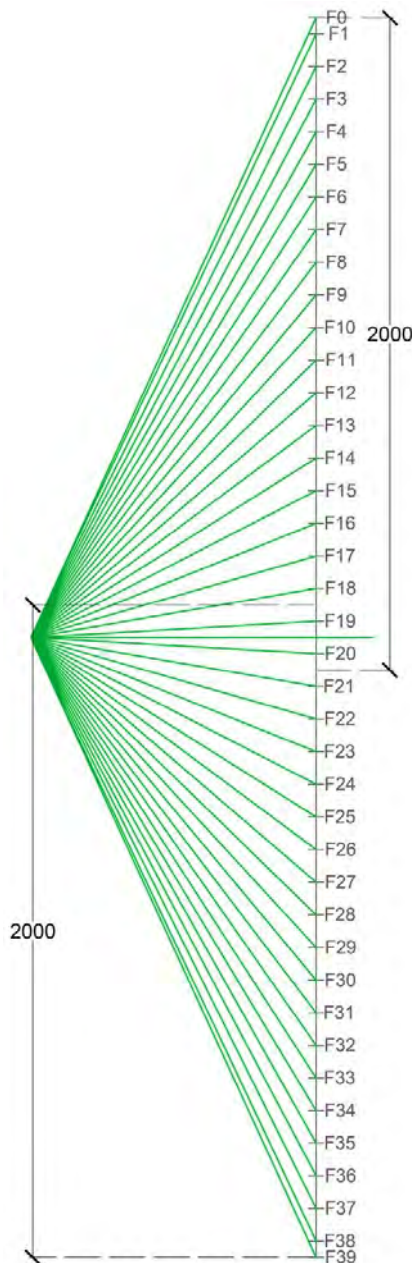


Figura 35.- Cota que marca las suma de fuerzas verticales ubicadas dentro del polígono de fuerzas. Dibujo del autor.

Una manera de comprobar esta información la podemos encontrar en nuestro polígono de fuerzas (ver sección III.2.3.- Funicular de fuerzas.). El polígono de fuerzas representa de manera gráfica, la suma de las fuerzas verticales que actúan sobre nuestra estructura. Al estar representadas las magnitudes de la fuerza a escala, podemos tomar la distancia que hay entre el inicio del polígono y la línea donde se encuentra el tercer polo donde tomamos los rayos polares para pasar por los puntos **A**, **C** y **B** del arco. Esta medida coincide con cada uno de los resultados obtenidos de la suma de fuerzas verticales planteadas en nuestra hoja de cálculo.

4.- Ahora, necesitamos determinar la magnitud de los momentos producidos por las fuerzas verticales (**M<sub>Jv</sub>**) primero calculamos las áreas correspondientes a cada segmento de arco (**Δ1**), multiplicando el resultado obtenido de la diferencia de las distancias entre los puntos sobre el eje **X** (**d<sub>j</sub>**) por la fuerza vertical presente en cada punto (**V**):

$$\Delta 1P_0 = dj_{P_0} * VP_0, \Delta 1P_1 = dj_{P_1} * VP_0, \Delta 1P_2 = dj_{P_2} * VP_1, \Delta 1P_3 = dj_{P_3} * VP_2, \dots$$

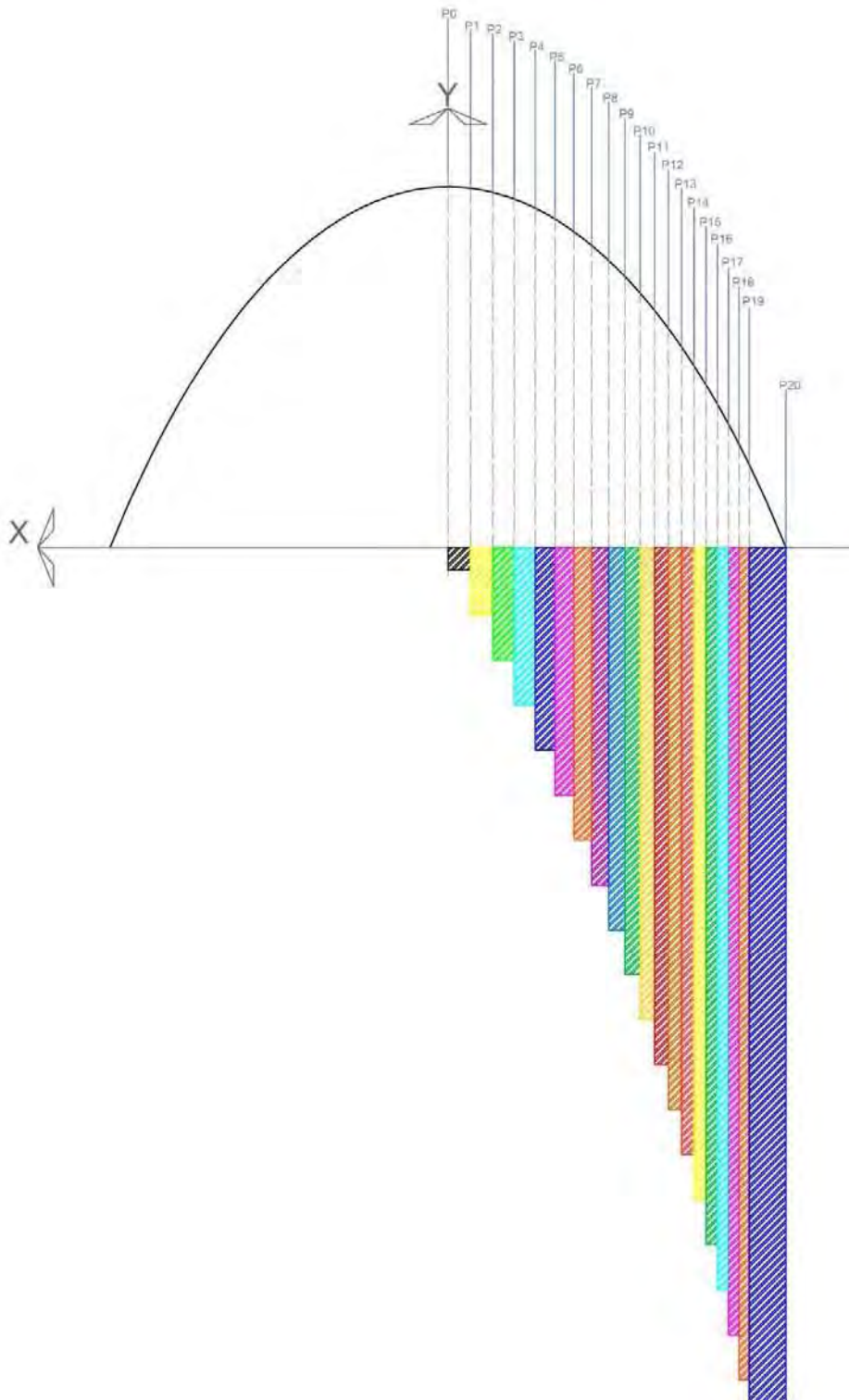


Figura 36.- Gráfica de las áreas en el arco. A la par de los cálculos se elabora el dibujo de dichas áreas para corroborar y respaldar nuestros resultados obtenidos a través del uso de la hoja de cálculo. Dibujo del autor.

Después de realizado este proceso, se procede a sumar cada una de estas áreas conforme se van recorriendo punto por punto para obtener los momentos verticales:

$$\mathbf{MJvP0 = \Delta 1P0, MJvP1 = -(\Delta 1P0+ \Delta 1P1), MJvP2 = -(\Delta 1P0+ \Delta 1P1, \Delta 1P2),...}^{41}$$

Al obtener el valor del momento vertical correspondiente al punto 20 (**P20**), se divide entre la flecha, con la finalidad de obtener el valor **H** que utilizaremos en el siguiente paso.

$$\mathbf{H= MJvP20/f}$$

5.- Para determinar la magnitud de los momentos horizontales (**MJh**), multiplicamos el valor **H** (que es nuestra constante en la operación) por cada uno de los valores de **hj**:

$$\mathbf{MJhp0 = H * hjp0, MJhp1 = H * hjp1, MJhp2 = H * hjp2, MJhp3 = H * hjp3,...}$$

Terminamos realizando una suma de los momentos verticales y horizontales de cada uno de los puntos de la curva elíptica. Al ser de signo negativo los momentos verticales y los momentos horizontales de signo positivo nos darán como resultado la magnitud de los momentos que estarán actuando a lo largo de la sección de nuestros arcos.

Al comparar los valores obtenidos por el método analítico con los resultados obtenidos por medio del método gráfico, serán muy próximos entre sí, lo que significa que los momentos presentes en nuestra cubierta son menores y por lo tanto no representan un riesgo a considerar aunque el cálculo solo considera las fuerzas gravitacionales.

### **III.3.3.-Esfuerzos de la sección.**

Una vez obtenido los momentos de ambos arcos, procederemos a determinar los esfuerzos normales y tangenciales. Podemos definir a los esfuerzos normales o de compresión (**N**) como aquellos perpendiculares a la sección mientras que los esfuerzos tangenciales o cortante (**Q**) son contenidos en el plano de la sección.

---

<sup>41</sup> Se agrega un signo negativo en las operaciones ya que las fuerzas actúan desde arriba hacia abajo. Más adelante se explicara la importancia de incluir este signo.

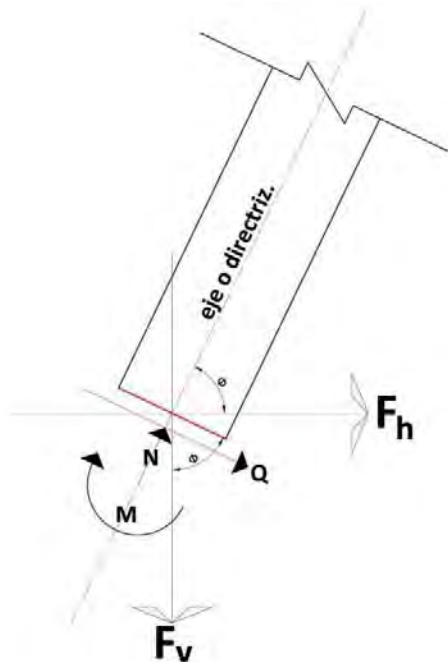


Figura 37.- Esquema que representa los esfuerzos a los que se encuentra sometido nuestra sección. Dibujo del autor.

Antes de obtener los valores de estos esfuerzos, primero tenemos que saber el ángulo de inclinación de las líneas tangentes que tocan a nuestra elipse.

### III.3.3.a- Tangentes de la elipse.

1.- Empezamos ingresando en nuestra hoja de cálculo, los radios mayores y menores de la elipse, en este caso el de la curva identificada como elipse 1:

- Circunferencia de radio mayor **a**: 33 m.
- Circunferencia de radio menor **b**: 11.49 m.

2.- Procedemos a ubicar los puntos dentro del sistema de coordenadas **X – Y**, los cuales, son los mismos que hemos venido usando en los funiculares de fuerzas y en los cálculos de momentos en la elipse.

3.- Determinando la distancia de los focos al eje de la elipse, usaremos la fórmula planteada en el Manual del Ingeniero<sup>42</sup>:

<sup>42</sup> Academia Hütte, 1938, pág. 123.

$$OF = OF' = \sqrt{a^2 \pm b^2} \quad 43$$

Lo que significa que la relación de igualdad entre los focos equivale a la raíz de la diferencia del cuadrado del radio **a** menos el cuadrado del radio **b**, obteniendo los siguientes resultados para ambas elipses:

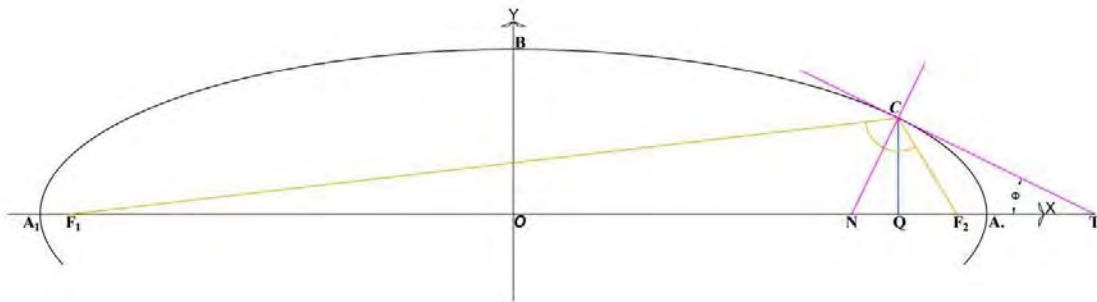
- Distancia de los focos al eje de la elipse **1**: 30.9351 m.
- Distancia de los focos al eje de la elipse **2**: 30.7126 m.

**4.-** Para saber la excentricidad de la elipse, dividimos la distancia de los focos respecto al eje entre la circunferencia del radio mayor de la elipse (**a**).

- Excentricidad de la elipse **1**: 0.9351 m.
- Excentricidad de la elipse **2**: 0.93069 m.

Teniendo la ubicación en el sistema de coordenadas **X – Y**, la distancia de los focos con respecto al eje y la excentricidad de la elipse, procederemos a usar las fórmulas para determinar Tangente **CT**, Subtangente **TQ**, Normal **CN**, Subnormal **NQ**.

**5.-** Antes de continuar, indicaremos de manera gráfica su posición dentro de la elipse y describiremos brevemente a que se refieren los términos antes mencionados.



**Figura 38.-** Dibujo de la elipse ubicando los focos de la elipse, radios vectores, subtangente TQ, tangente CT, subnormal NQ y normal CN. Cada punto utilizado para determinar las tangentes de la elipse corresponde a los mismos puntos donde se posicionan las alfajillas de bambú dentro del sistema estructural y que hemos venido utilizando para diferentes procedimientos y cálculos a lo largo de este trabajo.

Dibujo del autor tomado de Academia Hütte, 1938, pág. 123.

<sup>43</sup> Tanto en la elipse como en la hipérbola, se usan las mismas formulas la gran mayoría de las veces, diferenciándose solo por el uso del signo (*negativo o positivo*). En la elipse, se usa el signo negativo en las operaciones matemáticas mientras que para la hipérbola el cálculo será usando el signo positivo.

- La Tangente **CT** corresponde al punto de intersección por la prolongación de la línea tangente que toca a la curva en un punto **C** con la prolongación de la línea del eje focal **T**.
- La Subtangente **TQ** es la distancia que existe entre el punto de intersección **T** con una cuerda que pasa por un punto de la curva elíptica **CQ**.<sup>44</sup>
- La Normal **CN** se refiere a la línea que parte del punto **C** de la curva y toca en un punto **N** al eje focal de la elipse. La diferencia que existe entre la normal **CN** y una línea **CQ** radica en que la primera se determina la inclinación al cruzar por la mitad del ángulo formado por los radios vectores que tocan un punto **C** de la curva. Otra característica importante es que forman un ángulo recto con la Tangente **CT**.
- La Subnormal **NQ** considera la medida entre el punto **N** y el punto **Q**.
- Por último, la columna con el símbolo  $\Phi$  (*phi*) señala el ángulo de inclinación de la Tangente **CT**.

Definidos los términos, procederemos a realizar las sustituciones en las fórmulas para obtener los resultados referentes a la Tangente **CT**, Subtangente **TQ**, Normal **CN**, Subnormal **NQ** en cada uno de los puntos en que se dividió la sección de elipse que corresponde a nuestros arcos de la cubierta. Al ser una forma simétrica, basta con calcular la mitad de la curva.

**6.-** Por último, obtenemos el ángulo que forma la Tangente **CT** al calcular el seno inverso del cociente de las coordenadas **Y** entre el valor de **CT** de cada uno de los puntos.

---

<sup>44</sup> No confundir con la cuerda focal.





**Tabla 7.- Lineas tangentes de la Elipse 1.**

Radio a= 33 m                      Distancia de los focos al eje = 30.9351 m  
 Radio b= 11.4899 m                  Excentricidad de la elipse (e)= 0.9374 m

Punto de la Tangente	X	Y	Tangente CT	Normal CN	Subtangente TQ	Subnormal NQ	Φ
			$\frac{ay}{bx}\sqrt{\pm a^2 - e^2 x^2}$	$\frac{b}{a}\sqrt{\pm a^2 - e^2 x^2}$	$\mp \frac{a^2}{x} \pm x$	$\mp \frac{b^2}{a^2} x$	
P0	25.0000	7.5000	20.0181	8.0892	-18.5600	-3.0307	22.0034
P1	26.8377	6.6859	15.2799	7.4355	-13.7395	-3.2535	25.9484
P2	27.2874	6.4615	14.1790	7.2590	-12.6211	-3.3080	27.1105
P3	27.7322	6.2277	13.1099	7.0772	-11.5362	-3.3619	28.3618
P4	28.1717	5.9838	12.0716	6.8898	-10.4841	-3.4152	29.7154
P5	28.6050	5.7292	11.0642	6.6969	-9.4653	-3.4677	31.1857
P6	29.0313	5.4630	10.0873	6.4985	-8.4799	-3.5194	32.7907
P7	29.4496	5.1845	9.1413	6.2948	-7.5288	-3.5701	34.5520
P8	29.8587	4.8926	8.2262	6.0860	-6.6131	-3.6197	36.4954
P9	30.2571	4.5863	7.3429	5.8727	-5.7345	-3.6680	38.6521
P10	30.6430	4.2644	6.4922	5.6555	-4.8953	-3.7148	41.0598
P11	31.0142	3.9256	5.6754	5.4357	-4.0987	-3.7598	43.7640
P12	31.3679	3.5687	4.8941	5.2150	-3.3491	-3.8027	46.8181
P13	31.7008	3.1922	4.1498	4.9959	-2.6516	-3.8430	50.2851
P14	32.0087	2.7951	3.4447	4.7822	-2.0133	-3.8804	54.2345
P15	32.2864	2.3764	2.7802	4.5790	-1.4430	-3.9140	58.7347
P16	32.5282	1.9360	2.1567	4.3929	-0.9504	-3.9433	63.8516
P17	32.7271	1.4747	1.5733	4.2326	-0.5481	-3.9675	69.6111
P18	32.8760	0.9949	1.0254	4.1079	-0.2485	-3.9855	75.9807
P19	32.9686	0.5013	0.5052	4.0280	-0.0628	-3.9967	82.8535
P20	33.0000	0.0000	0.0000	4.0005	0.0000	-4.0005	0.0000

**Tabla 7.- Lineas tangentes de la Elipse 2.**

Radio a= 33 m                      Distancia de los focos al eje = 30.7126 m  
 Radio b= 12.0721 m                Excentricidad de la elipse (e)= 0.93069 m

Punto de la Tangente	X	Y	Tangente CT	Normal CN	Subtangente TQ	Subnormal NQ	Φ
			$\frac{ay}{bx}\sqrt{\pm a^2 - e^2 x^2}$	$\frac{b}{a}\sqrt{\pm a^2 - e^2 x^2}$	$\mp \frac{a^2}{x} \pm x$	$\mp \frac{b^2}{a^2} x$	
P0	25.0000	7.8800	20.1635	8.5608	-18.5600	-3.3456	23.004649
P1	26.8646	7.0109	15.3647	7.8790	13.6719	-3.5952	27.148557
P2	27.3199	6.7714	14.2525	7.6954	-12.5412	-3.6561	28.366064
P3	27.7697	6.5219	13.1734	7.5064	-11.4457	-3.7163	29.675102
P4	28.2135	6.2618	12.1268	7.3121	-10.3850	-3.7757	31.088571
P5	28.6505	5.9904	11.1122	7.1124	-9.3593	-3.8342	32.621229
P6	29.0797	5.7069	10.1296	6.9075	-8.3691	-3.8916	34.290302
P7	29.5001	5.4105	9.1791	6.6977	-7.4150	-3.9479	36.116964
P8	29.9104	5.1001	8.2607	6.4833	-6.4983	-4.0028	38.126089
P9	30.3089	4.7749	7.3754	6.2651	-5.6211	-4.0561	40.346493
P10	30.6938	4.4337	6.5238	6.0440	-4.7857	-4.1076	42.813597
P11	31.0628	4.0753	5.7070	5.8214	-3.9952	-4.1570	45.568528
P12	31.4130	3.6986	4.9264	5.5993	-3.2542	-4.2038	48.657833
P13	31.7411	3.3025	4.1832	5.3806	-2.5677	-4.2478	52.135292
P14	32.0430	2.8861	3.4789	5.1690	-1.9426	-4.2882	56.057055
P15	32.3139	2.4489	2.8143	4.9697	-1.3868	-4.3244	60.477592
P16	32.5481	1.9911	2.1892	4.7892	-0.9101	-4.3558	65.435085
P17	32.7395	1.5139	1.6017	4.6355	-0.5231	-4.3814	70.938825
P18	32.8821	1.0197	1.0467	4.5170	-0.2362	-4.4005	76.955162
P19	32.9702	0.5133	0.5168	4.4420	-0.0596	-4.4122	83.369150
P20	33	0	0.0000	4.4162	0.0000	-4.4162	0.000000

### III.3.3.b- Esfuerzos normales $N$ y tangenciales $Q$ .

Al haber determinado las tangentes de la curva de ambas elipses, se procederá a obtener los esfuerzos normales o de compresión ( $N$ ) y los esfuerzos tangenciales o cortante ( $Q$ ).

Si trazamos una línea correspondiente al punto  $P_{20}$ , que sea paralela al eje  $Y$  de la elipse, nos será de utilidad para saber el ángulo formado entre esta línea con la Tangente  $CT$ .

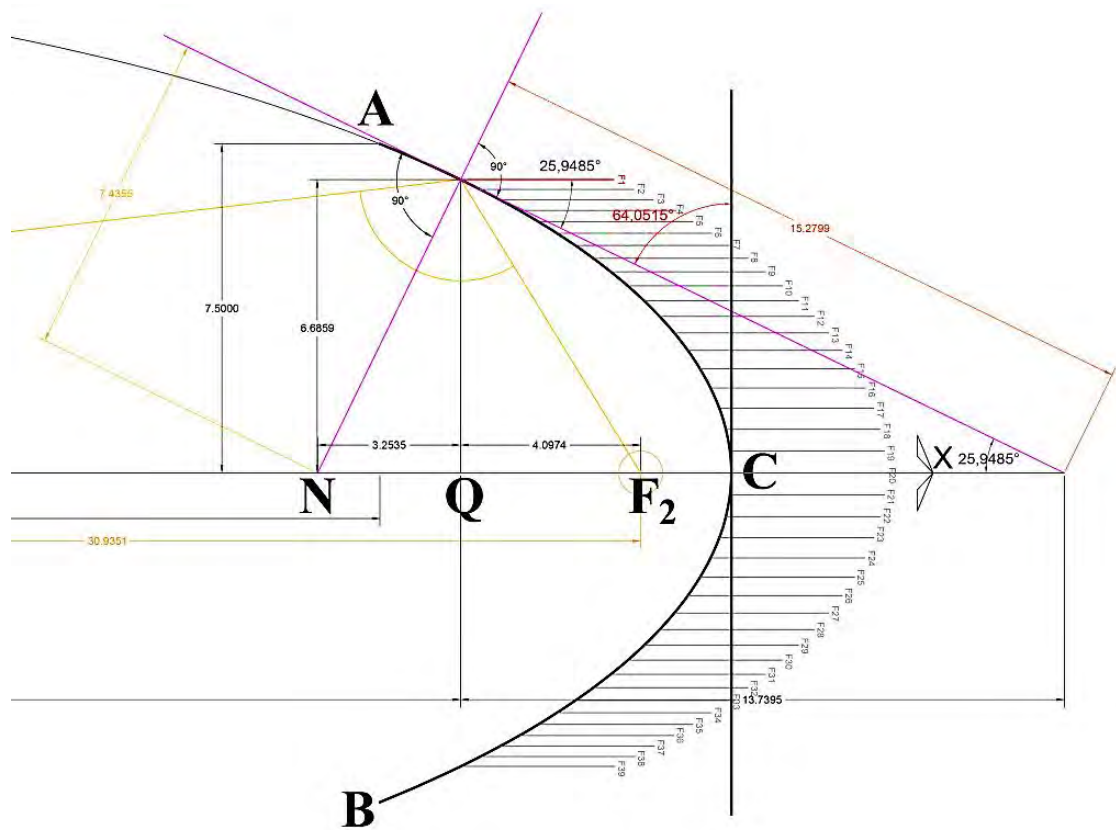


Figura 40.- Ángulo (color rojo) formado entre la Tangente  $CT$  que toca cualquier punto de la curva y la línea paralela al eje  $Y$ . Dibujo del autor.

Conociendo el ángulo de inclinación de la tangente en cada uno de los puntos ( $\varphi$ ) y los valores del empuje horizontal ( $H$ ) y fuerza vertical ( $V$ ) que previamente habíamos calculado<sup>46</sup>, procederemos a determinar los esfuerzos  $N$  y  $Q$  de nuestros arcos utilizando las siguientes formulas:

<sup>46</sup> Ver sección III.3.2.-Momentos del arco.

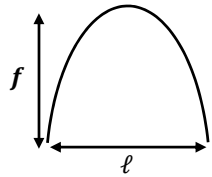
$$N = -H \cos \varphi - V \sin \varphi$$

$$Q = H \sin \varphi - V \cos \varphi$$

Los esfuerzos normales (**N**) representan la compresión de nuestros arcos, que es la suma de todas las fuerzas desde el punto más elevado hasta el punto de desplante de nuestro arco. Esto significa que dentro de la formula, existan signos negativos que al realizar la sustitución de valores y su cálculo nos dé un resultado positivo. En cambio, los esfuerzos tangenciales (**Q**), representan la diferencia de esfuerzos perpendiculares a la sección de los arcos, lo que se traduce en diferencia de signos dentro de la formula.

Para cerrar esta sección, se incluyen las hojas de cálculo de cada uno de los arcos. En dichas hojas, se calcularon los momentos, los esfuerzos normales y los esfuerzos cortantes. Para estos últimos dos casos, se desglosó y resolvió en base a jerarquía de operaciones con la finalidad de tener una mejor comprensión y control de las operaciones matemáticas. También se incluyen las gráficas de los momentos, las compresiones y los cortantes de ambos arcos donde se traduce los resultados obtenidos en nuestras hojas de cálculo. Cabe resaltar antes de proseguir con el presente trabajo, sobre los análisis realizados. Estos se efectuaron en base a cargas gravitacionales, por lo que se tiene que determinar el comportamiento de la estructura ante acciones accidentales como el viento o el sismo, por lo que deberán ser tomadas en cuenta y modificarán el trabajo de esfuerzos directos, no obstante las formas propuestas tendrán un comportamiento excelente durante la mayor parte del tiempo bajo la acción de su peso propio (Rincón Medina, 2014, pág. 211).

Tabla 8.- Cálculo de momentos de la Elipse 1 por fuerzas gravitacionales.



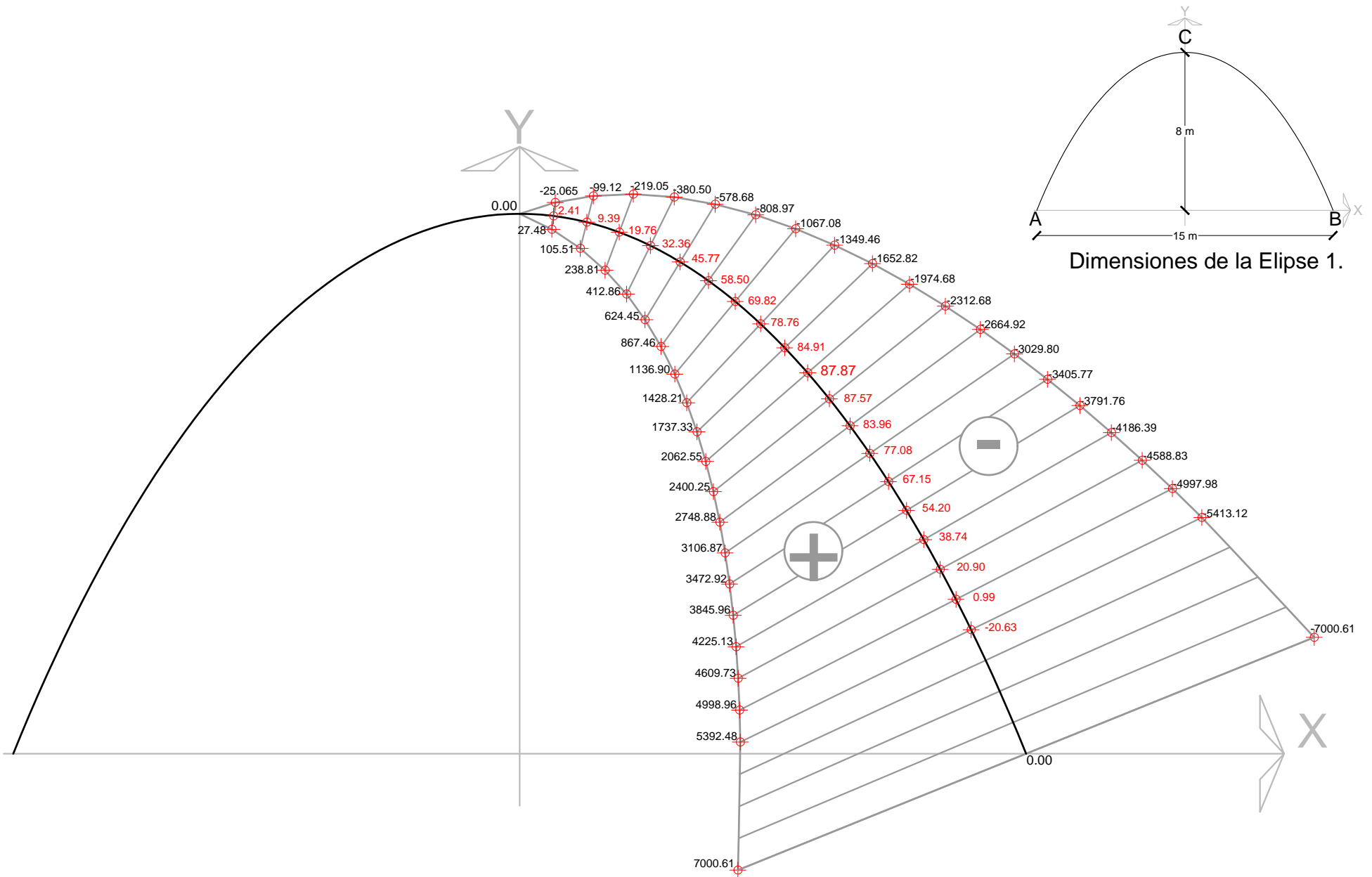
f= 8.00 m  
 l= 15.00 m  
 w= 100 kg/m

S= 23.1150 m  
 H= 875.0763 kg

$$N = -H \cos \phi - V \sin \phi$$

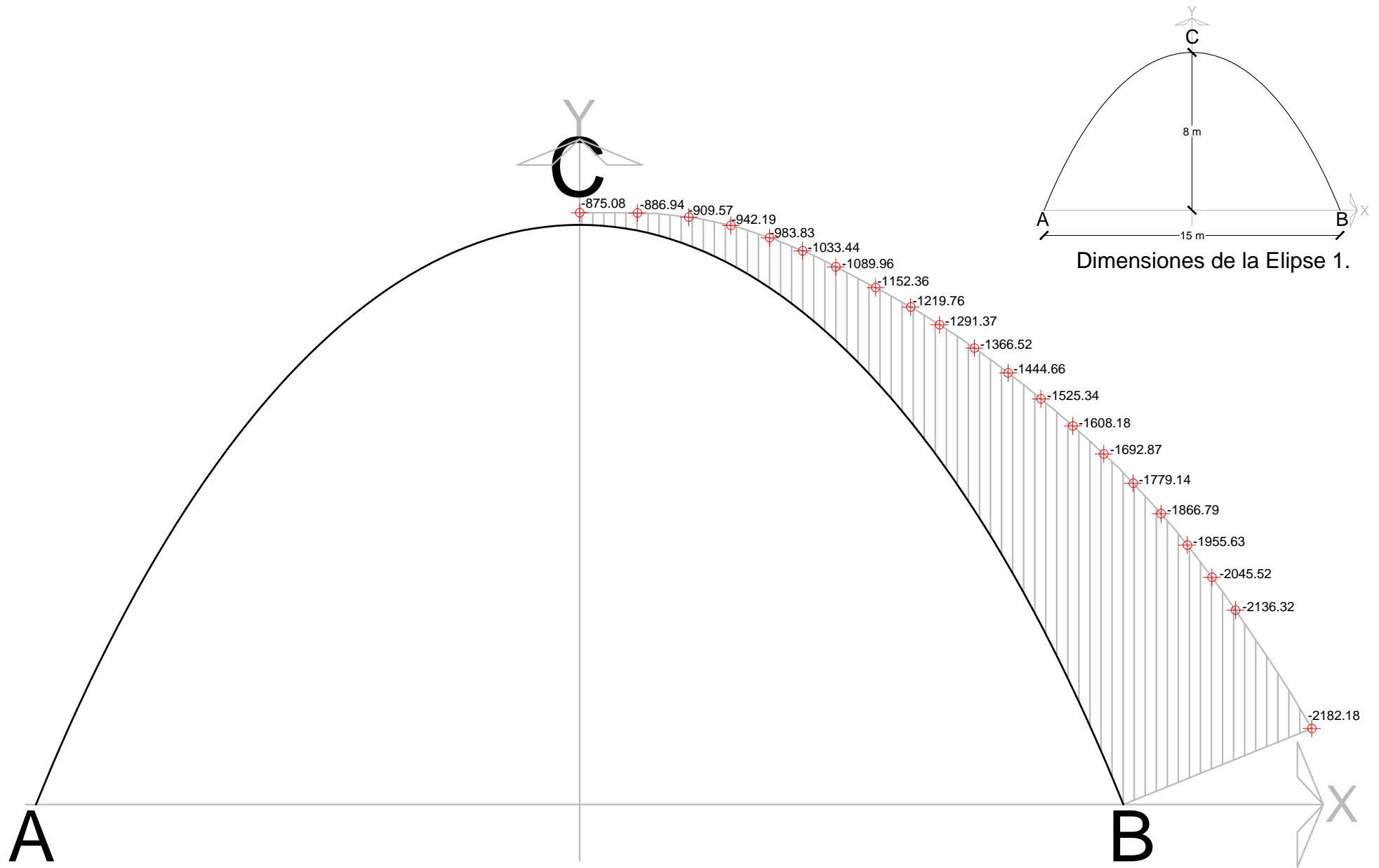
$$Q = H \sin \phi - V \cos \phi$$

Punto	X	Y	dj	hj	V	$\Delta 1$	MJv	MJh	MJv+MJh	$\Phi$	SENO $\Phi$	COSENO $\Phi$	N	Q
P	m	m	m	m	kg/m	m <sup>2</sup>	kg/m	kg/m	kg/m	grados	deg	deg	kg	kg
0	0.0000	8.0000	0.0000	0.0000	50	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	1.000000	-875.08	-50.00
1	0.5013	7.9686	0.5013	0.0314	150	25.07	-25.065	27.48	2.41	7.1486	0.124443	0.992227	-886.94	-39.94
2	0.9950	7.8760	0.4937	0.1240	250	74.06	-99.12	108.51	9.39	14.0169	0.242208	0.970224	-909.57	-30.61
3	1.4747	7.7271	0.4797	0.2729	350	119.93	-219.05	238.81	19.76	20.3896	0.348402	0.937345	-942.19	-23.19
4	1.9360	7.5282	0.4613	0.4718	450	161.46	-380.50	412.86	32.36	26.1487	0.440702	0.897653	-983.83	-18.30
5	2.3764	7.2864	0.4404	0.7136	550	198.18	-578.68	624.45	45.77	31.2641	0.518984	0.854784	-1033.44	-15.98
6	2.7951	7.0087	0.4187	0.9913	650	230.29	-808.97	867.46	58.50	35.7659	0.584475	0.811412	-1089.96	-15.96
7	3.1922	6.7008	0.3971	1.2992	750	258.12	-1067.08	1136.90	69.82	39.7143	0.638960	0.769240	-1152.36	-17.79
8	3.5687	6.3679	0.3765	1.6321	850	282.38	-1349.46	1428.21	78.76	43.1809	0.684304	0.729197	-1219.76	-21.00
9	3.9256	6.0142	0.3569	1.9858	950	303.37	-1652.820	1737.73	84.91	46.2358	0.722193	0.691692	-1291.37	-25.13
10	4.2644	5.6430	0.3388	2.3570	1050	321.86	-1974.68	2062.55	<b>87.87</b>	48.9399	0.754021	0.656850	-1366.52	-29.87
11	4.5863	5.2571	0.3219	2.7429	1150	337.99	-2312.68	2400.25	87.57	51.3478	0.780952	0.624591	-1444.66	-34.89
12	4.8926	4.8587	0.3063	3.1413	1250	352.25	-2664.92	2748.88	83.96	53.5045	0.803904	0.594760	-1525.34	-39.97
13	5.1845	4.4496	0.2919	3.5504	1350	364.88	-3029.80	3106.87	77.08	55.4480	0.823612	0.567154	-1608.18	-44.93
14	5.4630	4.0313	0.2785	3.9687	1450	375.98	-3405.77	3472.92	67.15	57.2093	0.840655	0.541572	-1692.87	-49.64
15	5.7292	3.6050	0.2662	4.3950	1550	385.99	-3791.76	3845.96	54.20	58.8143	0.855494	0.517814	-1779.14	-53.99
16	5.9838	3.1717	0.2546	4.8283	1650	394.63	-4186.39	4225.13	38.74	60.2846	0.868498	0.495692	-1866.79	-57.89
17	6.2277	2.7322	0.2439	5.2678	1750	402.44	-4588.83	4609.73	20.90	61.6380	0.879964	0.475041	-1955.63	-61.29
18	6.4615	2.2874	0.2338	5.7126	1850	409.15	-4997.98	4998.96	0.99	62.8895	0.890129	0.455708	-2045.52	-64.13
19	6.6859	1.8377	0.2244	6.1623	1950	415.14	-5413.12	5392.48	-20.63	64.0515	0.899188	0.437563	-2136.32	-66.39
20	7.5000	0.0000	0.8141	8.0000	2000	1587.50	-7000.61	7000.61	0.00	67.9966	0.927162	0.374662	-2182.18	62.01



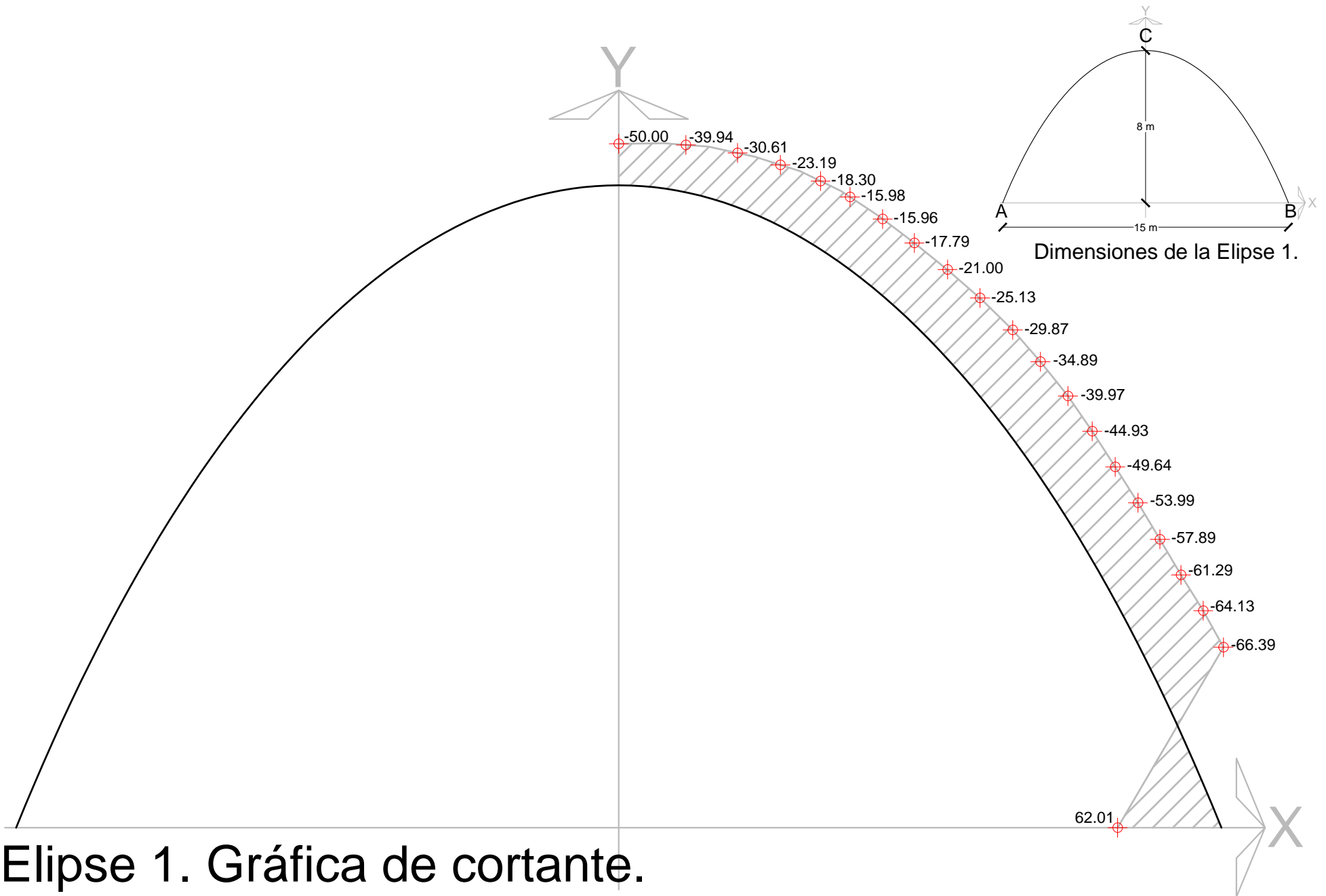
# Elipse 1. Gráfica de momentos.

Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.



# Elipse 1. Gráfica de compresiones.

Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.

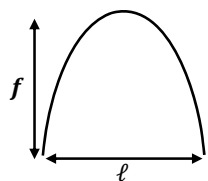


# Elipse 1. Gráfica de cortante.

Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.



**Tabla 8.- Cálculo de momentos de la Elipse 2 por fuerzas gravitacionales.**



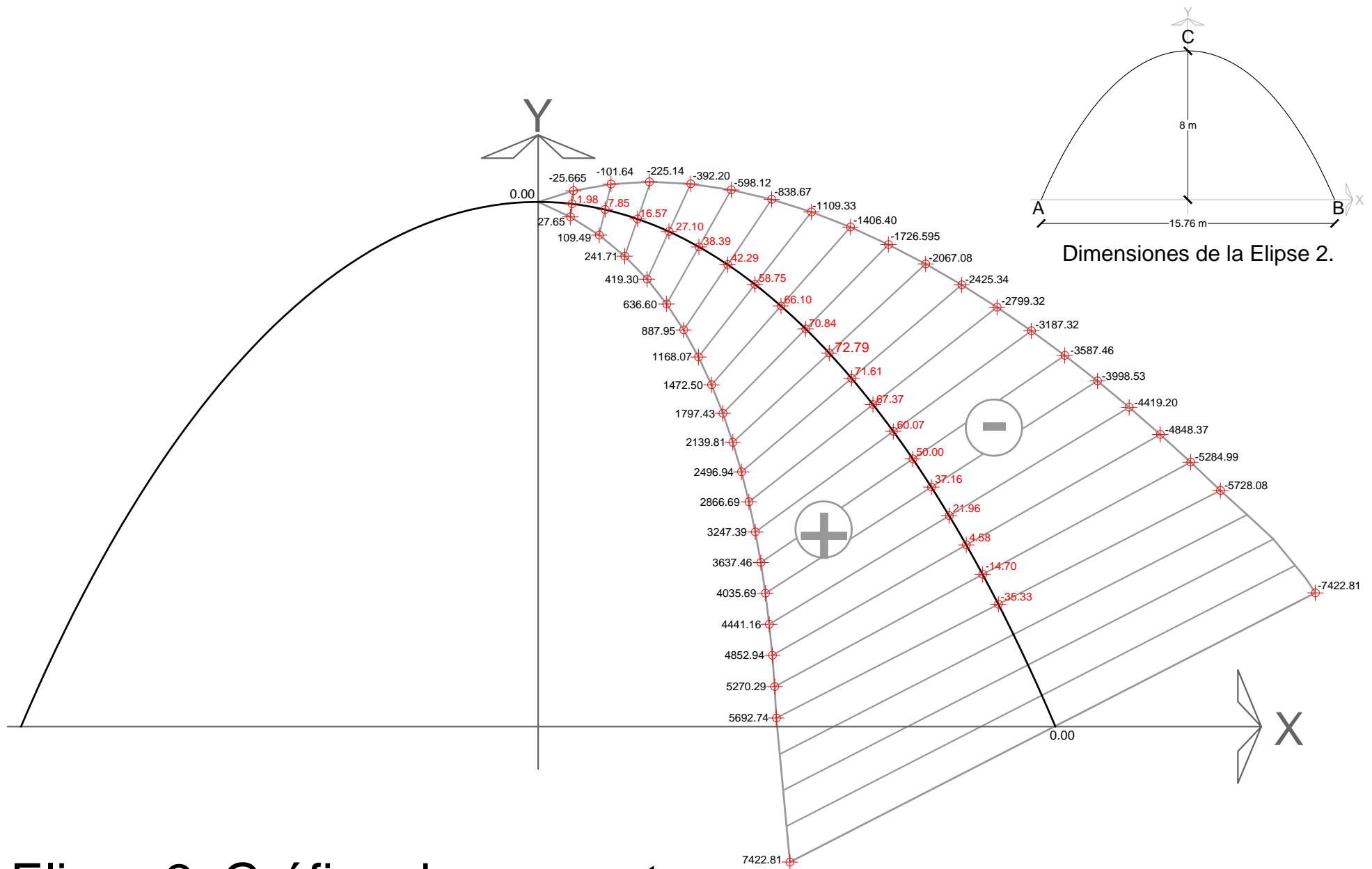
f= 8.00 m  
 e= 15.76 m  
 w= 100 kg/m

S= 23.6597  
 H= 927.8513 kg

$$N = -H \cos \varphi - V \sin \varphi$$

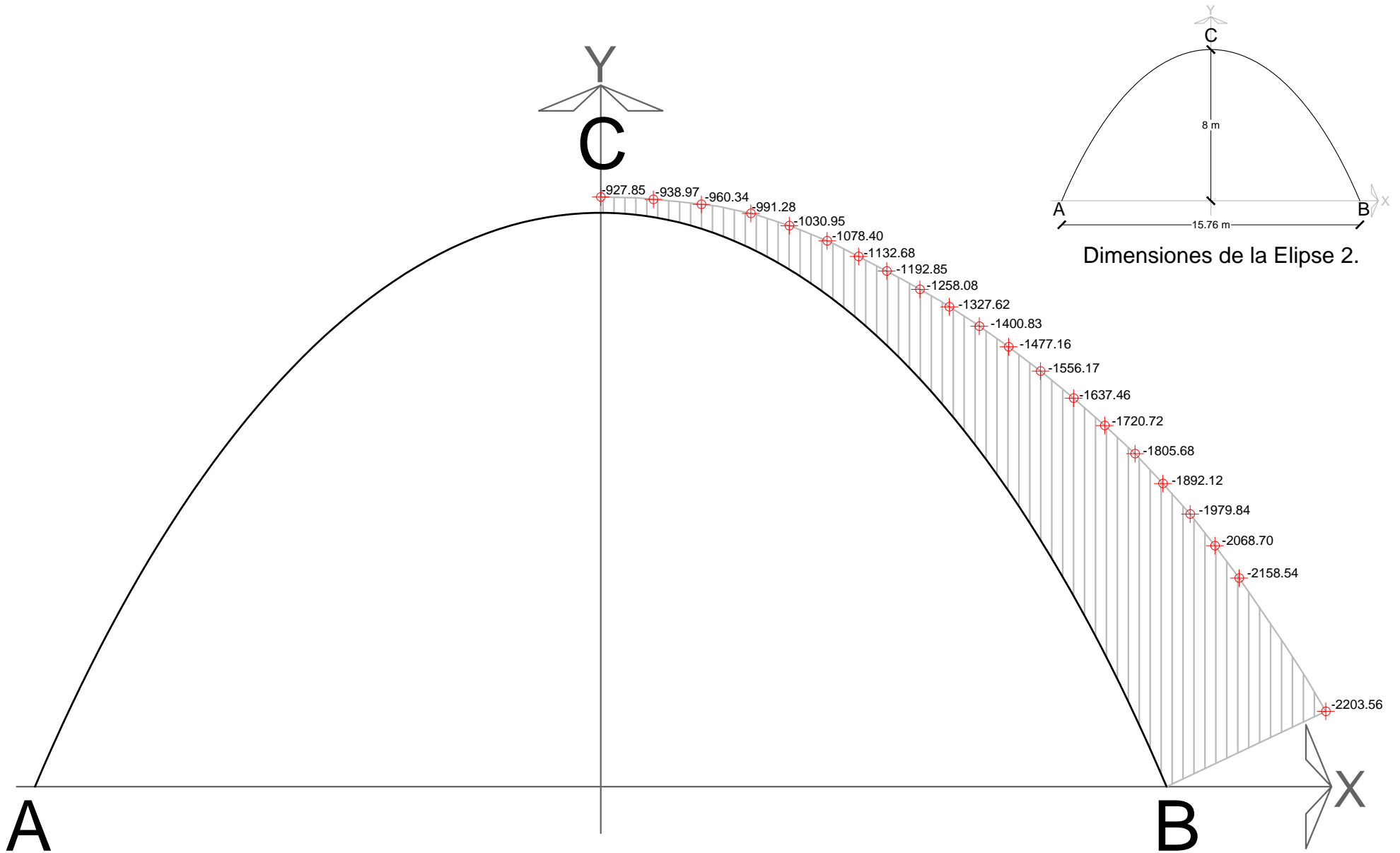
$$Q = H \sin \varphi - V \cos \varphi$$

Punto	X	Y	dj	hj	V	$\Delta 1$	MJv	MJh	MJv+MJh	$\Phi$	SENO $\Phi$	COSENO $\Phi$	N	Q
p	m	m	m	m	m	m <sup>2</sup>	kg/m	kg/m	kg/m	grados	deg	deg	kg	kg
0	0.0000	8.0000	0.0000	0.0000	50	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	1.000000	-927.85	-50.00
1	0.5133	7.9702	0.5133	0.0298	150	25.67	-25.665	27.65	1.98	6.6399	0.115629	0.993292	-938.97	-41.71
2	1.0198	7.8820	0.5065	0.1180	250	75.98	-101.64	109.49	7.85	13.0483	0.225772	0.974180	-960.34	-34.06
3	1.5138	7.7395	0.4940	0.2605	350	123.50	-225.14	241.71	16.57	19.0611	0.326576	0.945171	-991.28	-27.80
4	1.9911	7.5481	0.4773	0.4519	450	167.06	-392.20	419.30	27.10	24.5660	0.415741	0.909483	-1030.95	-23.52
5	2.4489	7.3139	0.4578	0.6861	550	206.01	-598.21	636.60	38.39	29.5229	0.492771	0.870159	-1078.40	-21.37
6	2.8861	7.0430	0.4372	0.9570	650	240.46	-838.67	887.95	49.29	33.9423	0.558358	0.829600	-1132.68	-21.17
7	3.3025	6.7411	0.4164	1.2589	750	270.66	-1109.33	1168.07	58.75	37.8641	0.613791	0.789469	-1192.85	-22.60
8	3.6986	6.4130	0.3961	1.5870	850	297.08	-1406.40	1472.50	66.10	41.3419	0.660551	0.750781	-1258.08	-25.27
9	4.0753	6.0628	0.3767	1.9372	950	320.20	-1726.595	1797.43	70.84	44.4316	0.700057	0.714087	-1327.62	-28.83
10	4.4337	5.6938	0.3584	2.3062	1050	340.48	-2067.08	2139.81	<b>72.74</b>	47.1864	0.733569	0.679615	-1400.83	-32.95
11	4.7749	5.3089	0.3412	2.6911	1150	358.26	-2425.34	2496.94	71.61	49.6535	0.762143	0.647409	-1477.16	-37.36
12	5.1001	4.9104	0.3252	3.0896	1250	373.98	-2799.32	2866.69	67.37	51.8750	0.786666	0.617379	-1556.17	-41.82
13	5.4105	4.5001	0.3104	3.4999	1350	388.00	-3187.32	3247.39	60.07	53.8829	0.807814	0.589437	-1637.46	-46.21
14	5.7069	4.0797	0.2964	3.9203	1450	400.14	-3587.46	3637.46	50.00	55.7095	0.826192	0.563389	-1720.72	-50.33
15	5.9904	3.6505	0.2835	4.3495	1550	411.08	-3998.53	4035.69	37.16	57.3787	0.842252	0.539084	-1805.68	-54.10
16	6.2618	3.2135	0.2714	4.7865	1650	420.67	-4419.20	4441.16	21.96	58.9113	0.856369	0.516364	-1892.12	-57.42
17	6.5219	2.7697	0.2601	5.2303	1750	429.16	-4848.37	4852.94	4.58	60.3248	0.868846	0.495083	-1979.84	-60.23
18	6.7714	2.3199	0.2495	5.6801	1850	436.63	-5284.99	5270.29	-14.70	61.6340	0.879931	0.475102	-2068.70	-62.49
19	7.0109	1.8646	0.2395	6.1354	1950	443.08	-5728.07	5692.74	-35.33	62.8515	0.889827	0.456298	-2158.54	-64.15
20	7.8800	0.0000	0.8691	8.0000	2000	1694.75	-7422.81	7422.81	0.00	66.9954	0.920473	0.390805	-2203.56	72.45



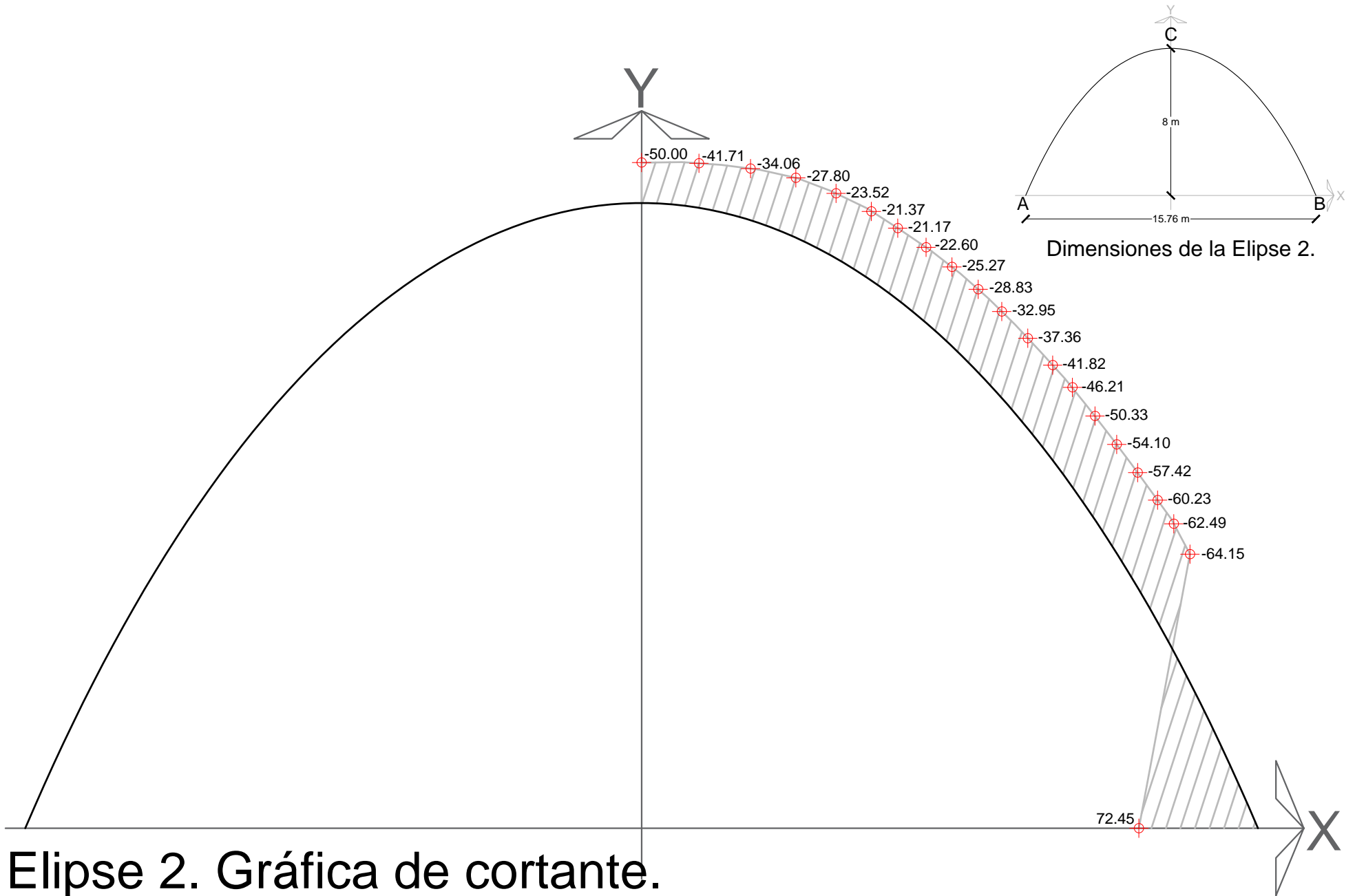
# Elipse 2. Gráfica de momentos.

Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.



## Elipse 2. Gráfica de compresiones.

Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.



# Elipse 2. Gráfica de cortante.

Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.

### **III.4.-Fuerzas externas del arco.**

#### **III.4.1.-Introducción.**

Las cargas se dividen en tres tipos: Cargas muertas, cargas vivas y cargas accidentales. Las cargas muertas se podría decir que es el peso mismo de la construcción, es decir, de los materiales, elementos estructurales y no estructurales (Meli Piralla, 2016, pág. 128). Las cargas vivas se deben a la operación y uso de la construcción (Meli Piralla, 2016, pág. 131), por último, las cargas accidentales, consideran a los eventos o fenómenos, meteorológicos o atmosféricos excepcionales (Meli Piralla, 2016, pág. 187). En el apartado anterior, vimos las acciones que corresponden a los esfuerzos que se producen dentro de la sección de la estructura de la cubierta ante fuerzas gravitacionales (carga muerta). Al ser una estructura ligera, las acciones accidentales como sismo no se consideran relevantes, ya que la forma y resistencia se obtiene en base a la geometría de las curvas planas y no por el aumento a su sección o masa. Sin embargo, debido a esta ligereza lo hace susceptible a otras acciones como el viento. A continuación, veremos las acciones externas causadas por viento a las que estará sometida la cubierta.

#### **III.4.2.- Viento.**

El viento son los movimientos de masas de aire debido a una combinación de factores que intervienen en conjunto. Estos factores son las condiciones climáticas de una región, las presiones atmosféricas y la rotación de la tierra. La velocidad y dirección de los vientos, están regidas por una combinación de fuerzas las cuales se presentan y comportan de varias formas, cito:

***“Fuerza de gradiente de presión:*** La que causa que el aire siempre se mueva de una presión alta a una presión baja.

***Fuerza coriolis:*** La que causa una deflexión hacia la derecha en el hemisferio Norte y a la izquierda en el hemisferio Sur, debido a la rotación terrestre”

***Fuerza centrífuga:*** el aire se mueve en un patrón curvo.

***Fuerza de fricción:*** Oposición a todo movimiento de aire cerca de la superficie de la Tierra<sup>47</sup>

Cada región presenta vientos con diferentes movimientos relacionados con la rugosidad del terreno, ya que la velocidad del viento puede disminuir a causa de la superficie del terreno (Cuando esta velocidad no encuentra interferencia alguna, se conoce como velocidad gradiente) y el gradiente de temperatura. La combinación de ambos nos da como resultado las turbulencias. Estas, se expresan en términos cualitativos y no cuantitativos como la velocidad, dirección y frecuencia. Las turbulencias se pueden diferenciar en dos tipos: mecánica y térmica, cito:

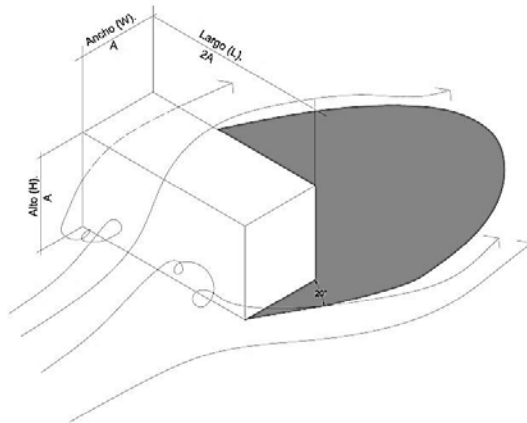
*“La fricción superficial produce turbulencia mecánica en las corrientes de aire y se determina por la rugosidad de las superficies y la velocidad del viento: la turbulencia térmica se asocia con la inestabilidad y actividad convectiva”.*<sup>48</sup>

Así como la turbulencia mecánica se incrementa dependiendo de la rugosidad del terreno, la turbulencia térmica se incrementa por el aumento de la temperatura y la inestabilidad atmosférica. Ambas pueden ocurrir de manera conjunta y pueden incrementarse una respecto a la otra. Una característica en común de ambas turbulencias es la formación de remolinos o vórtices cuya fuerza, tamaño y movimiento son condicionados por la velocidad, dirección del viento, la estabilidad o inestabilidad de la atmosfera baja y la forma y tamaño del objeto (García Chávez & Fuentes Freixanet, 2005, pág. 21).

---

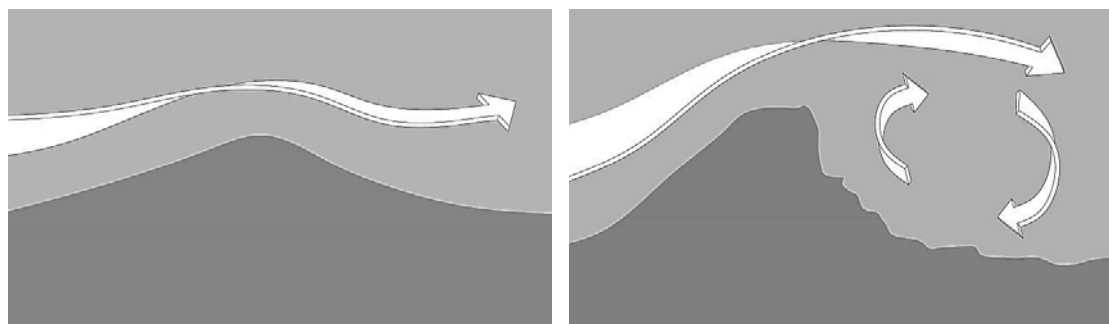
<sup>47</sup> Fuentes, García 2005: 19-20.

<sup>48</sup> Fuentes, García 2005: 21



**Figura 41.-** La inestabilidad de la atmosfera baja, la forma, el tamaño, la velocidad y dirección del viento pero principalmente por la forma y tamaño del edificio, determinan la magnitud de la fuerza de los remolinos o vórtices. Dibujo del autor tomado de García Chávez & Fuentes Freixanet, 2005, pág. 21.

La topografía juega un papel fundamental en el movimiento del terreno, por lo que tenemos que tener en cuenta si el lugar donde se desplantara nuestra cubierta, se ubica entre valles, laderas, o montañas. Un ejemplo de como la topografía condiciona el flujo del viento es de la siguiente forma; las montañas y sus valles, representan uno de los mayores factores para el cambio de dirección y velocidad del viento y si bien la vegetación ejerce el mismo efecto sobre el viento, no tiene una magnitud tan grande como la topografía. En colinas poco pronunciadas la turbulencia mecánica es mínima, por el contrario, en pendientes muy inclinadas, en riscos o bordes de cañones, el flujo del viento es mayor lo que ocasiona grandes remolinos en sotavento.



**Figura 42.-** Efecto de la topografía sobre el viento. *Izquierda:* Caso donde el viento pasa sobre una colina redonda o con una ligera pendiente. *Derecha:* Caso donde el viento pasa sobre una pendiente ascendente. Dibujos del autor tomados de García Chávez & Fuentes Freixanet, 2005, pág. 23.

Los vientos convectivos son la suma de flujos de vientos horizontales, verticales, ascendentes y descendentes cuyo común denominador y origen, es la diferencia regional o local de la temperatura, en específico del ambiente y cómo influye en el

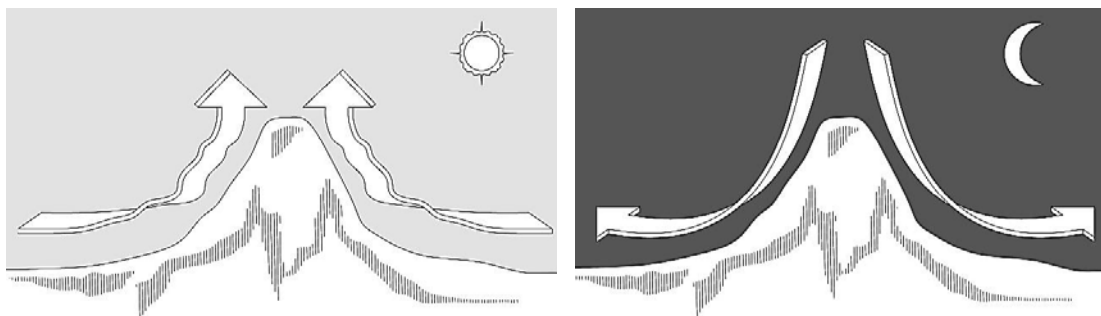
calentamiento y enfriamiento. Existen 3 tipos de vientos convectivos<sup>49</sup>. Para interés del proyecto, nos concentraremos en la segunda y tercera categoría.

- Brisas de tierra y mar.
- Vientos de ladera.
- Vientos de valle.

Es complejo los vientos en este tipo de topografía de ladera y valle, los vientos generales dominan la capa de aire superficial, sin embargo, cuando estos se debilitan, los vientos de origen local se vuelven factor importantes. Cito:

*“Los vientos generales y convectivos pueden desplazarse, reforzarse u oponerse el uno al otro. La relación entre ellos puede cambiar rápidamente; la actividad convectiva puede dominar por un tiempo y en el siguiente los vientos generales vuelven a prevalecer. Las diferencias en el calentamiento de aire sobre las laderas de las montañas, centro de cañones, valles y planicies, provocan diferentes sistemas de viento, pero todos interrelacionados.”<sup>50</sup>*

Los vientos de ladera es el resultado de la presión local provocada por la diferencia de temperaturas de las corrientes de aire ubicadas a una misma altura pero una más próxima a la ladera que otra.



**Figura 43.-** “Durante la noche, aire frío cercano a la superficie fluye ladera abajo como agua que corre entre los drenes que forma la topografía. La transición entre vientos ascendentes y descendentes empieza tan pronto como las laderas entran en la tarde sombreada y el enfriamiento de la superficie comienza”. García Chávez & Fuentes Freixanet, 2005, pág. 28. Dibujo del autor tomado de la misma página y autores.

<sup>49</sup> García Chávez & Fuentes Freixanet, 2005, pág. 25.

<sup>50</sup> Fuentes, García 2005: 27



Los vientos de valle y de ladera están relacionados uno con otro al formarse una circulación convectiva por las corrientes de viento ascendente y descendente, por lo que no deben ser analizados de forma independiente.

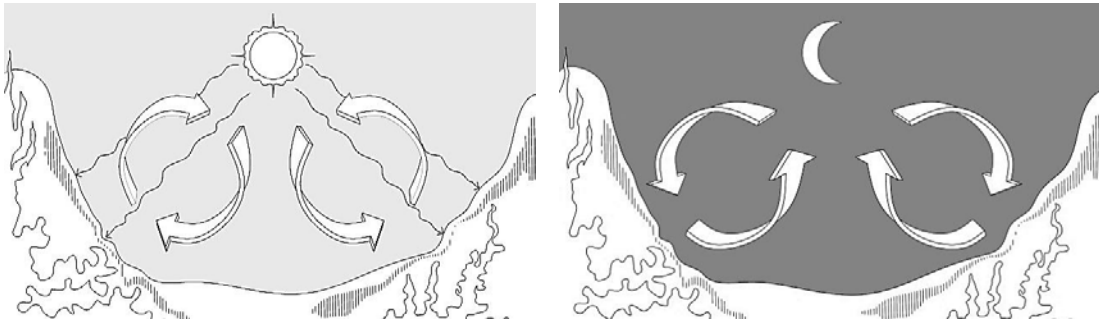


Figura 44.- “El sistema de circulación puede completarse si el flujo de aire ascendente, en las partes más altas de la ladera, se enfría adiabáticamente lo suficiente para fluir sobre el valle y descender para remplazar al aire inferior”. García Chávez & Fuentes Freixanet, 2005, pág. 29. Dibujo del autor tomado de la misma página y autores.

Hemos visto que las condiciones topográficas y climáticas modifican las corrientes de viento en una región o lugar. Cuando un edificio o estructura interfiere con el paso de dicha corriente, se presentan fuerzas a las cuales estará sometida la construcción y que muy probablemente comprometan su estabilidad. Dichas fuerzas actuarán en todos los lados de la forma de la construcción, sin embargo, podemos clasificarlo en dos frentes:

- **Barlovento:** Cara expuesta directamente a la fuerza del viento.
- **Sotavento:** Cara expuesta a las succiones del viento.

La suma de ambas da como resultado la **fuerza de arrastre**. Para ciertos elementos como perfiles o ángulos que se presentan en armaduras o torre, hay otra fuerza conocida como **fuerza de sustentación** (término empleado en la aeronáutica) el cual es una fuerza resultante hacia arriba. Para el diseño de una cubierta cuya resistencia se obtenga por forma, nos interesa la fuerza o presión total ejercida en una superficie, poniendo énfasis en el lapso en el cual el máximo de la velocidad del viento pueda rodear a toda la estructura, sin embargo, la geometría del objeto afectará el modo en que las presiones se distribuyan.

Al obstruir el flujo de aire, genera una desviación de la trayectoria del viento, lo que se traduce en presiones y succiones en el elemento. Si el elemento tiene una forma

geométrica particular, regularmente se generan vórtices de forma simétrica. La resultante de esos vórtices actúan de manera transversal al sentido del viento y cuando se sincronizan con la vibración natural de la estructura, las vibraciones se amplifican de manera considerable.

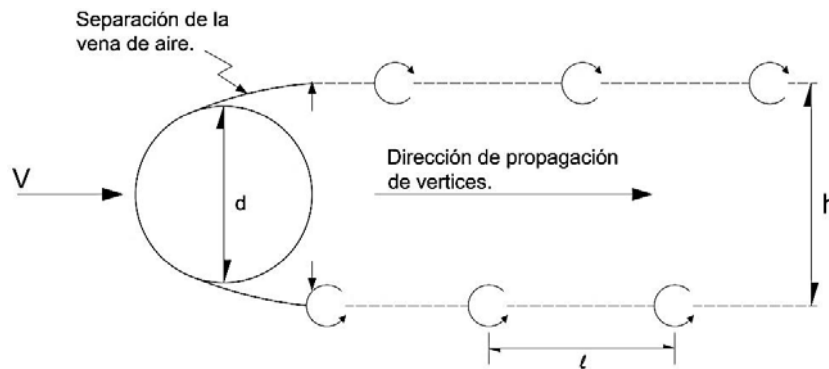


Figura 45.- Formación de vórtices. Dibujo hecho por el autor tomado de Meli Piralla, 2016, pág. 211.

El viento puede actuar en cualquier dirección, lo que obliga a investigar cuales son los frentes más desfavorables para la estructura antes estas acciones. Para edificios o estructuras regulares, basta con hacer un análisis simple que tome en cuenta dos direcciones del viento que coincidan con los ejes principales de la estructura.

### III.4.3.-Calculo por viento.

En un inicio se clasifica a la cubierta en base a la importancia de la construcción. Lo que marca el Reglamento de Construcción de la Ciudad de México dentro de sus Normas Técnicas Complementarias<sup>51</sup>, tendremos que al ser una cubierta para una estructura arqueológica, esta entra en el Grupo A, subgrupo A3 en la cual clasifica a las edificaciones cuya pérdida de material sea de gran valor histórico, legal o cultural: museos, monumentos y estructuras que contengan archivos históricos (SEDUVI, Normas Tecnicas Complementarias Para Diseño por Sismo., 2017, pág. 51). En las normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento de la Ciudad de México, hace una clasificación de las estructuras en base a su respuesta al viento. Identifica 4 tipos de

<sup>51</sup> Cabe aclarar que los cálculos por viento se basaron en las modificaciones realizadas después de los eventos ocurridos el 19 de septiembre del 2017 y publicadas en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México el día 15 de diciembre del 2017.

estructuras y una descripción de cada una de ellas. Dentro de estas categorías, podemos ubicar a nuestra cubierta dentro del Tipo 2 por la siguiente razón:

*“B) Tipo 2. Comprende las estructuras cuya esbeltez o dimensiones reducidas de su sección transversal las hace especialmente sensibles a las ráfagas de corta duración, y cuyos periodos naturales largos favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes. Se cuentan en este tipo, los edificios con esbeltez, definida como la relación entre la altura y la mínima dimensión en planta, mayor que 5, o con periodo fundamental mayor a 1 segundo.”<sup>52</sup>*

Dividiendo la altura de nuestra cubierta que es de 8 metros entre los 15 metros de uno de los lados menores de la cubierta, obtenemos como resultado 0.5333.

Las NTCPDV<sup>53</sup> en su sección 3 menciona lo siguiente; *“El método simplificado podrá aplicarse para estructuras con altura no mayor de 15m, con planta rectangular o formada por una combinación de rectángulos, tal que la relación entre una altura y la dimensión menor en planta sea menor que 4”*. (SEDUVI, Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento, 2017, pág. 88). Si bien el cociente obtenido entre dimensión menor y altura dio un valor mayor a lo señalado, la altura de la cubierta es menor a 15 metros por lo que podemos realizar los cálculos por viento mediante el uso del método simplificado.

Comenzamos determinando la velocidad de diseño con la siguiente fórmula:

$$VD = F_{TR}F_{\alpha}V_R$$

Sin embargo, para poder usar esta fórmula, hay que determinar la velocidad regional que es la velocidad máxima que se presenta en un determinado lugar a una altura de 10 m. Para determinar la velocidad regional, se considera el nivel de importancia de la construcción y la zona donde está ubicada, sin embargo, la cubierta ubica en el norte de Veracruz en la región del Totonacapan (véase I.1.1.- Contexto geográfico y ambiental.) por lo que tenemos que usar la velocidad regional del sitio.

---

<sup>52</sup> (SEDUVI, Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento, 2017, pág. 87).

<sup>53</sup> Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento de la Ciudad de México.

Dentro del reglamento de construcciones existe un análisis pormenorizado y detallado por zonas y regiones de las velocidades de viento pero solo respecto a la ciudad de México. Desafortunadamente no se cuentan con estudios a detalle sobre las velocidades del viento en diferentes partes de la república, y la información que se tiene sobre ciertas velocidades, responden más a un carácter meteorológico que a una medición hecha para análisis estructural. Se podría decir que Manual de Obras Civiles de la CFE es el único que tiene un análisis de velocidad de viento a nivel nacional dividido por regiones.

El Manual de Obras Civiles la CFE se incluye mapas de isostáticas de las velocidades regionales de la república mexicana con periodos de retorno de 10, 50 y 200 años. Por lo general, las velocidades regionales tienen un periodo de retorno o de recurrencia que se determina alrededor de 50 años como base en algunos reglamentos aunque existen variaciones en los incrementos de velocidad de viento de 100 a 200 años si la estructura es de gran importancia. La que nos resulta de interés, es la velocidad que en un breve tiempo, excederá a la velocidad normal por lo que elegimos la velocidad más alta que es de 168 km/h<sup>54</sup> por estar relativamente próxima a la costa y con un periodo de retorno de 200 años.

El factor de variación con la altura  $F\alpha$  que establece la variación de la velocidad del viento con la altura  $z$ . Este dato se define con las siguientes expresiones<sup>55</sup>:

$$F\alpha = 1.0; \quad \text{si } z \leq 10m$$

$$F\alpha = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha; \quad \text{si } 10 m < z < \delta$$

$$F\alpha = \left(\frac{\delta}{10}\right)^\alpha; \quad \text{Si } z \geq \delta$$

Como la altura de nuestra cubierta es menor a 10 m, el factor correctivo es de 1.0.

Si aplicamos la clasificación de rugosidad del terreno a nuestro proyecto, tendremos que estaría ubicado en rugosidad del terreno R3. Identificado en esta clasificación, lo

---

<sup>54</sup> (Comisión Federal de Electricidad, 2008, pág. 4.2 I. 4).

<sup>55</sup> (SEDUVI, Normas Tecnicas Complementarias para Diseño por Viento, 2017, pág. 89).

ubicamos en la tabla del Factor  $F_{TR}$  donde se encuentra dentro de la categoría de topografía T4 que es para terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10 %, con un valor de 0.97.

Obtenidos los datos, sustituimos y multiplicamos en la fórmula:

$$VD = F_{TR}F_{\alpha}V_R$$

$F_{TR}$ : 0.97

$F_{\alpha}$ : 1.0

$V_R$ : 168 km/h = 46.6667 m/s.

Sustituimos:

$$VD = (0.97)(1.0)(46.6667m/s) = 45.2667 \frac{m}{s}.$$

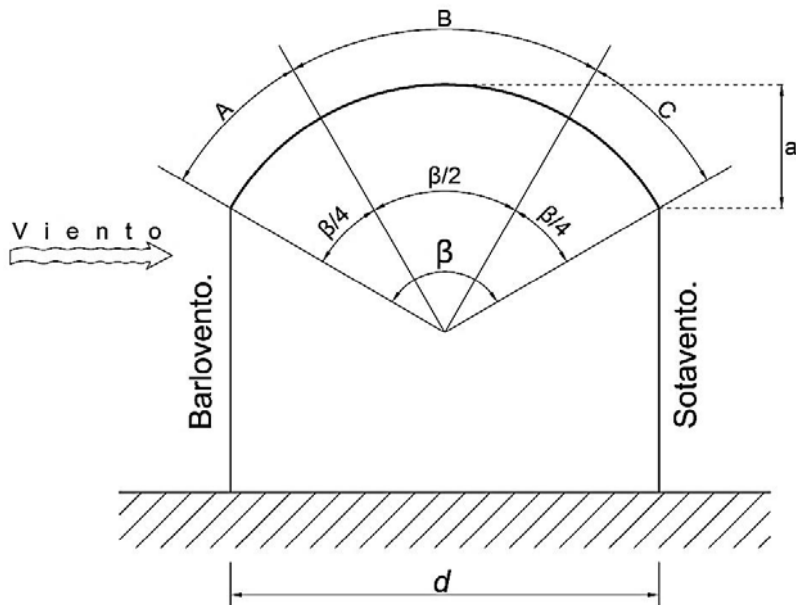
Obtenido la velocidad de diseño, se procederá a realizar los cálculos para determinar la presión de diseño ( $p_z$ ) que es la presión que ejerce el flujo de viento sobre una construcción determinada. Este se obtiene de la siguiente formula<sup>56</sup>:

$$p_z = 0.048C_pVD^2$$

Los coeficientes de presión se determinan dependiendo del tipo y forma de la construcción. Al ser la cubierta de una forma curva a base de arcos, (ver II.4.- Descripción general de la propuesta. ) las presiones y succiones se establecen de la siguiente forma:

---

<sup>56</sup> (SEDUVI, Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento, 2017, pág. 91)



**Coefficientes de presión C para cubiertas en arco.<sup>57</sup>**

Tipo de Cubierta	$r = a/d$	Zona		
		A	B	C
En estructura elevada	$0 < r \leq 0.2$	-0.9	$-0.7 - r$	-0.5
	$0.2 \leq r \leq 0.3$	$1.5r - 0.3$	$-0.7 - r$	-0.5
	$0.3 \leq r \leq 0.6$	$2.75r - 0.68$	$-0.7 - r$	-0.5
Apoiada en el terreno	$0 < r \leq 0.6$	$1.42r$	$-0.7 - r$	-0.5

Tabla 9.- Coeficientes de presión  $C_p$  para cubiertas en arco.

Para techos curvos, señala que el valor  $r$  se obtiene de la división de la flecha del arco entre el claro que se cubre, el resultado obtenido se sustituye en las operaciones especificadas en la tabla dependiendo de la zona del arco a la que esté sometida la presión y que varía si nuestra cubierta se encuentra en una estructura elevada o apoyada en el terreno. Al ser una estructura que se desplanta desde el terreno con una flecha de 8.00 m dividido entre el claro que son 15.00 m nos da como resultado 0.5333. Sustituyendo en cada una de las operaciones que corresponde a cada zona obtenemos los siguientes coeficientes de presión:

<sup>57</sup> *Ibid.*

**A: 0.7573**

**B: -1.2333**

**C: -0.5000**

Sustituyendo en nuestra formula los valores de velocidad de diseño y coeficientes de presión ejercidos las zonas A, B y C de un arco, tenemos los siguientes resultados:

Nuestra formula:

$$pz = 0.048 CpVD^2$$

Sustituyendo:

**A:**  $pz = 0.048 * (0.7573)(45.2667)^2$

**B:**  $pz = 0.048 * (-1.2333)(45.2667)^2$

**C:**  $pz = 0.048 * (-0.5000)(45.2667)^2$

Obtenemos las presiones de diseño (**pz**) de un arco apoyado desde el terreno:

**A:** 74.4878 kg/m<sup>2</sup> (presiones).

**B:** -121.3050 kg/m<sup>2</sup> (succiones).

**C:** -49.1777 kg/m<sup>2</sup> (succiones).

Este procedimiento se llevó a cabo para ambos arcos. Obtenidas las presiones de diseño y ubicadas en las zonas correspondientes en el arco, procedimos a realizar funiculares de fuerzas para determinar los momentos en la cubierta en base a las acciones por viento

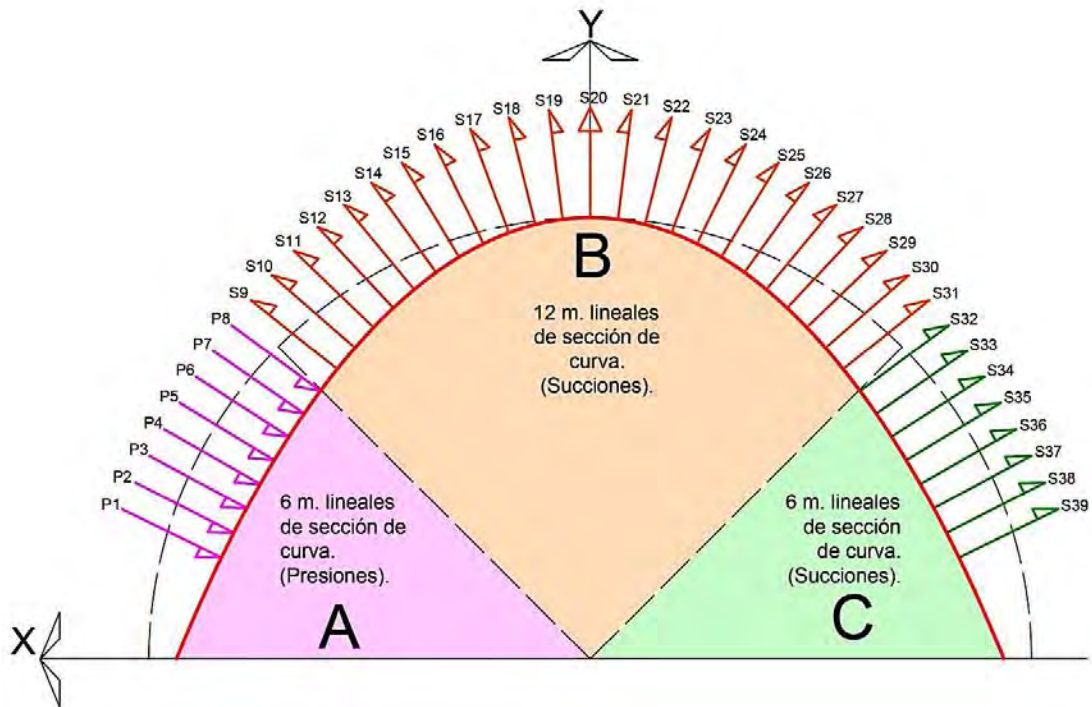


Figura 46.- Presiones ejercidas en un arco. En base a la distribución de presiones y succiones marcada en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento para techos curvos, establecemos la zonificación en nuestra cubierta de las fuerzas actuantes. Por su proximidad en sus dimensiones (*claro y flecha*) a un arco de media circunferencia (*línea punteada*), se planteó la distribución de las presiones y succiones, determinando también los metros lineales que corresponden a cada una de las zonificaciones. Dibujo del autor.

### III.4.4.-Funicular de fuerzas por viento.

En la sección correspondiente a los funiculares (ver III.2.3.-Funicular de fuerzas.) vimos que los funiculares de fuerzas son método gráfico de cómo un sistema de fuerzas actúan sobre un elemento (sea un arco, un cable o una viga) y la forma que tomará en base a las acciones mismas y las condiciones de apoyo de la propia estructura. En un inicio, se elaboraron funiculares de fuerzas con base a cargas gravitacionales, es decir, por el propio peso de la cubierta sin intervención o actuación de otras fuerzas, por lo que el resultado que obtuvimos fue que nuestra cubierta es estable y presenta mínimos esfuerzos. Ahora procederemos a realizar nuevamente este sistema de estática gráfica pero en base a las fuerzas por viento que jugaran un papel muy importante en el trabajo estructural de la cubierta.



### III.4.4.a-Descomposición de las fuerzas.

Al saber la magnitud de las fuerzas ejercidas en nuestra estructura, procedemos a descomponerlo en fuerzas verticales y horizontales, con la finalidad de poder determinar el sentido que toma cada una de los vectores en los que se divide la resultante.

1.- Empezamos ubicando cada una de las fuerzas en los puntos donde estarán ubicados las alfajillas horizontales (Ver II.3.2.c- Longitud de la curva.). La zona **A** corresponde a las presiones mientras en las zonas **B** y **C** se presentarán las succiones.

2.- Si trazamos una línea recta horizontal sobre cada uno de los puntos de ubicación de nuestras alfajillas, podemos medir el ángulo de inclinación de cada una de las fuerzas o presiones de diseño.

3.- Una vez determinado el ángulo de inclinación, establecemos el sentido que toman las fuerzas verticales y horizontales, identificando con signo negativo si estas van de derecha a izquierda y de arriba hacia abajo y con signo positivo si el sentido de las fuerzas van de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba.

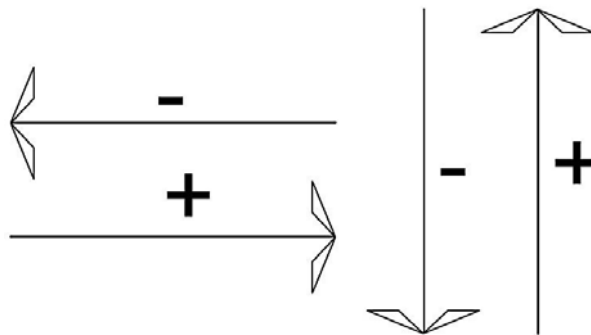


Figura 47.- Sentido que toman las fuerzas con su correspondiente signo. Dibujo del autor.

Después planteamos las siguientes fórmulas para saber la magnitud de la fuerza horizontal y fuerza vertical de las presiones y succiones.

Para las presiones  $P_0$  a la  $P_8$ , se aplican las siguientes formulas:

$$F_H = F \cdot \cos(\Phi)$$

$$F_V = F \cdot \sin(\Phi)$$

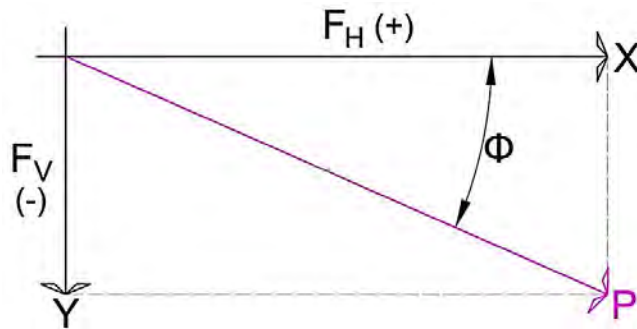


Figura 48.- Descomposición de las presiones en fuerza vertical y horizontal. Vemos en este esquema el sentido que toma cada fuerza con su correspondiente signo. La cota indica el ángulo de inclinación de la fuerza con respecto a una línea horizontal que toca a un punto de la curva elíptica. Dibujo del autor.

Para las succiones que van de la  $S_9$  a la  $S_{20}$ , se utilizaron las siguientes formulas:

$$F_H = - (F * \cos (\Phi))$$

$$F_V = - (F * \sin (\Phi))$$

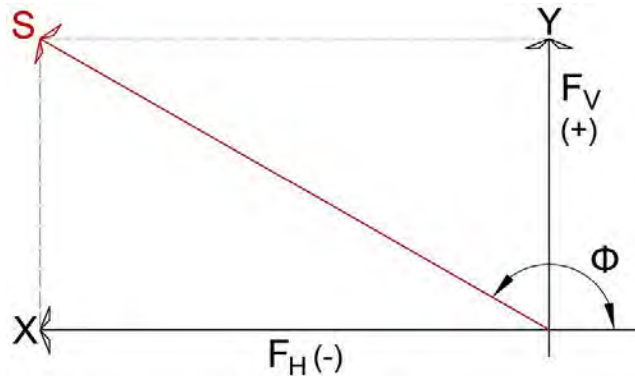


Figura 49.- Descomposición de las succiones en fuerza vertical y horizontal. Dibujo del autor.

Para las succiones que van de la  $S_{21}$  a la  $S_{39}$ , se aplicaron las siguientes formulas:

$$F_H = - (F * \cos (\Phi))$$

$$F_V = - (F * \sin (\Phi))$$

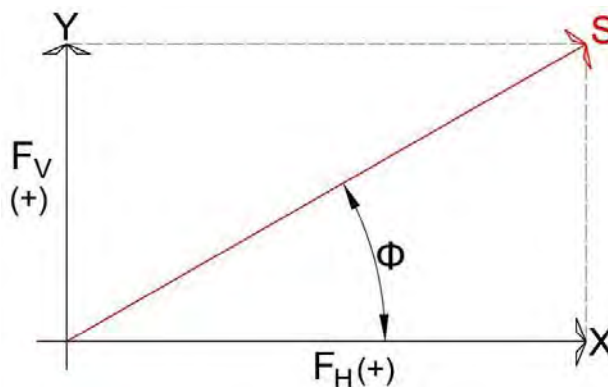


Figura 50.- Descomposición de las succiones en fuerza vertical y horizontal. Dibujo del autor.

Otra forma para saber la magnitud de las fuerzas, es el descomponer la resultante por medio del método gráfico. Ambos métodos nos llevan al mismo resultado, por lo que realizar el método gráfico y analítico, la información obtenida se respalda mutuamente. A continuación, se agrega la tabla con las fuerzas horizontales y verticales de ambos arcos.

Elipse 1.		8 x 15 m.		Elipse 2.		8 x 15.76 m.			
Acción del viento	Sentido	Fuerza Vertical	Sentido	Fuerza Horizontal	Acción del viento	Sentido	Fuerza Vertical	Sentido	Fuerza Horizontal
Presión 75 kg/m <sup>2</sup>					Presión 71 kg/m <sup>2</sup>				
P <sub>0</sub>	↓	-28.0997	→	69.5371	P <sub>0</sub>	↓	-27.7465	→	65.3539
P <sub>1</sub>	↓	-32.8172	→	67.4391	P <sub>1</sub>	↓	-32.3972	→	63.1777
P <sub>2</sub>	↓	-34.1782	→	66.7597	P <sub>2</sub>	↓	-33.9406	→	62.3621
P <sub>3</sub>	↓	-35.6281	→	65.9973	P <sub>3</sub>	↓	-35.1508	→	61.6881
P <sub>4</sub>	↓	-37.1769	→	65.1374	P <sub>4</sub>	↓	-36.6618	→	60.8022
P <sub>5</sub>	↓	-38.8360	→	64.1620	P <sub>5</sub>	↓	-38.2749	→	59.7999
P <sub>6</sub>	↓	-40.6179	→	63.0491	P <sub>6</sub>	↓	-40.0006	→	58.6596
P <sub>7</sub>	↓	-42.5366	→	61.7708	P <sub>7</sub>	↓	-41.8501	→	57.3548
P <sub>8</sub>	↓	-44.6070	→	60.2928	P <sub>8</sub>	↓	-43.8349	→	55.8525
Succión -121 kg/m <sup>2</sup>					Succión -119 kg/m <sup>2</sup>				
S <sub>9</sub>	↑	75.5756	←	-94.4951	S <sub>9</sub>	↑	77.0416	←	-90.6950
S <sub>10</sub>	↑	79.4789	←	-91.2365	S <sub>10</sub>	↑	80.8742	←	-87.2947
S <sub>11</sub>	↑	83.6947	←	-87.3853	S <sub>11</sub>	↑	84.9763	←	-83.3068
S <sub>12</sub>	↑	88.2328	←	-82.8008	S <sub>12</sub>	↑	89.3430	←	-78.6056
S <sub>13</sub>	↑	93.0780	←	-77.3141	S <sub>13</sub>	↑	93.9471	←	-73.0407
S <sub>14</sub>	↑	98.1809	←	-70.7214	S <sub>14</sub>	↑	98.7224	←	-66.4445
S <sub>15</sub>	↑	103.4289	←	-62.7990	S <sub>15</sub>	↑	103.5489	←	-58.6398
S <sub>16</sub>	↑	108.6161	←	-53.3249	S <sub>16</sub>	↑	108.2281	←	-49.4741
S <sub>17</sub>	↑	113.4188	←	-42.1566	S <sub>17</sub>	↑	112.4753	←	-38.8626
S <sub>18</sub>	↑	117.3971	←	-29.3072	S <sub>18</sub>	↑	115.9274	←	-26.8669
S <sub>19</sub>	↑	120.0594	←	-15.0576	S <sub>19</sub>	↑	118.1772	←	-13.9698
S <sub>20</sub>	↑	121	0	0	S <sub>20</sub>	↑	119	0	0
S <sub>21</sub>	↑	-120.0594	→	15.0576	S <sub>21</sub>	↑	-118.1772	→	13.9698
S <sub>22</sub>	↑	-117.3971	→	29.3072	S <sub>22</sub>	↑	-115.9274	→	26.8669
S <sub>23</sub>	↑	-113.4188	→	42.1566	S <sub>23</sub>	↑	-112.4753	→	38.8626
S <sub>24</sub>	↑	-108.6161	→	53.3249	S <sub>24</sub>	↑	-108.2281	→	49.4741
S <sub>25</sub>	↑	-103.4289	→	62.7970	S <sub>25</sub>	↑	-103.5489	→	58.6398
S <sub>26</sub>	↑	-98.1809	→	70.7214	S <sub>26</sub>	↑	-98.7224	→	66.4445
S <sub>27</sub>	↑	-93.0780	→	77.3141	S <sub>27</sub>	↑	-93.9471	→	73.0407

S28	↑	-88.2328	→	82.8008	S28	↑	-89.3430	→	78.6056
S29	↑	-83.6947	→	87.3853	S29	↑	-84.9763	→	83.3068
S30	↑	-79.4789	→	91.2365	S30	↑	-80.8742	→	87.2947
S31	↑	-75.5756	→	94.4951	S31	↑	-77.0416	→	90.6950
Succión -50 kg/m <sup>2</sup>				Succión -49 kg/m <sup>2</sup>					
S32	↑	29.7380	→	40.1952	S32	↑	30.2522	→	38.5461
S33	↑	28.3577	→	41.1806	S33	↑	28.8824	→	39.5829
S34	↑	27.0786	→	42.0327	S34	↑	27.6060	→	40.4834
S35	↑	25.8907	→	42.7747	S35	↑	26.4151	→	41.2704
S36	↑	24.7846	→	43.4249	S36	↑	25.3018	→	41.9621
S37	↑	23.7520	→	43.9982	S37	↑	24.2590	→	42.5735
S38	↑	22.7854	→	44.5064	S38	↑	23.2800	→	43.1166
S39	↑	21.8781	→	44.9594	S39	↑	22.3586	→	43.6015
S40	↑	18.7331	→	46.3581	S40	↑	19.1494	→	45.1032

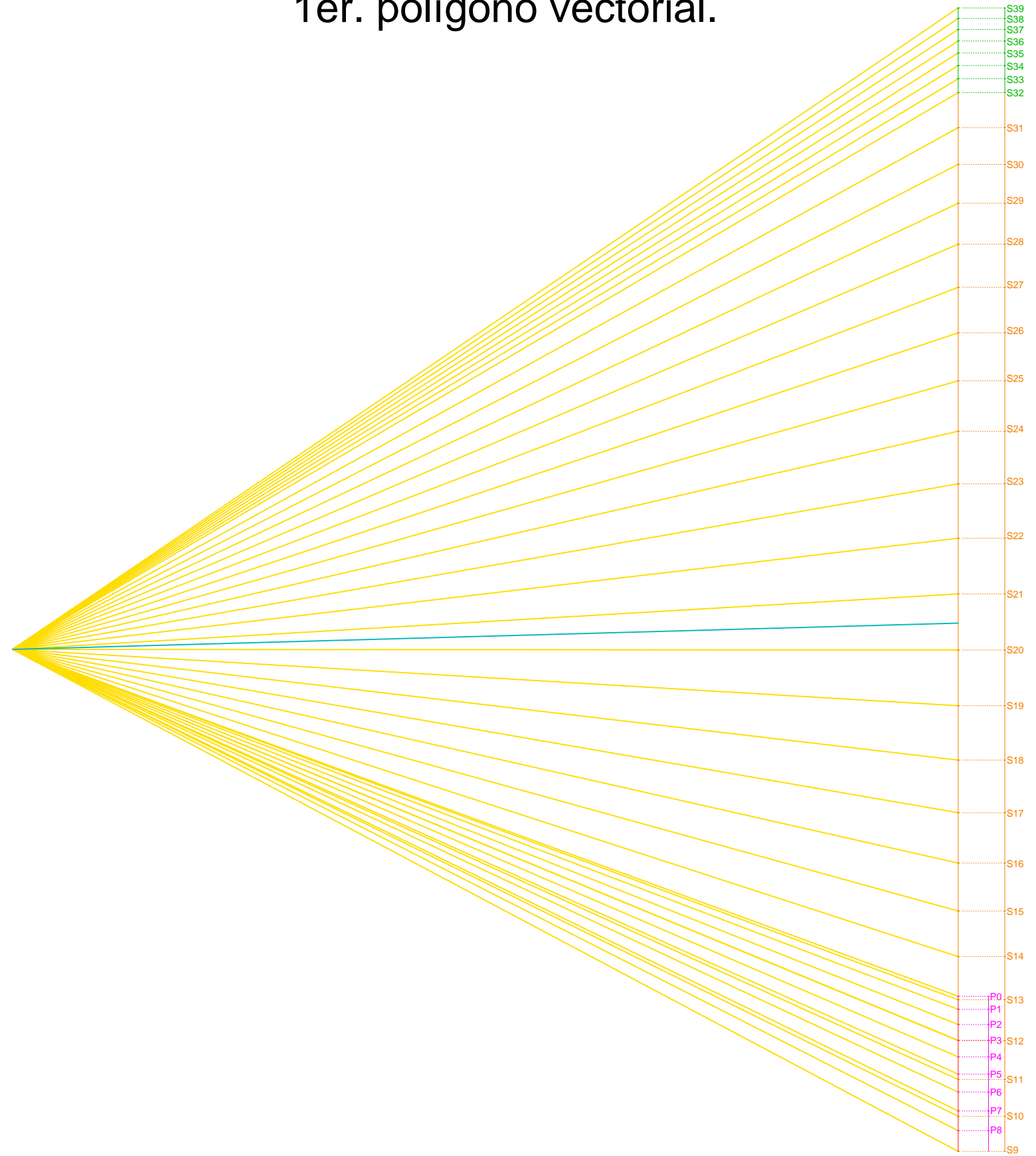
Tabla 10.- Tipo de acción y dirección del viento. La dirección que toma cada uno de los vectores que componen a la resultante obtenida por medio del cálculo y la magnitud de dichos vectores.

Obtenido las magnitudes de las fuerzas verticales y horizontales, procederemos a realizar sus respectivos funiculares de fuerzas.

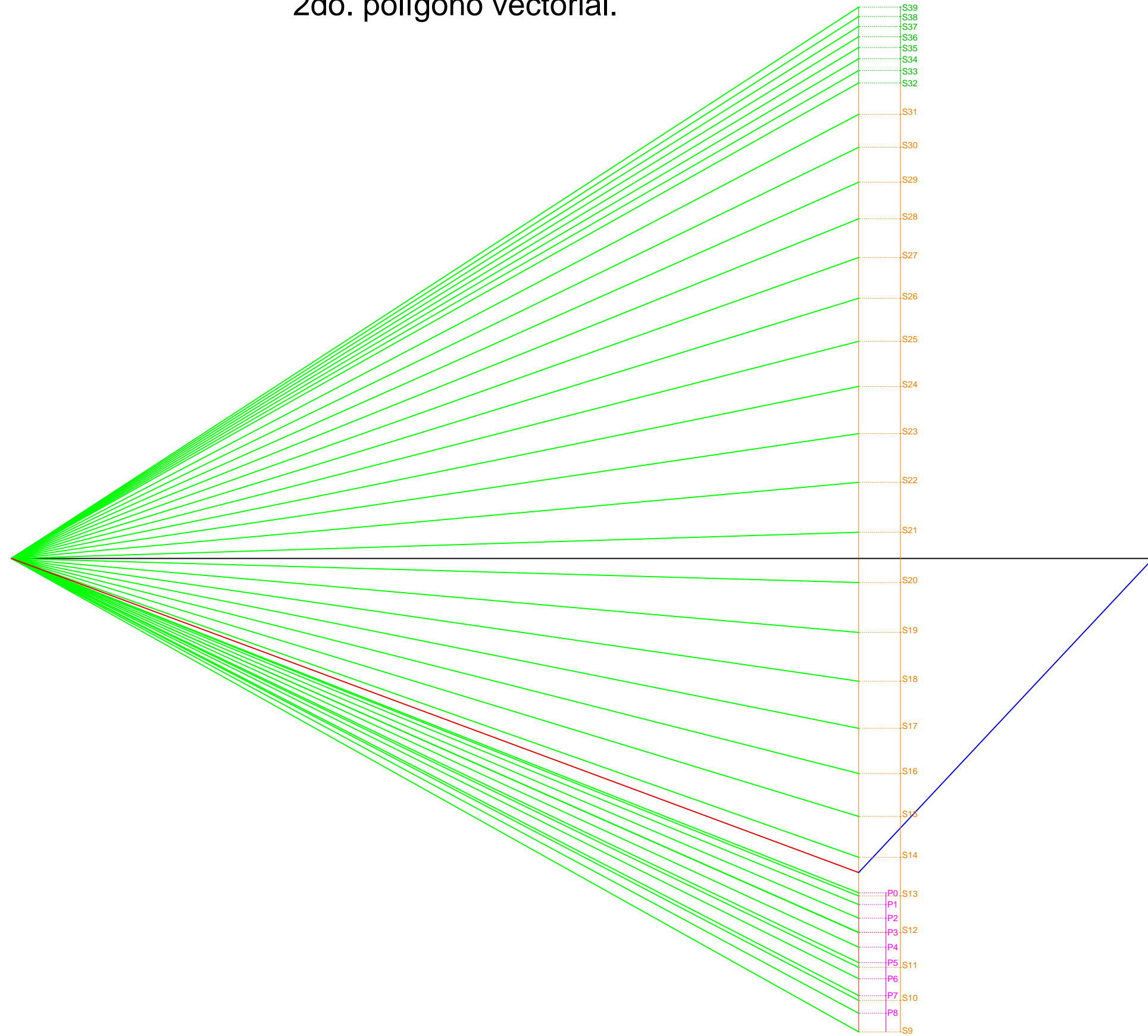
#### III.4.4.b-Funicular de fuerzas verticales.

Como ya se mencionó anteriormente (ver III.2.3.-Funicular de fuerzas.) este sistema nos permite, de manera gráfica, saber cómo un sistema de fuerzas actúa sobre un sistema estructural de cualquier tipo. En el mismo apartado se menciona el elaborar un polígono vectorial para representar las magnitudes de las fuerzas y sus componentes. Para las fuerzas verticales, procedemos a elaborar el polígono vectorial colocando cada una de las fuerzas en el sentido y dirección que les corresponde, es decir, las primeras fuerzas que corresponden a las presiones se colocaran una detrás de otra, de manera vertical y de arriba hacia abajo. Sin embargo, a partir de la fuerzas correspondiente a la succiones, se colocaran de forma consecutiva partiendo desde el punto donde termina la última fuerza de presión, teniendo en cuenta que el sentido de las succiones, van de abajo hacia arriba. Mencionado esto último, se procederá a resolver el funicular de fuerzas.

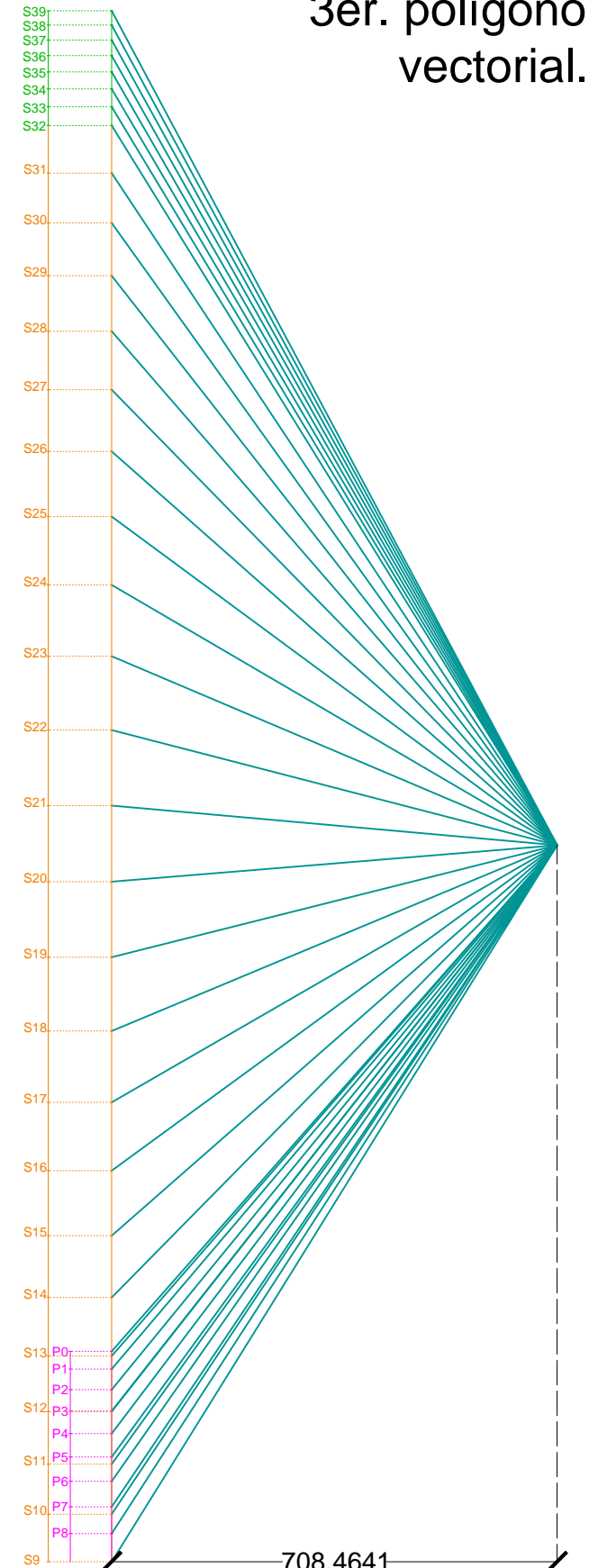
1er. polígono vectorial.



2do. polígono vectorial.

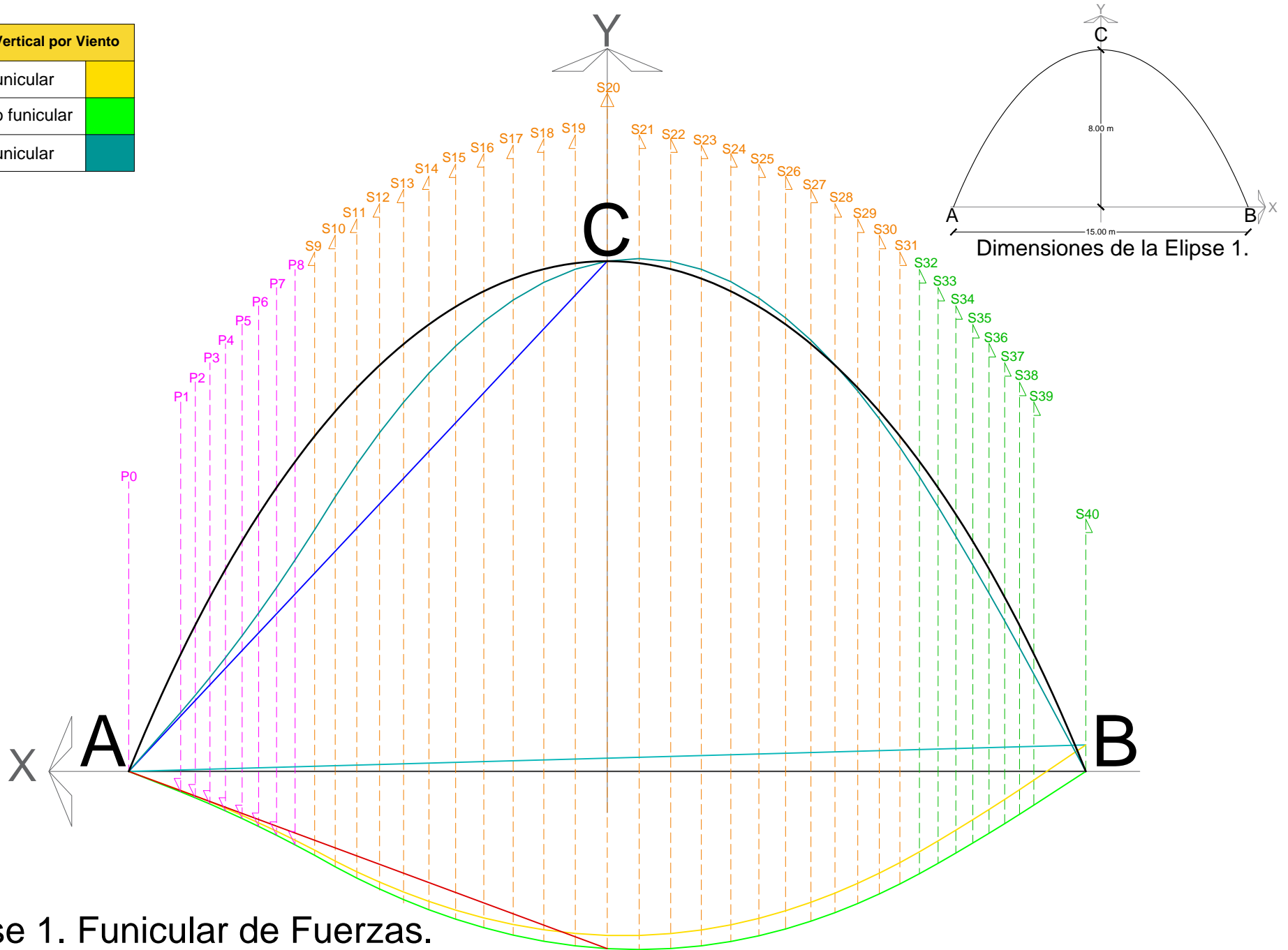


3er. polígono vectorial.



Elipse 1. Polígono vectorial. Análisis de Fuerzas Verticales por Viento

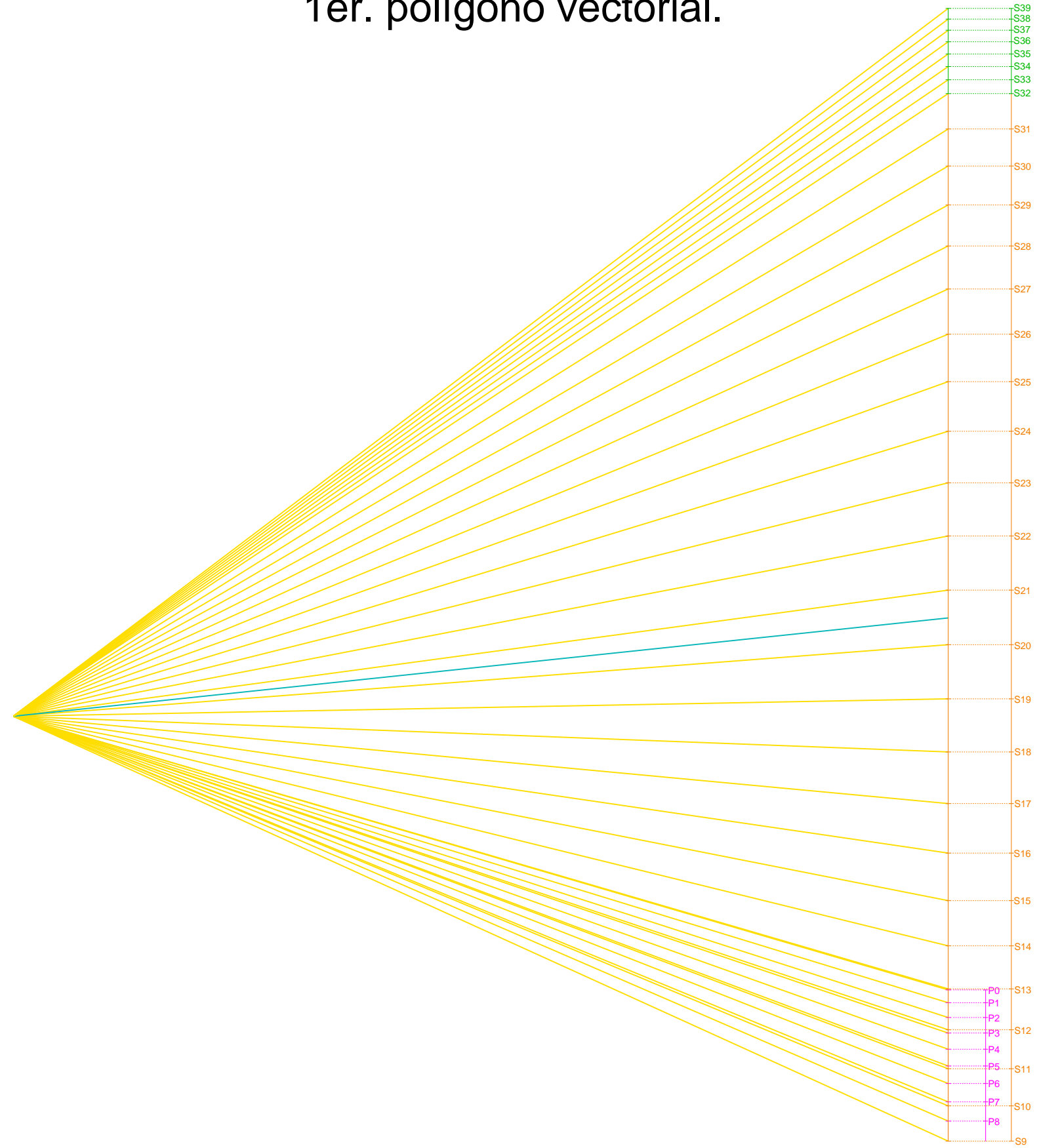
Fuerza Vertical por Viento	
Primer funicular	
Segundo funicular	
Tercer funicular	



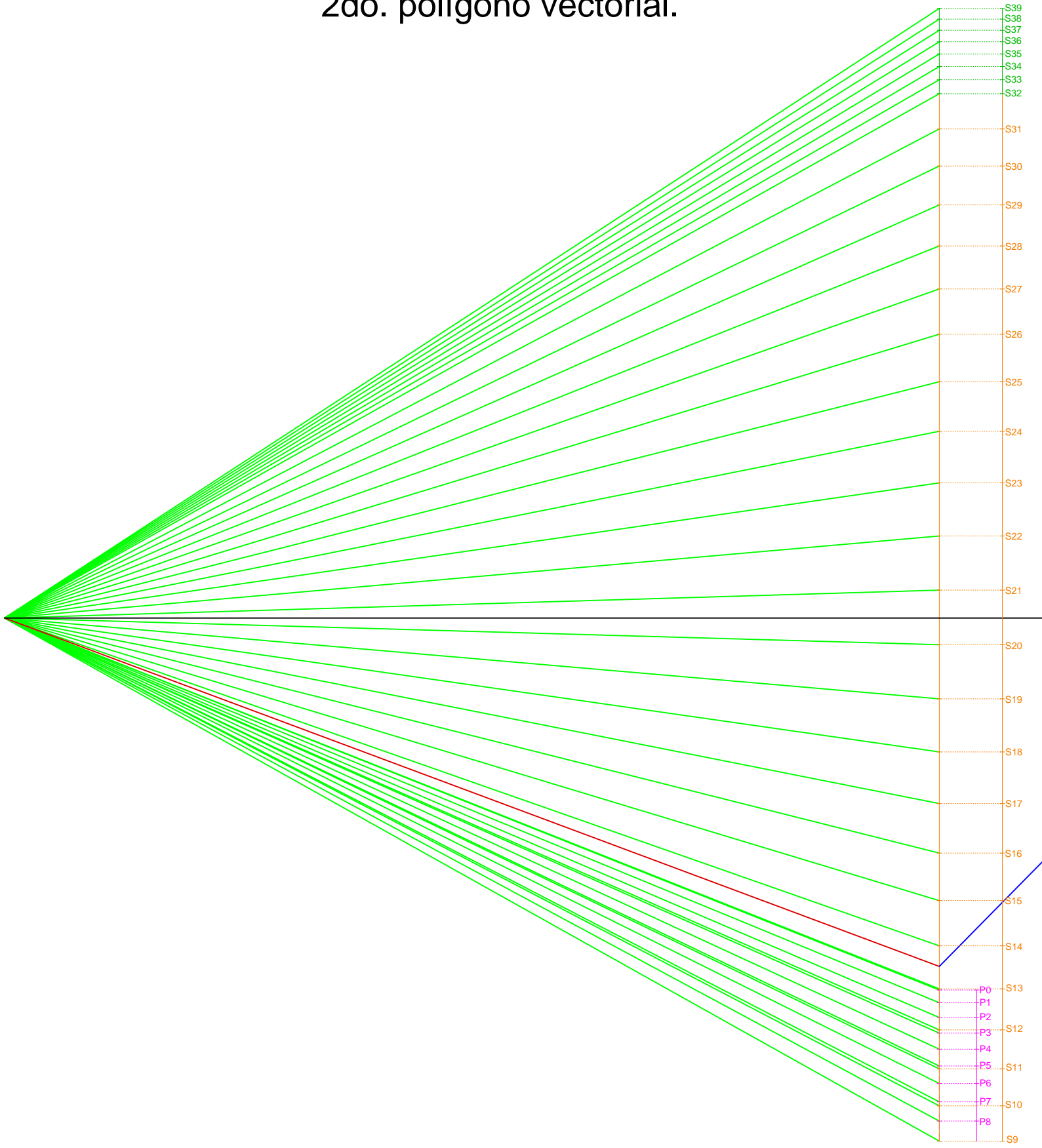
## Elipse 1. Funicular de Fuerzas.

Análisis de fuerzas verticales por viento presentes en el arco.

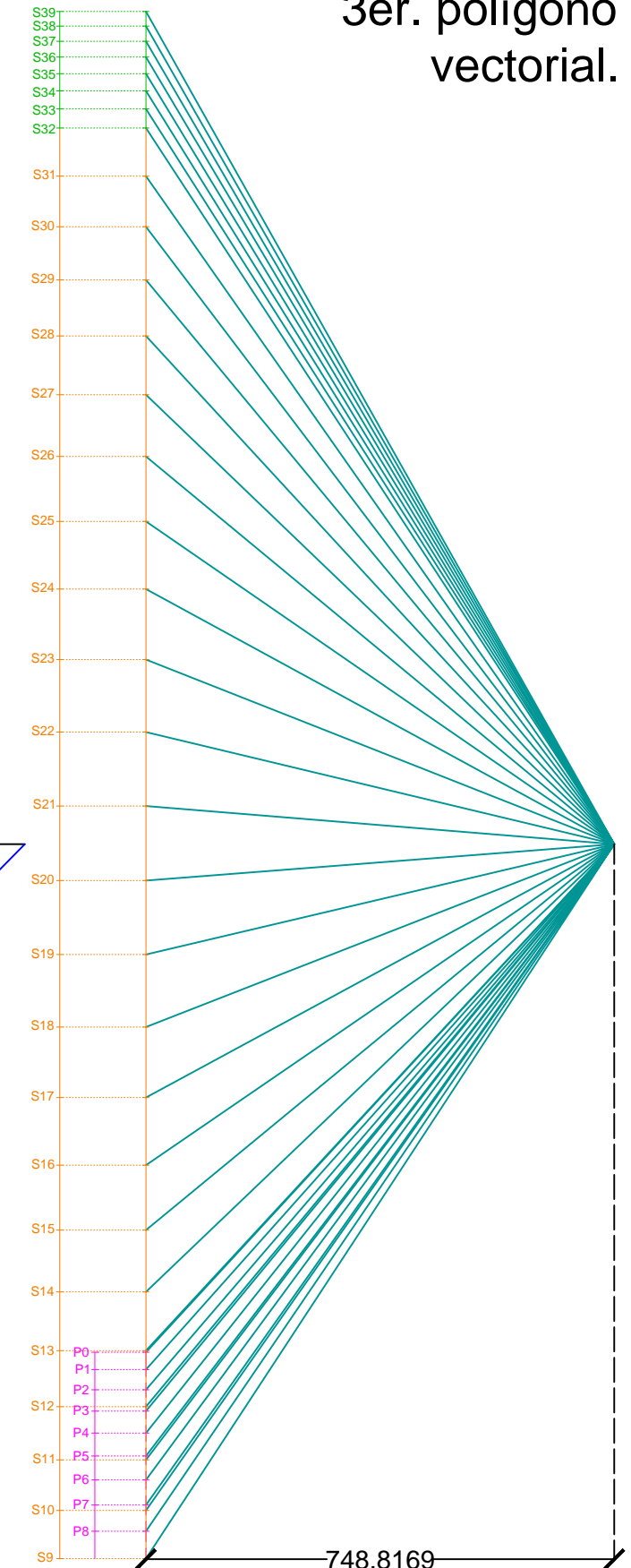
1er. polígono vectorial.



2do. polígono vectorial.

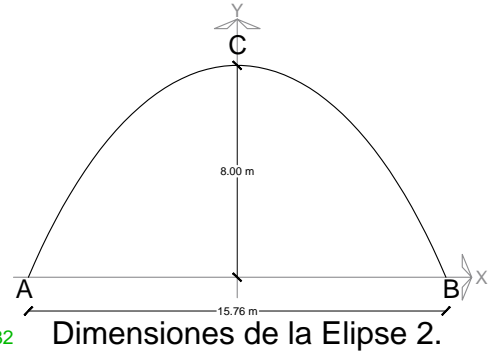
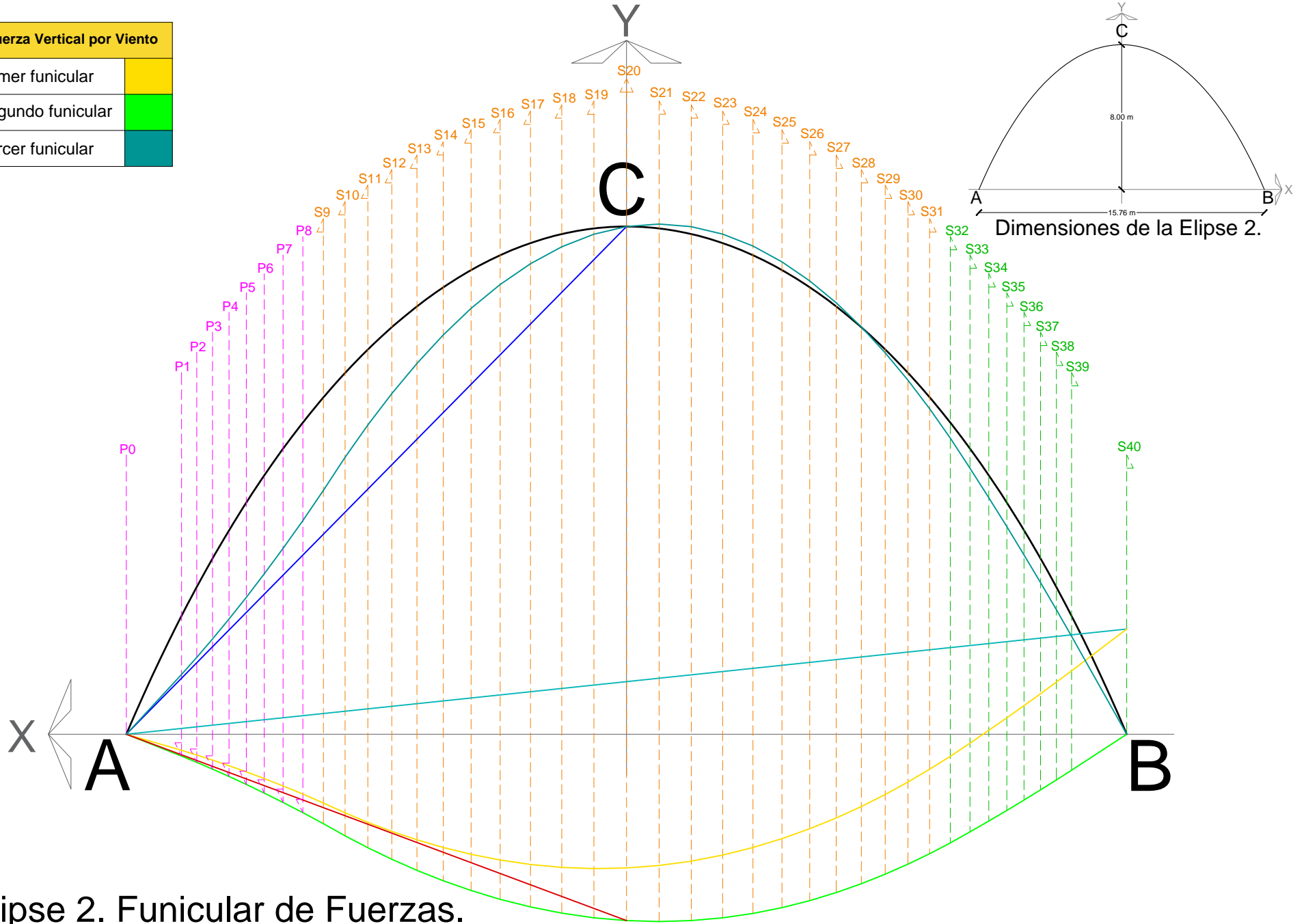


3er. polígono vectorial.



Elipse 2. Polígono vectorial. Análisis de Fuerzas Verticales por Viento

Fuerza Vertical por Viento	
Primer funicular	
Segundo funicular	
Tercer funicular	



## Elipse 2. Funicular de Fuerzas.

Análisis de fuerzas verticales por viento presentes en el arco.



### III.4.4.c-Funicular de fuerzas horizontales.

Para las fuerzas horizontales del viento, también se construirá el polígono vectorial de las presiones y succiones obtenidas de la descomposición de la resultante de las presiones de diseño ( $p_z$ ) de un arco apoyado desde el terreno. Sin embargo, para elaborar su respectivo funicular de fuerza, se procedió de la siguiente forma:

1.- Sea un arco elíptico cuya flecha es de 8 metros y claro de 15 metros (elipse 1) o de 15.76 metros (elipse 2). Con presiones y succiones a cada 0.50 metros de diferentes magnitudes conforme se distribuyen sobre el arco.

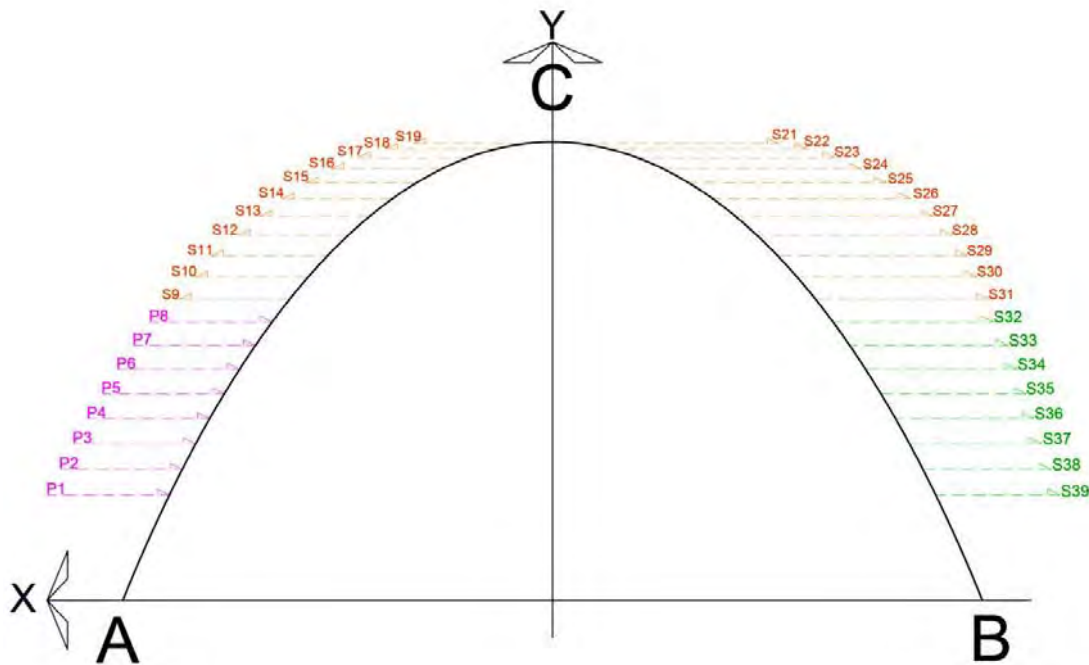


Figura 51.- Arco con presiones y succiones producto de las fuerzas horizontales por viento. Dibujo del autor.

2.- La magnitud de la resultante  $R_i$ , es igual a la suma de todas las presiones y succiones del lado izquierdo del arco (A-C). La posición de la resultante  $R_i$ , se obtiene al realizar un primer funicular, elaborando un polígono vectorial de las fuerzas que comprenden a esta sección del arco para establecer un polo cualquiera y trazar los rayos polares correspondientes.

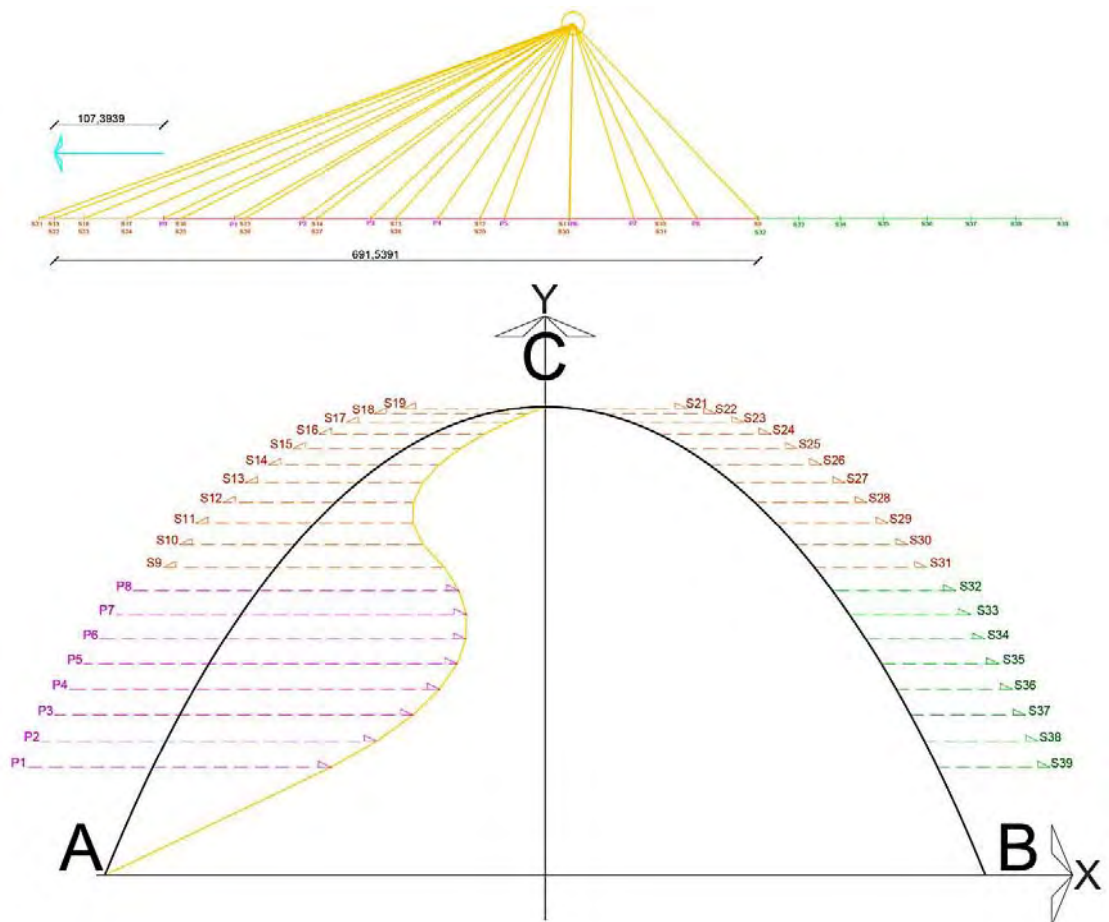


Figura 52.- Polígono vectorial y funicular de fuerzas. La dimensión de la resultante (en color cian), es el resultado de la diferencia de presiones y succiones presentes en lado izquierdo del arco. Dibujo del autor.

3.- Teniendo el primer funicular, prolongamos la línea de acción de la primera fuerza ( $P_1$ ) y última fuerza ( $S_{19}$ ). La intersección de ambas fuerzas, se considera como un punto dentro de la línea de acción de la resultante  $R_i$ .

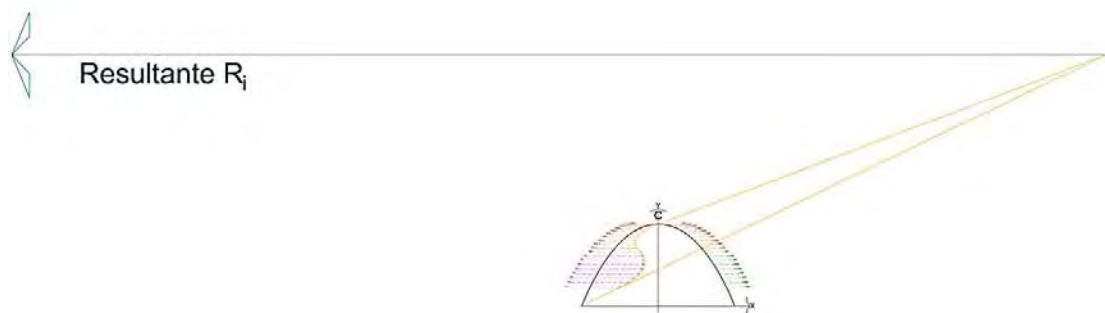


Figura 53.- Posición de la resultante  $R_i$ . Dibujo del autor.

4.- Trazamos una línea que parte del punto **B**, pase por el punto **C** y toque en un punto de la resultante **R<sub>i</sub>** que definiremos como punto **E**. A partir del punto **E** trazamos otra línea que se una con el punto **A** del arco.

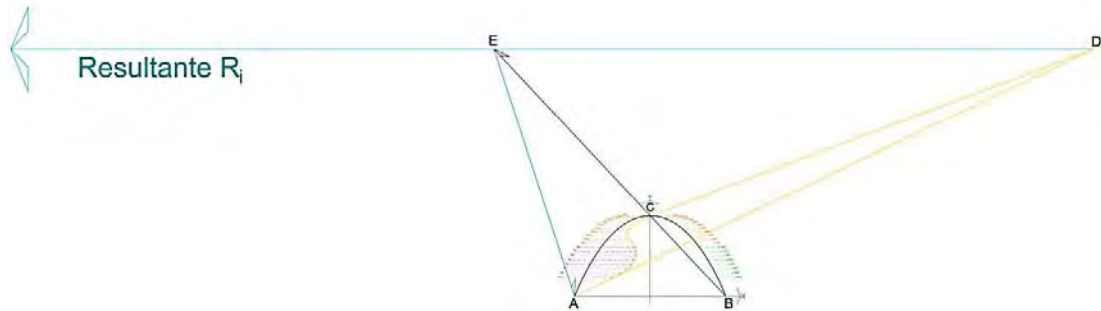


Figura 54.- Ubicación de los puntos E y D. Dibujo del autor.

5.- La magnitud de la resultante **R<sub>d</sub>**, es igual a la suma de todas las presiones y succiones del lado derecho del arco (C-B), por lo que procedemos de la misma forma como se hizo en el lado izquierdo del arco.

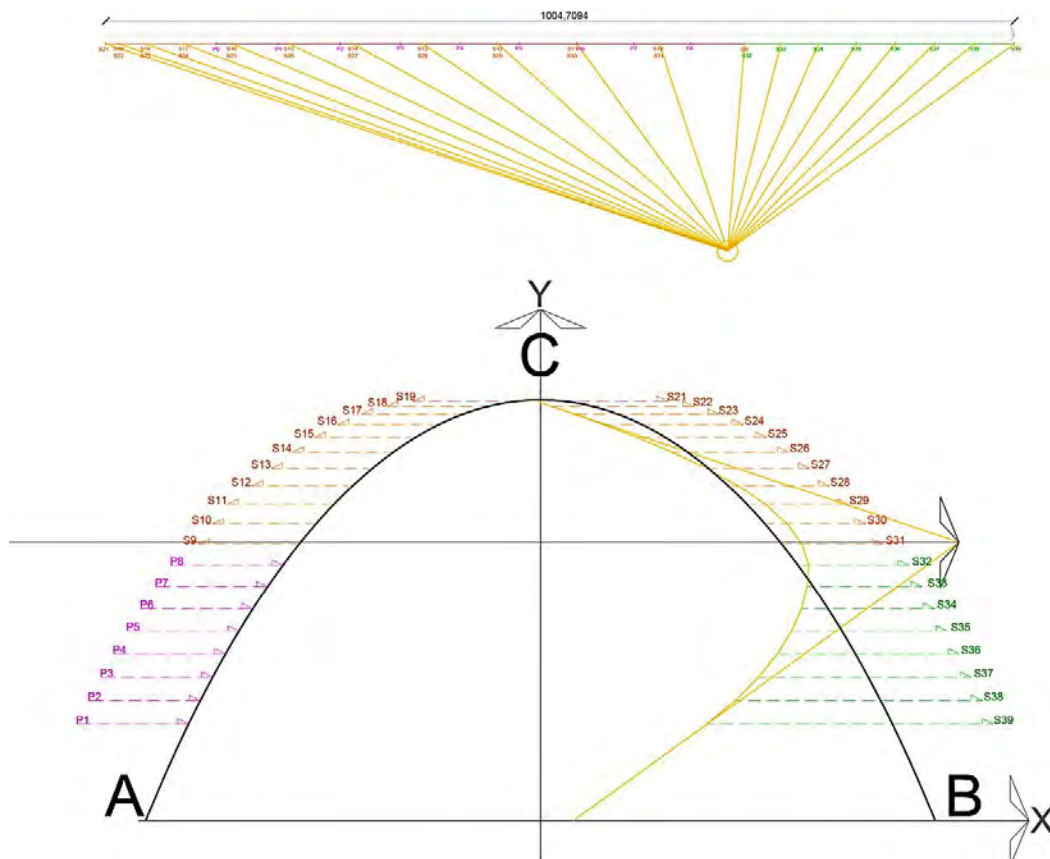


Figura 55.- Polígono vectorial y funicular de fuerzas. La dimensión de la resultante (en color gris), es la suma de todas las presiones que se efectúan en el lado derecho del arco. Dibujo del autor.

6.- Obtenido la posición de la resultante  $R_d$ , trazamos una línea que parta del punto  $A$ , pase por el punto  $C$  y toque en un punto de la resultante  $R_d$  que definiremos como punto  $F$ . A partir del punto  $F$  trazamos otra línea que se una con el punto  $B$  del arco.

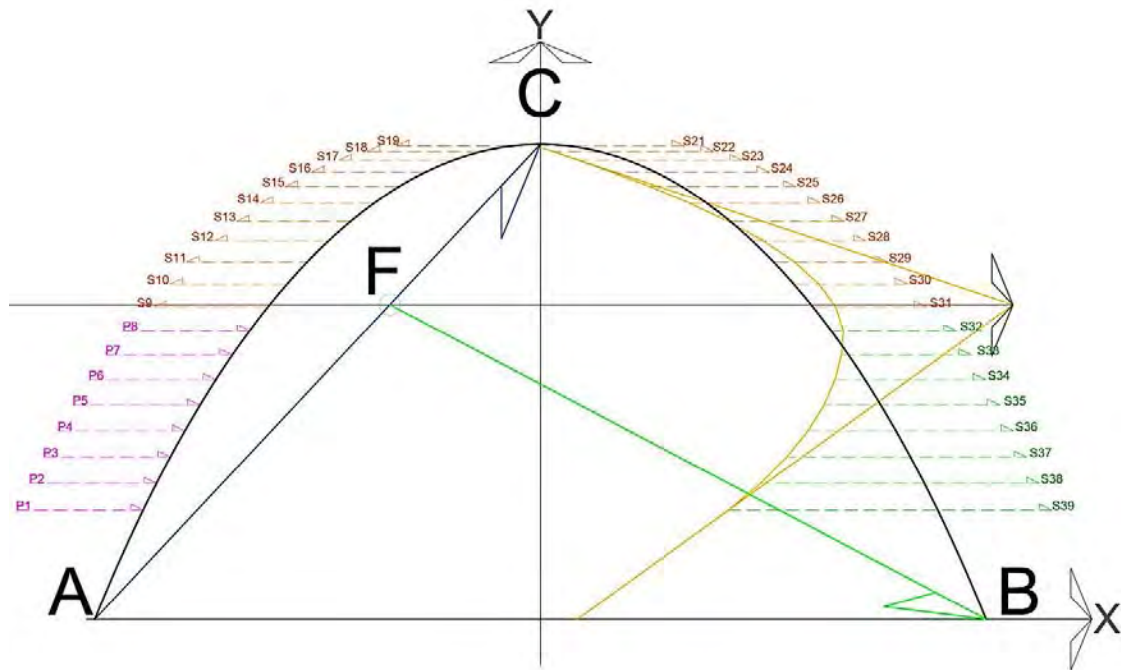


Figura 56.- Ubicación del punto F. Dibujo del autor.

7.- Descomponemos ambas resultantes. La resultante  $R_i$  en las direcciones E-A ( $R_{a_i}$ ) y C-E ( $R_{b_i}$ ). La Resultante  $R_d$  en las direcciones A-C ( $R_{a_d}$ ) y en F-B ( $R_{b_d}$ ).

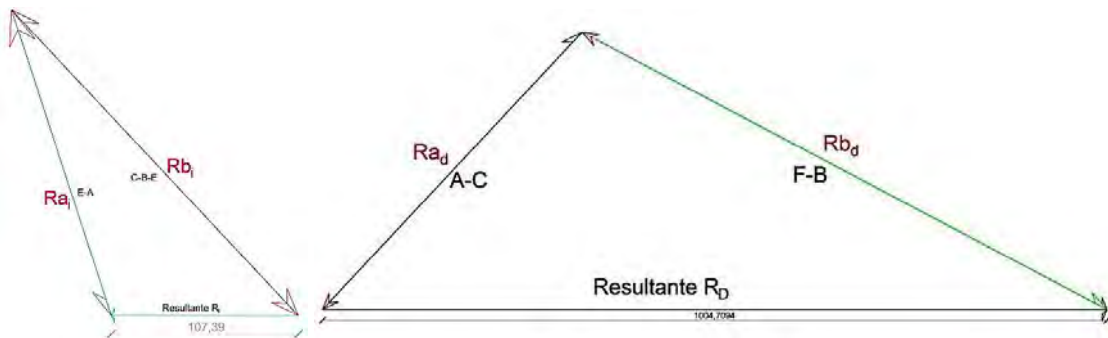


Figura 57.- La resultantes  $R_i$  y  $R_d$  con sus respectivas componentes. Dibujo del autor

8.- Las reacciones de las direcciones E-A, C-E, A-C y F-B son  $R_{a_i}$ ,  $R_{b_i}$ ,  $R_{a_d}$  y  $R_{b_d}$  respectivamente. Las reacciones siempre son de sentido contrario que las direcciones de los vectores en que se descompone la resultante. Agrupamos  $R_{a_i} - R_{a_d}$  en el punto  $A$  y  $R_{b_i} - R_{b_d}$  en el punto  $B$

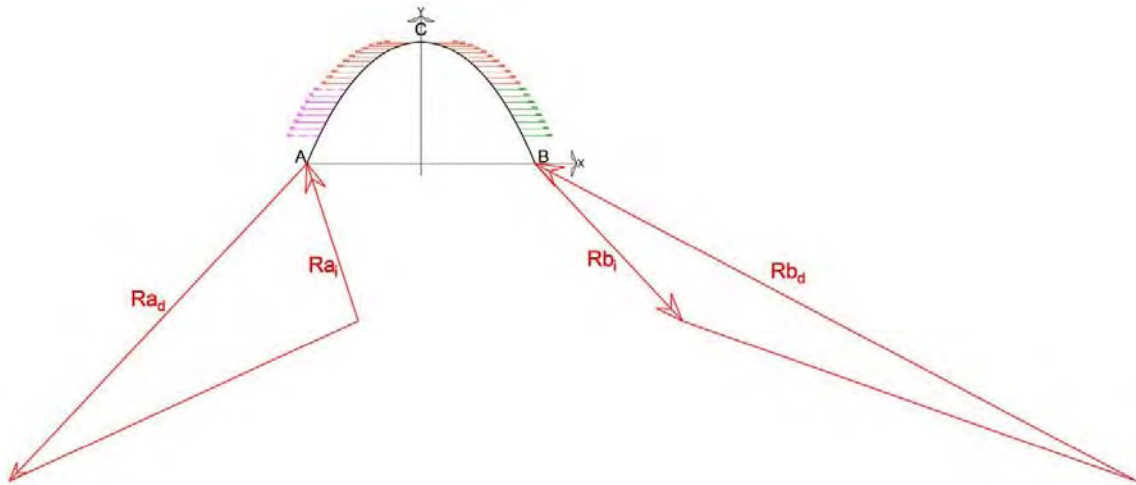


Figura 58.- Colocación de las resultantes  $R_{a_i}$ ,  $R_{b_i}$ ,  $R_{a_d}$  y  $R_{b_d}$  en los puntos A y B. Dibujo del autor.

9.- Colocado en su respectivo sitio las reacciones  $R_{a_i}$ ,  $R_{b_i}$ ,  $R_{a_d}$  y  $R_{b_d}$ , obtenemos la Reacción Total A y Reacción Total B. Al llevar una paralela hacia nuestro polígono vectorial de fuerzas horizontales de ambas reacciones en sus respectivos puntos, prolongaremos ambas reacciones hasta que se intersecten. El punto de dicha intersección, será la ubicación de nuestro polo para trazar los rayos polares y cerrar nuestro sistema funicular.

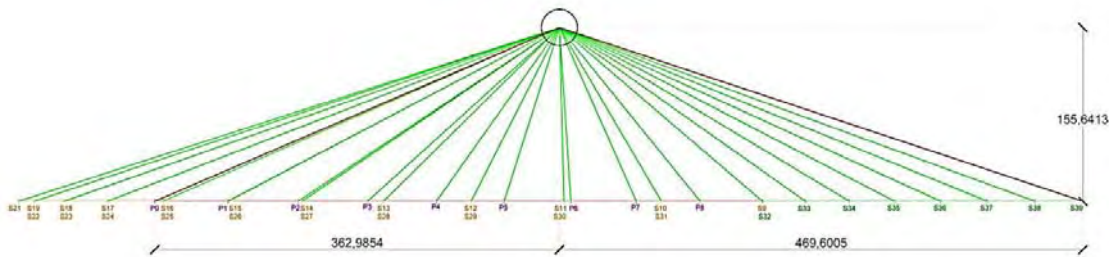
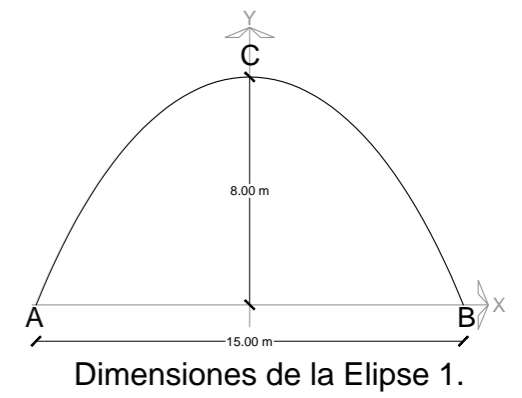
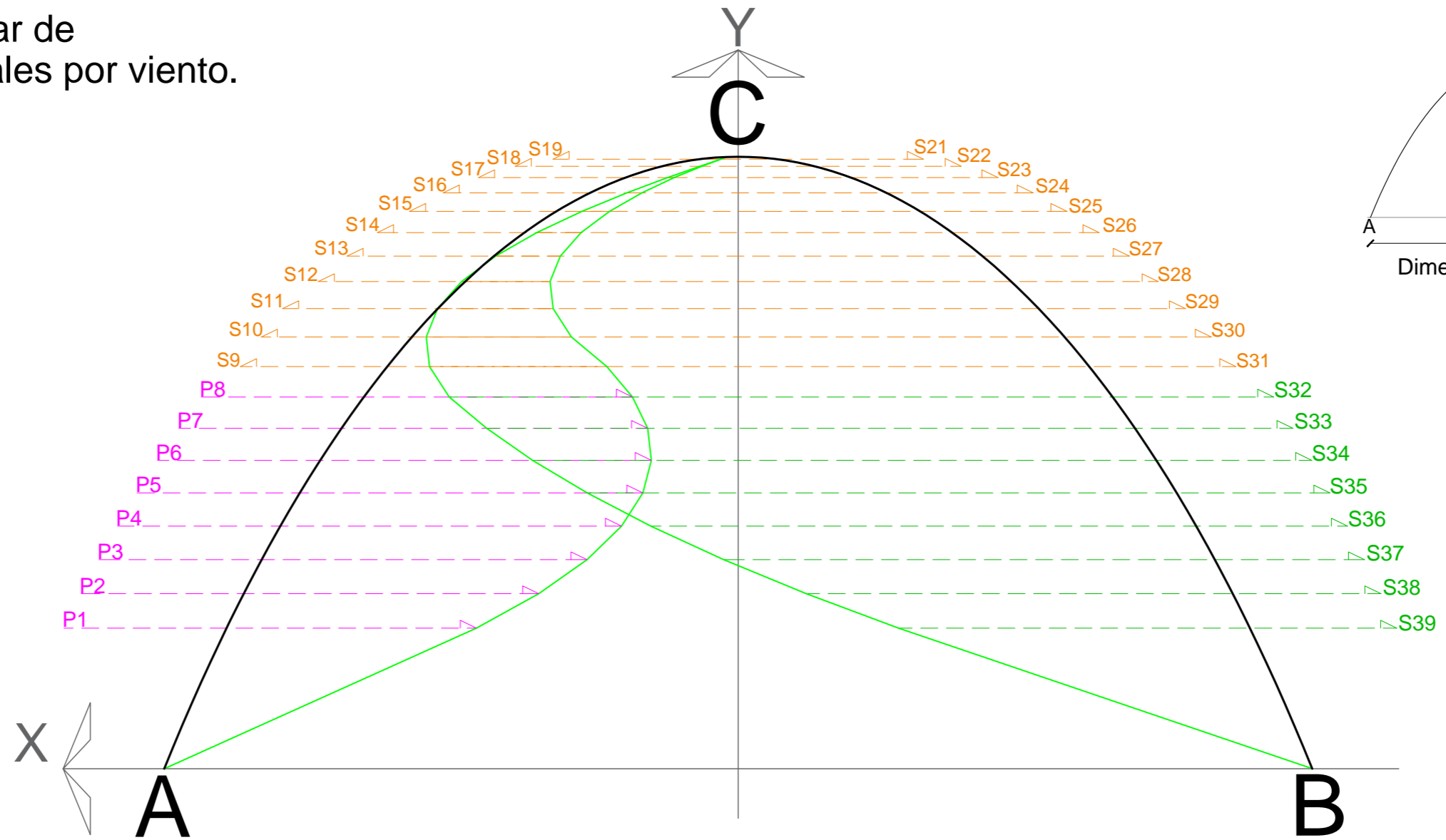
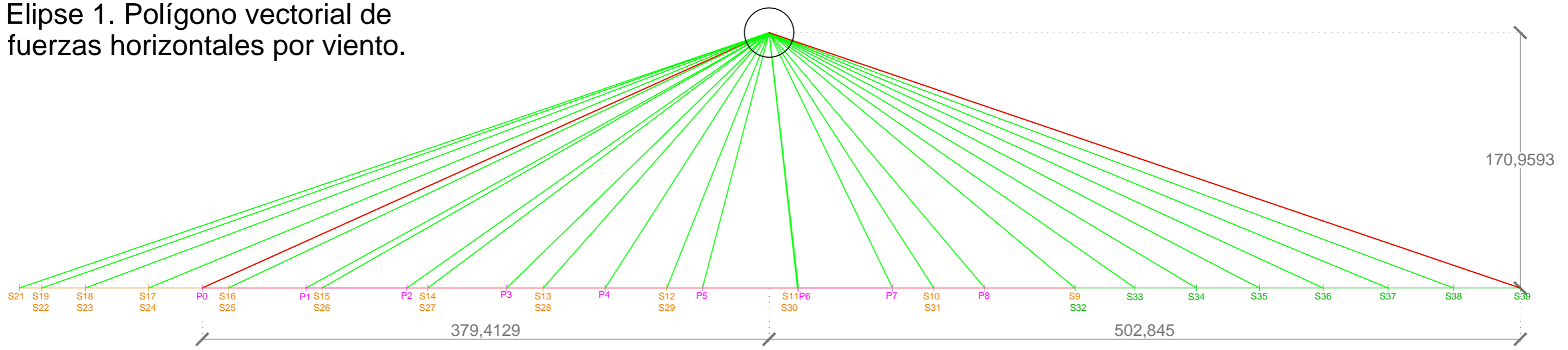


Figura 59.- Ubicación del polo mediante la intersección de la Reacción Total A y B. Dibujo del autor.

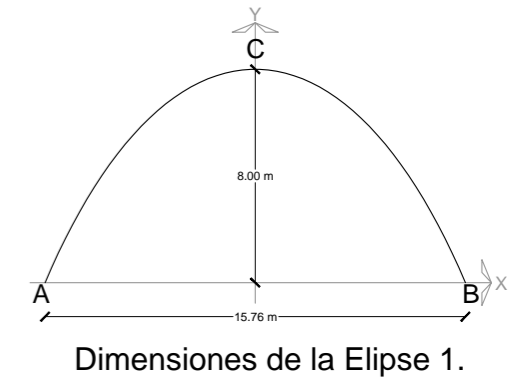
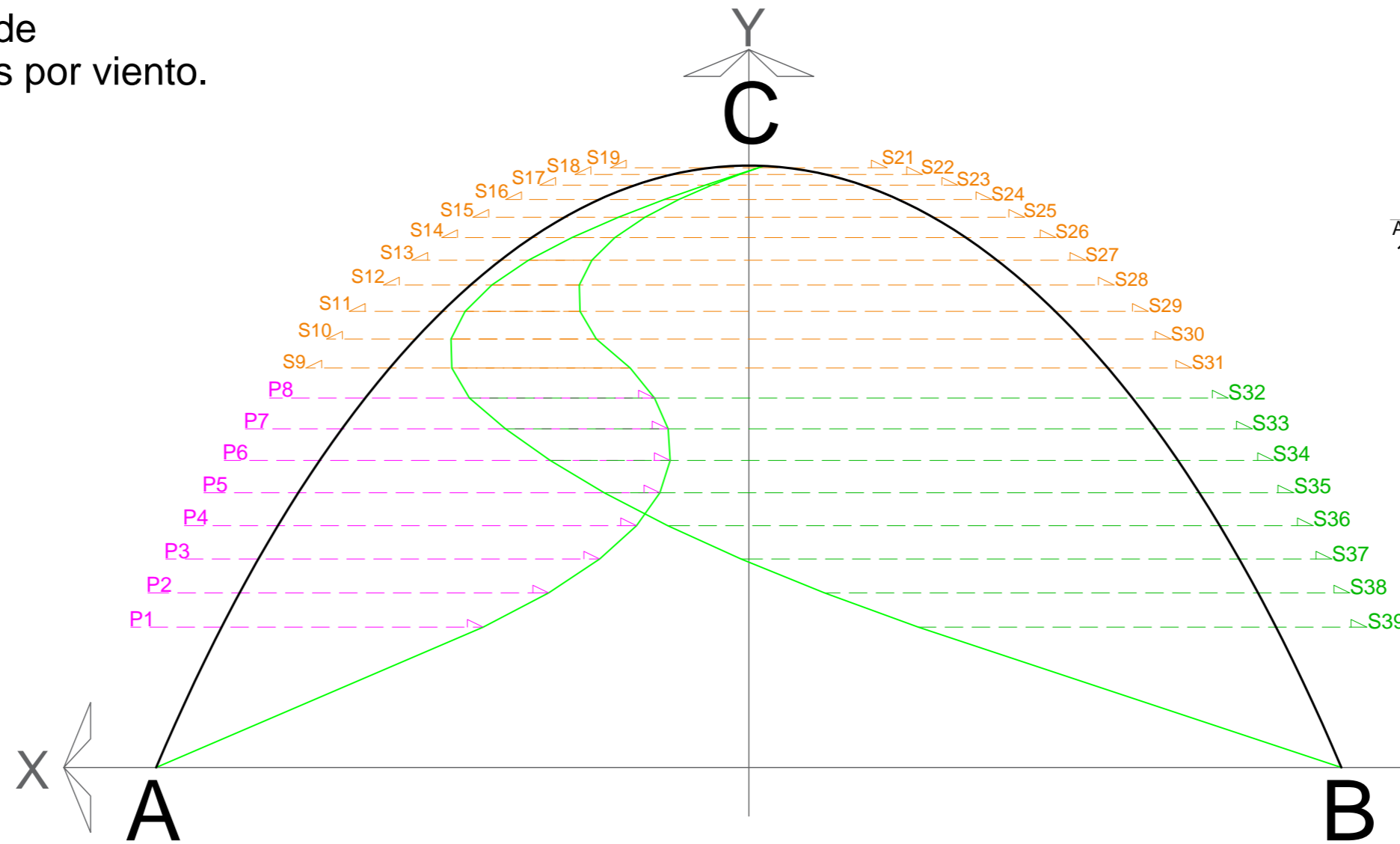
Elipse 1. Funicular de fuerzas horizontales por viento.



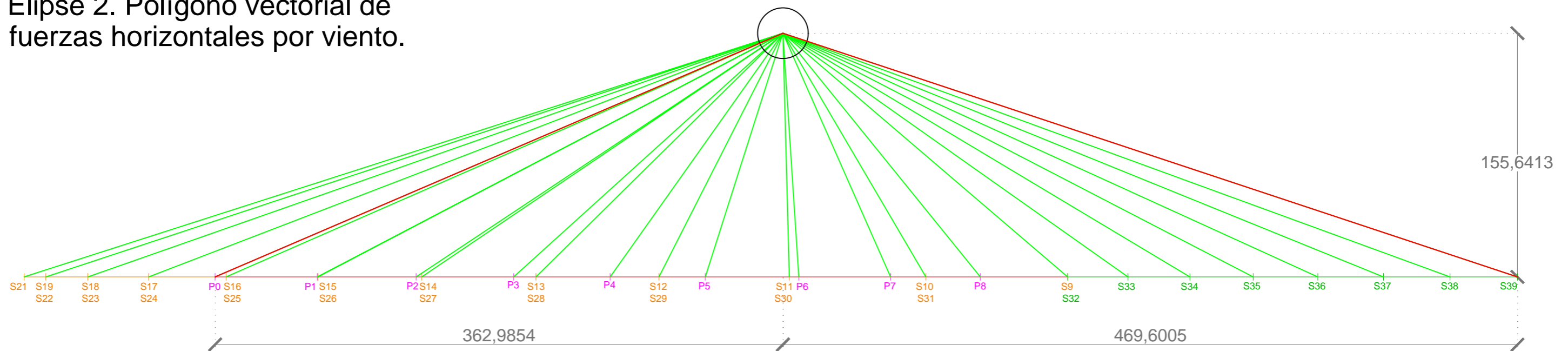
Elipse 1. Polígono vectorial de fuerzas horizontales por viento.



Elipse 2. Funicular de fuerzas horizontales por viento.



Elipse 2. Polígono vectorial de fuerzas horizontales por viento.



### III.4.5.-Determinación del momento máximo.

Concluidos los funiculares de fuerzas horizontales y verticales por viento, se procede a determinar la magnitud del momento máximo que producirá el giro en nuestra estructura. Para obtener este dato de manera sencilla, utilizaremos el método gráfico. (Ver III.3.2.-Momentos del arco.III.3.2.a- Método gráfico.).

En base al tercer y último funicular que pasa por los puntos A, B y C, existe una separación entre los elementos (arco y funicular) del cual se mide la distancia que existe entre cada fuerza de presión o succión que actúa en nuestra estructura con respecto al funicular que cierra nuestro sistema el cual identificaremos con la letra **h**. Realizado el registro de estas distancias, volvemos al polígono de fuerzas donde se toma nota del intervalo que hay entre el foco y el polígono de fuerzas para conseguir el valor (**H**) que representa al empuje o componente horizontal. Para terminar, se multiplican cada una de las diferencias de distancias de los puntos de presión o succión por el componente horizontal (**H**).

Hasta este punto, se procedió de la misma forma que se llevó a cabo para saber el momento máximo cuando están presentes solo las fuerzas gravitacionales, sin embargo, al tratarse de la descomposición de la resultante de las presiones de diseño por viento previamente calculadas, el sentido y dirección de los vectores hace que se consideren criterios diferentes para asignar a los momentos los signos positivos (+) y negativos (-) en base a la forma del tercer funicular con respecto al arco.

Cuando se trata de fuerzas por gravedad ( $F_G$ ), el sentido y dirección que adquieren cada magnitud es de arriba hacia abajo. No presenta variación en el comportamiento de las fuerzas sobre la estructura, debido a que representa su propio peso, por consiguiente, el valor que adquieren los momentos en base al funicular de fuerzas que cierra nuestro sistema es el siguiente; positivo en el extradós del arco y negativo en el intradós del arco.



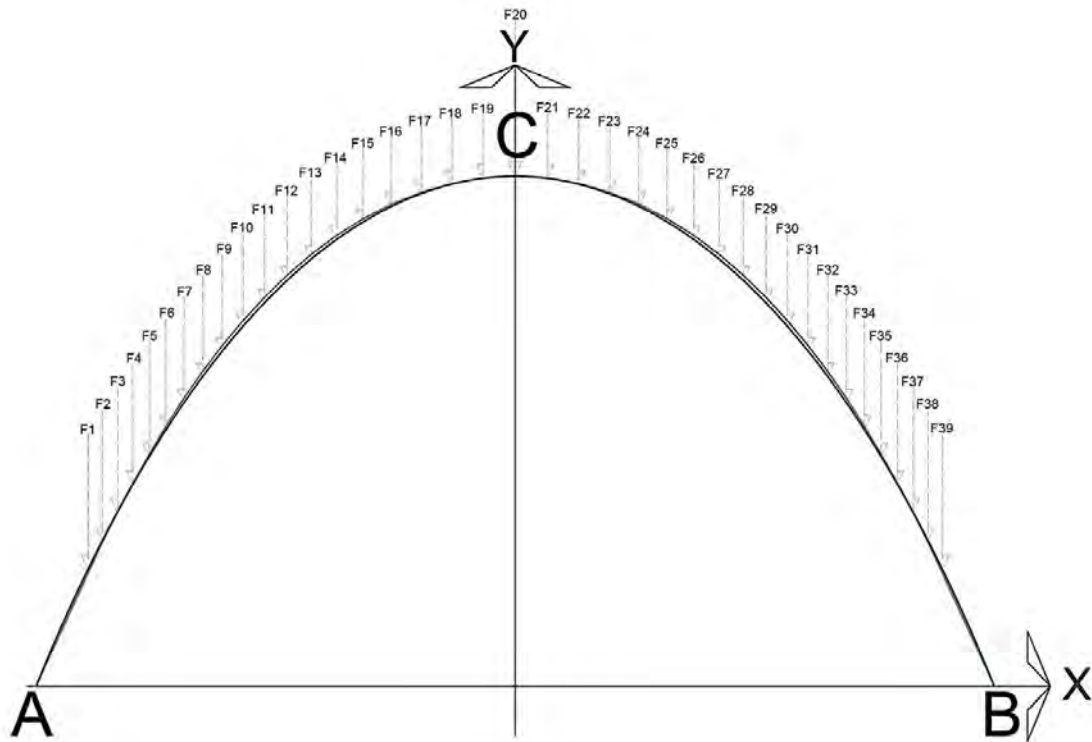


Figura 60.- Tercer funicular de fuerzas gravitacionales. Dibujo del autor.

El las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento menciona que en una cubierta estarán presentes dos tipos de acciones; presiones y succiones. Al descomponer la resultante del viento (las presiones de diseño) en vectores ortogonales, las presiones y succiones tomaran los siguientes signos:

Para el caso de fuerzas verticales por viento ( $F_V$ ), la presiones van de arriba hacia abajo mientras las succiones van en sentido contrario (de abajo hacia arriba). Vemos en nuestro funicular que la mayoría de las fuerzas que ejercen una acción sobre el arco, corresponden a las fuerzas de succión, lo que se traduce a que en nuestros arcos, presentaran una tendencia a elevarse del suelo. Sin embargo, ante el gran número de succiones sobre el arco, el funicular se mantiene por debajo del mismo y solo en algunos puntos se eleva a una menor distancia sobre la elipse, por lo que se considera a los momentos con signo positivo en el intradós del arco y negativos en el extradós del sistema estructural.

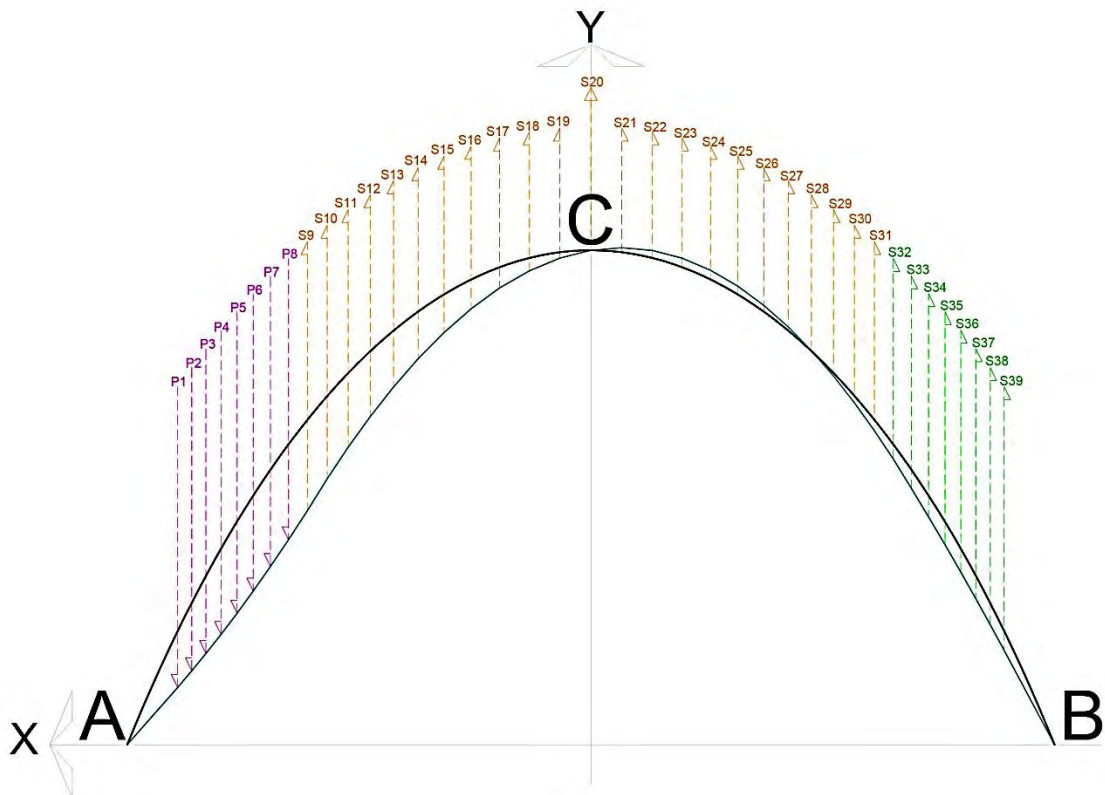


Figura 61.- Tercer funicular de fuerzas verticales por viento. Dibujo del autor.

Aunque están presentes una gran mayoría de succiones en los momentos de fuerzas horizontales por viento ( $F_vH$ ), el signo de los momentos varía de acuerdo a lado del arco que se esté analizando. En el lado izquierdo del sistema estructural elíptico, hay presiones y succiones actuando al mismo tiempo, por lo que la resultante  $R_i$  es la diferencia de fuerzas. Esta resultante tiende a ir a la izquierda del arco, lo que se significa que las succiones tienden a “jalar” al arco hacia afuera. No obstante, la sección de funicular que va de la presión 1 ( $P_1$ ) a la succión 19 ( $S_{19}$ ), se mantiene por debajo del arco elíptico, por lo que los momentos son de signo positivo en el intradós y negativo en el extradós del arco. A diferencia de su contraparte, el lado derecho del arco está sometido a una serie de succiones que sumándolas, corresponden a toda la longitud del polígono vectorial que es representado por la resultante  $R_d$ . Las fuerzas tiene el mismo sentido por lo que esta parte del arco tiende a ser llevado hacia la derecha por la fuerza resultante  $R_d$ . Los momentos son de signo positivo en el extradós y negativos en el intradós de la elipse.

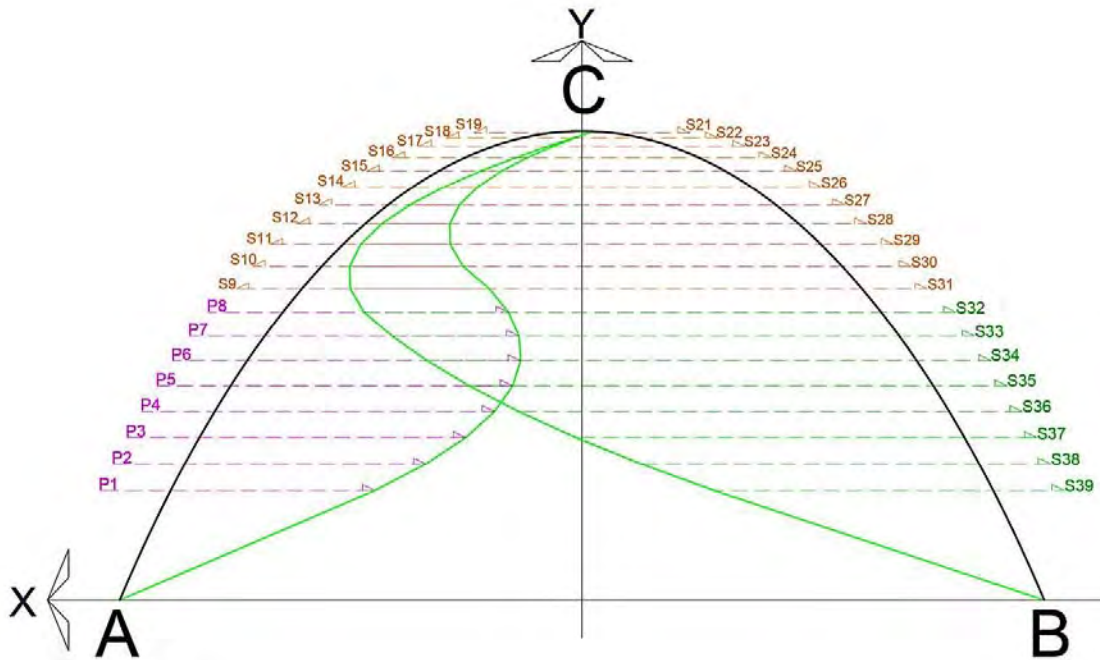


Figura 62.- Tercer funicular de fuerzas horizontales por viento. Dibujo del autor.

Vemos que los momentos de mayor magnitud, son ocasionados por uno de los vectores de descomposición de la acción por viento (en específico por las fuerzas horizontales por viento).

Arcos	Momento de fuerza horizontal por viento.
Elipse 1 (8 x 15 m)	8.6692 kg/m x 170.9593 m = 1482.08 kg/m <sup>2</sup>
Elipse 2 (8 x 15.76 m)	8.8156 kg/m x 155.6413 m = 1372.07 kg/m <sup>2</sup>

Tabla 11.- Valores máximos del momento horizontal por viento. En la parte izquierda de la tabla, se muestran los dos tipos de arcos que componen a nuestra cubierta, en el lado derecho, la fuerza horizontal por viento. Los primeros datos en la operación, corresponden a la distancia máxima entre el funicular que paso por los puntos A, C y B y el arco. Las unidades están en kg/m por que la medición se hace sobre la línea de acción de las fuerzas que están en kg/m y esa franja corresponde a la porción de fuerza que actúa fuera del eje neutro de nuestra estructura. El segundo valor, corresponde a la distancia entre el foco y la línea de acción de las fuerzas. Cabe señalar que en el punto de la fuerza de succión 32 (S<sub>32</sub>) es donde se localizan ambos momentos.

Si sumamos la fuerza vertical por viento y la gravitacional en el mismo punto donde se ubica la fuerza horizontal por viento (**succión 32**), tendremos el momento máximo:

$$\text{Momento Máximo} = F_G + F_V + F_H.$$

Sustituyendo los valores obtenidos de ambas elipses en nuestra operación:

**Momento Máximo Elipse 1 =**

$$-67.94 \text{ kg/m}^2 + 169.96 \text{ kg/m}^2 + 1482.08 \text{ kg/m}^2 = \mathbf{1584.1 \text{ kg/m}^2}$$

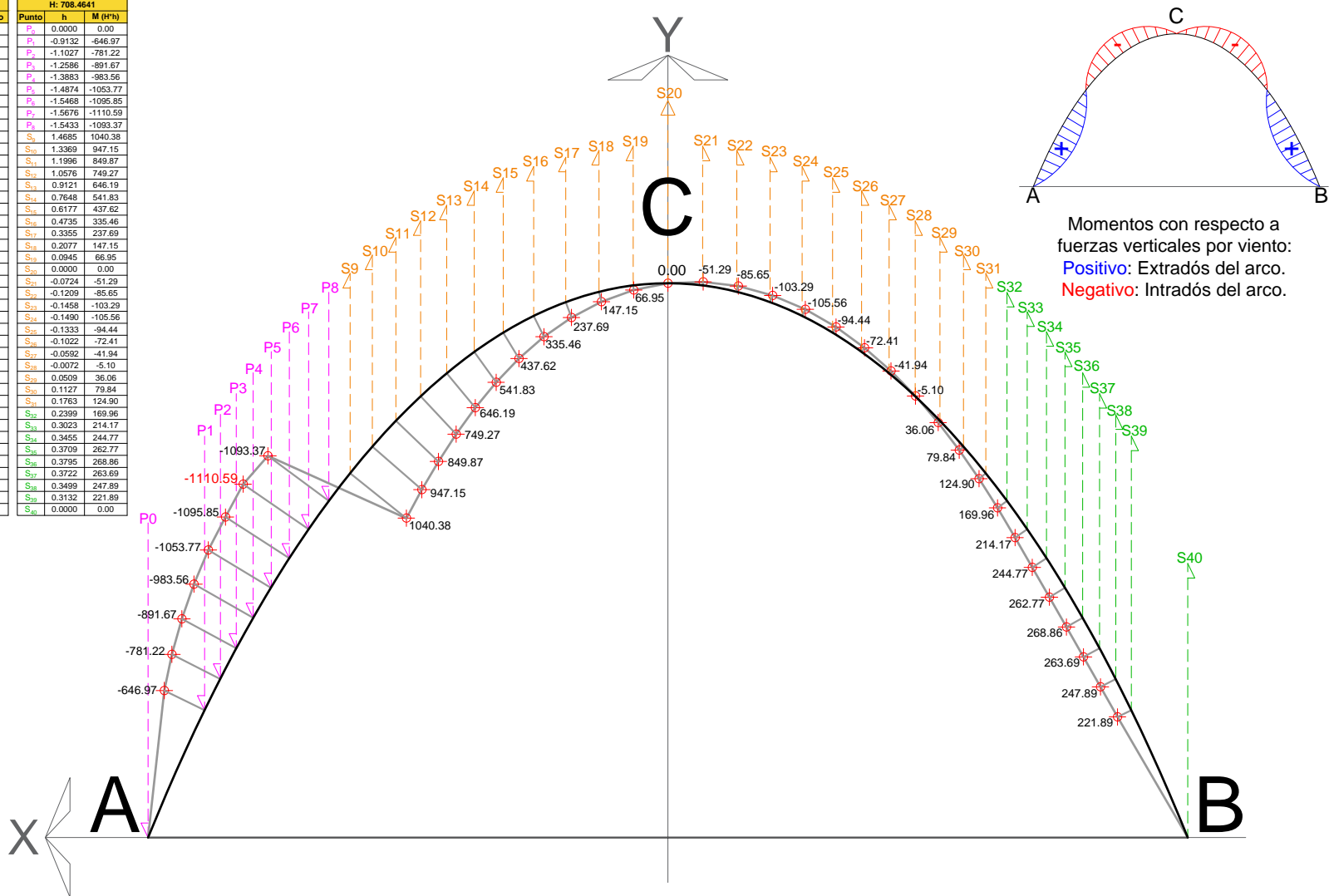
**Momento Máximo Elipse 2 =**

$$-50.5486 \text{ kg/m}^2 + 182.79 \text{ kg/m}^2 + 1372.07 \text{ kg/m}^2 = \mathbf{1504.31 \text{ kg/m}^2}$$

El valor más alto corresponde al caso del arco elíptico de 8 x 15 m (Elipse 1), cuyo valor es de 1584.1 kg/m<sup>2</sup>.

Para concluir esta sección, se anexan las gráficas de momentos respectivamente. En estos gráficos, se incluyen las tablas de las cuales la primera corresponde a los puntos de aplicación de la fuerza (presión o succión), la magnitud del vector y sentido que toma en su descomposición. En la tabla contigua, se especifica por cada uno de los puntos, las distancias *h* y el valor del momento de dicha fuerza.

Fuerza Vertical Viento.			H: 708.4641		
Punto	Fuerza	Senido	Punto	h	M (kN·h)
P <sub>0</sub>	-28.0997	↓	P <sub>0</sub>	0.0000	0.00
P <sub>1</sub>	-30.8172	↓	P <sub>1</sub>	-0.9132	-646.97
P <sub>2</sub>	-34.1782	↓	P <sub>2</sub>	-1.1027	-781.22
P <sub>3</sub>	-35.6281	↓	P <sub>3</sub>	-1.2586	-891.67
P <sub>4</sub>	-37.1769	↓	P <sub>4</sub>	-1.3883	-983.56
P <sub>5</sub>	-38.8360	↓	P <sub>5</sub>	-1.4874	-1053.77
P <sub>6</sub>	-40.6179	↓	P <sub>6</sub>	-1.5468	-1095.85
P <sub>7</sub>	-42.5366	↓	P <sub>7</sub>	-1.5676	-1110.59
P <sub>8</sub>	-44.6070	↓	P <sub>8</sub>	-1.5433	-1093.37
S <sub>9</sub>	75.5756	↑	S <sub>9</sub>	1.4685	1040.38
S <sub>10</sub>	79.4789	↑	S <sub>10</sub>	1.3369	947.15
S <sub>11</sub>	83.6947	↑	S <sub>11</sub>	1.1996	849.87
S <sub>12</sub>	88.2328	↑	S <sub>12</sub>	1.0576	749.27
S <sub>13</sub>	93.0780	↑	S <sub>13</sub>	0.9121	646.19
S <sub>14</sub>	98.1809	↑	S <sub>14</sub>	0.7648	541.83
S <sub>15</sub>	103.4289	↑	S <sub>15</sub>	0.6177	437.62
S <sub>16</sub>	108.6161	↑	S <sub>16</sub>	0.4735	335.46
S <sub>17</sub>	113.4188	↑	S <sub>17</sub>	0.3355	237.69
S <sub>18</sub>	117.3971	↑	S <sub>18</sub>	0.2077	147.15
S <sub>19</sub>	120.0594	↑	S <sub>19</sub>	0.0945	66.95
S <sub>20</sub>	121.0000	↑	S <sub>20</sub>	0.0000	0.00
S <sub>21</sub>	120.0594	↑	S <sub>21</sub>	-0.0724	-51.29
S <sub>22</sub>	117.3971	↑	S <sub>22</sub>	-0.1209	-85.65
S <sub>23</sub>	113.4188	↑	S <sub>23</sub>	-0.1458	-103.29
S <sub>24</sub>	108.6161	↑	S <sub>24</sub>	-0.1490	-105.56
S <sub>25</sub>	103.4289	↑	S <sub>25</sub>	-0.1333	-94.44
S <sub>26</sub>	98.1809	↑	S <sub>26</sub>	-0.1022	-72.41
S <sub>27</sub>	93.0780	↑	S <sub>27</sub>	-0.0592	-41.94
S <sub>28</sub>	88.2328	↑	S <sub>28</sub>	-0.0072	-5.10
S <sub>29</sub>	83.6947	↑	S <sub>29</sub>	0.0509	36.06
S <sub>30</sub>	79.4789	↑	S <sub>30</sub>	0.1127	79.84
S <sub>31</sub>	75.5756	↑	S <sub>31</sub>	0.1763	124.90
S <sub>32</sub>	29.7380	↑	S <sub>32</sub>	0.2399	169.96
S <sub>33</sub>	28.3577	↑	S <sub>33</sub>	0.3023	214.17
S <sub>34</sub>	27.0786	↑	S <sub>34</sub>	0.3455	244.77
S <sub>35</sub>	25.8907	↑	S <sub>35</sub>	0.3709	262.77
S <sub>36</sub>	24.7846	↑	S <sub>36</sub>	0.3795	268.86
S <sub>37</sub>	23.7520	↑	S <sub>37</sub>	0.3722	263.69
S <sub>38</sub>	22.7854	↑	S <sub>38</sub>	0.3499	247.89
S <sub>39</sub>	21.8781	↑	S <sub>39</sub>	0.3132	221.89
S <sub>40</sub>	18.7331	↑	S <sub>40</sub>	0.0000	0.00



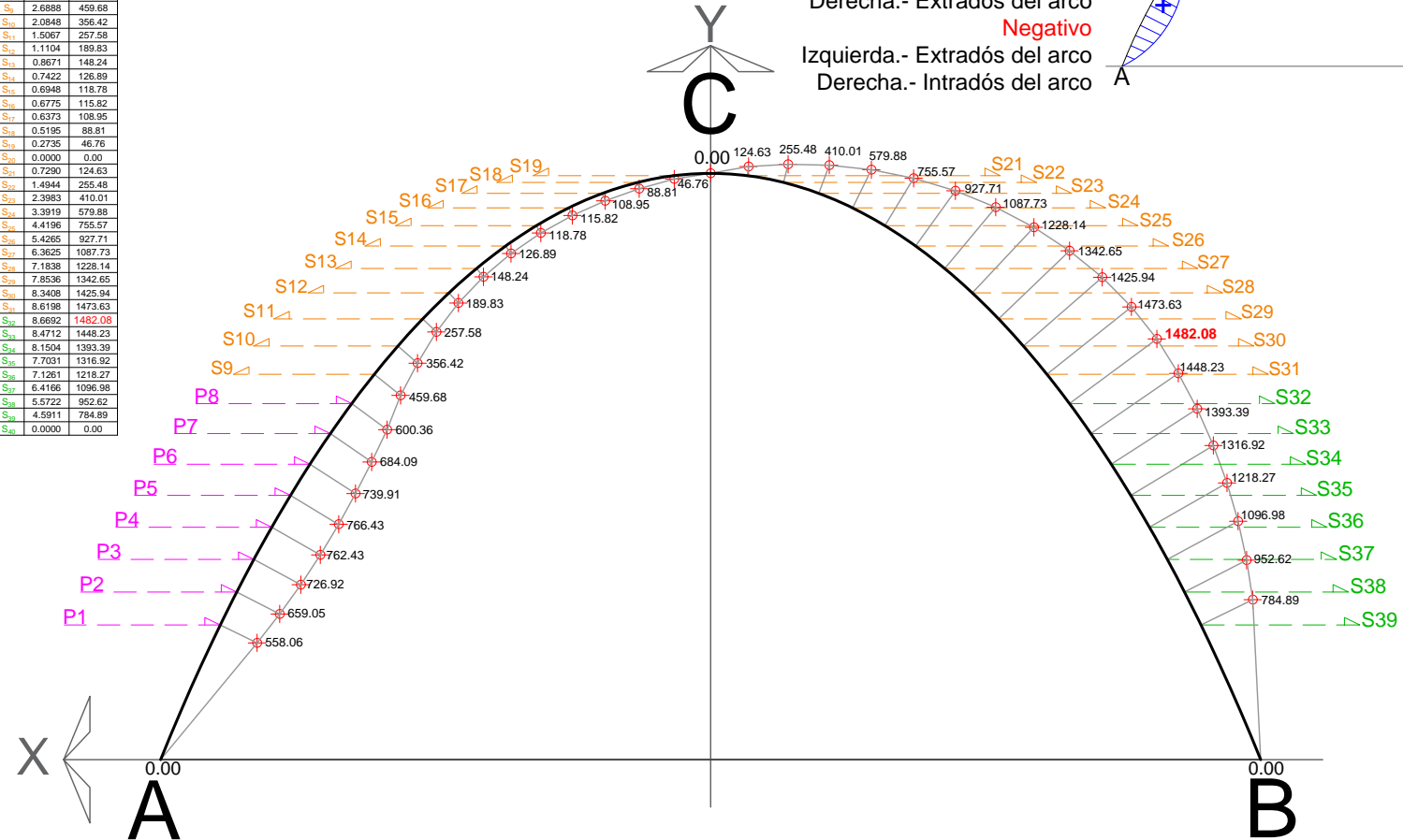
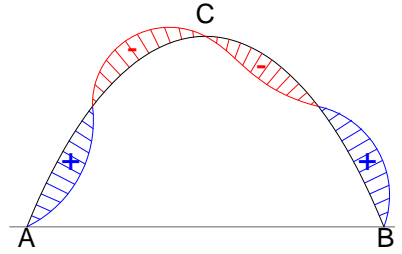
# Elipse 1. Gráfica de momentos.

Análisis de fuerzas verticales por viento presentes en el arco.

S/ESC.

Fuerza Horizontal Viento.			H: 170.9593		
Punto	Fuerza	Sentido	Punto	h	M (k'xh)
P1	69.5371	→	P1	0.0000	0.00
P2	67.4391	→	P2	3.2643	558.06
P3	66.7597	→	P3	3.8550	659.05
P4	65.9973	→	P4	4.2520	726.92
P5	65.1374	→	P5	4.4597	762.43
P6	64.1620	→	P6	4.4831	766.43
P7	63.0491	→	P7	4.3280	739.91
P8	61.7708	→	P8	4.0015	684.09
P9	60.2928	→	P9	3.5117	600.36
S1	-94.4951	←	S1	2.6888	459.68
S2	-91.2365	←	S2	2.0848	356.42
S3	-87.3853	←	S3	1.5067	257.58
S4	-82.8008	←	S4	1.1104	189.83
S5	-77.3141	←	S5	0.8671	148.24
S6	-70.7214	←	S6	0.7422	126.89
S7	-62.7970	←	S7	0.6948	118.78
S8	-53.3249	←	S8	0.6775	115.82
S9	-42.1566	←	S9	0.6373	108.95
S10	-29.3072	←	S10	0.5195	88.81
S11	-15.0576	←	S11	0.2735	46.76
S20	0.0000	0	S20	0.0000	0.00
S21	15.0576	→	S21	0.7290	124.63
S22	29.3072	→	S22	1.4944	255.48
S23	42.1566	→	S23	2.3983	410.01
S24	53.3249	→	S24	3.3919	579.88
S25	62.7970	→	S25	4.4196	755.57
S26	70.7214	→	S26	5.4265	927.71
S27	77.3141	→	S27	6.3625	1087.73
S28	82.8008	→	S28	7.1838	1228.14
S29	87.3853	→	S29	7.8536	1342.65
S30	91.2365	→	S30	8.3408	1425.94
S31	94.4951	→	S31	8.6198	1473.63
S32	40.1952	→	S32	8.6692	1482.08
S33	41.1806	→	S33	8.4712	1448.23
S34	42.0327	→	S34	8.1504	1393.39
S35	42.7747	→	S35	7.7031	1316.92
S36	43.4249	→	S36	7.1261	1218.27
S37	43.9982	→	S37	6.4166	1096.98
S38	44.5064	→	S38	5.5722	952.62
S39	44.9594	→	S39	4.5911	784.89
S40	46.3581	→	S40	0.0000	0.00

Momentos con respecto a las fuerzas horizontales por viento:  
**Positivo**  
 Izquierda.-Intradós del arco  
 Derecha.- Extradós del arco  
**Negativo**  
 Izquierda.- Extradós del arco  
 Derecha.- Intradós del arco

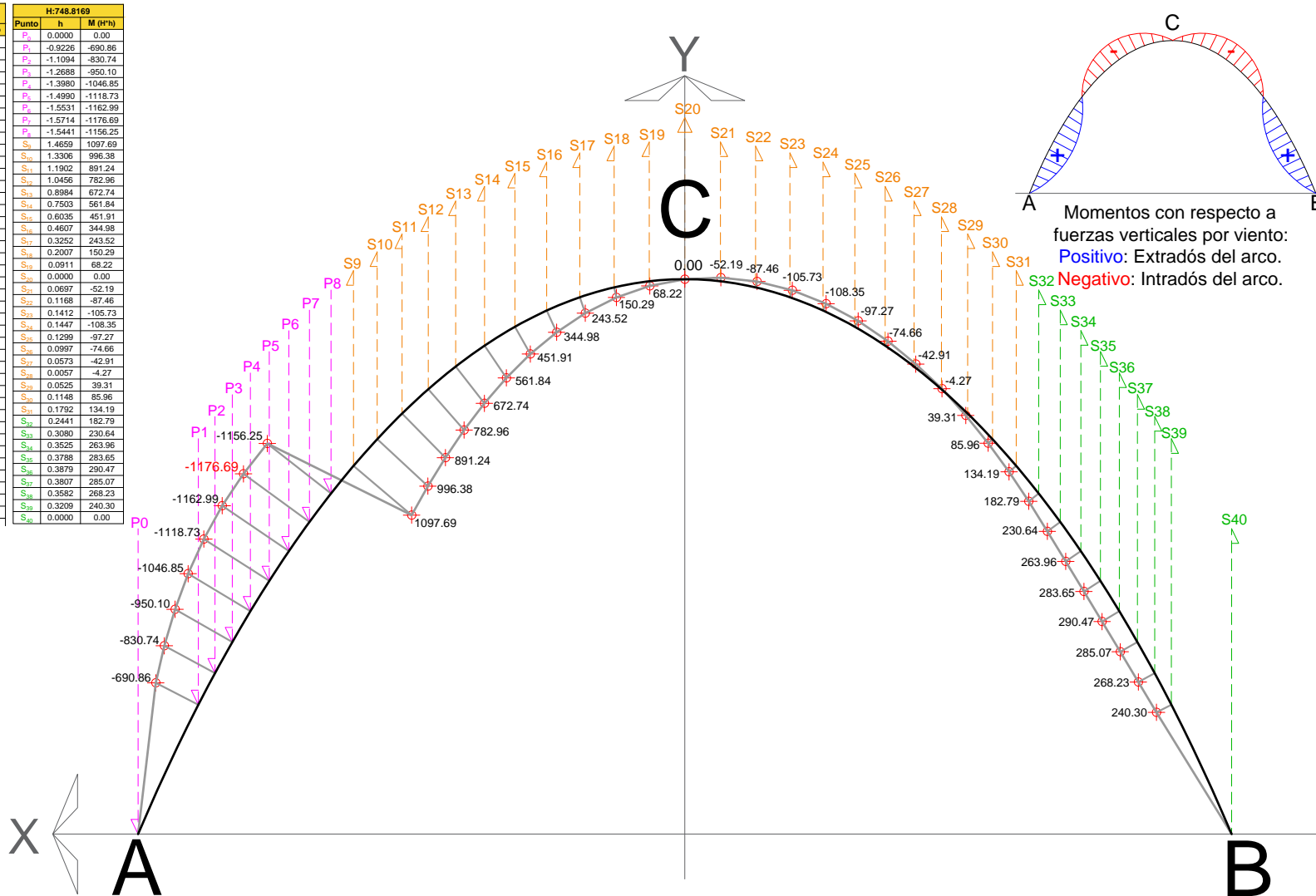


# Elipse 1. Gráfica de momentos.

Análisis de fuerzas horizontales por viento presentes en el arco.

S/ESC.

Fuerza vertical viento.			H:748.8169		
Punto	Fuerza	Sentido	Punto	h	M (t·m)
P <sub>0</sub>	-27.7464	↓	P <sub>0</sub>	0.0000	0.00
P <sub>1</sub>	-32.3972	↓	P <sub>1</sub>	-0.9228	-690.86
P <sub>2</sub>	-33.9406	↓	P <sub>2</sub>	-1.1094	-830.74
P <sub>3</sub>	-35.1508	↓	P <sub>3</sub>	-1.2688	-950.10
P <sub>4</sub>	-36.6618	↓	P <sub>4</sub>	-1.3980	-1046.85
P <sub>5</sub>	-38.2749	↓	P <sub>5</sub>	-1.4990	-1118.73
P <sub>6</sub>	-40.0006	↓	P <sub>6</sub>	-1.5531	-1162.99
P <sub>7</sub>	-41.8501	↓	P <sub>7</sub>	-1.5714	-1176.69
P <sub>8</sub>	-43.8349	↓	P <sub>8</sub>	-1.5441	-1156.25
S <sub>9</sub>	77.0416	↑	S <sub>9</sub>	1.4659	1097.69
S <sub>10</sub>	80.8742	↑	S <sub>10</sub>	1.3306	996.38
S <sub>11</sub>	84.9763	↑	S <sub>11</sub>	1.1902	891.24
S <sub>12</sub>	89.3430	↑	S <sub>12</sub>	1.0456	782.96
S <sub>13</sub>	93.9471	↑	S <sub>13</sub>	0.8984	672.74
S <sub>14</sub>	98.7224	↑	S <sub>14</sub>	0.7503	561.84
S <sub>15</sub>	103.5489	↑	S <sub>15</sub>	0.6035	451.91
S <sub>16</sub>	108.2281	↑	S <sub>16</sub>	0.4607	344.98
S <sub>17</sub>	112.4753	↑	S <sub>17</sub>	0.3252	243.52
S <sub>18</sub>	115.9274	↑	S <sub>18</sub>	0.2007	150.29
S <sub>19</sub>	118.1772	↑	S <sub>19</sub>	0.0911	68.22
S <sub>20</sub>	119.0000	↑	S <sub>20</sub>	0.0000	0.00
S <sub>21</sub>	118.1772	↑	S <sub>21</sub>	0.0697	-52.19
S <sub>22</sub>	115.9274	↑	S <sub>22</sub>	0.1168	-97.46
S <sub>23</sub>	112.4753	↑	S <sub>23</sub>	0.1412	-105.73
S <sub>24</sub>	108.2281	↑	S <sub>24</sub>	0.1447	-108.35
S <sub>25</sub>	103.5489	↑	S <sub>25</sub>	0.1299	-97.27
S <sub>26</sub>	98.7224	↑	S <sub>26</sub>	0.0997	-74.66
S <sub>27</sub>	93.9471	↑	S <sub>27</sub>	0.0573	-42.91
S <sub>28</sub>	89.3430	↑	S <sub>28</sub>	0.0057	-4.27
S <sub>29</sub>	84.9763	↑	S <sub>29</sub>	0.0525	39.31
S <sub>30</sub>	80.8742	↑	S <sub>30</sub>	0.1148	85.96
S <sub>31</sub>	77.0416	↑	S <sub>31</sub>	0.1792	134.19
S <sub>32</sub>	30.2522	↑	S <sub>32</sub>	0.2441	182.79
S <sub>33</sub>	28.8824	↑	S <sub>33</sub>	0.3090	230.64
S <sub>34</sub>	27.6060	↑	S <sub>34</sub>	0.3525	263.96
S <sub>35</sub>	26.4151	↑	S <sub>35</sub>	0.3788	283.65
S <sub>36</sub>	25.3018	↑	S <sub>36</sub>	0.3879	290.47
S <sub>37</sub>	24.2590	↑	S <sub>37</sub>	0.3807	285.07
S <sub>38</sub>	23.2900	↑	S <sub>38</sub>	0.3582	268.23
S <sub>39</sub>	22.3586	↑	S <sub>39</sub>	0.3209	240.30
S <sub>40</sub>	19.1494	↑	S <sub>40</sub>	0.0000	0.00

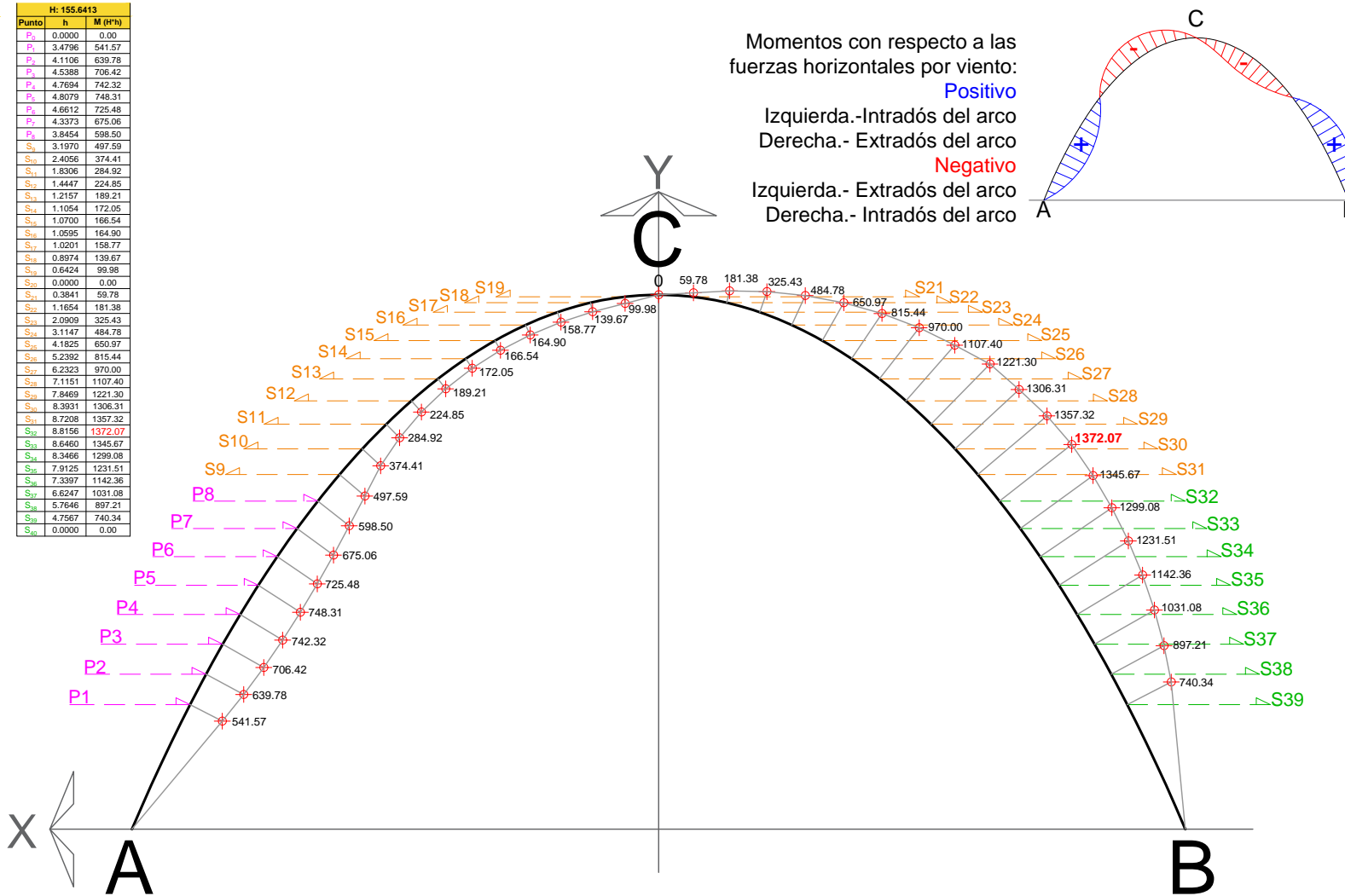


## Elipse 2. Gráfica de momentos.

Análisis de fuerzas verticales por viento presentes en el arco.

S/ESC.

Fuerza Horizontal Viento.			H: 155.6413		
Punto	Fuerza	Sentido	Punto	h	M (H <sup>2</sup> )
P <sub>1</sub>	65.3539	→	P <sub>1</sub>	0.0000	0.00
P <sub>2</sub>	63.1777	→	P <sub>2</sub>	3.4796	541.57
P <sub>3</sub>	62.3621	→	P <sub>3</sub>	4.1106	639.78
P <sub>4</sub>	61.6881	→	P <sub>4</sub>	4.5388	706.42
P <sub>5</sub>	60.8022	→	P <sub>5</sub>	4.7694	742.32
P <sub>6</sub>	59.7999	→	P <sub>6</sub>	4.8079	748.31
P <sub>7</sub>	58.6596	→	P <sub>7</sub>	4.6612	725.48
P <sub>8</sub>	57.3548	→	P <sub>8</sub>	4.3373	675.06
P <sub>9</sub>	55.8525	→	P <sub>9</sub>	3.8454	595.50
S <sub>1</sub>	-90.6950	←	S <sub>1</sub>	3.1370	497.59
S <sub>2</sub>	-87.2947	←	S <sub>2</sub>	2.4056	374.41
S <sub>3</sub>	-83.2068	←	S <sub>3</sub>	1.8306	284.92
S <sub>4</sub>	-78.6056	←	S <sub>4</sub>	1.4447	224.85
S <sub>5</sub>	-73.0407	←	S <sub>5</sub>	1.2157	189.21
S <sub>6</sub>	-66.4445	←	S <sub>6</sub>	1.1054	172.05
S <sub>7</sub>	-58.6398	←	S <sub>7</sub>	1.0700	166.54
S <sub>8</sub>	-49.4741	←	S <sub>8</sub>	1.0595	164.90
S <sub>9</sub>	-38.8626	←	S <sub>9</sub>	1.0201	158.77
S <sub>10</sub>	-26.8669	←	S <sub>10</sub>	0.8974	139.67
S <sub>11</sub>	-13.9698	←	S <sub>11</sub>	0.6424	99.98
S <sub>12</sub>	0.0000	0	S <sub>12</sub>	0.0000	0.00
S <sub>13</sub>	13.9698	→	S <sub>13</sub>	0.3841	59.75
S <sub>14</sub>	26.8669	→	S <sub>14</sub>	1.1654	181.38
S <sub>15</sub>	38.8626	→	S <sub>15</sub>	2.0909	325.43
S <sub>16</sub>	49.4741	→	S <sub>16</sub>	3.1147	484.78
S <sub>17</sub>	58.6398	→	S <sub>17</sub>	4.1825	650.97
S <sub>18</sub>	66.4445	→	S <sub>18</sub>	5.2392	815.44
S <sub>19</sub>	73.0407	→	S <sub>19</sub>	6.2323	970.00
S <sub>20</sub>	78.6056	→	S <sub>20</sub>	7.1151	1107.40
S <sub>21</sub>	83.3068	→	S <sub>21</sub>	7.8469	1221.90
S <sub>22</sub>	87.2947	→	S <sub>22</sub>	8.3931	1306.31
S <sub>23</sub>	90.6950	→	S <sub>23</sub>	8.7208	1357.32
S <sub>24</sub>	93.5461	→	S <sub>24</sub>	8.8156	1372.07
S <sub>25</sub>	95.8525	→	S <sub>25</sub>	8.6460	1345.67
S <sub>26</sub>	97.5999	→	S <sub>26</sub>	8.3466	1299.08
S <sub>27</sub>	98.7999	→	S <sub>27</sub>	7.9125	1231.51
S <sub>28</sub>	99.4741	→	S <sub>28</sub>	7.3397	1142.36
S <sub>29</sub>	99.6398	→	S <sub>29</sub>	6.6247	1031.08
S <sub>30</sub>	99.3548	→	S <sub>30</sub>	5.7646	897.21
S <sub>31</sub>	98.6596	→	S <sub>31</sub>	4.7567	740.34
S <sub>32</sub>	97.5999	→	S <sub>32</sub>	3.8454	595.50
S <sub>33</sub>	96.1777	→	S <sub>33</sub>	3.1370	497.59
S <sub>34</sub>	94.3539	→	S <sub>34</sub>	2.4056	374.41
S <sub>35</sub>	92.1777	→	S <sub>35</sub>	1.8306	284.92
S <sub>36</sub>	89.6525	→	S <sub>36</sub>	1.4447	224.85
S <sub>37</sub>	86.8022	→	S <sub>37</sub>	1.2157	189.21
S <sub>38</sub>	83.6525	→	S <sub>38</sub>	1.1054	172.05
S <sub>39</sub>	80.2022	→	S <sub>39</sub>	1.0700	166.54
S <sub>40</sub>	76.5525	→	S <sub>40</sub>	1.0595	164.90
S <sub>41</sub>	72.7022	→	S <sub>41</sub>	1.0201	158.77
S <sub>42</sub>	68.6525	→	S <sub>42</sub>	0.8974	139.67
S <sub>43</sub>	64.4022	→	S <sub>43</sub>	0.6424	99.98
S <sub>44</sub>	60.0525	→	S <sub>44</sub>	0.0000	0.00
S <sub>45</sub>	55.7022	→	S <sub>45</sub>	0.3841	59.75
S <sub>46</sub>	51.4525	→	S <sub>46</sub>	1.1654	181.38
S <sub>47</sub>	47.3022	→	S <sub>47</sub>	2.0909	325.43
S <sub>48</sub>	43.2525	→	S <sub>48</sub>	3.1147	484.78
S <sub>49</sub>	39.3022	→	S <sub>49</sub>	4.1825	650.97
S <sub>50</sub>	35.4525	→	S <sub>50</sub>	5.2392	815.44
S <sub>51</sub>	31.7022	→	S <sub>51</sub>	6.2323	970.00
S <sub>52</sub>	28.0525	→	S <sub>52</sub>	7.1151	1107.40
S <sub>53</sub>	24.5022	→	S <sub>53</sub>	7.8469	1221.90
S <sub>54</sub>	21.0525	→	S <sub>54</sub>	8.3931	1306.31
S <sub>55</sub>	17.7022	→	S <sub>55</sub>	8.7208	1357.32
S <sub>56</sub>	14.4525	→	S <sub>56</sub>	8.8156	1372.07
S <sub>57</sub>	11.3022	→	S <sub>57</sub>	8.6460	1345.67
S <sub>58</sub>	8.2525	→	S <sub>58</sub>	8.3466	1299.08
S <sub>59</sub>	5.3022	→	S <sub>59</sub>	7.9125	1231.51
S <sub>60</sub>	2.4525	→	S <sub>60</sub>	7.3397	1142.36
S <sub>61</sub>	-0.4022	→	S <sub>61</sub>	6.6247	1031.08
S <sub>62</sub>	-3.2525	→	S <sub>62</sub>	5.7646	897.21
S <sub>63</sub>	-6.1022	→	S <sub>63</sub>	4.7567	740.34
S <sub>64</sub>	-8.9525	→	S <sub>64</sub>	3.8454	595.50
S <sub>65</sub>	-11.8022	→	S <sub>65</sub>	3.1370	497.59
S <sub>66</sub>	-14.6525	→	S <sub>66</sub>	2.4056	374.41
S <sub>67</sub>	-17.5022	→	S <sub>67</sub>	1.8306	284.92
S <sub>68</sub>	-20.3525	→	S <sub>68</sub>	1.4447	224.85
S <sub>69</sub>	-23.2022	→	S <sub>69</sub>	1.2157	189.21
S <sub>70</sub>	-26.0525	→	S <sub>70</sub>	1.1054	172.05
S <sub>71</sub>	-28.9022	→	S <sub>71</sub>	1.0700	166.54
S <sub>72</sub>	-31.7525	→	S <sub>72</sub>	1.0595	164.90
S <sub>73</sub>	-34.6022	→	S <sub>73</sub>	1.0201	158.77
S <sub>74</sub>	-37.4525	→	S <sub>74</sub>	0.8974	139.67
S <sub>75</sub>	-40.3022	→	S <sub>75</sub>	0.6424	99.98
S <sub>76</sub>	-43.1525	→	S <sub>76</sub>	0.0000	0.00
S <sub>77</sub>	-46.0022	→	S <sub>77</sub>	0.3841	59.75
S <sub>78</sub>	-48.8525	→	S <sub>78</sub>	1.1654	181.38
S <sub>79</sub>	-51.7022	→	S <sub>79</sub>	2.0909	325.43
S <sub>80</sub>	-54.5525	→	S <sub>80</sub>	3.1147	484.78
S <sub>81</sub>	-57.4022	→	S <sub>81</sub>	4.1825	650.97
S <sub>82</sub>	-60.2525	→	S <sub>82</sub>	5.2392	815.44
S <sub>83</sub>	-63.1022	→	S <sub>83</sub>	6.2323	970.00
S <sub>84</sub>	-65.9525	→	S <sub>84</sub>	7.1151	1107.40
S <sub>85</sub>	-68.8022	→	S <sub>85</sub>	7.8469	1221.90
S <sub>86</sub>	-71.6525	→	S <sub>86</sub>	8.3931	1306.31
S <sub>87</sub>	-74.5022	→	S <sub>87</sub>	8.7208	1357.32
S <sub>88</sub>	-77.3525	→	S <sub>88</sub>	8.8156	1372.07
S <sub>89</sub>	-80.2022	→	S <sub>89</sub>	8.6460	1345.67
S <sub>90</sub>	-83.0525	→	S <sub>90</sub>	8.3466	1299.08
S <sub>91</sub>	-85.9022	→	S <sub>91</sub>	7.9125	1231.51
S <sub>92</sub>	-88.7525	→	S <sub>92</sub>	7.3397	1142.36
S <sub>93</sub>	-91.6022	→	S <sub>93</sub>	6.6247	1031.08
S <sub>94</sub>	-94.4525	→	S <sub>94</sub>	5.7646	897.21
S <sub>95</sub>	-97.3022	→	S <sub>95</sub>	4.7567	740.34
S <sub>96</sub>	-100.1525	→	S <sub>96</sub>	3.8454	595.50
S <sub>97</sub>	-103.0022	→	S <sub>97</sub>	3.1370	497.59
S <sub>98</sub>	-105.8525	→	S <sub>98</sub>	2.4056	374.41
S <sub>99</sub>	-108.7022	→	S <sub>99</sub>	1.8306	284.92
S <sub>100</sub>	-111.5525	→	S <sub>100</sub>	1.4447	224.85



## Elipse 2. Gráfica de momentos.

Análisis de fuerzas horizontales por viento presentes en el arco.

S/ESC.



### III.4.6.-Modulo de Sección.

Para determinar el módulo de sección de la estructura acorde a resistir el momento máximo a la que se encontrara sometido, usaremos uno de los valores (el de mayor exponente) de los momentos máximos.

La fórmula de la resistencia es la siguiente:

$$\gamma = \frac{M}{S}$$

Dónde:

$$S = \frac{bh^2}{6}$$

Por lo tanto:

$$\gamma = \frac{M}{\frac{bh^2}{6}}$$

Teniendo en cuenta que la resistencia máxima de la madera son 60 kg/cm<sup>2</sup>. La base de la sección de madera para los arcos mide 20 cm, por lo consiguiente:

$$60 = \frac{158410 \text{ kg/cm}}{\frac{20 \text{ cm} \cdot h^2}{6}}$$

Para saber la altura de la sección despejamos  $h$ .

$$h = \sqrt{\frac{6 \cdot 158410 \text{ kg/cm}}{20 \text{ cm} \cdot 60 \text{ kg/cm}^2}} = 28.1433 \text{ cm} \approx 30 \text{ cm}$$

Conociendo la base y altura de la sección, procedemos a incluirlos en la ecuación original.

$$\gamma = \frac{158410 \text{ kg/cm}}{\frac{20 \text{ cm} \cdot (30 \text{ cm})^2}{6}} = 52.8033 \text{ kg/cm}^2$$

La sección idónea para resistir el momento máximo obtenido de la suma de fuerzas gravitacionales y de las fuerzas por viento es de 30 x 20 cm.

Notamos que existe un incremento considerable en sus dimensiones. Esto se debe por lo siguiente; cuando se realizó el primer análisis (fuerzas internas), solo se consideró el comportamiento estructural de los arcos ante su peso propio (Ver III.3.-Fuerzas internas del arco.). En base a los resultados obtenidos mediante el uso de la estática gráfica (funiculares de fuerzas), la elipse demostró ser adecuada ante las acciones internas al casi coincidir el funicular de fuerzas con el eje del arco elíptico y por consiguiente, presenta momentos mínimos ( $-75.8630 \text{ kg/m}^2$  y  $-60.3262 \text{ kg/m}^2$ ), lo que significa que es auto portante.

Sin embargo, una estructura se encontrara sometida a diferentes acciones ajenas a sus componentes. En este caso, las presiones y succiones producidas por el viento ejercen un cambio radical en el comportamiento estructural de los arcos. Al variar la dirección, magnitud y sentido de cada una de las resultantes por viento y al ser dividida en fuerzas verticales y horizontales para facilitar el análisis gráfico (Ver III.4.4.a-Descomposición de las fuerzas.), obtenemos como resultado momentos en sentido vertical ( $169.96 \text{ kg/m}^2$  y  $182.79 \text{ kg/m}^2$ ) y horizontal ( $1482.08 \text{ kg/m}^2$  y  $1372.07 \text{ kg/m}^2$ ) de magnitudes considerables en los dos tipos de arcos, ya que el espacio entre el funicular de fuerzas y el eje del arco es mayor con respecto al primer análisis antes mencionado.

Si sumamos los momentos de fuerzas internas y externas, sabremos el momento máximo con el cual podremos calcular el módulo de sección y por consiguiente, conocer las dimensiones correctas para que la cubierta resista los lapsos críticos a los que se encontrara realizando su mayor trabajo estructural e incluso, considerar aumentar ligeramente la sección de los arcos (a reserva del criterio del diseñador) como un factor de seguridad.

### III.5.- Cimentación de la cubierta.

Para cerciorarnos de no cimentar encima de otra subestructura arqueológica que se encuentren debajo, se tiene que consultar el informe técnico de liberación del edificio. Dentro del ***“Informe del Informe del Palacio de las pinturas, edificio I. Zona Arqueológica de el Tajín, Veracruz 1992-1996”*** elaborado por el Arqlogo Juan Sánchez Bonilla, encontramos lo siguiente:

*“El Arqlogo. José García Payón, en los años 60-61, realizó exploraciones en el Tajín Chico, para definir la amplitud de la plataforma sobre la que descansan los edificios “K”, “I” y “J” del Tajín Chico. Estructuras que se consideró como una nivelación artificial, ya que al recortar el lomerío para hacer terrazas, el material sobrante, sirvió como relleno para ampliar estos espacios, sobre los cuales se desplantaron los edificios antes mencionados, [...]”.*<sup>58</sup>

Esta idea se confirma más adelante:

*“Como la dinámica arquitectónica del complejo denominado Tajín Chico, se debe en gran parte, a que sus fundadores, aprovecharon los lomeríos que se elevan hacia el lado Noroeste, los cuales fueron recortando como terrazas, para diseñar los espacios, que en un principio fueron utilizados para la edificación de sus casas habitación, [...]posteriormente se fueron ensanchando y elevando más lo niveles para estructurar sus plataformas, que les permitió proyectar una urbanización compleja e intelectualizada[...].”*<sup>59</sup>

Ante las limitaciones espaciales de la región, es lógico que usaran los lomeríos circundantes para desplantar su ciudad (Ver I.1.2.- Descripción del sitio arqueológico.), modificando la topografía de la región en un sistema de terrazas con la finalidad de tener un terreno firme y plano donde desplantar las edificaciones que componen actualmente a El Tajín, por lo que es poco probable que existan subestructuras en el perímetro del edificio I.

---

<sup>58</sup> (Sánchez Bonilla, 1996, pág. 3)

<sup>59</sup> (Sánchez Bonilla, 1996, pág. 54)

Existen varias razones para considerar que en los puntos donde se cimentara la cubierta, no exista alguna posible subestructura o vestigio arqueológico:

- Al revisar la secuencia de liberación del edificio I, existe evidencia de etapas constructivas anteriores, una dentro de la otra, sin embargo, no se hace mención de subestructuras en las “afueras” del edificio o perímetro<sup>60</sup>, solo se hace referencia a pisos estucados en exteriores.
- Dentro de los trabajos efectuados, se contempló la liberación del muro de contención que colinda con la parte sur del edificio I y la consolidación de los elementos que lo componen. Durante el proceso, no se reportan restos o elementos arqueológicos que obliguen a reubicar los puntos de apoyo de la cubierta.
- La construcción de un dren de 1.40 m de profundidad ubicado entre los edificios “K” y el del caso de estudio (edificio “I”), iniciando desde la esquina sureste del edificio “C” con dirección al sur y terminando en el flanco izquierdo de la escalera de acceso al conjunto de Tajín Chico (Sánchez Bonilla, 1996, pág. 55). Si bien se reporta un pequeño resto de piso, este se ubica hasta los 1.50 m que correspondería a una etapa muy temprana de ocupación. Considerando que la propuesta de cimentación tendrá como máximo 1.00 m de profundidad, no existe algún problema de excavar y cimentar a dicha profundidad.

Sin embargo, antes de realizar la excavación para las obras iniciales de la estructura, se tendrá que realizar pozos de sondeo en los puntos donde se localizaran los apoyos de la cubierta para dar absoluta certeza de no tocar ningún elemento arqueológico relevante.

---

<sup>60</sup> (Sánchez Bonilla, 1996, págs. 5-14)

### III.5.1.-Propuesta de cimentación.

Se plantea el uso de zapatas aisladas de concreto de 1.00 m por 1.00 m en su base con la finalidad de tener una mayor área de contacto sobre el terreno. De esta forma, se garantiza una mejor distribución del peso de la estructura evitando cargas puntuales que podrían provocar hundimientos diferenciales.

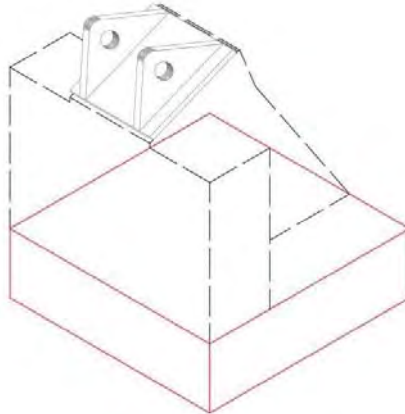


Figura 63.- Propuesta de cimentación. Una mayor superficie de contacto con el suelo (*color rojo*), brinda una mejor distribución de las cargas desde la parte superior de la estructura hacia el suelo. Dibujo del autor.

La forma inclinada en el centro de la zapata responde a las fuerzas que transmitirá los arcos a la cimentación, por lo que es necesario que resistan esos empujes, sin embargo, para evitar un futuro volteo de la zapata, se adosara un muro para generar un contrapeso, cuya altura de 0.70 m sumado a los 0.30 m de la base de la zapata, nos da un total de 1.00 m de profundidad.

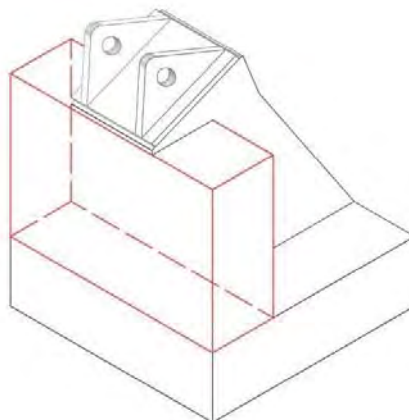


Figura 64.- Muro adosado en la cimentación. Al integrar este muro al sistema de cimentación (*color rojo*), se creara un contrapeso ante las fuerzas de empuje de los arcos que pueden producir un volteo. Dibujo del autor.

Producto de la unión de la base y el muro (dos prismas rectangulares) crean la forma volumétrica de un cubo abstraído. Al intersectar con la forma piramidal de la zapata donde se apoyaran los arcos, genera espacios o “vacíos” en la cimentación que pueden ser aprovechados para dotarlo de un mayor peso, ya que estos “huecos” contendrán el material de relleno de la cimentación (tierra). De esta forma no solo se garantiza la estabilidad de la cubierta ante el tipo de suelo en el que se desplantará, sino que sirva de lastre a la estructura ante las succiones a las que estará sometida.

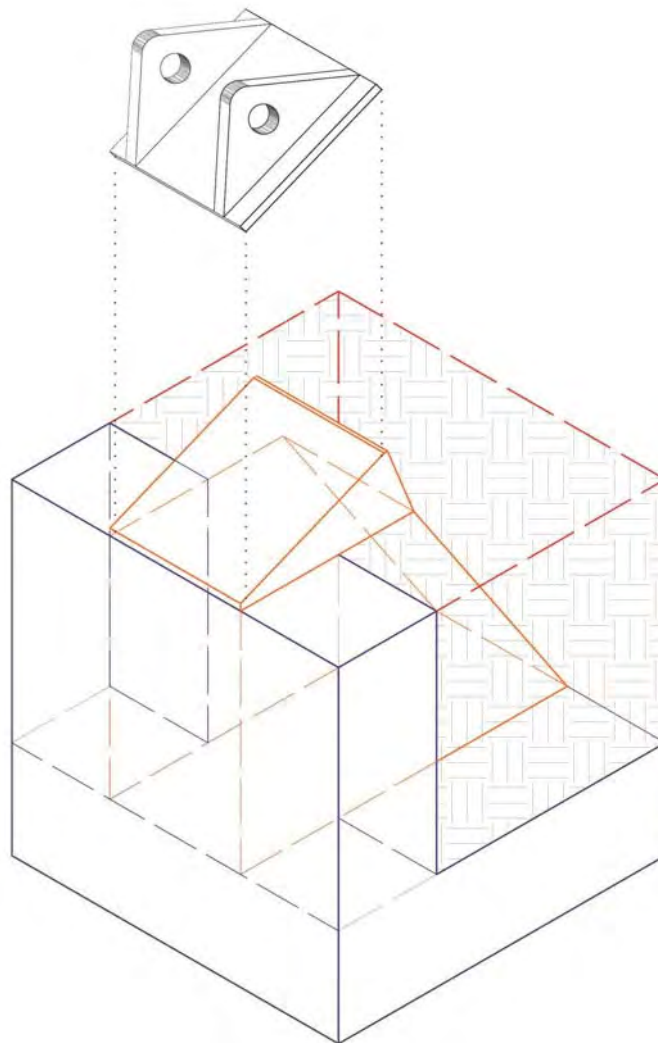
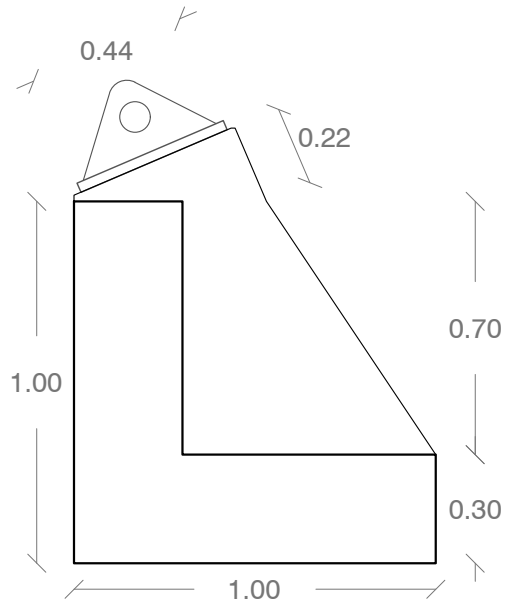


Figura 65.- Geometría de la cimentación. Como se mencionó anteriormente, la unión de los dos prismas rectangulares (la base y el muro de contrapeso) generan una forma en “L” (líneas en color azul) que asemeja a una sección de cubo (líneas de color rojo). La intersección con la forma piramidal donde se apoyaran los arcos (color amarillo) generan “huecos” que contendrán al material de relleno de la cimentación (líneas color gris), dejando la parte superior del sistema al exterior donde se ubica la placa, evitando que los arcos de madera tengan contacto con el suelo. Dibujo del autor.

Por último, se pondrá una interface de geo textil o hule para diferenciar y separar la cimentación del material arqueológico circundante (pisos) y evitar que el concreto pueda mezclarse y fraguarse con los materiales originales antes mencionados por si se decide en un futuro retirar la cubierta, sea fácil su remoción. Cabe agregar que al optar por articular la estructura con la cimentación, se evita la generación de momentos en esta parte en específico. El considerar un empotramiento comprometería a la subestructura arqueológica al tener que ampliar la sección de los arcos en su parte inferior y por consiguiente, un sistema de cimentación de mayores dimensiones.

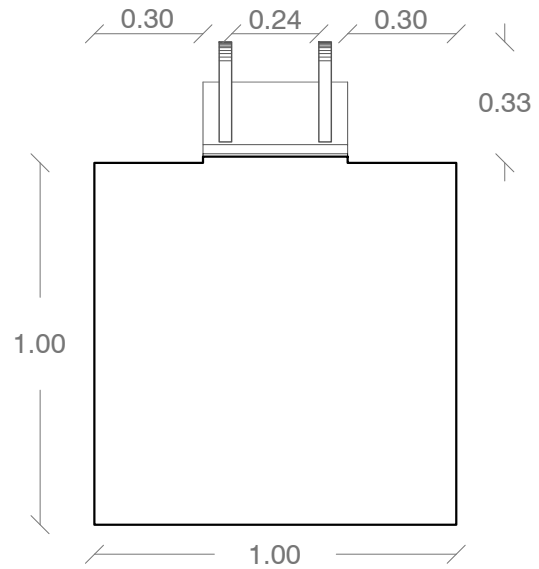
Se anexan la montea de la cimentación y un isométrico donde se podrá apreciar la descripción realizada en este apartado.

# Montea de la propuesta de cimentación para la cubierta del Edificio I.



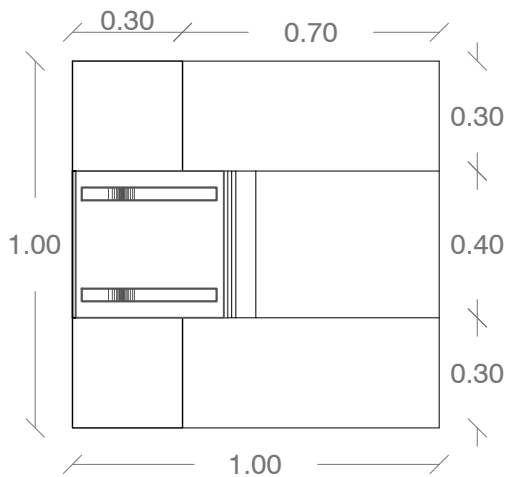
**Vista Lateral.**

Esc. 1:20. Cotas en metros.



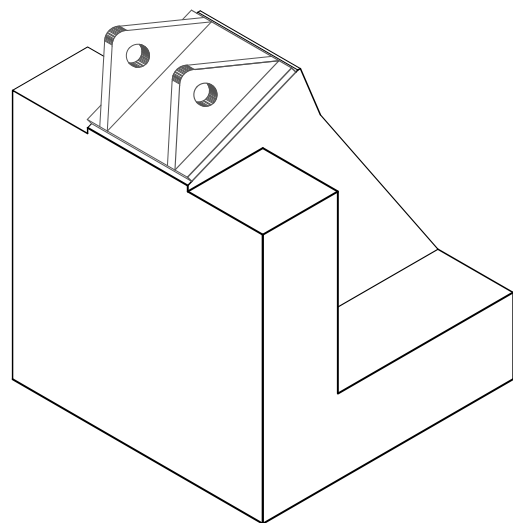
**Vista Frontal.**

Esc. 1:20. Cotas en metros.



**Vista Aérea.**

Esc. 1:20. Cotas en metros.



**Isométrico.**



## **Conclusiones.**

Para cerrar este trabajo sobre la propuesta estructural para el edificio I de El Tajín Veracruz, se hará un resumen de los alcances y contribuciones logrados por capítulo, así como las limitantes identificadas y las perspectivas o rumbos que pueden tomar este trabajo en futuras investigaciones.

### **Alcances.**

Las cubiertas para contextos arqueológicos es un tema que presentan una gran variedad de factores y elementos que intervienen en su planeación, diseño, construcción y supervisión. Para el caso del edificio I, primero se consideró los factores ambientales y geográficos, la descripción de la zona de monumentos arqueológicos y los antecedentes reportados en informes, donde se menciona la serie de eventos y dificultades que ha presentado la preservación del sitio y su pintura mural.

Identificado la problemática de la cubierta, se estableció los objetivos que fueron desde la consulta de normas, cartas y recomendaciones de profesionistas para el diseño y colocación de cubiertas, así como el estudio de casos de otros elementos de protección de para vestigios arqueológicos en diferentes partes del mundo. En este sentido, han sido diferentes los criterios sobre la colocación de cubiertas en base a las políticas nacionales como internacionales, sin embargo, existen puntos en común como **la reversibilidad, el enmarcar al sitio, mínimo mantenimiento y la integración al entorno**. Los casos de estudio, brindaron información útil, acerca de las consideraciones que se tomaron en cuenta en cada una de las fases de diseño y construcción. No existe como tal la “cubierta ideal” o “modelo” que pueda ser la referencia para futuras estructuras de protección, pero si casos de éxito que ayuden a entender el proceso efectuado para cumplir con las metas.

En base a la información obtenida y analizada, se hizo una primera propuesta mediante el uso de curvas planas. Gracias a su sencillez en su trazo (que es una de sus particularidades geométricas) representa una forma que pueda integrarse al contexto donde se encuentre. Para poder cumplir uno de los objetivos planteados al inicio, se

comprendió la naturaleza de las curvas planas y su desarrollo geométrico y numérico, con la finalidad de manipular las formas para obtener el diseño que cumpla con los requisitos establecidos.

Para el planteamiento del diseño, se basó en cuestiones de *intuición estructural* mediante el trazo geométrico de las curvas elípticas y la construcción de la maqueta de la estructura. Para desarrollar y ejercitar esta “intuición”, el uso de la geometría estructural y de nociones básicas de mecánica se vuelve fundamental, por consiguiente, antes de realizar algún análisis matemático, primero se comenzó con el ejercicio de la reflexión geométrica y mecánica que es una de las premisas de la Especialidad en Diseño de Cubiertas Ligeras.

Establecida la forma, se procedió a comprender la naturaleza de los materiales elegidos. Uno de las particularidades del proyecto, fue la poca información que se encontró sobre la madera. Aunque existe una bibliografía básica al respecto, esta es muy limitada y por lo general es procedente de otros países (principalmente de Estado Unidos). Resulta bastante curioso que en un país como México, exista poca información al respecto (y la que existe esta muy desactualizada) teniendo en cuenta que hay regiones donde existe madera de buena calidad para la construcción. **Posiblemente nuestra cultura constructiva que limita el uso de madera para acabados o cimbra y la falta de una normatividad que regule su producción y explotación de los recursos forestales, hace que no contemos con especificaciones sobre el material y tengamos que importarlo de otros países, donde existen normas, criterios, especificaciones y métodos de diseño y construcción con madera.**

Al usar arcos de forma elíptica, el concepto de sistemas funiculares tuvo que ser estudiado y comprendido para poder efectuar el ejercicio gráfico de funiculares de fuerzas, este nos dotó de información útil e inmediata sobre el comportamiento estructural ante esfuerzos internos (gravitacionales) y externos (viento). Sobre este último punto, la descomposición de vectores por método gráfico para analizar las fuerzas del viento y su influencia en el comportamiento estructural de nuestra cubierta,

facilitó el análisis y cálculo. La determinación numérica, sirvió para corroborar los resultados obtenidos por medio de la estática gráfica.

Este ejercicio obtuvo como resultado lo siguiente; **la geometría de las curvas planas y el uso de la estática gráfica pueden garantizar la estabilidad y resistencia estructural de la cubierta sin requerir el uso de apoyos intermedios, independientemente del material elegido para su construcción, cumpliendo con el principio de estructuras resistentes por forma.**

### **Contribuciones.**

El concepto de funiculares de fuerzas no es un tema innovador en esta trabajo terminal, sin embargo, resulta ser una reivindicación de este ejercicio gráfico, demostrando su vigencia y utilidad para el análisis simple del comportamiento estructural ante las cargas vivas, muertas y accidentales y su pre dimensionamiento.

Un aporte original de este trabajo, es la incorporación de los sistemas constructivos vernáculos como una alternativa para la construcción de cubiertas para sitios arqueológicos, en los cuales los presupuestos sean limitados, la zona arqueológica se encuentra enclavada en un sitio de difícil acceso o no se tenga una disponibilidad inmediata de materiales. Sin embargo, hay que ser cuidadosos en cómo se maneja el tema. No se trata de simplemente copiar un sistema constructivo y/o forma sino el incorporar técnicas, habilidades o materiales que puedan ser útiles para los proyectos. **Hay que reconocer que si bien estos sistemas han perdurado por décadas, tienen sus limitantes y es ahí donde el arquitecto y sobre todo el especialista, puede incorporar los conocimientos de geometría y mecánica para realizar propuestas eficientes con el mínimo de recursos.**

### **Limitantes.**

Este trabajo se ubicó, suponiendo el hipotético caso de un cambio de cubierta, en la fase de diseño y pre dimensionamiento de la estructura. Es por esto que a pesar de los avances obtenidos, queda pendiente algunos temas relacionados con la construcción de la cubierta, es decir, en base a los resultados conseguidos por medio del uso de los

funiculares, el siguiente paso consistiría en concretar dichos cálculos en el diseño de elementos constructivos como las uniones de las piezas de madera y bambú, los módulos de ensamblaje para las alfajillas con respecto a los arcos, el tipo de tejido de la palma, la cantidad y diámetro de los pernos entre otros aspectos técnicos como la identificación precisa de las especies de madera y bambú ( léase sus nombres científicos).

Otra limitante en este trabajo es el alcance del tema; solo se contempló el diseño y cálculo de la cubierta de protección teniendo en cuenta que no está permitido el ingreso al público a la subestructura. Si bien al interior de la estructura de protección se garantiza la fácil movilidad al personal encargado de los trabajos de conservación de los acabados arquitectónicos *in situ*, no significa que pueda recibir a un mayor número de personas.

### **Perspectivas.**

En relación con el apartado anterior, el trabajo terminal puede continuar desarrollándose en el ámbito de la investigación tecnológica, al estudiar y diseñar las piezas que compondrían a la cubierta, creando un sistema estructural por forma que tenga la facilidad de poder colocarse y repararse en un tiempo menor en comparación con otras estructuras de protección. Siguiendo esa línea tecnológica, la tesina puede orientarse a la búsqueda de la forma mediante el uso de programas de diseño paramétrico cuyos valores sean tomados en base a la ubicación geográfica y ambiental de la subestructura arqueológica a proteger, como la temperatura, la humedad relativa, la precipitación pluvial, los vientos dominantes, la orientación y los elementos o acabados a proteger, con el objetivo y meta de generar formas que no solo respondan a las fuerzas actuantes sobre la estructura, sino que garanticen un equilibrio climático que no altere a la pintura mural, escultura, pisos o aplanados y/o relieves adosados al elemento arquitectónico.

Otro rumbo que puede tomar este tema, es el concebir cubiertas cuyo diseño no solo garantice su protección, sino que incluyan y ofrezcan una infraestructura para realizar recorridos (andadores, rampas, pisos translucidos) ligado a una museografía que

prepare al visitante o turista en su visita al sitio, a poder contextualizar y entender mejor las zonas arqueológicas y sensibilizarlo en la importancia de preservar los elementos decorativos que por cuestiones de conservación se encuentra bajo protección.

Por último, al considerar el uso de sistemas constructivos vernáculos o autóctonos, se puede hacer una labor antropológica que no solo se dedique a la mera apropiación y reinterpretación sino que involucre a la población en la preservación del patrimonio, lo que podría generar un vínculo entre las comunidades aledañas con los sitios, cuya relación entre ambos actores desgraciadamente, ha estado plagada de conflictos donde ambas partes salen perjudicadas.

Ante el prejuicio de ser una arquitectura de pobres, sumando a la creciente migración de la gente de la región a las ciudades en busca de una fuente de empleo o alternativas para la educación, hacen que adquieran un estilo de vida diferente al de su entorno y por consiguiente olviden o renieguen de su cultura. **El Incorporar y reconocer que el uso de las técnicas constructivas vernáculas es valioso y útil para buscar soluciones que puedan resolver la problemática actual de cubiertas, hará que revaloren estos conocimientos y por consiguiente los preserven.** Ante este hecho, el tema de este trabajo terminal puede también estar ligado al área de las humanidades en un futuro.

## Índice de particulares.

### Índice de gráficos.

#### III.- Sistema estructural. III.2.-Sistema funicular.

##### *III.2.3.- Funicular de fuerzas.*

**Elipse 1.** Polígono vectorial. Fuerzas Gravitacionales ( $100 \text{ kg/m}^2$ ).

**Funicular de fuerzas.** Fuerzas Gravitacionales ( $100 \text{ kg/m}^2$ ). Elipse 1.  $8 \times 15 \text{ m}$ .

**Elipse 2.** Polígono vectorial. Fuerzas Gravitacionales ( $100 \text{ kg/m}^2$ ).

**Funicular de fuerzas.** Fuerzas Gravitacionales ( $100 \text{ kg/m}^2$ ). Elipse 2.  $8 \times 15.76 \text{ m}$ .

#### III.- Sistema estructural. III.3.- Fuerzas internas del arco.

##### *III.3.2.- Momentos del arco. III.3.2.- Método gráfico.*

**Gráfica de momentos. Elipse 1.** Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.

**Gráfica de momentos. Elipse 2.** Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.

#### III.- Sistema estructural. III.3.- Fuerzas internas del arco.

##### *III.3.3.- Esfuerzos de la sección. III.3.3.b.- Esfuerzos normales **N** y tangenciales **Q**.*

**Gráfica de momentos. Elipse 1.** Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.

**Gráfica de compresiones. Elipse 1.** Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.

**Gráfica de cortantes. Elipse 1.** Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.

**Gráfica de momentos. Elipse 2.** Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.

**Gráfica de compresiones. Elipse 2.** Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.

**Gráfica de cortantes. Elipse 2.** Análisis de fuerzas gravitacionales presentes en el arco.

#### III.- Sistema estructural. III.3.- Fuerzas externas del arco.

##### *III.4.5.- Determinación del momento máximo.*

**Polígono vectorial de fuerzas verticales por viento. 1er polígono de fuerzas.**

**Polígono vectorial de fuerzas verticales por viento. 2do polígono de fuerzas.**

**Polígono vectorial de fuerzas verticales por viento. 3er polígono de fuerzas.**

**Funicular de fuerzas.** Fuerzas verticales por viento elipse 1.

**Gráfica de momentos Elipse 1.** Análisis de fuerzas verticales por viento presentes en el arco.

**Polígono vectorial de fuerzas verticales por viento. 1er polígono de fuerzas.**

**Polígono vectorial de fuerzas verticales por viento.** 2do polígono de fuerzas.

**Polígono vectorial de fuerzas verticales por viento.** 3er polígono de fuerzas.

**Funicular de fuerzas.** Fuerzas verticales por viento elipse 2.

**Gráfica de momentos Elipse 2.** Análisis de fuerzas verticales por viento presentes en el arco.

**Polígono vectorial y Funicular de fuerzas horizontales por viento.** Elipse 1.

**Gráfica de momentos Elipse 1.** Análisis de fuerzas horizontales por viento presentes en el arco.

**Polígono vectorial y Funicular de fuerzas horizontales por viento.** Elipse 2.

**Gráfica de momentos Elipse 2.** Análisis de fuerzas horizontales por viento presentes en el arco.

## **Índice de tablas.**

**Tabla 1.-** Resultados obtenido en  $X$  a partir de la sustitución en  $y^2$  Elipse 1.

**Tabla 2.-** Resultados obtenido en  $X$  a partir de la sustitución en  $y^2$  Elipse 2.

**Tabla 3.-** Ventajas y desventajas de las cubiertas hechas con materiales orgánicos.

**Tabla 4.-** Tipos de la madera según su composición y morfología.

**Tabla 5.-** Esfuerzos admisibles del Bambú.

**Tabla 6.-** Momentos gravitacionales.

**Tabla 7.-** Líneas Tangentes de la Elipse 1 y Elipse 2.

**Tabla 8.-** Calculo de momentos de la elipse 1 y elipse 2 por fuerzas gravitacionales.

**Tabla 9.-** Coeficientes de presión  $C_p$  para cubiertas en arco.

**Tabla 10.-** Tipo de acción y dirección del viento.

**Tabla 11.-** Valores máximos del momento horizontal por viento.

## Índice de planos

### Planos I

#### Planteamiento del problema. Antecedentes

*Descripción del sitio arqueológico.*

**L-00** Plano de sitio. Arq. Hernández Estrada, Raúl A. / Arq. Magdaleno Olmos, Roberto. Escala 1:2,500. Veracruz, México. CNCPC-INAH. 2010.

**L-01** Plano de ubicación Tajín Chico. Arq. Hernández Estrada, Raúl A. / Arq. Magdaleno Olmos, Roberto. Escala 1:2,500. Veracruz, México. CNCPC-INAH. 2010.

**L-02** Plano de planta arquitectónica. Arq. Hernández Estrada, Raúl A. / Arq. Magdaleno Olmos, Roberto. Escala 1:75. Veracruz, México. CNCPC-INAH. 2010.

**L-03** Plano de cortes Edificio I. Arq. Hernández Estrada, Raúl A. / Arq. Magdaleno Olmos, Roberto. Escala 1:75. Veracruz, México. CNCPC-INAH. 2010.

**L-04** Plano de secciones Edificio I. Arq. Hernández Estrada, Raúl A. / Arq. Magdaleno Olmos, Roberto. Escala 1:75. Veracruz, México. CNCPC-INAH. 2010.

### Planos II

#### Proyecto arquitectónico. Descripción general de la propuesta.

**A-00** Plano de ubicación.

**A -01** Plano de cubierta (estructural).

**A -02** Plano de cortes.

**A -03** Plano de alzados.

### Planos III

#### Sistema Estructural. Propuesta de cimentación.

Montea de la propuesta de cimentación para la cubierta del Edificio I



## Índice de figuras

**Figura 1.-** Mapa general del sitio arqueológico. Croquis tomado de Ladrón de Guevara, 2010, pág. 53.

**Figura 2.-** *Izquierda:* Vista aérea de la zona residencial “Tajín Chico”. Imagen satelital consultada el 18 de marzo del 2019.

*Derecha:* Vista actual de la subestructura. Foto cortesía de la CNCPC-INAH.

**Figura 3.-** Forma antropomorfa reptando. Foto cortesía de la CNCPC-INAH.

**Figura 4.-** Vista de Tajín Chico desde la pirámide de Nichos. Foto J.L. Morales. Temporada 1992. Fototeca de la CNCPC-INAH.

**Figura 5.-** Imágenes donde se observan los daños que presentó la cubierta en 2012. Fotos: Benjamín Blaisot.

**Figura 6.-** Imagen a partir de una nube de puntos donde se marca la ubicación de los apoyos de la cubierta. Cortesía de ZMAET- CNCPC/INAH.

**Figura 7.-** *Izquierda:* Modelo 3D de la cubierta. *Derecha:* Estado actual sobre el sitio arqueológico. Imagen tomada de Rizzi, 2011, pág. 216-217.

**Figura 8.-** Vista 3D del proyecto. Imagen tomada de Rizzi, 2011, pág. 220.

**Figura 9.-** Vista 3D de la cubierta para la escalinata. Imagen tomada de Rizzi, 2011, pág. 223.

**Figura 10.-** Primer acercamiento mediante el uso de arcos parabólicos. Dibujo del autor.

**Figura 11.-** Obtención de la elipse mediante el corte a un cono con un plano oblicuo a su eje de simetría. Dibujo del autor.

**Figura 12.-** Trazo de la elipse que paso por los puntos A, B y C. Dibujo del autor.

**Figura 13.-** Giro de la elipse. Dibujo del autor.

**Figura 14.-** Puntos sobre la curva elíptica. Dibujo del autor.

**Figura 15.-** Prolongación e intersección de líneas paralelas a las ordenadas y líneas paralelas a las abscisas. Dibujo del autor.

**Figura 16.-** Ejemplo de una superficie cilíndrica. Modelo 3D del autor.

**Figura 17.-** Cortes y sección de la primera propuesta de cubierta. Dibujos del autor.

**Figura 18.-** Diferentes vistas de la maqueta de la primera propuesta. Fotos del autor.

**Figura 19.-** Modelo 3D esquemático. Dibujo del autor.

**Figura 20.-** Nuevo planteamiento estructural. Dibujo del autor.

**Figura 21.-** Vista lateral de la maqueta. Fotos del autor. Fecha: 2018.

**Figura 22.-** Vista frontal de la maqueta. Fotos del autor. Fecha: 2018.

**Figura 23.-** Vista aérea de la maqueta. Fotos del autor. Fecha: 2018.

**Figura 24.-** Construcción de una casa típica de la región. Fotos del autor. 2015.

**Figura 25.-** Daño del bambú en la unión de elementos. Fotografía Benjamín Blaisot.

**Figura 26.-** Detalle de palma recién cortada. Fotografía del autor. Fecha: 2015.

**Figura 27.-** Esquemas de sistemas funiculares. Dibujos realizados por el autor tomados de Moore, 2000, pág. 165.

**Figura 28.-** Reacciones de empuje en diferentes tipos de arco. Dibujos realizados por el autor tomados de Moore, 2000, pág. 165.

**Figura 29.-** Primer trazo del funicular de fuerzas de la elipse 1. Dibujo del autor.

**Figura 30.-** Segundo trazo del funicular de fuerzas de la elipse 1. Dibujo del autor.

**Figura 31.-** Tercer trazo del funicular de fuerzas de la elipse 1. Dibujo del autor.

**Figura 32.-** Sección del tercer trazo del funicular de fuerzas de la elipse 1. Dibujo del autor.

**Figura 33.-** Polígono de fuerzas de la elipse 1 con foco correspondiente al tercer funicular. Dibujo del autor.

**Figura 34.-** Fuerzas distribuidas sobre el arco. Dibujo del autor.

**Figura 35.-** Cota que marca las suma de fuerzas verticales ubicadas dentro del polígono de fuerzas. Dibujo del autor.

**Figura 36.-** Grafica de las áreas en el arco. Dibujo del autor.

**Figura 37.-** Esquema que representa los esfuerzos a los que se encuentra sometido nuestra sección. Dibujo del autor.

**Figura 38.-** Dibujo de la elipse ubicando los focos de la elipse, radios vectores, subtangente TQ, tangente CT, subnormal NQ y normal CN. Dibujo del autor tomado de Academia Hütte, 1938, pág. 123.

**Figura 39.-** Angulo formado entre la Tangente CT que toca cualquier punto de la curva y la línea del eje X. La cota color naranja nos muestra la distancia numérica de CT. Dibujo del autor.

**Figura 40.-** Angulo formado entre la Tangente CT que toca cualquier punto de la curva y la línea paralela al eje Y. Dibujo del autor.

**Figura 41.-** La inestabilidad de la atmosfera baja, la forma, el tamaño, la velocidad y dirección del viento pero principalmente por la forma y tamaño del edificio, determinan la magnitud de la fuerza de los remolinos o vórtices. Dibujo del autor tomado de García Chávez & Fuentes Freixanet, 2005, pág. 21.

**Figura 42.-** Efecto de la topografía sobre el viento. Dibujos del autor tomados de García Chávez & Fuentes Freixanet, 2005, pág. 23.

**Figura 43.-** La transición entre vientos ascendentes y descendentes. Dibujos del autor tomados de García Chávez & Fuentes Freixanet, 2005, pág. 28.

**Figura 44.-** El sistema de circulación de aire. Dibujos del autor tomados de García Chávez & Fuentes Freixanet, 2005, pág. 29.

**Figura 45.-** Formación de vórtices. Dibujo hecho por el autor tomado de Meli Piralla, 2016, pág. 211.

**Figura 46.-** Presiones ejercidas en un arco. Dibujo del autor.

**Figura 47.-** Sentido que toman las fuerzas. Dibujo del autor.

**Figura 48.-** Descomposición de las presiones. Dibujo del autor.

**Figura 49.-** Descomposición de las succiones. Dibujo del autor.

**Figura 50.-** Descomposición de las succiones. Dibujo del autor.

**Figura 51.-**Arco con presiones y succiones producto de las fuerzas horizontales por viento. Dibujo del autor.

**Figura 52.-** Polígono vectorial y funicular de fuerzas. Dibujo del autor.

**Figura 53.-** Posición de la resultante  $R_i$ . Dibujo del autor.

**Figura 54.-** Ubicación de los puntos E y D. Dibujo del autor.

**Figura 55.-** Polígono vectorial y funicular de fuerzas. Dibujo del autor.

**Figura 56.-** Ubicación del punto F. Dibujo del autor.

**Figura 57.-** La resultantes  $R_i$  y  $R_d$  con sus respectivas componentes. Dibujo del autor.

**Figura 58.-**Colocación de las resultantes  $R_{a_i}$ ,  $R_{b_i}$ ,  $R_{a_d}$  y  $R_{b_d}$  en los puntos A y B. Dibujo del autor.

**Figura 59.-**Ubicación del polo mediante la intersección de la Reacción Total A y B. Dibujo del autor.

**Figura 60.-** Tercer funicular de fuerzas gravitacionales. Dibujo del autor.

**Figura 61.-** Tercer funicular de fuerzas verticales por viento. Dibujo del autor.

**Figura 62.-** Tercer funicular de fuerzas horizontales por viento. Dibujo del autor.

**Figura 63.-** Propuesta de cimentación. Dibujo del autor.

**Figura 64.-** Muro adosado en la cimentación. Dibujo del autor.

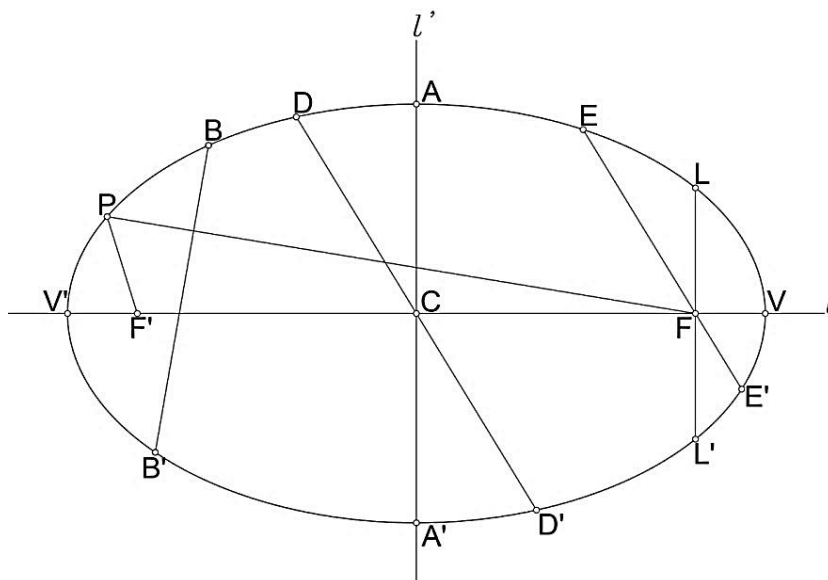
**Figura 65.-** Geometría de la cimentación. Dibujo del autor.

## Anexos

### Anexo 1. La elipse y sus componentes.

Las partes que componen a la elipse son las siguientes<sup>61</sup>:

- Los puntos fijos **F** y **F'** son los *focos*.
- Una línea horizontal que pasa por los dos focos se conoce como *eje focal* ( $l$ ).
- La misma línea horizontal, corta a la elipse en dos puntos **V** y **V'** llamados *vértices*.
- La línea entre los dos vértices **V** y **V'** se designa con el nombre de *eje mayor*.
- El punto **C** o *centro*, es el punto medio de la recta que une a los dos focos.
- El *eje normal* ( $l'$ ) es una línea vertical perpendicular al eje focal y que pasa por el centro.
- El *eje normal* ( $l'$ ) corta a dos puntos de la elipse. El segmento que se forma entre esos dos puntos se conoce como *eje menor*.
- Un segmento de línea que una a los puntos **B-B'** cualesquiera de la elipse, se conoce como *cuerda*.
- Si una cuerda **E-E'** pasa por uno de los focos de la elipse, se llama *cuerda focal*.
- Cuando una *cuerda focal* es paralela al *eje focal* ( $l$ ), se conoce como *lado recto*.
- Cuando una cuerda pasa por **C**, se llama un *diámetro*.
- Un punto cualquiera **P**, cuando se une a los focos mediante una recta formando el segmento **FP** y **F'P**, se llama *radios vectores* de **P**.



Componentes de la elipse. Dibujo del autor en base al esquema de Lehmann 1980:173.

<sup>61</sup> Clasificación tomada de (Lehmann, 1980, págs. 173-174)

## Anexo 2. Regla para Clasificar Estructuralmente Madera de Latifoliadas o Tropicales<sup>62</sup>.

CONCEPTO	TOLERANCIAS
<b>Acanelamiento</b>	Menor al 2% del ancho de la pieza
<b>Arqueamiento</b>	Menos de 2.0 cm por cada 2 m de longitud para grosor de 3.8 cm y 1.0 cm para madera de 8.7 cm de grueso
<b>Encorvadura</b>	Menos de 1.0 cm por cada 2 m de longitud en piezas de 8.7 cm de ancho. En mayores a 8.7 cm se permite 0.5 cm.
<b>Torcedura</b>	Menos de 1.5 mm por cada 25 mm de ancho, en una longitud de 2 m.
<b>Acebolladura</b>	En una cara hasta $\frac{1}{4}$ de la longitud, con una profundidad menor de 3 mm.
<b>Arista faltante o gema</b>	Una arista y menos de $\frac{1}{4}$ del ancho o grosor.
<b>Grietas</b>	La suma de sus profundidades debe ser menor a $\frac{1}{4}$ del espesor de la pieza.
<b>Pendiente de la fibra</b>	Menor a 1:8 en cualquier parte de la pieza.
<b>Manchas</b>	Se aceptan si no son cambios de color por pudrición.
<b>Nudo hueco</b>	No se permite en los cantos. En las caras el menor a 4 cm de diámetro o $\frac{1}{6}$ de ancho.
<b>Nudo sano</b>	No se permite en los cantos. En las caras el menor de 6 cm de diámetro o $\frac{1}{4}$ de ancho.
<b>Agujeros de larvas</b>	Hasta dos agujeros en un cuadro de 6 x 6 cm.
<b>Ataque de insectos</b>	Hasta 10 perforaciones en un cuadro de 6 x 6 cm, sin infestación activa.
<b>Rajaduras</b>	En un extremo y longitud menor o igual a 1.5 veces el ancho de la pieza.
	Se permite solamente en un extremo y de longitud menor a 1.5 veces el ancho de la pieza. No se permite en las aristas.
<b>NO SE PERMITEN:</b>	
Duramen quebradizo, Fallas de Compresión, Médula inclinada, Nudos arracimados y Pudrición.	

<sup>62</sup> Tabla tomada de Comisión Forestal de America del Norte (COFAN), 1994, pág. 52.

## Bibliografía

- Academia Hütte. (1938). *Manual del Ingeniero* (Segunda Edición ed., Vol. Tomo I). (R. Hernández, M. Company, Edits., R. Hernández, & M. Company, Trads.) Barcelona: Gustavo Gilli.
- Arnal Simón, L., & Betancourt Suárez, M. (2007). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. México D.F.: Trillas.
- Ber, F. P., Johnston, E., & Mazurek, D. (2017). *Mecánica Vectorial para Ingenieros. Estática*. (Undécima ed.). (S. Villalobos, & J. E. Murrieta, Trads.) Ciudad de México: McGraw Hill.
- Blaisot, B. J.-M. (2014). *Proyecto de Sutipución de la Palapa del Edificio Ien la Zona Arqueológica El Tajín, Veracruz*. Veracruz, México: CNCPC-ZMAET-INAH.
- Comisión Asesora Permanente para el Regimen de Construcciones Sismo Resistentes. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Comisión Federal de Electricidad. (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles*. México, México: CFE - Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Comisión Forestal de America del Norte (COFAN). (1994). *Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera*. México D.F., México: Consejo Nacional de la Madera en la Construcción, A.C.
- Díaz-Berrio Fernández, S. (2005). *Comentarios a la Carta Internacional de Venecia*. (Segunda ed.). México DF: UAM-Xochimilco.
- García Chávez , J. R., & Fuentes Freixanet, V. (2005). *Viento y Arquitectura* (Tercera Edición ed.). D.F., México: Trillas.
- Ladrón de Guevara, S. (2010). *El Tajín. La urbe que representa el orbe*. (A. Hernández Chávez, & E. Matos Moctezuma, Edits.) México D.F., México: Colegio de México / Fondo de Cultura Económica.
- Lehmann, C. H. (1980). *Geometría Analítica*. México: Limusa.
- López Carmona, F., & Hernández Hernández, A. (2017). *Proyecto de corrección geométrica. Catedral y Sagrario Metropolitanos*. (Primera edición ed.). Ciudad de México: FA - UNAM.
- Medina Gonzáles, T. (2011). Techumbres para la Conservación del Legado Escultorico de la Zona Arqueológica de Copán , Honduras: Lineamientos, Evaluación y una Propuesta Metodologica. En *Cubiertas Arquitectónicas en Contextos Arqueológicos* (págs. 179-203). Mexico DF: Fomento Cultural Banamex.
- Meli Piralla, R. (2016). *Diseño Estructural*. México DF: Limusa.
- Minke, G. (2012). *Building with Bamboo. Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Alemania: Birkhauser.
- Moore, F. (2000). *Comprensión de las estructuras en arquitectura* (1er. Edición. ed.). (J. León Cárdenas, Trad.) México DF.: McGraw Hill.

- Morante López, R. B. (2010). *La pirámide de los Nichos de Tajín. Los códigos del tiempo.* (Primera edición ed.). Ciudad de México: UNAM - IIE - IIA.
- Ortiz Bobadilla, I. (2015). *Madera. Predimensionamiento de alfarjes y armaduras de madera para arquitectos.* (primera ed.). México DF, México: Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco.
- Prieto, Valeria. (1994). *Vivienda Campesina en México* (2da. Edición. ed.). México DF.: Secretaria de Turismo, SEDESOL, INFONAVIT.
- Rincón Medina, J. L. (2014). Los funiculares como generadores de formas estructurales ligeras. En V. Autores, J. G. Oliva Salinas, & E. Valdéz Olmedo (Edits.), *Tecnología. Una contribución sistemática de acción, reflexión y análisis.* (Vol. VI, págs. 205-211). México DF: FA-UNAM.
- Rivero Weber, L., Robles García, N. M., Guilliem Arroyo, S., & Rivero Chong, R. (2011). Lineamientos Técnicos para la colocación de Cubiertas Arquitectónicas en Contextos Arqueológicos. En *Cubiertas Arquitectónicas sobre Contextos Arqueológicos.* (págs. 22-34). Ciudad de México: Fomento Cultural Banamex.
- Rizzi, G. (2011). Colocación de Cubiertas en zonas Arqueológicas: Un Problema Arquitectónico y de Conservación. En *Cubiertas Arquitectónicas en Contextos Arqueológicos* (págs. 213-225). Mexico DF: Fomento Cultural Banamex.
- Robles Fernández-Villegas, F., & Echenique-Manrique, R. (1983). *Estructuras de Madera* (Primera preedición. ed.). México DF, México: Limusa.
- Sánchez Bonilla, J. (1996). *Informe del Palacio de las pinturas, edificio I. Zona Arqueológica de el Tajín, Veracruz 1992 - 1996.*
- SEDUVI. (2017). Normas Tecnicas Complementarias Para Diseño por Sismo. En SEDUVI, *Gaceta Oficial de la Ciudad de México.* Ciudad de México: Gobierno de la Ciudad de México.
- SEDUVI. (15 de Diciembre de 2017). Normas Tecnicas Complementarias para Diseño por Viento. En *Gaceta Oficial de la Ciudad de México.* Ciudad de México: Gobierno de la Ciudad de México.
- Torroja Miret, E. (2007). *Razón y Ser de los Tipos Estructurales* (Vol. 87). (J. Torroja, Ed.) Madrid, España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Van Lengen, J. (1983). *Manual del Arquitecto Descalzo. Como Construir Casas y Otros Edificios.* Mexico DF: Concepto.
- Villalobos Jaramillo, J. (2011). Funcionalidad de las cubiertas en zonas arqueológicas. En *Cubiertas Arquitectónicas en Contextos Arqueológicos.* (Primera ed., págs. 39-58). México DF: Fomento Cultural Banamex A.C.