1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El bambú nos fascinó desde que lo vimos por la primera vez. Su estética, su forma extraordinaria, sus secretos y su gran potencial nos motivaron a acercarnos a él. Además, sólo pocos lo aplican para estructuras modernas.
El bambú es uno de los materiales usados desde la más remota antigüedad por el hombre para aumentar su comodidad y bienestar. En el mundo de plástico y acero de hoy, el bambú continúa aportando su centenaria contribución y aun crece en importancia. Los programas internacionales de cooperación técnica han reconocido las cualidades excepcionales del bambú y están realizando un amplio intercambio de variedades de esa planta y de los conocimientos relativos a su empleo.
En seis países latinoamericanos, varios asiáticos y cada vez más en el continente europeo se adelantan hoy proyectos destinados a ensayar y seleccionar variedades sobresalientes de bambú recoleccionadas en todo el mundo, y también a determinar al lugar potencial de ese material en la economía locales.
Estos proyectos, que ahora forman parte del programa de cooperación técnica del desarrollo del bambú han venido realizándose durante varios años y algunos de ellos han llegado ya a un grado de desarrollo en el que la multiplicidad de usos del bambú ha llegado a ser una estimulante realidad.

Pero justamente hoy en día se necesita el desarrollo técnico de los recursos naturales y renovables para poder construir de una manera sostenible que nos permita una calidad de vida a largo tiempo. Esta investigación quiere participar en la búsqueda de encontrar nuevas formas para el uso del bambú porque creciendo rápido y siendo muy resistente, el bambú es muy competitivo con respecto a otros materiales.
La idea principal de esa investigación es aplicar al bambú las técnicas modernas de estructuras livianas, espaciales y flexibles del acero o la madera.
De allí es que decidimos investigar sistemas estructurales que respondan a las siguientes pautas de diseño:

* Aprovechamiento de la longitud y flexibilidad natural del bambú
* Control de su curvatura
* Aumento de la rigidez flexional
* Superación de la escala natural del material para salvar grandes luces
* Posibilidad de generación de diferentes configuraciones espaciales
* Utilización de materiales de bajo costo y fácil obtención
* Empleo de mano de obra no especializada.

1.1 OBJETIVOS

- Obtener toda la bibliografía posible para comprender la cultura del bambú durante su historia.
- Compilar los aspectos generales acerca del bambú colombiano, *Guadua angustifolia,* sus propiedades físicas y mecánicas, proceso de cultivo, producción, usos y aplicaciones.
- Realizar una investigación sobre como se va a realizar la vuelta. Los métodos usados para trazar su superficie, su cuerpo, y su proceso constructivo. Comprender la formación de esta vuelta a realizar en el caso práctico tanto teóricamente como numéricamente.
- Analizar como trabaja la vuelta armada con bambú guadua, sus reacciones, sus puntos críticos y sus deformaciones.
- Obtener posibles soluciones constructivas en el caso de que la vuelta, por las cargas y empujes que recibirá, no soporte bien o flecha demasiado.

1.2 METODOLOGIA DE TRABAJO

Para realizar el proyecto, primeramente hemos tenido que documentarnos al máximo sobre la cultura del bambú durante su historia. De esta forma hemos podido trabajar mejor para entender cada punto a tratar. Sabíamos que en Europa no es precisamente el lugar donde el bambú predomine, pero cada vez va ganando más terreno en la arquitectura sostenible.

Posteriormente nos salió la posibilidad de realizar un estudio in situ de una vuelta que se iba a construir cerca de Girona, y que iba a ser dirigida como arquitecto por el Profesor Gabriel Barbeta.

Hemos realizado un seguimiento de obra minucioso de la vuelta armada con bambú guadua y hemos analizado como trabaja el material, sus reacciones, sus entregas y todo lo que está relacionado a la formación de la vuelta estructuralmente.

Finalmente hemos analizado todos los datos obtenidos tanto de forma numérica con un programa de cálculo estructural, como de la formación teórica de la vuelta.

1.3 AGRADECIMIENTOS

En los casi últimos cinco años de nuestras vidas que han transcurrido estudiando en Girona, estamos a punto de culminar una meta personal, en estos instantes muchas cosas pasan por nuestra mente. En primer lugar queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a nuestras familias por el apoyo mostrado y a todas las personas que de una u otra forma han ayudado para que este sueño sea una realidad.

A los tutores del proyecto Xavier Vinyoles i Miquel Llorenç, por su invaluable aporte en el proceso de investigación y enfoque dado al trabajo, por su disposición y sobre todo por su paciencia.

Al arquitecto Gabriel Barbeta por su interés en el presente trabajo, por la documentación aportada y por su tiempo para las tutorias imprescindibles para nuestra comprensión. Queremos destacar que sin los aportes y puntos de vista de muchas personas, con las que tuvimos la oportunidad de compartir en Maçanet de la Selva durante el proceso de construcción de la vuelta, hubiera sido muy difícil llevar a feliz termino el proyecto, al constructor y jefe de obra Xavi Puig, a los obreros Gica Cristea, Nicola Stancioiu, Mirel Petre y en general a todas las personas que nos aportaron de alguna manera y que consideramos importante mencionarlas.

Gracias.

1.4 PRECEDENTES DE LOSAS ARMADAS DE BAMBÚ

Posiblemente los primeros precedentes que tenemos de losas gunitadas con bambú, serían los entrepisos que se hacían antiguamente, y que todavía son vigentes en algunos lugares del mundo, básicamente en países en vías de desarrollo, hechos a base de una estructura de madera o bambú, con recubrimiento de una capa de paja y ramas con tierra encima.

Por lo que sabemos, fue después de la Segunda Guerra Mundial, en la República Democrática Alemana, se comenzó a estudiar de una manera científica las propiedades de las tierras estabilizadas y los gunitados de tierra, barro y paja para configurar elementes horizontales, como consecuencia de la escasez de materiales de construcción que había y la gran necesidad de reconstruir un país devastado por la guerra

Los estudios analizados de noticias tratan de elementos prefabricados (dinteles, entrebigados y paneles) de tierra estabilizada con paja y reforzados con bastones de madera de 3cm. de diámetro.

En concreto, se trataba de tres tipos de elementos diferentes:
-Paneles para la formación de tabiques con encajes de 100 x 25cm.
-Dinteles de puertas y ventanas de hasta 1.2m. de luz.
-Entrebigados para forjados de 70 x 32 x 11cm.

El tratamiento realizado era sumergir dentro del agua o del fango los materiales.
Con los años fue creciendo el uso del bambú como material estructural, principalmente en las regiones menos desarrolladas, hasta llegar al S.XXI, cuando está tomando un papel importante en la arquitectura sostenible con nuevos proyectos ilusionantes e innovadores.

2-LA GUADUA ANGUSTIFOLIA

2. LA *GUADUA ANGUSTIFOLIA* "El Bambú Colombiano"

Guadua angustifolia

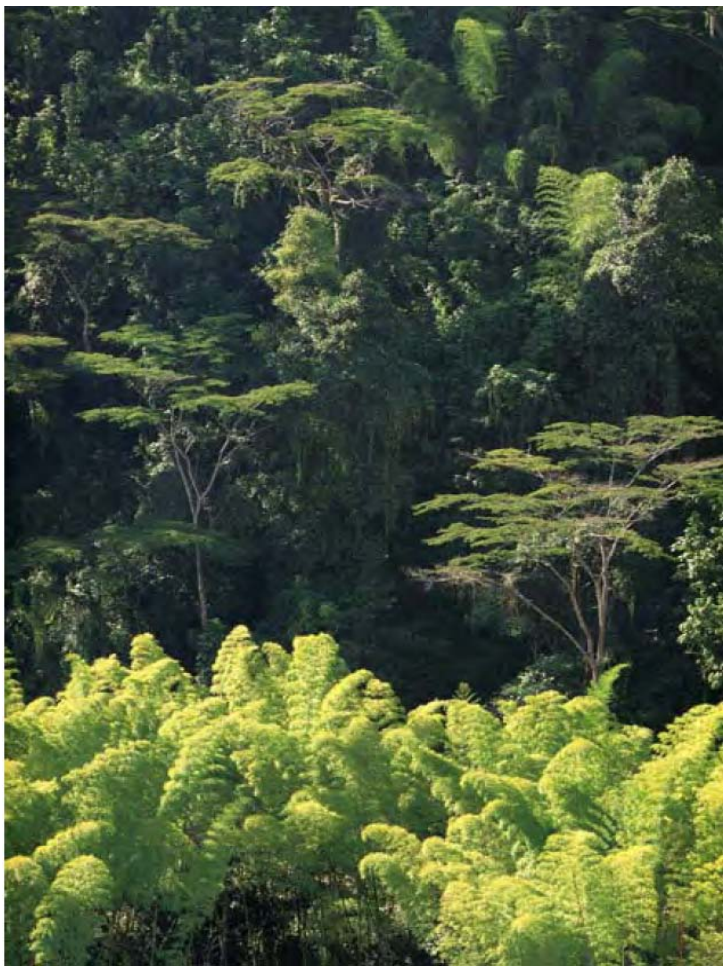


Foto 1 - Cultivo de guadua en Quindio (Colombia)

El bambú ha sido desde siglos pieza vital muy importante para muchos pueblos en su desarrollo. Países de todo el mundo desde Filipinas, China, Canadá, Colombia, Senegal o Francia. Sin este recurso el desarrollo de muchos de estos países y alrededores habría sido totalmente diferente. Aunque se tenga referencia sobre su uso principal en territorios menos desarrollados, existen cada vez más las construcciones sustentadas con este material natural, ecológico y denominado como el acero vegetal. La guadua es una especie forestal representada por esbeltos y modulados tallos que enaltecen el paisaje de los valles interandinos es larga, recta, uniforme en su desarrollo, liviana, hueca, resistente, suave, de rápido crecimiento, de bello color e imperceptiblemente cónica.

Fueron primero los colonizadores y luego los campesinos y maestros de la construcción los encargados de darle a la guadua la importancia que se merece. Su valor depende de la aplicabilidad y del espacio físico donde la misma se utilice. Conocido como ”la gramínea maravillosa”, el bambú crece en zonas templadas de todo el mundo, especialmente en Asia y América y se distingue por su resistencia estructural, liviandad y hábitat perenne.

Una vez que se siembra, estará ahí toda la vida. Mientras un árbol maderable demora en crecer 15 o 20 años, un bambú apenas necesita cinco años. Ya se está reconociendo el bambú como recurso económico, protector de la tierra y fuente de ingresos. Las familias campesinas saben que si siembran hay industrias que se lo compran. Se está propiciando un nuevo tipo de economía. Innumerables usos por sus características físico-mecánicas que garantizan elementos estructurales para falsa obra, pisos, paredes, tabiques, puertas, ventanas, artesanías y otros.
Contribuir a la preservación de cuencas hidrográficas quebradas y laderas erosionadas, que proporcionan una eficiente recuperación de los suelos por su gran capacidad de amarre del sistema rizomático. Es decir, donde hay agua no se seca el río y el agua es potable.

Por aportar al entorno su mejoramiento paisajístico, aportando color, armonía y purificación ambiental.

Constituyen recursos florísticos de gran importancia ecológica por propiciar condiciones de humedad, luz y temperatura a un sinnúmero de especies naturales.
Para ejecutar construcciones adecuadas con guadua, es indispensable conocer y ejecutar correctamente el proceso preliminar de cultivo y obtención del material. Además requiere de un proceso de inmunización, ya que la planta está amenazada por agentes bióticos (plagas), entre los que encontramos roedores, escarabajos y otros insectos.

Foto 2 - Pruebas de laboratorio para medición de un tipo de guadua

Foto 3 - Detalle Bambú negro

Pocas especies maderables hemos conocido que tengan tantas ventajas como el bambú, el hecho de que se llegue a usar correctamente en nuestro país depende de “la voluntad” que tengamos los que lleguemos a conocer estas “posibilidades” y nos decidirnos a utilizarla.

Foto 4 - Gráfico de una plántula de guadua angustifolia

Existen diversos aspectos de preservación a tener en cuenta por el contenido de almidón y humedad presentes en el bambú:

- En la plantación es recomendable colocar culmos cortados y recostados lo más verticalmente posible sobre los culmos circundantes, de manera que se mantengan aislados del suelo.

- El material debe secarse, ya sea al aire libre (colocando los culmos horizontalmente y espaciados, bajo una cubierta ligera), en estufa o cámaras de metal o ladrillo y hormigón (es la forma mas rápida) o a fuego abierto (a una distancia de 40 o 50cm. del suelo, se introducen carbones y/o maderas secas encendidas)

- Por medio de sustancias químicas preservantes, se ayuda a prolongar las estructuras físicas y los componentes del Bambú.

El volumen y el rendimiento del Bambú varían de acuerdo a la especie en particular y a las condiciones en que se encuentre. Existe un volumen anual actual de 1.000.0000 de toneladas de producción en todo el mundo.

"Desde su llegada al Quindío los colonos encontraron a porrillo la guadua, especie de bambú gigantesco y la utilizaron para hacer sus casas, sus camas, los instrumentos musicales, la banqueta, la tapia del fogón, el aparador, el tarro de sal, el cedazo, el parapeto para la piedra de moler, los burros típicos para el juego de los, las estacas y talanqueras del potrero, las canoas que conducen el agua limpia desde la acequia, el lavadero, la puerta de trampas, el granero en conclusión la guadua fue y ha sido el único soporte de aquella raza, el símbolo de la civilización en estas tierras, como la porcelana en Asia, la piedra en Europa y el hierro y el cemento en Estados Unidos"

Foto 5 - Cultivo de guadua en la zona cafetera de Colombia

La *Guadua angustifolia* se encuentra en estado natural en Colombia, Ecuador y Venezuela, en donde forma colonias dominantes conocidas popularmente como *"guaduales"* concentrados principalmente en la región andina, entre los 0 y 2000 msnm; se observa principalmente a la orilla de ríos y quebradas, en el pie demente de la cordillera, en los bosques montanos medio y bajo y en los valles interandinos. La *guadua angustifolia ha* sido introducida a varios países de Centroamérica y del Caribe, e inclusive al Asia, Norteamérica y Europa.

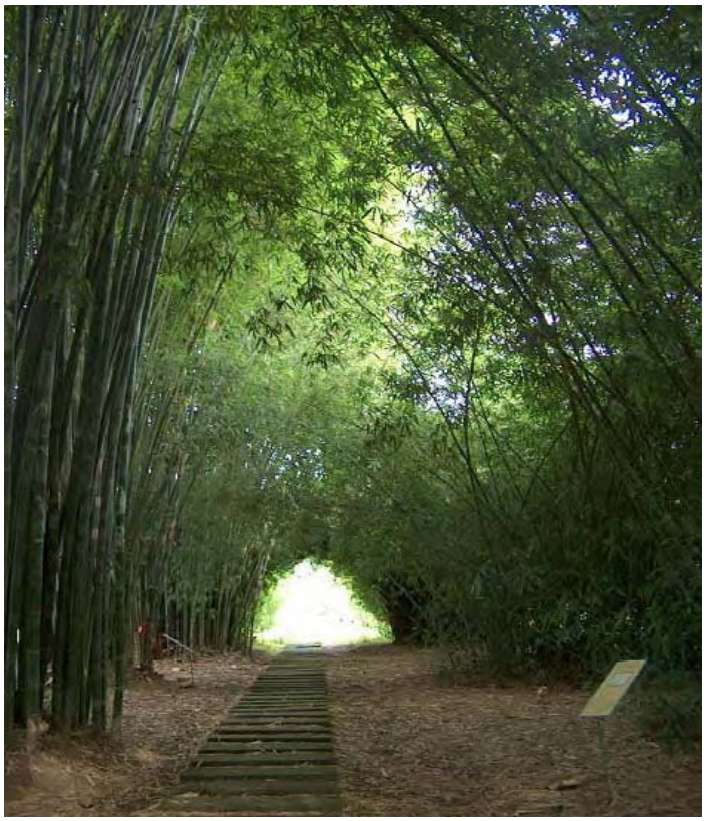


Foto 6 – Bosques de bambú en Japón

En Colombia, los guaduales se desarrollan de manera optima en la región central de los Andes entre los 500 y 1500 metros, con temperaturas entre 17º C y 26º C, precipitaciones de 1200-2500 mm/año, humedad relativa del 80-90% y suelos aluviales ricos en cenizas volcánicas con fertilidad moderada y buen drenaje". La fotografía de esta página corresponde a un ejemplo de un "guadual" tecnificado en Quindío- Armenia

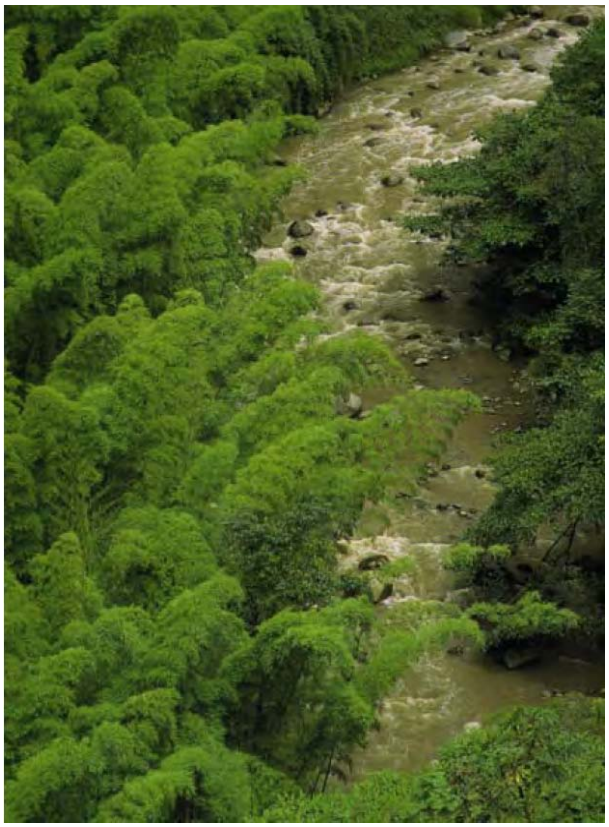
2.1-Importancia Ambiental:

La guadua es una planta que aporta múltiples beneficios para el medio ambiente y el hombre, sus productos cuando son empleados como elementos integrales de la construcción de viviendas funcionan como reguladores térmicos y de acústica, el rápido crecimiento de la guadua permite según el *"estudio aportes de biomasa aérea realizado en el centro nacional para el estudio del Bambú-Guadua, producir y aportar al suelo entre 2 y 4 ton/ha/año de biomasa, volumen que varia según el grado de intervención del guadual; esta biomasa constituye entre el 10 y el 14% de la totalidad de material vegetal que se genera en un guadual. La biomasa es importante, ya que contribuye a enriquecer y mejorar la textura y estructura del suelo. El aporte anual de biomasa general de un guadual en pleno desarrollo oscila entre 30 y 35 ton/ha/año."*

Foto 7 - Aporte de biomasa de la guadua al suelo

Los rizomas y hojas en descomposición conforman en los suelos símiles de esponjas, evitando que el agua fluya de manera rápida continua, con lo cual se propicia la regulación de los caudales y la protección del suelo a la erosión. El sistema entretejido de rizomas y raicillas origina una malla, que les permite comportarse como eficientes muros biológicos de contención que controlan la socavación lateral y amarran fuertemente el suelo, previniendo la erosión y haciendo de la guadua una especie con función protectora, especial para ser usada en suelos de ladera de cuencas hidrográficas.

El agua proveniente de la lluvia que cae sobre el guadual, permanece mucho tiempo en él, toma diversos caminos y tarda mas tiempo en caer al suelo, dando como resultado la “regulación de caudales,” ya que si la misma cantidad de agua se precipitara sin obstáculos ocasionaría crecidas súbitas y no se formarían reservas que son empeladas dentro del sistema cuando se requiere, especialmente en épocas de verano. Adicionalmente el dosel o bóveda que se conforma por el follaje en riveras de fuentes de agua impiden las perdidas por altas y rápidas tasas de evaporación (súbita) contribuyendo así a la mencionada regulación.



Entre los aportes más valiosos de la especie se debe mencionar su comportamiento como una bomba de almacenamiento de agua, cuyo funcionamiento es el principio de "vasos comunicantes" donde en épocas húmedas absorbe importantes volúmenes de agua que almacena tanto en su sistema rizomático como en el tallo, se ha determinado, según estudios realizados en la hacienda Nápoles, municipio de montenegro (sabogal 1983) y en el centro nacional para el estudio del bambú-guadua (Giraldo, 1996) que una hectárea de guadua puede almacenar 30.375 litros de agua, es decir, el agua para 150 personas por día (se asume un consumo promedio de 200 litros/día/persona). En época de verano cuando se percibe la necesidad de agua en el suelo, la que se encuentra almacenada en la planta es aportada de manera paulatina al suelo (esponja que suelta líquido).

Los guaduales cumplen en sus zonas de crecimiento por el mundo, papel relevante puesto que han propiciado la existencia y sostenibilidad de flora, microflora, entomofauna, mamíferos, aves, reptiles y anfibios.

Se resalta que en estos nichos ecológicos o comunidades es la especie dominante y a ella se asocia vegetación muy variada y numerosa que le permite conformar una estructura vertical triestratofitica, característica de las sociedades vegetales altamente desarrolladas y evolucionadas que tolera una amplia interrelación entre los diferentes componentes del sistema.

2.2 Importancia Socio-Cultural

Desde épocas prehispánicas la guadua es el Bambú más ligado a la cultura del nuevo mundo. En la zona central de Colombia se han encontrado vestigios de esta especie en excavaciones arqueológicas de asentamientos indígenas. Su existencia ha generado leyendas míticas en las que se dice

"Después del diluvio había quedado únicamente un hombre a quien el amo del cielo dio una guadua, que de la noche a la mañana convirtió en su mujer y compañera."

La guadua es un elemento simbólico que recoge referentes de un pasado cargado de gesta en el que se acuñaron los mas destacados caracteres de la vida regional, hoy necesarios de rescatar. De la relación del hombre con su entorno (relación sociedad-naturaleza), mediante trabajo o la simple conservación, resultan "sentidos" afectivos o emotivos.
Las comunidades incorporan como parte de suya los objetos sobre los cuales actúan; luego de la acción, los individuos pueden reconocerse en el objeto; es cuando se originan los afectos y la cultura. Es así como las viviendas que inicialmente se construyeron en guadua han recogido en su estructura y espacio muchos esfuerzos, sueños, anhelos y constituyen el referente inicial de la vida espiritual. Es por lo anterior que la guadua no se puede excluir fácilmente del paisaje, de la cotidianidad y de la memoria histórica de los pueblos.

La manera como la guadua ha penetrado directa e indirectamente en casi todos los ámbitos de la vida regional, amerita atención y tratamiento adecuado para garantizar su permanencia a largo plazo. Por ser la guadua una planta perenne, de alto rendimiento de madera por hectárea, por alcanzar su madurez en tiempo relativamente corto, por su longitud, trabajo y buena durabilidad esta especie se ha convertido en un Bambú importante para la comunidad.

Las condiciones favorables de sus propiedades físico-mecánicas, hacen que los tallos tengan muchos usos, a tal punto que los habitantes de la zona andina colombiana la utilizan en vivienda, utensilios de cocina, instrumentos musicales, puentes, canaletas, acueductos, horcones, lo que demuestra como llevan a la guadua a la cotidianidad

Foto 8 - Raíz de guadua en el centro nacional para el estudio del bambú

Los cultivadores, aprovechadores y comerciantes de la guadua constituyen el grupo social denominado *"guadueros"* que generalmente conforman comunidades de estratos medios, con bajo nivel de escolaridad, pero con gran arraigo y familiaridad con el agro, el campo y la guadua, el manejo y aprovechamiento de la guadua requiere de obreros de buena condición física, ya que en esta actividad se deben realizar grandes esfuerzos, especialmente cuando de corte, troceo, cargue y transporte se trate. La cultura del guadero ha sido heredada de sus antepasados, lo que hace de este un gremio muy particular, exclusivo y cerrado.

2.3 Importancia Económica

En Colombia la guadua es la especie forestal nativa con mayores posibilidades económicas, ya que su utilización en la construcción y la industria, permiten reducir costos, cuando es empleada como materia prima.
Por sus excelentes propiedades físico-mecánicas, por su resistencia al ataque de insectos, por su belleza escénica y tal vez, por lo más importante la diversidad de aplicaciones no igualadas por ninguna especie forestal, representa una alternativa económica que ha coadyuvado a mitigar la problemática social en el campo.

Los guaduales viven y se desarrollan asociados a áreas de gran potencial agrícola, es decir, suelos ricos, jóvenes y de buena capacidad productiva, constituyendo además

una especie de importancia en la economía del finquero, toda vez que la inversión en el mantenimiento y manejo anual representa apenas entre el 25 y 30 % de las ganancias que se logran al cosechar el guadual. Por esto se cultiva y resiembra con esmero, aunque no con intensidad.

"Desaparecida del campo esta joya este precioso elemento que todo lo suple estaremos perdidos, seremos pobres."

En Colombia aproximadamente 100.000 personas derivan su sustento del aprovechamiento manejo y comercialización de la Guadua, de donde obtienen hasta $400 dólares mensuales, con un ritmo de trabajo de 4 días laborales en la semana. El Bambú-guadua además de ser materia prima de los pobres, de uso local y bajo costo, debe convertirse en fuente de industrialización con reconocimiento internacional, tal como se presento en el acto de inauguración del V congreso internacional de Bambú realizado en San José de Costa Rica.

Los Guaduales Comunidades Dinámicas Altamente Especializadas

En la zona andina colombiana, la Guadua esta localizada en áreas estratégicas de la cuencas hidrográficas, donde cumple un elevado papel en la dinámica sucesiva que le permite perpetuarse en el ecosistema, no obstante, por la gran actividad evolutiva de la especie, la mayoría de los guaduales pueden encontrarse muy densos de tallos por falta de manejo o muy intervenidos debido al aprovechamiento no técnico, que afecta la acción reguladora y el efecto de equilibrio biológico.

Comunidades vegetales como las de la Guadua deben manejarse técnicamente para obtener de ellas su mayor productividad y lograr que sean especializadas en la regulación de caudales y en el aporte de cantidades significativas de biomasa en tiempo muy corto. El manejo se fundamenta en bases biológicas, ecológicas y estructurales con lo cual se logra su sostenibilidad en el tiempo y el espacio.

Foto 9 - Cultivo y transporte de guadua en Colombia

Para que el guadual se considere bien manejado es necesario que cumpla tres condiciones fundamentales: sostenibilidad, máxima productividad y rentabilidad.

2.4 La Sostenibilidad

Implica que las actividades productivas del suelo y del vuelo forestal sean aprovechadas ininterrumpidamente, sin causar la menor alteración al ecosistema como tal. Esta condición se cumple fácilmente en los bosques de guadua, los cuales se regeneran por partes vegetativas, constituyentes de sus rizomas y semillas, elementos que se consideran básicos para su multiplicación

Foto 10 - Cultivo tecnificado de guadua en el centro nacional del bambú (Colombia)

La máxima productividad

Esta sujeta a la capacidad productiva del sitio, a las leyes biológicas naturales de la planta y las condiciones ecológicas y estructurales que gobiernan el desarrollo de la guadua como ser vivo.

De lo anterior se concluye que la actividad de manejo silvicultural se encuentra supeditada al aprovechamiento, acción que procura crear y mejorar las condiciones biológicas del guadual a niveles óptimos, lo cual se logra cuando la intervención forestal se realiza de manera oportuna y periódica para regular el espacio vital de los individuos y para favorecer la mayor aparición de elementos jóvenes (renuevos). Cuando el aprovechamiento se efectúa en forma no adecuada e inoportuna ocurre degradación por exceso o carencia de individuos maduros y la consiguiente disminución de la actividad biológica que se caracteriza por la menor emergencia de renuevos que son los que garantizan la perpetuidad del guadual.

La Rentabilidad

Exige que la emisión de nuevos individuos ocurra de manera periódica, en cantidad estable y en lapsos similares. Es evidente que para cumplir con esta condición se hace necesaria la aplicación de prácticas silviculturales como la entresaca selectiva que garantiza la eficaz y oportuna sustitución de las cañas o guaduas cortadas.

Condiciones y Distribución Geográfica

Por su ubicación sobre las faldas de las cordilleras occidentales, central y el valle de varios ríos posee todos los pisos térmicos, lo cual propicia el crecimiento de gran diversidad de especies.

En Colombia, la guadua es un elemento muy característico del paisaje y constituye la base constructiva del eje cafetero, en particular. Esta región, tiene una extensión de 13.346 km2 y una población aproximada de 1.600.000 habitantes.

Particularmente la guadua, ha sobrevivido la sustitución de especies nativas para la implantación del monocultivo de café. Crece en suelos fértiles y sueltos entre los 500 y 1500 metros, con temperaturas entre 17º C y 26º C, precipitaciones de 1200-2500mm/año, 0 y 1700 metros sobre el nivel del mar.

Foto 11 - Culmo de guadua recién cortado

En la actualidad, es objeto de una devastadora explotación lo que podría llevar a su extinción. Por esta razón se adelantan programas de reforestación y cultivo en invernadero promovidos por la Universidad de Manizales (Colombia) entre otras.

Foto 12 - Cultivo de guadua Montenegro- Quindio

Entre los 3 y 6 años de crecimiento, alcanza su máxima resistencia, en general llega a estas dimensiones promedio:

- Altura entre 18 y 30 m.
- Diámetros entre 8 y 18 cm.
- Espesores entre 2 y 2.5 cm. en el medio y de 1,5 hacia los extremos.
- Distancia entrenudos de 7 a 10 cm. en la base y de 25 a 35 cm. en el medio

El bambú crece en regiones intertropicales, especialmente en las zonas en rojo del mapa

Foto 13 - Plano de zonas aptas para el cultivo de bambú en el mundo

2.5 Características Generales de la Planta

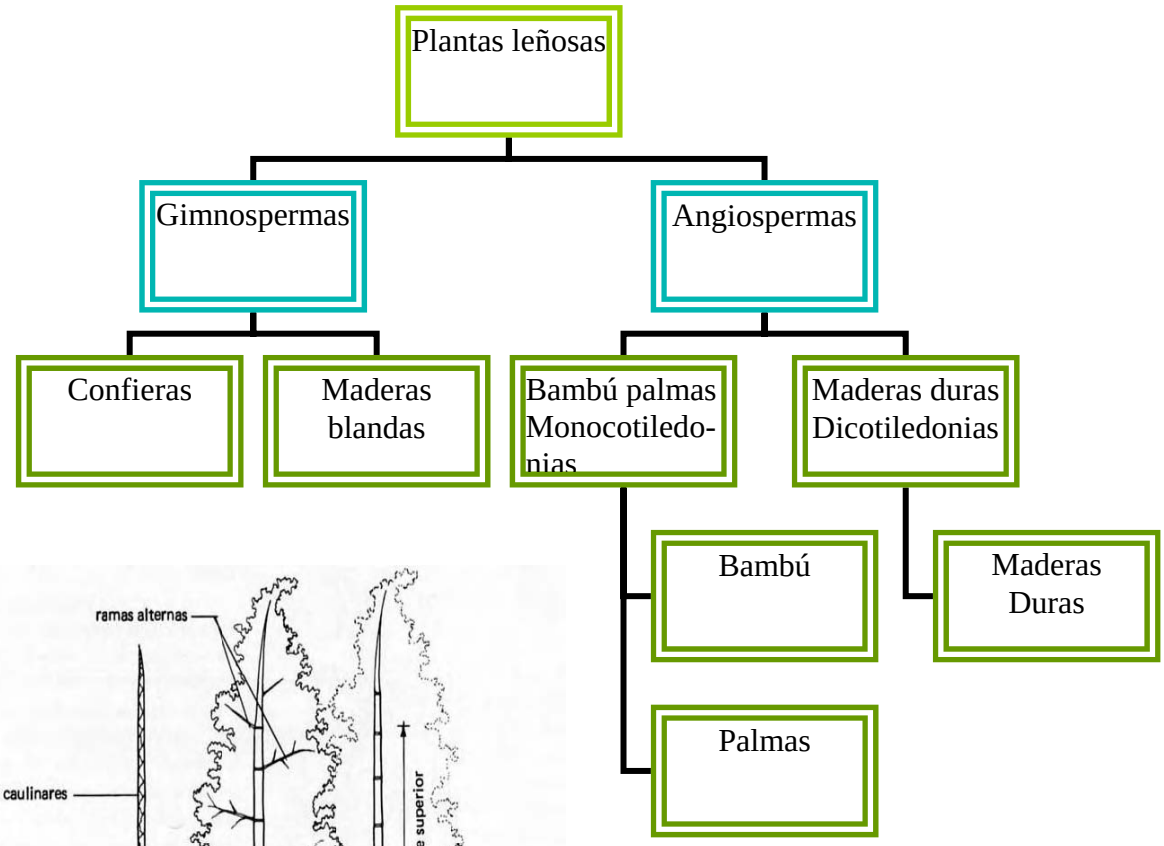
El bambú es una planta gramínea, botánicamente se clasifica en los Cormofitos, dentro de la subdivisión de los espermatofitinios (Fanerógamas):

- Clase : Angiospermas
- Subclase : Monocotiledóneas
- Orden : Gluminofloralejo
- Familia : Gramineaopoaceae
- Subfamilia : Bambusoideae
- Tribu : Bambusae o Poaceae

Dentro de la subfamilia Bambusoidea existen aproximadamente 90 géneros en los que se clasifican las 1250 especies que se conocen dentro de cinco (5) tribus:

- Anomochloeae Olyreae
- Buerge
- Siochioeae,
- Sreptochacteae
- Bambusae.

La especie bambusea es la más utilizada en la Industria de la construcción, dentro de la que se encuentra la *Guadua angustifolia* como la especie de mayor aplicación en Colombia y especie utilizada en nuestro seguimiento de obra y colocación de una vuelta en Maçanet de la Selva (Girona). Las Gramíneas Bambusoides, morfológicamente se encuentran en el grupo de las plantas leñosas que se clasifican así:



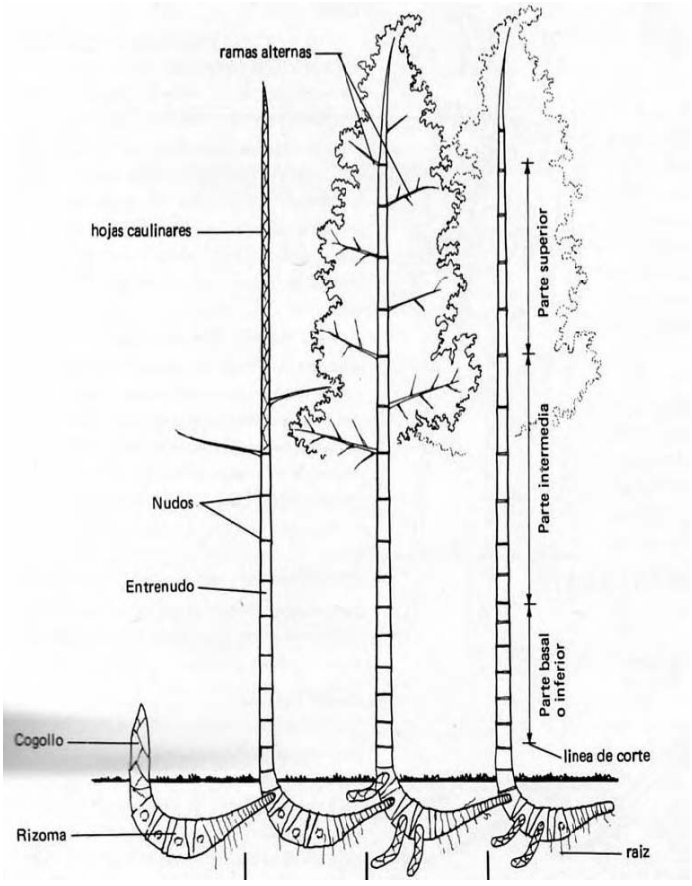


Foto 14 - Conformación de un culmo de guadua

2.6 Propiedades Físico-Mecánicas

Una característica de todo producto de la naturaleza es su variabilidad; la guadua como tal es buen ejemplo de ello. No existen dos pedazos de guadua iguales, aun siendo parte del mismo tallo o caña.
Se presentan condiciones del ambiente como son el suelo y el clima que afectan la tasa de crecimiento, así como la estructura, la forma y las propiedades de resistencia. Se pueden mencionar otros ejemplos que son fuentes de variación en las propiedades de la guadua como la presencia o ausencia de luz y las labores silviculturales en el guadual como la poda de ramas. Se puede concluir entonces, que la guadua es un material bastante heterogéneo en su constitución interna, producto del medio ambiente donde se desarrolle.

En el diseño de una construcción el arquitecto o ingeniero debe garantizar seguridad, calidad, economía y durabilidad, aplicando su conocimiento científico y tecnológico. En el campo de la construcción, el comportamiento de los elementos estructurales tiene una fuerte relación frente a los diferentes esfuerzos a que se ven sometidos.

Unidades en Kg/cm2	**Módulo de elasticidad a tracción**	**Módulo de elasticidad a compresión**	**Módulo de elasticidad a flexión**
MATERIAL			
GUADUA	190.000	184.000	179.000
OTRAS MADERAS	90.000-180.000	96.000-169.000	108.000-128.000

Tabla 1 – Módulo de elasticidad a solicitaciones externas en bambú.

En el caso del bambú, las propiedades mecánicas dependen de las características físicas del material que en particular sea utilizado construcción y no corresponden a valores absolutos o comparables con otras muestras, ya que las condiciones varían notablemente. Estos gráficos corresponden sólo a un esquema comparativo general ya que casi siempre, para un mismo material sus resistencias pueden variar.

Unidades en Kg/cm2	**Resistencia a tracción**	**Resistencia a compresión**		**Resistencia a flexión**
MATERIAL		**Perpendicular a la fibra**	**Paralelo a la fibra**	
GUADUA	430	560	650	740
ALISO	108	68	357	460
ARBOLOCO	500-1500	132	405	390
OTRAS MADERAS	1000	50-144	400	500-720

Tabla 2 – Resistencia a tracción, compresión y flexión de bambú y otras maderas.

Por la esbeltez, durante su crecimiento es sometido a fuertes cargas de viento. Los tabiques de entrenudo producen rigidez y elasticidad, evitan su ruptura al curvarse (característica apropiada para construcciones sismorresistentes). Su crecimiento cónico constituye una desventaja, ya que se obtienen secciones de diámetros variables, pero a través de un proceso de cultivo de invernadero es posible obtener grosores de forma secuencial que logren facilitar la resolución de uniones la bambusa guadua es abundante en el eje cafetero colombiano, su rápido crecimiento constituye una de sus principales ventajas. Es un material económico muy resistente a los esfuerzos de compresión, tracción y flexión.

Ahora estableceremos algunas definiciones de tipo técnico, en relación con la resistencia del material, cuando esta sometida a diferentes esfuerzos dentro de una construcción, referidos en al anterior cuadro:

• **Esfuerzo:**

Es una fuerza expresada con base en la unidad medida de área.

• **Resistencia a Compresión:**

Se presenta cuando la fuerza actúa acortando una dimensión o reduciendo el Volumen del cuerpo en cuestión; se define como la fuerza total de compresión dividida por el área de la sección transversal de la pieza sometida al esfuerzo. La compresión paralela a la fibra o al grano, esta implicada en muchos usos de la guadua, en columnas, postes, puntales para minas y todos aquellos casos donde la madera esta sometida a cargas. Del ensayo de compresión perpendicular se obtienen datos para el calculo de esfuerzo de las fibras al limite proporcional (EFLP), que es el esfuerzo máximo en compresión que la madera puede soportar sin deformarse, máxima resistencia a la compresión y el modulo de la elasticidad.

Foto 15 - Resistencia de la guadua a compresión

• **Resistencia a Flexión y Tracción:** En el uso de la guadua para la construcción, la resistencia de la flexión es la propiedad más importante. Entre la compresión paralela, la tracción paralela y la flexión existen las siguientes relaciones: la resistencia a la flexión es alrededor del 75% mayor que la resistencia a la compresión. La flexión se presenta en partes estructurales denominadas vigas, las cuales pueden ser simples, empotradas y viga continua.

Foto 16 - Resistencia de la guadua a flexión

2.7 Proceso de Cultivo

El establecimiento y desarrollo de una planta de guadua obedece a la germinación de su semilla (sexual) o la propagación utilizando algunas de las partes de la planta (asexual).

Foto 17 - Aerofotografía de cultivo tecnificado de guadua

Cuando ocurre la reproducción de la planta por semilla, se presentan características muy definidas y particulares con relación a su crecimiento; una vez la semilla germina da origen a una plántula débil en sus primeros estados y requiere mínimo de 4 meses para que se fortalezca su sistema de raíces (muy fibrosa) y comience la emisión de

renuevos producto de la multiplicación asexual, normalmente esta plántula en 4 meses emite cerca de 4 a 5 talluelos con hojas debidamente diferenciadas.

La planta con el transcurrir del tiempo origina cada vez nuevos rebrotes que van evolucionando en diámetro y altura a tal punto que dependiendo del tipo de suelo y de las condiciones climáticas logra entre 10 y 13cm de altura en 30 días y diámetros que se incrementan a un promedio de 0.10mm mensuales; al finalizar el primer año tiene un promedio de 12-14 rebrotes con vida productiva de 3-4 meses al cabo de los cuales se secan de arriba hacia abajo para dar paso a nuevos rebrotes con que adquieren mayor altura y salen con diámetro mayores. En condiciones normales en las primeras fases de desarrollo, siempre los nuevos hijos (renuevos) poseen mayor tamaño de rizoma, diámetro y altura, con relación a la planta que los generó. A partir del tercer año de sembrada la planta original, se logra tener entre 18-20 rebrotes, alturas que oscilan entre los 5 y 7 metros y diámetros de 4-6cm; época en la cual se deben realizar los primeros tratamientos silviculturales para evitar exceso de tallos.

Foto 18 - Savia que sale de la guadua verde o "viche"

Entre los 3 y 6 años la planta de guadua entra en una etapa de desarrollo vertiginoso, adquiere alturas entre 12 a 15 metros, incremento de los diámetros entre 9 y 11cm y disminución en el numero de renuevos siendo estos de 12-14; A partir de esta etapa la planta estabiliza su desarrollo evolutivo, estandarizando patrones como altura promedio de 15 a 18m, diámetros entre 10-12cm y promedio/Ha de 4000 a 4500

individuos diferenciados de manara clara de acuerdo a la edad de desarrollo así: Renuevos, guaduas viches (jóvenes), guaduas hecha (madura) y guaduas secas (las que culminan su ciclo). En esta etapa el guadual se considera desarrollado en cuanto a producción de individuos debidamente formados en diámetro y altura

• Características de los individuos componentes del guadual

Un guadual ideal es aquel que se regenera o multiplica bajo los criterios de la sostenibilidad, máxima productividad y la rentabilidad equilibrada, debe contener en su estructura horizontal como mínimo entre el 65 y 70% de guaduas maduras, 20-25 de guaduas viches, del 5 al 10% de renuevos y entre el 2 y el 5% de guadua secas.

- **Renuevo**

Se considera el primer individuo de la fase de desarrollo, caracterizado porque independiente del sistema de multiplicación del cual provenga, (reproducción o propagación) este siempre emerge con su diámetro definido, debido a que no posee células de cambium o procambium que diferencian sus tejidos hacia fuera, haciéndolo engrosar; durante los primeros 30 días el crecimiento alcanza ratas de 4 a 6cm en 24 horas y el 60% de este, se realiza en horas nocturnas, condición que obedece a la presencia de auxinas. Después de los 90 cm. de altura el renuevo se estabiliza en un promedio de 9 a 11cm de crecimiento en 24 horas; esta recubierto totalmente de hojas caulinares que varían según el sitio y las condiciones climáticas donde se desarrolla el renuevo, en el oriente del País y en la altiplanicie cundiboyacence los renuevos reciben el nombre de bobo.

Una vez formado el rizoma y adquirida la característica de tipo paquimorfo es decir con cuellos cortos y altamente entrelazados (crecimiento plagiotrópico) se inicia la fase de renuevo, cuando la parte apical del rizoma emerge (crecimiento ortotrópico) se presenta la iniciación del culmo o tallo aéreo con su diámetro definido.
El crecimiento longitudinal de los tallos empieza a manifestarse por la elongación completa y sucesiva de los entrenudos comenzando por el inferior y finalizando por el más apical. Solo se inicia la formación de un nuevo entrenudo, cuando el inmediatamente anterior esta definido.

En términos generales en la fase de renuevo o rebrote, desde que emerge del suelo hasta que llega a su máxima altura, tarda entre 150 y 190 días (6 meses), variabilidad que depende de las condiciones de distribución de las lluvias y de la temperatura; posteriormente el tallo detiene su crecimiento, comienza el desprendimiento de las hojas caulinares y da paso a la formación de ramas básales y apicales, por activación de las yemas nodales.

En la fase de rebrote normalmente hay ausencia de ramas básales y apicales, presencia de hojas caulinares que bordean o recubren los nudos de manera superpuesta y localizadas desde la parte basal a la apical; en esta fase la resistencia del tallo es mínima.

- **Guadua Joven " Viche"**

Esta fase se inicia cuando las hojas caulinares de la parte apical del culmo comienzan a desprenderse, una a una dándole paso a las ramas primarias, que a su vez están cubiertas por hojas caulinares pequeñas, que en forma similar comienzan a caer para dar salida a las ramas secundarias.

Caracterizada por tener entrenudos de coloración verde intenso y lustroso, nudos con bandas nodales de color blanquecino, anchos de 2 a 3cm pubescencia de color café claro visibles en la parte superior del nudo o banda nodal, donde se encuentran además las yemas nodales sobresalientes que pueden o no activarse y dar origen a ramas inferiores o superiores. Los entrenudos son limpios e inicialmente blandos por carecer de lignificación completa, las paredes presentan grosor que varia de acuerdo a biotipo entre1 y 2.5cm, en este estado la guadua está cargada de humedad, siendo visible su conformación fibrosa.

Foto 19 - Características típicas de la guadua Joven

En un guadual natural el individuo joven o viche tiene una transitoriedad de 6 a 24 meses y no ha logrado el grado de resistencia ideal para ser utilizado debido al alto contenido de humedad. Su cubierta externa o cutícula no se ha lignificado completamente; la parte inferior del tallo generalmente presenta coloración amarillenta.

- **Guadua Madura *"Hecha"***

Caracterizada por la desaparición en el tallo, del lustre del entrenudo, coloración mas clara y se hace evidente la aparición de manchas de hongos color gris-claro, de forma redondeada a oblonga, con diámetros de hasta 3 cm.; cuando la ha adquirido la configuración enunciada se puede decir que es apta para ser aprovechada ya que el tallo esta en el optimo grado de resistencia y normalmente tiene edad superior a los dos y medio años.

Es la única fase apta para el aprovechamiento de los tallos; comúnmente se les llama *"Hecha o gecha."* Por la evolución intrínseca del guadual, este tipo de tallo se encuentra en mayor proporción en el interior y menor en su periferia.

- **Guadua Sobremadura**

Los hongos y líquenes comienzan a desaparecer del tallo, hasta cuando empieza a observarse hongos en forma de plaquetas alargadas y de color rojizo. En este momento se inicia la decoloración y el tallo se va tornando amarillento, indicativo del inicio de la finalización del ciclo vegetativo.

Foto 20 - Guadua sobremadura

Foto 21 - Guadua Madura "hecha"

• Guadua Seca

Las guaduas adultas no aprovechadas están completamente degradadas, debido a la perdida de humedad y por consiguiente escasa o nula actividad fisiológica, el tallo se torna amarillento, presenta manchas rojizas en toda su longitud y disminuye hasta el 80% de la resistencia. En esta fase los tallos se hacen propicios para ser refugio o lugar de animación de aves como los carpinteros (Melanerpes sp), que construyen orificios circulares en los entrenudos de la parte superior y emplea dicha para ovopositar.

El follaje se torna amarillento y hay defoliación de las ramas, es la fase final de los tallos y sus posibilidades de sostenibilidad o perpetuidad se acaban; termina el ciclo de vida y es conveniente retirarlas del guadual; su único uso es como leña o carbón.

Condiciones Ambientales Para el Desarrollo de la Guadua:

Suelos

La guadua posee amplio rango de distribución geográfica lo cual indica su gran adaptabilidad, hecho que esta determinado por las condiciones edafoclimáticos;

Observaciones técnicas demuestran que el buen desarrollo de la planta esta gobernada de manera directa por la calidad de sitio donde se desarrolle, la precipitación y la temperatura.

Los suelos propicios para su plantación son los evolucionados a partir de cenizas volcánicas. Otros suelos en menos proporción pueden presentar texturas areno-limosas o franco limosas; suelos pesados o arcillosos no son buenos para el desarrollo de la planta. En resumen, suelos ricos en materia orgánica, con buenos drenajes, húmedos pero no inundables, es donde mejor se comporta la guadua. La guadua requiere suelos con profundidad efectiva desde moderadamente profunda hasta muy profundos. El perfil del suelo ideal es el que presenta texturas gruesas y medias, con apariencia textura liviana a mediano.

Foto 22 – Suelo de bosque de guadual en la región cafetera del Once Caldas (Colombia)

2.8 Características físicas

- **Densidad aparente**

Es una variable importante para evaluar el grado de compactación de los suelos. Evaluaciones realizadas a varios agro ecosistemas, en los que se incluyeron los del guadual, el suelo mostró niveles bajos de compactación (0.69 gr/cc). En promedio un agro sistema productivo tiene entre 0.98 y 1.05gr/cc. La densidad aparente disminuye significativamente en aquellos sistemas donde los contenidos de la materia orgánica son altos y las densidades reales de los materiales que conforman la matriz del suelo son bajas.

- **Resistencia a la penetración**

Indica el grado de compactación en los sistemas edáficos; cuanto mayor sea la resistencia que opone el medio físico al penetrómetro, el suelo es más compacto. Los suelos del guadual presentan mas bajos de resistencia a la penetración, entre los 10 y 20cm de profundidad (1.36kg/cm2); los suelos menos compactados tienen mas espacios porosos para retener mayor volumen de agua y realizar los intercambios gaseosos (mas aireación), facilitan la conductividad del agua y proporcionan mejor ambiente para el desarrollo de los microorganismos. Los suelos ricos en materia orgánica como los ocupados por guaduales son menos susceptibles a la compactación.

- **Porosidad**

Es el volumen de espacios vacíos del suelo, expresado como porcentaje. Los suelos ocupados por guaduales son suelos muy porosos, con niveles que alcanzan el 70,72%; en sistemas altamente productivos como los dedicados a la ceba intensiva en ganadería, poseen porosidades entre el 56.33% y el 57.72%, a medida que es mayor la porosidad se mejora notoriamente la retención de la humedad, la percolación en el suelo, la actividad de los microorganismos y se reduce la compactación.

- **Distribución de agregados**

En términos estructurales, las partículas elementales del suelo (arena, limo, arcilla) se unen para formar agregados individuales, con propiedades diferentes a las de una

masa igual de partículas. Los análisis de distribución o clasificación de agregados de acuerdo al tamaño, muestran que las partículas estructurales del suelo de un guadual catalogan como muy finas con un diámetro medio ponderado (DMP) de 3,63mm.

- **Estabilidad de Agregados**

Hace referencia la capacidad que tienen los granos de conservar su tamaño cuando se humedecen y de permitir al paso de agua y la entrada de aire a través del suelo. La medida para determinar la estabilidad de agregados es el diámetro medio ponderado resultante del método de Yoder.
Los suelos del guadual poseen un diámetro de 3.03Mm razón por la cual se clasifican como los ambientes con mayor estabilidad estructural. Los mayores contenidos de materia orgánica guardan proporción con la estabilidad estructural de los suelos; por lo anterior se podría esperar que los suelos con niveles más altos de materia orgánica desarrollen agregados de mayor tamaño y, por consiguiente, con mejores características.

- **Textura**

El análisis de textura cuantifica la proporción relativa de las partículas del suelo en términos de porcentaje. Los guaduales se caracterizan por tener altos contenidos de arena en comparación con limos y arcilla (63,11% 19,03% y 17,84 % respectivamente). En lo que tiene que ver con los compuestos ceméntales orgánicos, es necesario mencionar que el efecto agregante de la materia orgánica se hace mayor a medida que decrece el contenido de arcilla, además promueve la agregación y ayuda para estabilizar la estructura del suelo.

- **Estructura**

En términos generales la estructura que muestran los suelos considerados aptos para la guadua se presenta en bloques sub-angulares, media y moderada, consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, característica que se observa en los primeros 15cm del horizonte. Hasta los 73cm la estructura es de bloques sub-

angulares media y fina; consistencia e húmedo friable, en mojado, ligeramente pegajosa y plástica. De los 73cm en adelante no se encuentra estructuras definidas, grano suelto.

- **Contenido de Humedad**

El agro sistema de guadua se caracteriza por tener los mayores contenidos de humedad (34,88%); porcentaje que se considera alto si se compara con un cultivo de cítricos que es del 19,71%. Los guaduales con mayor densidad aparente y real son los que poseen suelos con mayor volumen de poros y por consiguiente pueden retener mas humedad, así mismo el contenido de la materia orgánica y residuos vegetales juegan un papel importante en la economía hídrica, ya que cumplen con la función de servir como colchón o esponja absorbente. Esta actividad mejora también de manera ostensible la actividad microbiana y reduce la penetración facilitando el desarrollo radical.

- **Conductividad hidráulica**

Se define como la velocidad de filtración de fluidos en medios saturados. Los guaduales con un promedio de 50,73cm/h se caracterizan por tener una conductividad que se clasifica como muy rápida; en estos suelos el agua se infiltra sin presentar problemas de encharcamiento, el paso de fluidos es mas rápido en suelos no compactados y con mayores contenidos de materia orgánica, donde existe buena porosidad y el tamaño de los agregados es mayor.

Características Químicas

Son aquellas que suministran una información que con adecuada interpretación permite describir al origen, la clasificación y la evaluación de la fertilidad de un suelo.

- **Potencial de Hidrógeno**

Anteriormente la mayoría de los guaduales se encuentran en suelos derivados de cenizas volcánicas, con porcentaje bajo de saturación de bases, pobres en fósforo y mediano en potasio.
A medida que las acidez disminuye se incrementa la disponibilidad de Ca, Mg y K; en el caso contrario, una reducción incide en el incremento de iones de hidrógeno, hierro o aluminio y en la relación de Ca/Mg.[30]

- **Capacidad de Intercambio Cationico (CIC)**

Se define como la sumatoria de bases intercambiables totales (Na, K, Mg, Ca) y la acidez intercambiable (H, Al). Los suelos que presentan bajo grado de intervención

como los guaduales se consideran de clasificación media con una CIC entre 15 y 16 me/100 gr. de suelo. Suelos desprovistos de cobertura vegetal presentan menores niveles de CIC.

- **Aluminio**

Los altos niveles de Aluminio son considerados de acción toxica para la mayoría de las plantas incluyendo los guaduales, en suelos derivados de cenizas volcánicas, donde generalmente se desarrolla la guadua, los valores de este elemento son mínimos y no causan daños fisiológicos.

- **Calcio**

Los agrosistemas de guadua presentan valores de calcio que se pueden clasificar como medios (5.0me/100gr); no obstante si se compara con otros sistemas productivos como la ganadería y la caficultura, los guaduales poseen promedios muchos mayores.

- **Magnesio**

Los guaduales y/o bosques se distinguen de otros sistemas productivos por presentar niveles superiores de este elemento (1,84me/100gr). La representación de Mg. en términos de la capacidad de intercambio catiónico es muy pobre en suelos derivados de cenizas volcánicas.

- **Potasio**

En general los suelos con guadua poseen niveles moderados de potasio (0.6me/100gr), si se tiene en cuenta que por su naturaleza, estos suelos contienen importantes cantidades de este elemento.

- **Sodio**

Los suelos óptimos para el desarrollo de la guadua requieren niveles muy bajos de sodio (rangos que fluctúan entre 0.21 y 0.27 me/100gr.)

- **Fósforo**

En los guaduales los niveles de fósforo no muestran variaciones considerables, en términos de generales se presentan entre 20 y 30ppm, cantidad alta, tratándose de suelos alofánicos y existiendo la posibilidad de que este elemento no este aprovechable en los rangos que se describen en los análisis de laboratorio.

- **Elementos menores**

A nivel general los promedios de elementos menores contenidos en los suelos donde se encuentra la guadua se pueden considerar como altos para todos a excepción de boro, cuyos niveles son medios. El cobre se encuentra en rangos entre 1 a 5ppm; el hierro presenta niveles entre 280 y 300ppm; manganeso entre 8 y 10ppm y Boro con niveles de 0.15 a 0.20ppm.

2.9 Preservación e inmunización de la guadua.

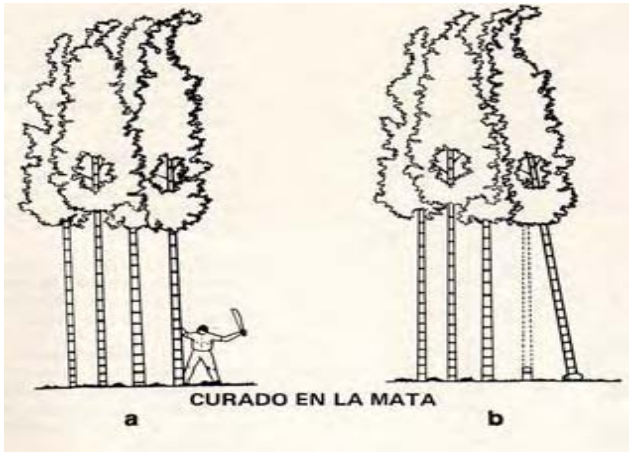
La guadua al igual que la madera también contiene humedad, la cual es indispensable extraer, para obtener su mayor resistencia y controlar hongos y agentes que la puedan atacar. El material después del proceso de corte debe ser sometida a un proceso de secado, *"en este proceso se contrae y obtiene su color amarillo, al estar seca pierde toda la savia y no es tan propensa al ataque de hongos, en este proceso se desecha casi un 20% de guadua por estar rajadas o torcidas."* A continuación explicaremos los métodos utilizados mas comúnmente para el secado del material:

- **Secado al aire**

Este método consiste en apilar la guadua en cantidad suficiente en el suelo, se coloca de manera horizontal y aire libre (mejor cubierto), teniendo precaución que no tenga contacto con le suelo, sobre alguna base que impida esto.

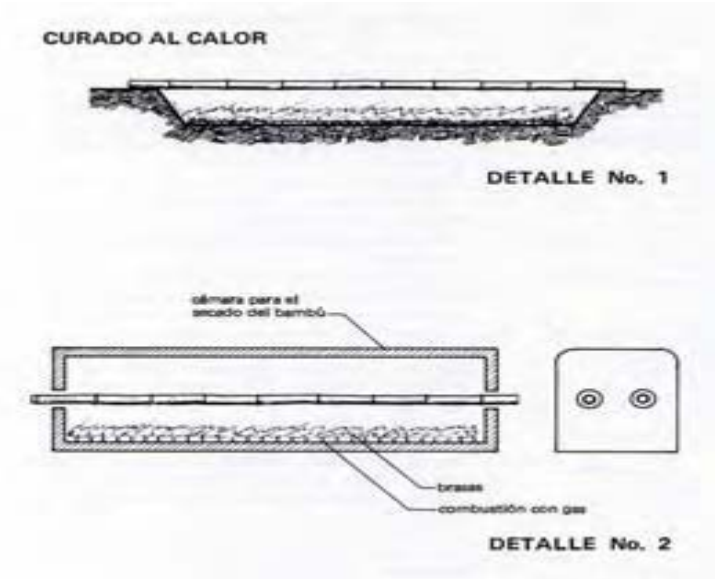
- **Secado en la mata**

Después de cortada la guadua se deja con ramas y hojas recostada de forma vertical, sobre otras guaduas del cultivo, debe de estar aislado del suelo por medio de piedras u otro elemento, como se observa en el grafico de esta pagina. En esta posición se deja por un periodo de 4 semanas, después de lo cual se cortan sus ramas y hojas, y se deja secar dentro de un área cubierta bien ventilada. Este método es hasta ahora el que ofrece los mejores resultados, además los tallos no se manchan y conservan su color.

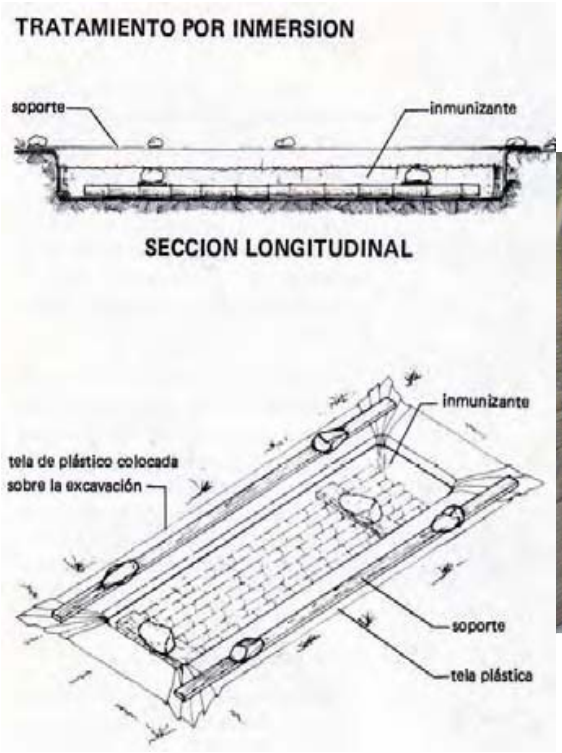


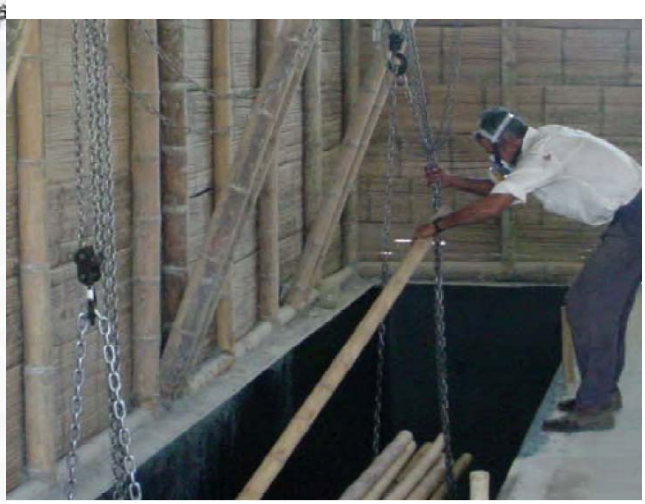
- **Secado al calor**

El secado al calor se realiza colocando las cañas de guadua de forma horizontal sobre brasas de madera, a una distancia apropiada, evitando que pueda ser quemada por las llamas y girándolas constantemente, este proceso se debe hacer a campo abierto. Las brasas se deben colocar en una pequeña excavación de unos 30cm o 40cm de profundidad, tal como se observa en el gráfico siguiente:



Posteriormente después del proceso de secado, la guadua debe de someterse a un tratamiento preservativo, con la finalidad de prevenir el ataque de insectos y hongos, que son los principales agentes “enemigos”, este proceso debe de ser lo suficientemente eficiente para evitar problemas futuros en las construcciones. Su composición no debe de afectar sus propiedades físico-mecánicas, ni su color y preferiblemente debe de ser en estado líquido para que se pueda impregnar interiormente donde es más vulnerable, proceso que debe realizarse estando la guadua seca o curada, los diferentes tratamientos para su inmunización de la guadua son los siguientes:



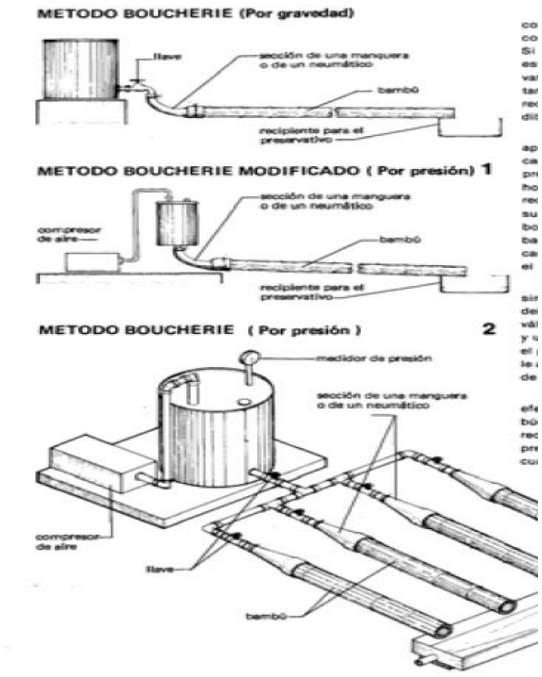


Este proceso se realiza primero haciendo dos perforaciones en cada entrenudo de la guadua, para después sumergir la guadua mediante unas pesas en un tanque que contiene preservativos, por un periodo de cinco días, con el fin de que el liquido penetre de manera correcta en el interior de cada entrenudo, tal y como se puede observar en el gráfico y fotografía.
En el mercado existen diversos productos como inmunizantes, que deben de ser elegidos con un respaldo de tipo científico.

- **Método boucherie**

Este método se realiza aprovechando la presión hidrostática, con bambúes recién cortados, en posición horizontal sobre el suelo. El recipiente del preservativo debe estar a una cierta altura y de este deben de salir unas mangueras que se conectan a las guaduas por su extremo inferior. El preservativo a aplicar reemplazara a la savia, saliendo por un extremo opuesto, este método se puede observar en el gráfico siguiente enumerado como 1.

También existe otro método muy similar al anterior, con la diferencia que para la aplicación del preservativo se emplea presión, por medio de un medidor, en lugar de que este fluya por gravedad como el anterior, se necesitan de 10 a 15 libras de presión, en este caso el tiempo de inmunización se reduce de varios días a unas 6 o 7 horas, por obvias razones este resulta mas costoso. Este método se puede observar en el gráfico siguiente.



Inmunizado método por Boucherie

2.10Producción Mundial

" Silvicultura es la técnica empleada para sembrar y manejar los bosques con múltiples propósitos; también se describe como la habilidad de manejar bosques, argumentando que es arte porque su técnica esta fundamentada en los principios de las ciencias biológicas y la ecología. En un contexto más amplio, silvicultura es el cultivo de las selvas, montes o bosques."

La silvicultura implica entonces cultivo manejo y aprovechamiento, en busca de incrementar la productividad y los beneficios que genera el bosque, para nuestro caso el

Guadual. La silvicultura de la guadua ha sido un aspecto trabajado en las dos ultimas décadas, debido al interés que ha despertado, especialmente en Latinoamérica, hecho que se manifiesta con la aparición de técnicas tendientes a incrementar la productividad y disminuir su destrucción; se incluye la búsqueda de nuevas áreas para el establecimiento de cultivos de guadua. El conocimiento y la aplicación de estas técnicas silviculturales han propiciado el manejo sostenido de los guaduales, mediante la regulación del espacio vital para mejorar su desarrollo

Cuando el producto del bosque de Guadua es la madera que sea de excelentes condiciones, es decir, con buen diámetro y longitud y de adecuado estado fitosanitario, dichas cualidades están determinadas por la practica de manejo silvicultural. Como se verá mas adelante, es fundamental el manejo del material vegetal que se emplea en el establecimiento de la plantación, así como las entresacas selectivas, que estén destinadas principalmente a la obtención de productos de mejor calidad y de manera constante.

Para conocer a fondo el manejo silvicultural de la guadua es necesario dividir su crecimiento y desarrollo en dos periodos:

Prácticas Silviculturales Para el Cultivo de la Guadua

Comprende la etapa de establecimiento y formación del bosque-rodal y las técnicas de manejo necesarias para lograr la aparición de tallos hechos con diámetro y longitud aptos para ser aprovechados, lo que sucede generalmente entre el cuarto y sexto año de establecida la plantación.

Para iniciar una plantación de guadua, es necesario planificar el manejo, definir su objetivo y la función que en el futuro deberá cumplir dicho bosque. Dentro de las funciones más importantes que cumplen estos bosques, una vez establecidos, se tiene la protección-conservación, la producción comercial, la ornamentación o el establecimiento para usos mixtos.

En esta primera fase silvicultural, las prácticas para la implementación del bosque de guadua son: obtención del material para siembra, definición de la distancia de la siembra entre chusquines según objetivo propuesto, localización y preparación del

terreno, trazo, plateo y ahoyado, siembra de las plántulas, limpias y plateos, fertilización podas y entresaca.

Un ejemplo de una plántula apta para la siembra lo podemos apreciar en esta fotografía.

Foto 23 – Plántula de guadua

2.11Obtención del Material para Siembra

Las plántulas para la siembra se preparan desde el vivero, donde se deben tener los cuidados mínimos requeridos para contar con buenas condiciones físicas y fitosanitarias; el material debe ser fuerte, vigoroso y de buen desarrollo tanto foliar como radical, condiciones que determinan en alto porcentaje, el éxito de la plantación. El material vegetal a plantar, bien sea en bolsa o raíz desnuda, debe tener las siguientes características mínimas: 20cm de altura, entre 2 y 4 tallos lignificados, con buena diferenciación radical y poseer 10 laminas foliares desarrolladas.

En el vivero las plántulas deben permanecer con buenas condiciones de humedad, para que al momento de su movilización para el establecimiento en el campo, las plántulas no sufran marchitamiento.

Definición de la Distancia de Siembra Según objetivo

La distancia de siembra en planificaciones de guadua, depende del objetivo del cultivo, la cual determina la densidad de población. Cuando el guadual se establece es con el fin de proteger o conservar suelos o cualquier otro ecosistema, el sistema de siembra es en triangulo y la distancia mínima entre plántulas es de 2.50m por 2.50m por 2.50m. Cuando se realizan plantaciones para proteger y conservar taludes adyacentes a corrientes de agua, el trazo se efectúa a partir de 1 o 2m del área mojada, dependiendo de la inundabilidad del terreno. Normalmente en orillas de ríos y quebradas se siembran entre 2 y 3 surcos a al distancia antes recomendada.

Foto 24 - Trazado para el establecimiento de un guadual distancia 4 X 4

Esta distancia de siembra, bajo buenas condiciones ambientales y edafológicas, mas el acelerado manejo posterior a la siembra, permite obtener gracias a su abundante follaje una cubierta o canopia forestal protectora, en el lapso de 12 a 15 meses, después de establecido el cultivo. Para establecer plantaciones productoras de comerciales de guadua se han evaluado diferentes distancias de siembra partiendo de

3m por 3m pasando luego a 4m por 4m y llegándose a distancias ideales de 5m por 5m; el sistema de siembra depende de la topografía del terreno, definiéndose que en pendientes inferiores al 25% será en cuadro.

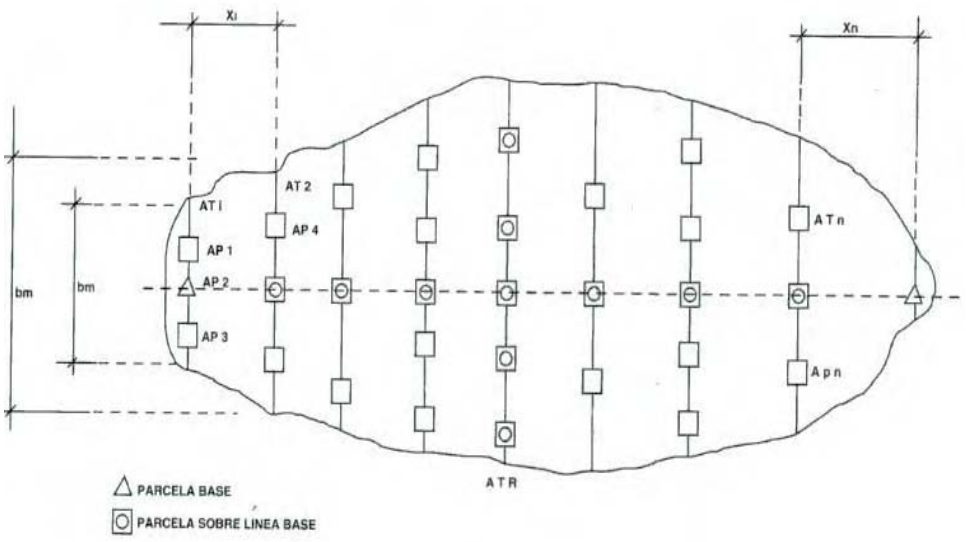
Con las dos últimas distancias de siembra se obtienen mayores diámetros en menor tiempo, debido al mayor espacio entre impedimento para la evolución y desarrollo del rizoma. Se recomienda el empleo de la distancia de siembra de 4m x 4m como lo observamos en el ejemplo ilustrado en la fotografía siguiente, por favorecer el desarrollo del diámetro y la altura de los tallos, especialmente los que están en el borde del cultivo, debido a que reciben mayor luz horas luz/día, presentan menor competencia entre plantas y las condiciones de temperatura exterior del rodal favorece su desarrollo; su docel demora mas tiempo en cubrir el terreno, hasta 20 meses.

Las investigaciones sobre el manejo silvicultural, han demostrado que después de los 3 años las plantas sembradas, pierden el trazo o surco, conformando masas discontinuas debido a que se produce acercamiento entre los culmos. En esencia, al cabo de 5 o 6 años las plantas exteriores son las más jóvenes del rodal y presentan mayor cantidad de tallos, los mejores diámetros comerciales son 10.5cm. En promedio, mientras que al interior presentan tallos con diámetro de 6cm o 8cm.

Foto 25 – 2º Trazado para el establecimiento de un guadual distancia 4 X 4

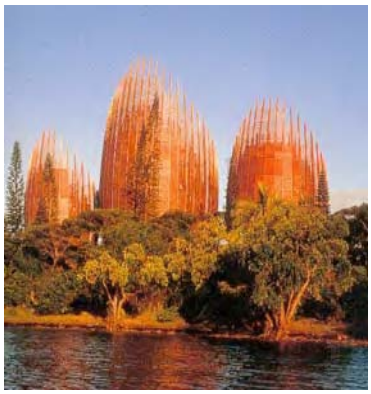
Como el sistema de siembra en cuadro no favorece en cierto grado el desarrollo de los tallos interiores, las investigaciones tienden a modificar las distancias y el sistema de siembra, de tal manera que se favorezca el desarrollo homogéneo de todos los tallos.

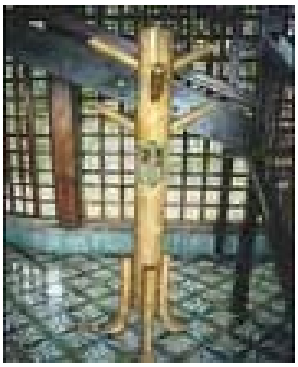
Se debe entonces buscar mayor incidencia del efecto de la luz y disminuir la competencia entre plantas. Las consideraciones anteriores, permiten plantear la necesidad que la distancia entre plantas y surcos se deben dirigir en el sentido del sol, es decir, orientar el establecimiento de la plantación, de tal manera que las plantas en los surcos reciban mayor cantidad de horas/luz/día, para lo cual se deben iniciar investigaciones con diferentes de siembra, entre plantas y surcos. En conclusión, se recomiendan algunas variaciones de distancias que deben ser objeto de evaluación.



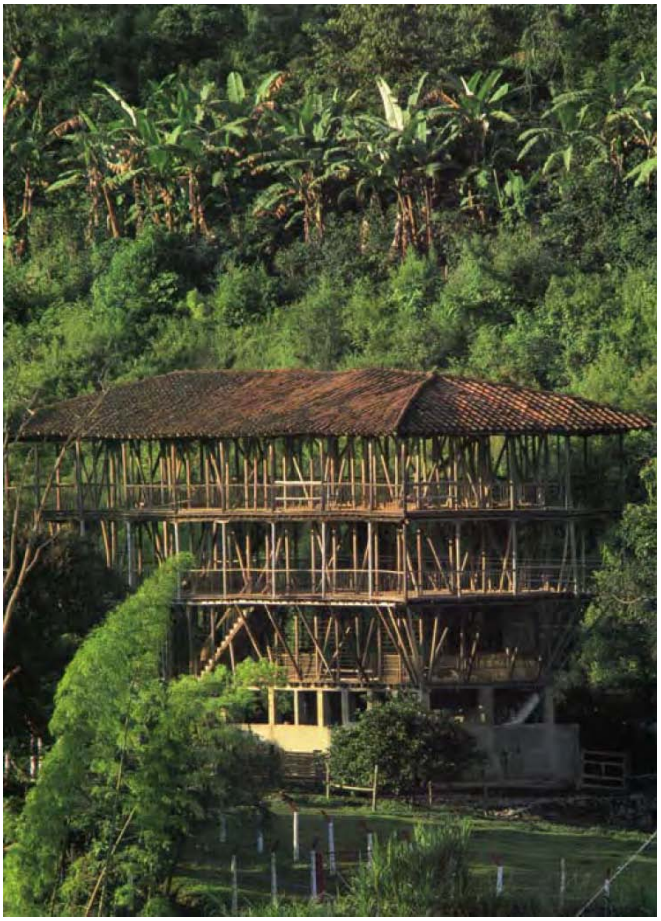
2.12 Principales Usos y Aplicaciones de la Guadua

El uso de este material no ha sido solamente para la construcción de edificios, estructuras, acabados, cerramientos, canales, escaleras, barandas, etc., siempre se ha ampliado al campo "industrial" para la elaboración de muebles, objetos, artesanías, actualmente se destaca la elaboración de muebles *"modernos"* en guadua. En países con una tradición milenaria con bambú como es el caso de China, India y Japón, el bambú es utilizado para la fabricación de pulpa de papel y en la producción de artes hasta los tres años de edad.





Fotos 26 -Casa en la Calera (Colombia) Simon Velez



Fotos 27 - Estructura Madera y guadua construcción típica para el secado del café Simón Vélez

El bambú, particularmente la Guadua angustifolia en Colombia viene siendo utilizada por el arquitecto Simón Vélez, quien en los últimos veinte (20) años ha logrado plasmar en cada una de sus obras las bondades de este material, logrando implementar esta técnica tanto en el campo residencial así como en el institucional.
El énfasis de la utilización de este material estaba dado en las estructuras de cubierta. El cálculo se realizaba por una relación simple carga estructura, uniendo varias guaduas a partir de uniones simples, aseguradas cada determinadas distancias y apoyadas sobre estructuras de madera y en algunos caso de hormigón.

En las primeras construcciones que realizó Simón Vélez (máximo exponente de la arquitectura de bambú mundial), la guadua la utilizaba con uniones simples y venciendo luces máximas de 10 m., el siguiente paso fue combinar su utilización con otras maderas como el aliso o el mangle, las cuales se encuentran de 9 ó 10m de longitud, frente a los 2.5 o 3m. de la madera rolliza que se consigue generalmente como material industria.

3.PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS. ENSAYOS EN BAMBÚ

PROPIEDADES FÍSICO- MECÁNICAS. ENSAYOS EN BAMBÚ

3.1 Bambú versus hormigón – acero y madera

Desde el punto de vista mecánico, frente a requerimientos energéticos constructivos, de resistencia y rigidez por unidad de área, facilidad y seguridad de uso, etc, el bambú se puede comparar de manera favorable con materiales de uso común como el hormigón, el acero y la madera.

La gran versatilidad del bambú se debe en gran parte a su estructura anatómica y morfológica. La sección circular ahuecada presenta algunas ventajas estructurales en comparación con secciones macizas o rectangulares de otros materiales.

“El bambú requiere solo el 57% de su masa cuando es usado como viga y solo un 40% cuando es usado como columna” (Janssen, 1988,)

Aunque la composición química de la madera y del bambú no defiere demasiado, el bambú es dos veces más rígido que la madera. La razón de esto es aún desconocida y la hipótesis más creíble es la diferencia entre el ángulo de disposición de la celulosa, las microfibrillas y la célula-eje, siendo 20º para la madera y solo 10º para el bambú.

3.2 Deformación –Eficiencia

Las siguientes tablas nos permiten comparar algunos aspectos mecánicos del bambú en relación con la energía de tensión acumulada y eficiencia frente al hormigón, el acero y la madera, (Janssen, 1981).

En la primera tabla podemos ver como el bambú puede acumular tanta energía de tensión como la madera. La capacidad del bambú y la madera está entre la del acero y el hormigón. De la máxima capacidad de acumulación de energía de tensión dependerá su fortaleza y seguridad.

Tabla 3. Energía de tensión acumulada: hormigón, acero, madera y bambú

Material de trabajo	Esfuerzo de trabajo	E	Tensión	Energía de tensión acumulada	
	(N/mm2)	(N7mm2)-6	en10	(J/m3)	(J/kg)
Hormigón	8.0	25.000	300	1.200	0,5
Acero	160.0	210.000	800	64.000	8,2
Madera	7.5	11.000	700	2.600	4,3
Bambú	10.0?	20.000	500	2.500	4,2

Tabla 4. Eficiencia : hormigón, acero, madera, bambú

Material	Esfuerzo de trabajo Peso por volumen 2(N/mm2) (kg/cm3)	E Peso por volumen (kg/cm3)
Hormigón	8/2400=0.003	25000/2400=10
Acero	160/7800=0.020	210000/7800=27
Madera	7,5/600=0.013	11000/600=18
Bambú	10/600=0.017	20000/600=33

Según la tabla 4 (Janssen,1981), el bambú es tan eficiente como el acero, y en ambas columnas de eficiencias el bambú y el acero son muy similares y mejores que las correspondientes para la madera y el hormigón.

En la tabla 5, para dar ejemplo sobre la eficiencia del bambú en flexión, se realizó un sencillo puente calculado para hormigón reforzado, acero, madera y bambú, empleando 750 N de peso muerto en tres metros de luz

Tabla 5 . Comparación eficiencia hormigón, acero, madera y bambú en hipotético puente de luz corta (3m.)

	Esfzo Tensión (N/mm2)	Sección (mm)	Deflexión (mm)	Masa del puente (kg)
Hormigón	10	40x100	9	32
Acero	160	30x30	31	13
Madera	10	35x100	15	6
Bambú	10	100x80 (*)	7,5	5

(*)diámetro externo ∅ 100mm. Diámetro interno ∅ 80mm.

El bambú y la madera son considerados eficientes en flexión ya que de ellos solo se requieren 5 y 6 kg. de material para fabricar el puente. En tanto que para fabricar el mismo puente se requieren 13 y 32 kg. de acero y hormigón respectivamente.

3.3 Seguridad del Material

El bambú, dada su capacidad de respuesta frente a terremotos y huracanes, es generalmente considerado como un material que ofrece seguridad.
Esta afirmación está relacionada con dos propiedades mecánicas a saber:

- La energía de deformación.

Se expresa como la energía almacenada en el material durante la acción o producción de cargas, y representa la relación entre la fuerza que actúa sobre el material y la deformación del mismo hasta un límite en que se produce el colapso.
Está definida como la superficie del diagrama –esfuerzo- deformación, y en este sentido el cálculo de la relación presenta los siguientes valores:

Hormigón	10MJ/kg
Acero	1400MJ/kg
Madera	20 MJ/kg
Bambú	50MJ/kg

Esto significa que desde el punto de vista de la seguridad, el acero marca una importante diferencia con relación a los otros materiales analizados, situándose el bambú en la segunda valoración.

- Desviación de resistencia:

La desviación de resistencia está relacionada con elementos que dentro de cada sistema proceden o actúan en forma incorrecta afectando los elementos que actúan correctamente. En el caso del acero, al ser un material controlado industrialmente, el grado de disipación de su energía es muy reducido.

Durante un terremoto, ciclón o desastre similar, los esfuerzos en las edificaciones se incrementan partiendo de una situación normal “0”. De acuerdo con el aspecto mecánico señalado, el acero alcanzará el colapso bastante rápido, seguido por el hormigón, y finalmente la madera y el bambú.

3.4 Resistencia a la tensión

La corteza exterior del bambú posee una mayor capacidad de resistencia a los esfuerzos de tensión que el estrato o anillo interior.

Con relación a la sección transversal los culmos delgados presentan más resistencia que los culmos gruesos. Estos factores explican la gran capacidad de resistencia a los esfuerzos de flexión de culmos delgados en comparación con los gruesos en los cuales, la proporción de fibras de la corteza exterior es más baja en relación con la totalidad de la sección transversal.

Tabla 6 Esfuerzos de tensión en culmos y secciones o láminas (Dunkelberg 1985)

	Diám . 80mm (kp/cm2)	Diam . 80mm (kp/cm2)
Fibras Estrato exterior	Min 3068 Max 3273	Min 3574 Max 3843
Fibras Estrato interior	Min 1484 Max 1633	Min 1353 Max 1947
Espesor Pared completa	Min 1627 Max 2151	Min 2325 Max 2758
Segmentos de culmo	Con nudos Sin nudos	2277 2911

La mejor propiedad mecánica que posee el bambú es su alta resistencia a la tensión paralela a la fibra (200-300 N/mm2).

La disgregación de las fibras por fuerzas que actúan perpendicularmente a las mismas, se denomina tensión perpendicular a la fibra, y se relaciona estrechamente con el clivaje, por la acción de separar el bambú a lo largo de la fibra.
También está vinculado al fenómeno del agrietamiento superficial a que son más o menos propensas todas las especies de bambú durante el secado. Por lo general las grietas o rajaduras en la superficie se presentan cuando los esfuerzos que se crean durante el secado exceden a la resistencia del bambú a tensión perpendicular a la

fibra. Por ésta razón, la tendencia que el bambú tiene a rajarse limita el uso de clavos o clivajes para asegurar las uniones.

3.5 Resistencia a la compresión

Gran parte del bambú empleado en construcción está sometido a compresión paralela a la fibra, por ejemplo, en columnas, vigas, soportes, montantes y otros, los cuales están sujetos a cargas que tienden a aplastar o a acortar los miembros longitudinalmente.

La resistencia del bambú a la compresión es relativamente alta, pero carece de significado si no se especifica el grado de sazonamiento y la relación entre la longitud y el diámetro de la pieza.

Es importante definir el grado de sazonamiento puesto que como en la madera, la humedad disminuye la rigidez de las células fibrosas, trayendo consigo una disminución de las propiedades mecánicas, sobre todo en compresión y flexión. Si la longitud del culmo es suficientemente grande con respecto a la mínima sección transversal, la resistencia bajo carga compresiva disminuye considerablemente por efecto de flexión de columna (pandeo).

Por lo tanto, una falla por flexión lateral se puede llegar a producir antes de que se derrumbe por completo la resistencia a la compresión. (Urrutia, 1983)

Tabla 7. Esfuerzo de compresión en culmos y varas (Dunkelberg, 1985)

	Culmo	
	Diam. 60mm (kp/cm)	Diám. 32mm (kp/cm2)
Paralela a la fibra	636	863
Perpendicular a la fibra	525	930

En el estudio específico de la Universidad Nacional de Colombia (1991) recomiendan entre otros aspectos los siguientes:

- Seleccionar el material a utilizar, descartando todos aquellos elementos que presenten defectos tales como grietas, curvaturas y daños producidos por agentes exteriores.

- Utilizar como valor del módulo de elasticidad E= 90913 kg/cm2

- Recomienda un factor de seguridad FS=3.0 para el esfuerzo de la compresión paralela a la fibra.

Tabla 8. Cargas de trabajo máximas, según luces para guadua angustifolia.

Luz de apoyos uniforme (mts.)	Máxima carga (Newtons)
3.00	22000
3.50	16200
4.00	12400
4.50	9800
5.00	8000

3.6 Resistencia al cortante

El esfuerzo cortante es una medida de la capacidad del bambú a resistir fuerzas que tienden a producir deslizamiento de una porción del material con relación a otra porción adyacente.

El corte es una fuerza que actúa paralelamente a un plano, en contraste a las de tensión y compresión que son perpendiculares al área considerada. La fractura por corte es muy diferente de la tensión o compresión puesto que no hay reducción localizada del área, ni tampoco alargamiento.

El empleo del bambú en la construcción involucra la presencia de esfuerzos cortantes en mayor o menor grado y las fuerzas que los producen pueden actuar a lo largo de la fibra, a través de la fibra, y en forma inclinada o en diagonal de la misma.

En culmos con paredes de 10 mm de espesor, el esfuerzo cortante es aproximadamente un 11 % más bajo que para culmos con paredes de de 6 mm de espesor debido a la distribución y mayor porcentaje de fibras fuertes en la sección transversal.

Ensayos realizados en Colombia con Guadua angustifolia (27 muestras) presentaron un valor máximo de 144 kg/cm2 y el mínimo de 45 kg/cm2, con promedio de 93 kg/cm2.

El esfuerzo de corte deberá ser tomado muy en cuenta especialmente en el diseño de uniones o juntas. La mayoría de estos componentes constructivos están sujetos a corte paralelo a la fibra.

Para corte perpendicular a la fibra no ocurre falla directa en el plano de la sección transversal, en vista de que las otras propiedades hacen que la falla ocurra en alguna u otra forma, causada por aplastamiento a través de la fibra. El efecto corte oblicuo o en diagonal se puede observar en los planos inclinados de falla en columnas cortas ensayadas a compresión.

La falta de una mayor respuesta al cortante es evidentemente una desventaja para el uso estructural del bambú, sin embargo, es una gran ventaja para el empleo del material en la industria artesanal (cestería, esteras, muebles,...) y en la fabricación de utensilios que requieren itas o láminas.

3.7 Resistencia a la flexión

El comportamiento estructural del bambú en flexión es muy importante debido a que en muchos casos su uso está especialmente limitado a atender este tipo de esfuerzos.

El siguiente diagrama representa el momento flector para una pieza de bambú. En el estrato neutro A-B el esfuerzo cortante es máximo y por lo tanto con un alto riesgo de falla.

En la parte alta C el esfuerzo de flexión es máximo y en el caso de presentarse un momento positivo actuará en compresión con un esfuerzo lateral excesivo que al actuar de forma transversal a las fibras se constituye en un riesgo adicional de falla en el bambú (Janssen ,1981)

Ensayos comparativos realizados en culmos verdes y secos (80 y 12% de contenido de humedad respectivamente), presentaron como resultado un incremento aproximado del 50% en la resistencia al esfuerzo de flexión en el bambú seco.

Tabla 9. Posición del esfuerzo a lo largo del culmo. (Janssen, 1981)

	Base	Medio	Apice
Esfuerzo final flexión (N/mm2)	73	65	66
Módulo de elasticidad (N/mm2)	10700	11850	13800

Las diferencias son significativas observándose una aparente contradicción: el esfuerzo de flexión decrece con la altura y el módulo de elasticidad se incrementa debido a que el porcentaje de fibras es mayor.
Esto mismo sucede en culmos secos.

3.8 RESULTADOS DEL ENSAYO A FLEXIÓN EN MUESTRAS DE BAMBÚ DE LA ESPECIE Guadua angustifolia Kunth

En esta proyecto presentamos los resultados de las pruebas de esfuerzo a flexión conseguidos hasta la actualidad, para muestras experimentales de la especie de Bambú "Guadua angustifolia"; siguiendo la Norma Internacional DIN EN 52 186 (1978). El Módulo de Elasticidad MOE no varía con la humedad del ambiente, ni con la longitud del tramo ni con la edad, pero el MOR presenta diferencias significativas con el ambiente y la edad, pero no con el tramo. Los resultados para el MOE oscilan entre 11.700 N/mm2 a 13.266 N/mm2 y el de esfuerzo de rotura MOR, fue de 87.981 N/mm2 para (85%HR/20ºC) y 122.917 para (65%HR/20ºC) presentando diferencias significativas.

3.8.1. INTRODUCCIÓN

El esfuerzo de Flexión en el Bambú para culmos se determina de acuerdo ISO 22 157-1:2004 Bamboo –
Determination of physical and mechanical properties – Part 1 [1], con un test de flexión que se realiza aplicando la carga perpendicular al eje del culmo. Con especimenes de Bambú, en éste caso Guadua se determina la capacidad de flexión de los culmos en cuatro puntos, la carga versus la curva de deflexión vertical y el (MOE) Módulo de Elasticidad. Para éstas pruebas de Flexión se empleo la Norma DIN EN 52 186 [2] usada para maderas. La ecuación 1 representa el cálculo del esfuerzo último de flexión.

$$\sigma ult = F*L*D/2*1/6*I; \quad MPa \text{ (o N/mm2)} \quad (1)$$

Donde: σult : El esfuerzo último de flexión, se expresa con

una precisión de 1 MPa (N/mm2)
F : La máxima carga aplicada en N. (el total de
carga aplicada en dos puntos de carga).
L : El espacio libre entre apoyos en mm.
D : Diámetro externo en mm.
I : El momento de inercia en mm4.

El Módulo de Elasticidad, conocido también como Modulo de Young's, para el esfuerzo de Flexión esta dado por la pendiente de la parte lineal de la curva Esfuerzo-deformación unitaria, ver figura 1. La ecuación 2 presenta el calculo del modulo de elasticidad:

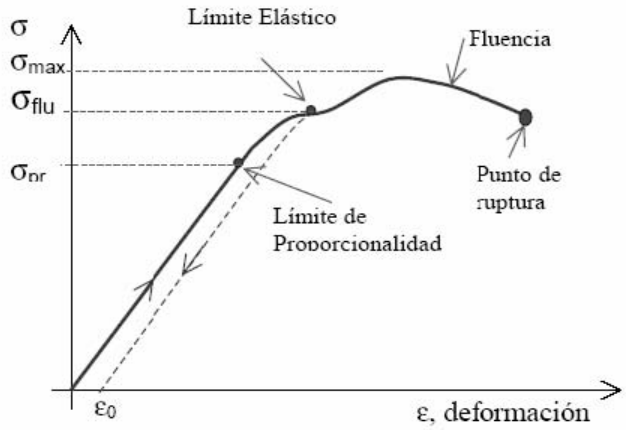


Figura 1. Curva esfuerzo – deformación.

E= 23*F*L3/1296* δ * I (MPa o N/mm2) (2)

Donde:

E : Módulo de Elasticidad (MOE),
F: La máxima carga aplicada en N. (el total de carga aplicada en dos puntos de carga),
L: El espacio libre entre apoyos en mm,
I : El momento de inercia en mm4,
δ: La deflexión en L /2 en mm

La flexión estática se analiza principalmente en tres propiedades, ellas son: (MOE) Módulo de Elasticidad, (MOR) Módulo de Rotura y (ELP) Esfuerzo al Límite Proporcional. Para las pruebas de flexión [3] empleó la ecuación 3 para determinar el MOE:

E= (P2 – P1)L3 / 48 * J * Λy ; (Kp/cm2) (3)

Donde:

P1,P2, : fuerzas que producen es esfuerzo,

I : Momento de inercia,

L :El espacio libre entre apoyos.

Δy : Deflexión en dirección *y*.

Atrops J. L. (1969) □3□, encontró una variación entre los resultados del MOE, el MOE de tracción fue mayor que el de flexión y el MOE de compresión más pequeño que el MOE de tracción y flexión, esto es atribuido a la variación de diámetros del Bambú rollizo (redondo), que varío de 70 – 100 mm aprox. Recomienda tomar como un MOE para el bambú de 200.000 Kp/cm2 **(20.000 N/ mm2**) pero no se menciona en esté estudio que especie de Bambú utilizó en sus ensayos.

Para Limaye V. D., (1952) [4] el MOE y el MOR a esfuerzos de flexión, es bajo en el tope y alto en la base, hace unas observaciones importantes del porque la base es más fuerte y dice que esto se debe a que el espesor de pared en la parte de abajo esta cerca del piso, debido a los esfuerzos a que ésta sometido el culmo cuando está en pie (vivo). Ésta misma apreciación la comparten otros investigadores [5][6] (Janssen J. A. A., 1981; Saltar M. A., 1991).

El tema del esfuerzo último de flexión es el punto más importante que tiene el Bambú de acuerdo a [4], el esfuerzo de flexión es significativo a lo largo del culmo, pero el tope es más bajo por ser más tieso. El nudo y los internudos en las pruebas de flexión fueron significativos para tramos cortos, pero no significativos para tramos largos. El esfuerzo de flexión el MOE se incrementó parcialmente a lo largo de la longitud del culmo, pero no así en el ELP y en el MOR con las especies *Gigantochloa levis* y *Bambusa blumeana* [7] (Espiloy Z. B., 1985), para [8] (Abd. Latif M. & Mohd. Zin J., 1992) tuvo la misma apreciación que Espiloy con respecto al MOR, con las especies *Gigantochloa schortechnii* y *Bambusa blumeana.* Lo interesante de éstos estudios son la coincidencia del comportamiento del MOR para la *Bambusa blumeana,* lo que denota una tendencia uniforme de las propiedades mecánicas de acuerdo a la especie, también se analiza que no todas las propiedades mecánicas tienen la misma tendencia y que puede variar con la especie

Sotela J., (1990, 1992) [9] realizó 12 ensayos a flexión con *Guadua angustifolia*, para determinar las propiedades de la especie proveniente de dos sitios de Costa Rica, zona sur del país y zona Atlántico, se efectuaron cargas de larga duración y de corta, el autor concluyó que el MOE no varío para ninguno de los dos sitios en cargas a de flexión, El MOE con las muestras en condición seca al aire fue 28% mayor que las muestras verdes (frescas), el MOR de Flexión de las muestras de procedencia Sur fueron superiores 49% que las del Atlántico.

3.8.2. MATERIALES Y MÉTODOS

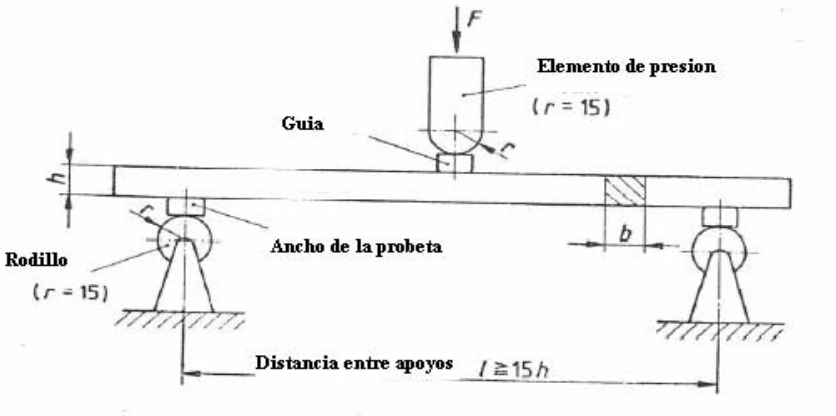
El material usado en esta investigación es de la especie "*Guadua angustifolia*" del biotipo cebolla, seleccionado y posteriormente extraído de los guaduales que posee el Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Para la experimentación se escogió como variable importante la edad de la Guadua, se cortó una Guadua verde, otra madura y otra sobremadura, para la fabricación de las probetas. El proceso de corte se realizó siguiendo un procedimiento para no afectar en el Guadual, y se puede consultar en la referencia [10], igualmente se hizo trazabilidad de las respectivas muestras. Otra variable importante a considerar en el experimento fue el ambiente de climatización y para tal efecto se organizaron dos lotes de probetas, uno en un ambiente normal (65%/20°C ;humedad relativa y temperatura) que dio como resultado un (CH) contenido de humedad final del material de ~ 10% y otro en ambiente simulando el tropical o húmedo (85%/20°C ; humedad relativa y temperatura) que dio como resultado un (CH) contenido de humedad final del material de ~ 15 %.

La descripción de cómo se localizan los tramos de la guadua, se encuentra en la referencia [11]

La figura 2 muestra el principio físico del experimento según norma DIN 52 186 para pruebas de madera a flexión.

Según DIN 52 186 el esfuerzo de rotura en flexión σ ult. se calcula con la ecuación 4



2

σ *ult* 2 = 3*F*Lapoyo / 2 * L2 *L1 (4)

Donde:

σult : Esfuerzo de rotura en flexión en N/mm2 o en MPa.
F : La máxima carga de rotura aplicada en N. (el total de carga aplicada en dos puntos de apoyo).
lapoyo : longitud entre apoyos de la probeta en mm. Se recomienda mayor o igual a 15 veces la altura de la probeta.
l1 : altura de la probeta en mm.
l2 : ancho de la probeta en mm.

La longitud total de la probeta de flexión es de 200 ± 1mm, con l1 = l2 = 10 ± 1mm. Ver figura 3.

La prueba de flexión se realiza sometiendo a las fibras de la probeta a una fuerza perpendicular a la cara tangencial longitudinal exterior (TLext.), y la determinación del esfuerzo último en flexión se realiza incrementando gradualmente la fuerza a la probeta, hasta destruirla.
Según DIN 52 186 el modulo de elasticidad en flexión E o MOE se calcula con la ecuación 5.

$$E = L^3 * \Delta F / 4 * L2^3 * L1 * \Delta\delta \qquad (5)$$

Donde:

E: Modulo de elasticidad en flexión en N/mm2 o en MPa.

ΔF: Diferencial de carga aplicada en N.

Δδ: Diferencial de deformación por efecto de la carga en mm.

El diferencial de carga aplicada entre apoyos es de 2000 N a una rata de aplicación de 4mm/minuto. El dimensionamiento de las probetas se hizo acorde a la norma DIN 52 186. Se aclara que esta norma en Europa se utiliza para madera y se aplica a la Guadua por considerarla un Bambú maderable. La otra razón para aplicar la norma es que a diferencia de la norma ISO 22 157-1:2004 Bamboo – Determination of physical and mechanical properties – Part 1 en la cual se usa el culmo entero como probeta, esta permite tomar una probeta más pequeña de la Guadua.

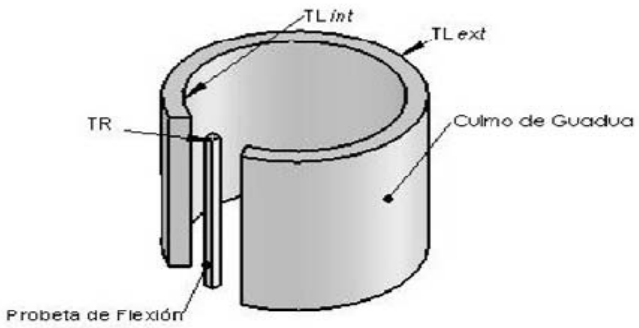


Figura 2. Esquema probeta para prueba de flexión y sitio de extracción en la Guadua

Figura 4. Ensayo de flexión de una probeta de Guadua.

Para el análisis estadístico, se utilizó como metodología la formación de bloques en un diseño factorial □12□, en donde los bloques están dados por la edad de la Guadua, formando tres bloques de materia prima para realizar las pruebas, los bloques fueron: verde, madura y sobremadura. En cada bloque se asignaron aleatoriamente los 6 tratamientos formados por dos factores que se tuvieron en cuenta en la realización del experimento, el factor tramo de la guadua con tres niveles: cepa, basa y sobrebasa y el factor ambiente con dos niveles: normal (65% de humedad relativa) y húmedo (85% de humedad relativa). El análisis estadístico para las variables módulo de elasticidad y esfuerzo de rotura, se basa en un análisis de varianza (ANOVA) siguiendo un modelo lineal que tiene en cuenta el efecto de cada uno de los factores, el efecto del bloqueo y la interacción entre los dos factores. El número de unidades analizadas fue de 18, 3 repeticiones por tratamiento, una en cada bloque. El nivel de confiabilidad mínimo para los resultados es del 95% de confianza y los datos se procesaron en el software SPSS versión.

3.8.3 . RESULTADOS

En la tabla 10 se muestran los resultados de los promedios de Módulo de Elasticidad, de acuerdo a la edad de la Guadua y en la tabla 11, se presentan los promedios de módulo de elasticidad para los tramos de la guadua: cepa, basa y sobrebasa, además de clasificar los resultados según el ambiente: húmedo o normal. El análisis de varianza implica diferencias significativas en los módulos de elasticidad promedios de los diferentes tratamientos del experimento ($p < 0,001$), ni la interacción entre los factores ($p = 0,627$), ni el factor ambiente ($p = 0,079$), ni el factor tramo de la Guadua ($p = 0,385$) son significativos. El efecto del bloqueo es significativo ($p = 0,026$), es decir la edad de la guadua muestra un aporte importante en la variabilidad.

	Módulo de elasticidad (N/mm2)	Intervalo de confianza al 95% (N/mm2)	
Edad	Media	Límite inferior	Límite superior
Verde	11631	10481	12780
Madura	12476	11327	13626
Sobremadura	13996	12847	15146

Tabla 10. Resultados Módulo de Elasticidad por Edad de la Guadua

	Módulo de elasticidad (N/mm2)	Intervalo de confianza al 95% (N/mm2)		
Ambiente (% HR)	Tramo	Media	Límite inferior	Límite superior
Normal (65/20)	Cepa	13266	11641	14892
	Basa	14129	12503	15754
	Sobrebasa	12455	10829	14080
Húmedo (85/20)	Cepa	11773	10147	13398
	Basa	12466	10841	14092
	Sobrebasa	12118	10492	13744

Tabla. 11. Resultados Módulo de Elasticidad por Tramo de la Guadua y Ambiente.

	Esfuerzo de Rotura (N/mm2)	Intervalo de confianza al 95% (N/mm2)	
Ambiente (%HR/ ºC)	Media	Límite inferior	Límite superior
Normal (65/20)	122.917	114.638	131.195
Húmedo 85/20	96.260	87.981	104.539

Tabla 12. Resultados MOR (N/mm2) por Ambiente

En la tabla 12 se presentan los promedios de esfuerzo de rotura de acuerdo al ambiente, en la tabla 10 los promedios de acuerdo a la edad de la Guadua y en la tabla 11 los promedios de acuerdo al tramo de la Guadua y al ambiente simultáneamente. El análisis de varianza muestra diferencias significativas en los esfuerzos de rotura promedio de los diferentes tratamientos del experimento ($p < 0,001$), la interacción entre los factores no es significativa ($p =0,771$), el factor tramo de la Guadua ($p = 0,221$) no es significativo y el factor ambiente ($p < 0,001$) si es significativo. El efecto del bloqueo es significativo ($P < 0,001$), la edad de la Guadua muestra un aporte importante a la variabilidad, al igual que el ambiente. Los resultados significativos se presentan gráficamente en las tablas comentadas.

	Esfuerzo de Rotura (N/mm2)	Intervalo de confianza al 95%. (N/mm2)	
Edad	Media	Límite inferior	Límite superior
Verde	88.265	78.126	98.404
Madura	108.213	98.074	118.353
Sobremadura	132.287	122.147	142.426

Tabla. 13. Resultados MOR (N/mm^2) por Edad de la Guadua

3.8.4 . CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Los factores ambiente (%HR) y tramo de la guadua no interactúan entre sí en los resultados de ninguna de las dos variables medidas en el experimento: Módulo de Elasticidad y Esfuerzo de Rotura.

La variable Módulo de Elasticidad presenta diferencias significativas en sus promedios según la edad de la Guadua, las Guaduas verdes se diferencian significativamente de las sobremaduras, siendo menor el promedio en las verdes, pero no hay diferencias significativas entre los promedios de verdes y maduras , ni entre maduras y sobremaduras.

En el caso de Esfuerzo de Rotura, la edad de la Guadua muestra promedios significativamente diferentes (en las tres edades), mostrando un aumento del promedio de esfuerzo de rotura a medida que aumenta la edad de la Guadua. También hay diferencias significativas de acuerdo al ambiente, siendo mayor el promedio en el ambiente normal (65%HR), es decir entre menos humedad relativa del ambiente mayor son las propiedades mecánicas de la Guadua.

La diferencia del Esfuerzo de Rotura MOR entre los dos ambientes tuvo un incremento del 40% del valor de clima húmedo (85%HR/20ºC), de 87.981N/mm2 a 122.917 N/mm2; estos datos tienen concordancia con los resultados de Sotela J., (1990, 1992) para el MOR y también con el MOE ya que no presentó variación entre los sitios y para este estudio no hubo diferencias con respecto al tramo, el ambiente ni la edad.

3.9 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A TENSIÓN Y CIZALLADURA DE LA Guadua angustifolia

3.9.1 RESUMEN

Para Guadua angustifolia Kunth fueron determinados los valores últimos de los esfuerzos a tensión y cizalladura. Los resultados estadísticos mostraron valores promedios a Tensión y cizalladura de 190,70 MPa (1945,92 kgf/cm2) y 5,57 MPa (56,84 kgf/cm2), respectivamente, indicando que el material como elemento de

ingeniería presenta una alta resistencia en dirección paralela a la orientación de las fibras.

Por ser la guadua un material ampliamente utilizado en estructuras tanto a nivel rural como urbano, se han generado intereses por analizar el comportamiento de estos elementos cuando son sometidos a diferentes esfuerzos entre los cuales el de tensión y cizalladura han merecido un interés particular, especialmente para el diseño de uniones.
Existen valores obtenidos en varias investigaciones en torno a este material como elemento estructural, los cuales varían dependiendo la procedencia del material, el espesor de la pared y la parte del culmo utilizada.
Para obtener valores de resistencia máxima, se deben realizar pruebas directamente en el laboratorio, lo que indica que para encontrar dicho valor al momento de utilizar el material como elemento estructural incrementa de alguna manera los costos en los proyectos. Uno de los principales inconvenientes que se presenta en la guadua utilizada como material estructural, ocurre cuando se somete a esfuerzos de tensión y de cizalladura, dadas las características propias del material, principalmente por la dirección paralela de las fibras en su estructura interna.
De los ensayos realizados por Cheatle y López (2002) basados en la norma dada por el INBAR (The International Network for Bamboo and Rattan) (1999), encontraron un valor de esfuerzo admisible promedio de 6,87 MPa y 53,5 MPa para elementos de guadua sometidos a cizalladura y tensión paralela respectivamente.

De igual manera, Díaz y González (1992) determinaron para elementos de guadua provenientes de Antioquia y Risaralda, sometidos a cizalladura, esfuerzos promedios de 5,78 MPa y de 7,74 MPa. También, Castrillón y Malaver (2004), para elementos de guadua sometidos a cizalladura registraron valores promedios de 7,84 MPa y en tensión paralela a la fibra de 91,87 MPa. Por otra parte, Martínez (1992), reportado por Camacho y Páez (2002), midieron esfuerzos promedios de 34,6 MPa para elementos sometidos a tensión y de 4,7 MPa para elementos a corte o cizalladura.

Experimentos realizados en elementos de bambú Calcuta por Ahmad (2000), halló valores de 156,14 MPa a nivel de la basa y de 185,3 MPa en la sobrebasa. Así mismo, Janssen (2002), estableció para la Guadua angustifolia Kunth un esfuerzo promedio de 148,4 MPa para elementos sometidos a tensión paralela y de 3,5 MPa para elementos de guadua sometidos a esfuerzo de cizalladura.

De acuerdo a las normas ASTM 143-94 e ISO TC-165 del INBAR (1999), el esfuerzo último o de ruptura (sult), se pueden obtener a partir de la siguiente expresión:

Determinación de la resistencia mecánica a tensión.

$$\sigma_{ult} = \frac{P_{ult}}{A} \quad (1)$$

En donde Pult es la carga última o máxima
(N) y A es el área (mm2). El área es la medida de la sección transversal en la contracción, siendo esta igual al valor resultante de multiplicar un ancho fijo de 5mm por un espesor variable (B) según el ancho de la pared del elemento (Figura 1).
Figura 1.Probetas para realizar en Guadua angustifolia Kunth pruebas de tensión paralela a la fibra.
A partir de la norma ISO TC-165 del INBAR (1999), se puede determinar el esfuerzo último a cizalladura, sometiendo el material a una velocidad de carga de 0,01 mm/ seg a partir de la siguiente expresión:

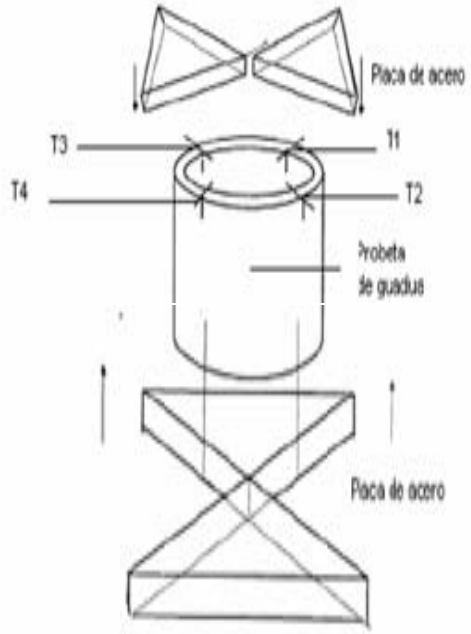
$$\sigma_{ult} = \frac{P_{ult}}{\sum(T * L)} \quad (2)$$

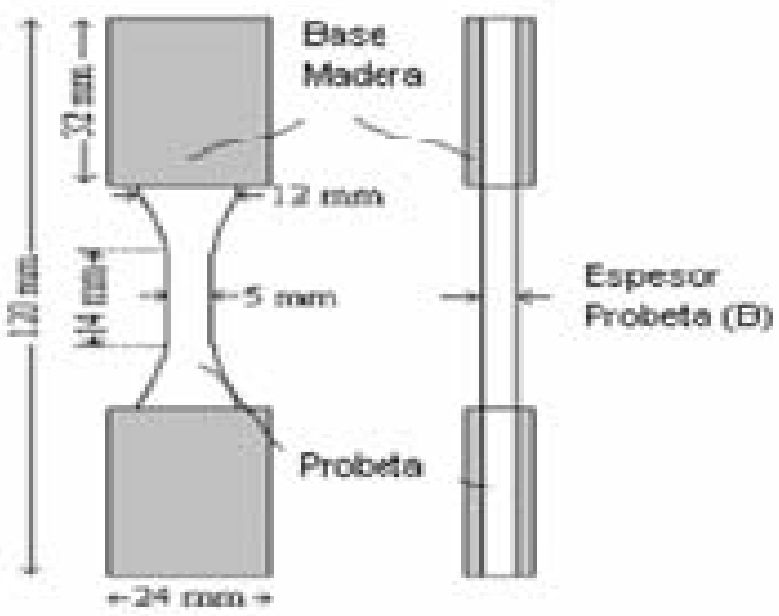
Donde:

σ_{ult}=Esfuerzo último a cizalladura (N/mm2)
Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín.Vol.58, No.1.p.2709-2715.2005.

T = Espesor de la pared (mm)
L = Longitud de la probeta (mm) en la Figura 2

.





Tanto el espesor como la longitud de la probeta deben ser medidos en cuatro puntos del elemento, como se da a conocer de cizalladura en Guadua angustifolia Kunth .

El objetivo de esta investigación fue determinar bajo ensayos de tensión y cizalladura la resistencia mecánica de elementos de la Guadua angustifolia Kunth para contenidos de humedad menores del 20 % base seca.

3.9.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. El material para los ensayos fue extraído del municipio de Venecia Antioquia-Colombia, con una altura aproximada de 1600 msnm, temperatura de 20 ºC y humedad relativa del 67 %.
El trabajo de investigación se realizó en los laboratorios de Productos Forestales de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Metodología. Para el estudio se seleccionaron 18 elementos para las pruebas a cizalladura y 15 a tensión paralela al grano. Dicho material correspondió a Guadua angustifolia Kunth forma cebolla, de la zona media del culmo o zona basal, con diámetros externos entre 9 y 12 cm y espesores de pared entre 0,6 y 1,0 cm. para tensión y entre 0,7 y 1,5 cm. para cizalladura.
El material seleccionado, fue secado naturalmente hasta alcanzar contenidos de humedad en base seca menores del 20 % determinado por la norma S358.2 dada por ASAE (American Society of Agricultural Engineers), (1990). Posteriormente, a cada uno de estos se les caracterizó físicamente midiendo el espesor de las paredes (B) para las probetas a tensión, y los espesores T1, T2, T3 y T4 en las de cizalladura. Estos valores de B y T fueron determinados mediante un micrómetro digital con una precisión de 0,01 mm.

Teniendo en cuenta que al realizar las medidas para los ensayos a cizalladura según la norma ISO TC-165 del INBAR (1999), los espesores T1 y T4 fueron muy similares al igual que T2 y T3, y como la longitud de las probetas en los cuatros puntos fueron iguales, el esfuerzo fue determinado de la siguiente forma:

$$\sigma_{adh} = \frac{P_{ult}}{(T_1 * L) + (T_2 * L)} \quad (3)$$

Los esfuerzos a tensión paralela al grano fueron determinados de acuerdo a la expresión (1), según las normas ASTM 14394 e ISO TC-165 del INBAR (1999).
La carga última (Pult), tanto en las pruebas

de tensión como de cizalladura fueron determinadas gráficamente de las curvas obtenidas de carga (N) contra deformación (mm.)

3.9.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esfuerzo último a tensión. El esfuerzo último a tensión fue determinado mediante la expresión (1). Los resultados de los análisis estadísticos se muestran en la Tabla 1, donde el coeficiente de variación (34%) indica una alta variabilidad de la estructura del material, situación esta típica para elementos de naturaleza biológica. A su vez el valor encontrado del esfuerzo último promedio es de 190,70 MPa. Las diferencias pueden ser consecuencia de la variabilidad y heterogeneidad del material vegetal usado en los estudios como también a los parámetros de operación y medida con los cuales se realizaron los respectivos ensayos.

En la Figura 3, se muestra el valor promedio del esfuerzo último a tensión dado por diferentes investigadores para elementos de Guadua angustifolia Kunth y el valor encontrado en esta investigación. Un análisis de la Figura 3, indica que existe una alta discrepancia entre los valores definidos, mostrando diferencias máximas de 82 % y mínimas de 22 % con respecto al valor encontrado. Para otras especies tales como bambú, Ghavami (2004) comenta que el esfuerzo a tensión es relativamente alto y puede alcanzar los 370 MPa.

Esta alta variabilidad muestra la necesidad de estandarizar las pruebas de ensayo a tensión para la guadua, de tal menara que sus resultados puedan ser utilizados en el diseño de estructuras.

Determinación de la resistencia mecánica a tensión.

PARÁMETRO	Promedio (MPa)	Intervalos de confianza al 95 % (MPa)		Coeficiente de variación (%)
		Límite inferior	Límite Superior	
Esfuerzo último (σ_{ult})	190,70	152,3	229,10	34

Tabla 14. Esfuerzo último para elementos de Guadua angustifolia Kunth sometidos a tensión paralela al grano.

Con respecto al acero se puede encontrar que para un contendido de 0,2 % de carbono, la resistencia de este material es 2,4 veces más alta con respecto a la guadua.

Esta característica hace que la guadua se presente como un material alternativo de construcción y sea atractivo para aplicaciones de diseño en ingeniería que incluyan elementos sometidos a tensión.

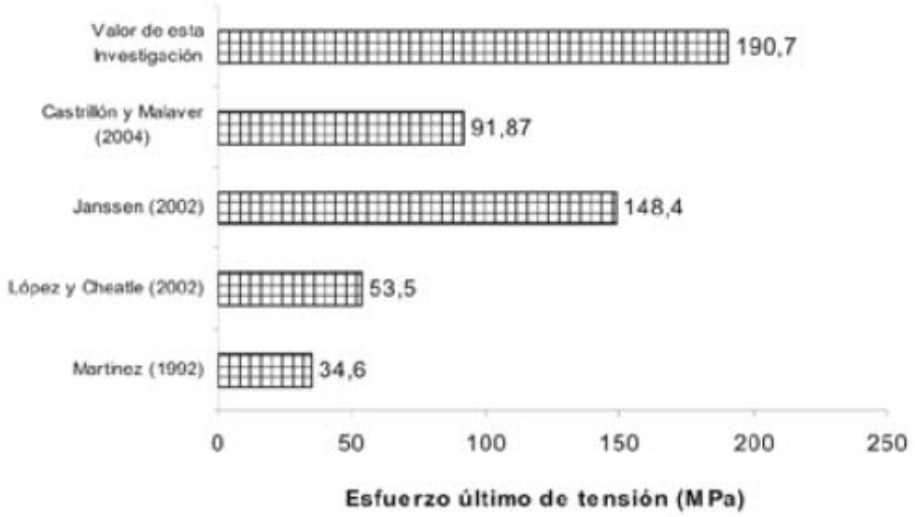


Figura 3. Esfuerzo último a tensión obtenido para *Guadua angustifolia* Kunth.

La variabilidad de la resistencia mecánica de la guadua disponibles hasta el momento (Figura 3), pueden ser debidas a los parámetros de operación del ensayo y a las

características intrínsecas del material, ya que el material vegetal puede variar anatómicamente y estructuralmente dependiendo de la región en la cual se encuentre cultivado. Además, dependiendo de la zona del culmo donde se hayan tomado las muestras y del contenido de humedad de las mismas, ya que la resistencia de los elementos varía de manera inversamente proporcional de la cepa hacia la parte basal en el culmo.

Esfuerzo máximo de cizalladura.

El esfuerzo máximo a prueba a tensión, la guadua presenta un esfuerzo máximo a cizalladura que fue determinado mediante la expresión figura 3. Los resultados de los análisis estadísticos se muestran en la tabla 15, de la cual se puede inferir que en comparación con los resultados de la prueba a tensión, la guadua presenta una más

baja resistencia mecánica en dirección perpendicular a sus fibras. Esta diferencia en resistencias indica la alta anisotropía presente en el material.

Parámetro	Promedio (MPa)	Intervalos de confianza al 95% (MPa)		Coeficiente de variación (%)
		Límite inferior	Límite superior	
Esfuerzo último (ult)	5,57	5,10	6,10	17

Tabla 15. Esfuerzo último.

En la tabla 16 se citan algunos valores en guadua bajo ensayos de cizalladura, dentro de los cuales se observa que el resultado que mayor diferencia presenta con respecto a la investigación actual es de 40 % y con un mínimo del 15% encontrándose que estos valores son cercanos a los intervalos de confianza obtenidos . Sin embargo, estas variaciones no son tan amplias comparadas con el ensayo a tensión, ya que en las pruebas de tensión o tracción los puntos de agarre ocasionan grandes centros de concentración de esfuerzos y deslizamientos relativos.

Tabla 16. Resistencia de elementos de Guadua angustifolia Kunth sometidos a cizalladura.

Investigador	ult (MPa)	% de variación con respecto a la investigación actual
Díaz y González (1992)	7,74	39,7
Martínez (1992)	4,70	15,1
López y Cheatle (2002)	6,87	23,3
Janssen (2002).	4,50	20,7
Castrillón y Malaver (2004)	7,84	40,7
Investigación actual	5,57	0

3.9.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Siendo el ensayo a tracción uno de los más importantes al momento de dimensionar estructuras con guadua, se observan notables diferencias en los valores encontrados, que aunque siguiendo las mismas normas (INBAR,1999) varían hasta en un 82% de diferencia.

Esto puede ser originado por la anisotropía del material, a los parámetros de operación del ensayo y a condiciones ambientales de humedad relativa y temperatura, pero muestra la necesidad de estandarizar los procedimientos en las pruebas principalmente en los puntos de agarre de las probetas en donde se presentan los principales inconvenientes por desplazamiento.

3.10 Resistencia al clivaje

La resistencia al clivaje se utiliza para denotar la resistencia que ofrece el bambú al desgarramiento. Se expresa como la fuerza necesaria para provocar la falla por unidad de longitud (Kg/cm2).
Una baja resistencia al clivaje favorece el corte longitudinal de los culmos, mientras que una alta resistencia es requerida para uniones con pernos, clavos, clivajes y otros tipos.

Tabla 17 - Resistencia al clivaje para algunas especies de gran porte (Urrutia,1983)

Especie	Media muestral (kg/cm)	Desviación estándar (Kg/cm)
B.textilis	50	5,6
B. tulda	48	7,3
B. vulgaris	46	5,4
G. angustifolia	49	7,5
G. verticillata	53	9.9

3.11 Elasticidad

Culmos delgados o láminas extraídas de la pared del culmo proveen valores más altos de resistencia en relación con el área de la sección transversal, en comparación con culmos de sección más gruesa.

El incremento de frecuencia de las fibras fuertes en la superficie exterior del culmo, tiene con relación a la elasticidad, el mismo efecto de reforzamiento como respuesta bajo cargas de tensión, cortante o flexión.

El módulo de elasticidad del bambú decrece entre un 5 y 10% con el incremento de carga, semejante a lo que sucede con la madera maciza.
Para efectos de cálculo estructural podrá usarse un módulo de elasticidad de 200.000kp/cm2 (Dunkelberg, 1985)

Tabla 18 - Módulo de elasticidad en compresión para algunas especies de gran porte con nudo y sin nudo (Urrutia, 1983)

Especie		Media muestral (kg/cm2*10)	Desviación estándar (kg/cm2*10)
B.textilis	Con nudo	1.98	0.47
	Sin nudo	2.44	0.44
B. tulda	Con nudo	2.23	0.67
	Sin nudo	2.92	0.94
G. angustifolia	Con nudo	1.83	0.19
	Sin nudo	1.46	0.17
G. vertic.	Con nudo	1.41	0.25
	Sin nudo	1.64	0.41

Tabla 19 - Módulo de elasticidad en tensión para algunas especies de gran porte (Urrutia, 1983)

Especie		Media muestral (kg/cm2*10)	Desviación estándar (kg/cm2*10)
B.textilis	Con nudo	2.64	0.31
	Sin nudo	2.70	0.26
B. tulda	Con nudo	2.94	0.64
	Sin nudo	3.18	0.43

G. angustifolia	Con nudo	1.54	0.28
	Sin nudo	2.31	0.53
G. vertic.	Con nudo	1.40	0.23
	Sin nudo	2.52	0.33

K. Datta y H. E. Glenn, realizaron experimentos con diferentes especies. Los datos que a continuación se indican corresponden a los valores máximos y mínimos obtenidos de los ensayos con algunas especies.

Tabla 20 - Resistencia y módulo de elasticidad a la tensión en la zona del nudo:

	Resistencia (kg/cm2)	Módulo de elasticidad (kg/cm2)
Màxima	3.480	316.395
Promedio	2.285	
Mínima	1.265	140.620

Tabla 21 - Resistencia y módulo de elasticidad a la compresión:

	Resistencia (kg/cm2)	Módulo de elasticidad (kg/cm2)
Màxima	863	199.000
Mínima	562	151.870

Tabla 22 - Resistencia y módulo de elasticidad a la flexión:

	Resistencia (kg/cm2)	Módulo de elasticidad (kg/cm2)
Màxima	2.760	220.000
Mínima	763	105.465

Ahora podemos sacar conclusiones sobre estos estudios realizados por diferentes especialistas sobre la resistencia y elasticidad del bambú, son las siguientes:

- Las muestras que presentan un módulo de elasticidad alto, dan una resistencia también alta.

- El valor de la resistencia a la compresión del bambú es mucho menor que el de la tensión en una misma especie.

- El bambú es aproximadamente cuatro veces más fuerte en tensión que en compresión, en una misma especie, en nuestro caso dándole importancia a la Guadua angustifolia. (especie de nuestro seguimiento de obra posterior).

- El módulo de elasticidad a la compresión es ligeramente inferior que en tensión.

- La variación de las características de la flexión en bambúes de diferentes edades no es muy significativa.

- El módulo de elasticidad a la flexión es mayor que el módulo de elasticidad a la compresión.

- El módulo de elasticidad a la tensión es mayor que el módulo de elasticidad a la flexión.

- La resistencia a la tensión es mayor que la resistencia a la flexión, y ésta a su vez es mayor que la resistencia a compresión.

3.12 Comportamiento ante el fuego:

Sobre las bases de las altas concentraciones de ácido de silicio en la corteza y la alta densidad, el bambú es clasificado, de acuerdo a la norma DIN4102 (comportamiento de quemado de materiales de construcción), como inflamable pero poco combustible. La susceptibilidad a la ignición depende particularmente de la posición del componente, porque componentes horizontales son menos susceptibles que los diagonales o los verticales.

En una caña da bambú horizontal, las llamas se esparcen anularmente al nodo próximo.
Entonces el fuego se apaga, porque la llama no puede pasar fácilmente de un nodo a otro en un material poco combustible.

Si el segmento intermedio (entre nodos) revienta, mostrando roturas longitudinales y transversales, la combustión es más rápida. Además, las rajaduras transversales disminuyen significativamente la capacidad de soportar las cargas (Fatiga).
Un tubo de bambú, que es llenado con agua, puede soportar hasta 400º C en su parte inferior, mientras el agua se calienta en el tubo.

La combustión de segmentos en posición diagonal se produce en forma ascendente hasta el final. Las llamas se extienden en forma de anillos desde la zona de corte del espécimen.

En posición vertical todos los especimenes arden continuamente desde el punto de ignición hasta el final, siendo el mismo comportamiento que en posición diagonal.

Bosques de Bambú en Japón.

La combustión en componentes de bambú varía en relación con las cargas y resultados de la reacción estructural. Culmos rajados o parcialmente afectados por esfuerzos térmicos, pueden seguir alguna o todas las fases de combustión descritas, con lo cual se reduce considerablemente la capacidad de conducción de carga del culmo como elemento tubular, especialmente en componentes de pared delgada en razón a la disposición externa y paralela de las fibras más fuertes de la pared del culmo.

Al arder, el agua almacenada en el interior se evapora casi por completo, la temperatura sube y el espécimen se raja produciendo un estallido y continúa ardiendo como si estuviese en posición diagonal.

Como síntesis de su comportamiento ante el fuego, tomamos conclusiones:

- Los componentes estructurales en posición horizontal, son más resistentes al fuego que los posicionados verticalmente o en forma inclinada.

- La relativa lentitud de ignición y expansión de la llama en el bambú ofrece ventajas por ejemplo, para las construcciones con especies de sección delgada realizadas en Asia, dado que la variable tiempo, en caso de evacuación por incendio, se incrementa notablemente.

- El techo, al ser la parte de la estructura que desde el interior puede se más fácilmente incendiado, permite en cierta medida la conservación del esqueleto de la vivienda hasta la extinción del fuego.

- En relación con la normativa y comportamiento al fuego de materiales y componentes constructivos, el bambú podrá ser clasificado como combustible y particularmente como material constructivo retardante.

Foto 28 - Puente actual de bambú guadua en Colombia de Jörg Stamm.

3.13 Bambú como refuerzo del hormigón

Una de las principales aplicaciones del bambú en combinación con otros materiales de construcción la constituye su empleo como refuerzo del hormigón. Los primeros experimentos en este campo fueron realizados en 1914 por H. Chou en el Massachussets Institute of Technology, (USA), y posteriormente aplicados en China (1918), entre otros propósitos en la cimentación de puentes de ferrocarril.

Se han realizado investigaciones en países tales como China, India, Japón, Filipinas, México, Guatemala, EE.UU y Colombia y aún en países sin mucha cultura del bambú como Alemania, Holanda, Italia y Egipto. Las investigaciones y trabajos experimentales ponen de manifiesto que el refuerzo de bambú en el hormigón incrementa la carga límite de rotura del elemento de forma considerable, en comparación con lo previsible a ese mismo elemento sin reforzar. No obstante, existen varias limitaciones prácticas en el empleo del bambú como refuerzo del hormigón. La más importante es la dificultad de adherencia producida por las variaciones en los contenidos de humedad de cada material por tanto, gran parte de las investigaciones han sido enfocadas en esa dirección.

Los datos experimentales y comentarios que comentamos a continuación se basan en el trabajo que durante el presente siglo han desarrollado investigadores tales como H. Glenn (1944), Pama et al (1976), e Hidalgo (1980).

Los elementos de hormigón que trabajan a flexión, al estar armados con bambú muestran resquebrajamientos que exceden considerablemente los previstos con un elemento no reforzado de las mismas dimensiones. El refuerzo de bambú aumenta la capacidad de carga en 4 ó 5 veces, con un porcentaje óptimo de refuerzo del 3 al 4% de la sección transversal. Por encima de este valor óptimo de refuerzo no hay aumento en la capacidad de carga. Al utilizar culmos enteros con un diámetro hasta de 4.0 cm., se observa que con piezas integrantes de fijación transversal no hay deslizamiento del bambú y la curva de flexión de carga conserva su forma lineal hasta la rotura. También se reduce la flexión total. El bambú partido desarrolla una mayor capacidad de carga que los culmos enteros. La carga máxima que soporta un elemento de hormigón reforzado con bambú depende de la resistencia a la tracción del bambú, de la resistencia a la compresión del hormigón y, lo más importante, de la cohesión entre el hormigón y el refuerzo longitudinal del bambú.

La resistencia límite a la rotura por tracción de algunas especies de bambú en tensión directa, es aproximadamente la misma que la del acero suave en su límite de fluencia. Por término medio oscila entre 1.400 y 2.800 kg/cm2. Fue este elevado valor lo que atrajo la atención de los investigadores para la utilización del bambú como refuerzo. Pero en la práctica no ha sido posible aprovechar toda la resistencia del bambú cuando está dentro del hormigón como refuerzo; la escasa adherencia entre el bambú y el hormigón, y el bajo módulo de elasticidad del bambú son los dos factores principales que impiden en la actualidad un aprovechamiento eficaz de la elevada resistencia a la tracción del bambú.

La capacidad de carga de las vigas reforzadas con bambú aumenta al aumentar la resistencia del hormigón de una sección dada. El promedio de la resistencia a la rotura por compresión directa del bambú varía de 400 a 700 kg/cm2, con un valor del hormigón 1:2:4= 158 kg/cm2.

Una desventaja importante del Bambú como refuerzo es su elasticidad, y además la tendencia, si está ya seco, a absorber una gran cantidad del agua contenida en el hormigón húmedo, lo que tiene como consecuencia la dilatación inicial y la contracción posterior a medida que se seca el hormigón. Este fenómeno provoca la formación de grietas longitudinales en el hormigón, reduciendo la capacidad de carga de los elementos y la adherencia entre el hormigón y el refuerzo. El resquebrajamiento es mayor cuando es elevado el porcentaje de refuerzo del bambú. El bambú verde utilizado como refuerzo también se contrae al secarse el hormigón y la resistencia de adherencia es escasa.

La mayoría de las soluciones estudiadas coinciden en que el bambú debe recubrirse con una sustancia impermeabilizante. Glenn, (1944) recomienda recubrir las tablillas de refuerzo con una capa delgada de emulsión asfáltica. Un efecto contrario se puede producir si se aplica demasiada emulsión debido a que el refuerzo queda lubricado y por lo tanto pierde totalmente la adherencia. Se propone también el uso de medios culmos (corte longitudinal) como refuerzo principal, secados previamente (20% humedad), e impregnados con un adhesivo (resina poliestérica o epóxica) en los extremos y en una longitud de 25cm., la parte restante con aceite de linaza y trementina (proa. 1:1 durante 4 dias). Pama (1976) recomienda tratamiento por inmersión del refuerzo en una solución al 2% de cloruro de cinc, o recubrimiento con

un adhesivo de neopreno sobre lo cual se rocía la arena gruesa para lograr mayor adherencia. Fang et al (1976), propone un tratamiento de azufre-arena como recubrimiento, consistente en perforar parcialmente los tabiques de los nudos, y remover la capa externa brillante con un chorro de arena a presión, después de lo cual se envuelve con alambre para frenar el aumento de volumen y finalmente se sumerge en azufre derretido a 50ºC.

El principal problema de estos métodos de tratamiento es el sobrecosto. Se prevé que los estudios con bambú como refuerzo del hormigón sigan su curso y poder encontrar nuevas vías de construcción.

3.14 Protección térmica- aislamiento

Sabemos que el aislamiento térmico está dado por la resistencia que opone la "envoltura" de la edificación al paso del calor.

El bambú, por su anatomía de tabiques o entrenudos con aire en su interior, y en general por su naturaleza porosa, se constituye en un excelente material aislante térmico. En consecuencia, el coeficiente de transmisión de calor requerido en una edificación de acuerdo con las condiciones ambientales locales, puede ser obtenido mediante un buen empleo del material, con la definición de sistemas constructivos adecuados e incrementado con materiales aislantes.

Los espacios de aire encerrados entre los revestimientos interior y exterior de un muro (cámara) poseen una apreciable resistencia a la transmisión del calor.
Los pisos de bambú elevados requieren el mismo grado de aislamiento de los muros exteriores en las mismas zonas climáticas, ya que debiendo estar ventilados por debajo, su temperatura es similar a la del exterior.

3.15 Aislamiento acústico

El requerimiento acústico en una edificación de bambú situada en el área rural o urbana de débil o regular intensidad sonora, puede ser resuelto únicamente con los materiales comunes empleados en la edificación. La cámara de aire propia de los entrenudos del bambú, así como la que se crea al interior de los muros con cámara usualmente empleados, contribuyen al aislamiento. Si el nivel sonoro externo fuera mayor, puede reforzarse el aislamiento con el uso de materiales absorbentes.

3.16 El bambú y los movimientos sísmicos

La mayoría de países de tradición constructiva con bambú, están ubicados en zonas geográficas donde ocurren con regularidad sismos de mediana y gran intensidad. Es necesario por consiguiente diseñar las edificaciones considerando esta solicitación y capacitarlas para responder adecuadamente.
Una de las razones por la cual el uso del bambú y la madera se hizo tan común en algunos países latinoamericanos fue su eficaz comportamiento ante la acción de los sismos.
Algunos materiales y sistemas estructurales, o la combinación de unos con otros, serán mejores para resistir los efectos de un movimiento sísmico, y en este aspecto el bambú ofrece características excepcionales de buen comportamiento, dados su peso reducido y flexibilidad.

Las fuerzas que se presentan en las estructuras debido a las aceleraciones del sismo están directamente relacionadas con el peso de la edificación, por lo tanto, a mayor peso, mayores fuerzas de inercia y viceversa.
La constitución anatómica tubular y fibrosa del bambú le permite absorber energía de deformación que redunda en una mayor flexibilidad, retardando las fallas o roturas y permitiendo un comportamiento más dúctil.

Aún cuando se presenten movimientos sísmicos muy intensos las características de absorción y disipación de energía le permiten mostrar ese comportamiento dúctil, absorbiendo y amortiguando sin fallar, efectos mayores a los previstos. Esta propiedad es muy ventajosa para asegurar el menor daño a los ocupantes de una edificación en esas circunstancias.

3.17 Consideraciones generales de diseño

- Fijación de todos los elementos portantes y no portantes entre sí a través de riostras, vigas de agarre, tensores de acero, etc.
- Proveer de flexibilidad en las uniones, que es posible obtener mediante el uso de piezas plásticas, conectores metálicos, etc.
- Hacer una adecuada fijación del mobiliario y equipo auxiliar de la edificación, dado que pueden representar algún peligro para el usuario en el caso de desprenderse de su posición inicial.
- En caso de muros medianeros o cortafuegos hechos en mampostería, es importante que satisfagan las especificaciones para cargas sísmicas de los códigos locales en atención a resistir adecuadamente el corte horizontal que se presenta.
- El riesgo de incendios o anegaciones se incrementa con movimientos sísmicos severos, lo cual se debe prever en el diseño con una adecuada ubicación de las instalaciones eléctricas, mecánicas y sanitarias.
- A mayor peso del techo, mayores serán las fuerzas de inercia que se producirán durante el sismo, y por lo tanto mayores efectos negativos en la edificación. Es recomendable el empleo de materiales livianos para reducir la acción sísmica, el riesgo de deformaciones y de desprendimientos.

Foto 29 - Puente de bambú guadua en Costa Rica.

3.18 Uniones estructurales del bambú

El cálculo de elementos con guadua, al igual que con madera puede llevar a una situación muy peligrosa: que los elementos sean suficientemente fuertes para el trabajo deseado, pero que las uniones sean débiles. Todo el que ha trabajado con guadua sabe que las uniones requieren de mucho cuidado y son el eslabón más débil.
La madera cuenta con múltiples tecnologías para solucionar las uniones. Para la guadua existen soluciones tradicionales, pero la dificultad se manifiesta cuando se trata de hacer uniones que soporten esfuerzos a tracción. Las cerchas que se han construido con guadua realmente no funcionan como tal, pues las uniones trabajan pobremente a tracción, generalmente son unos pocos clavos. Uno de los primeros en realizar un estudio académico de las cerchas de guadua fue el ingeniero holandés Dr. Jules Janssen quien en 1974 probó en la Universidad Tecnológica de Eindhoven (Países Bajos) más de 50 uniones diferentes con bambú filipino, con base en las cuales construyó 5 cerchas de 8 metros de luz, a las que sometió a esfuerzos. Las cargas eran análogas a las de una cubierta en asbesto cemento o zinc. Primero diseñó una cercha similar a la montante maestro, y luego con base en los resultados planteó una similar a la Howe. Esta última resultó más resistente y rígida. Estas cerchas se probaron acostadas en el piso del laboratorio. Los diseños propuestos por Janssen son simples, y satisfacen las necesidades de una comunidad que necesita una cubierta.

UNIONES A TRACCIÓN
Estas propuestas de cerchas son válidas, y curiosamente no muy conocidas en nuestro medio.

Unión con lámina de acero**:**
La 1ª utiliza un zuncho de acero, o abrazadera, que sirve como transición de esfuerzos entre una sucesión de tornillos fijados a la pared de la guadua y un elemento conector que permita la construcción de la unión. Se utilizan 12 tornillos de 6.35mm (1/4”), 1x0.04m de lámina calibre 22 y un pasador de 1.58 cm. (5/8”).

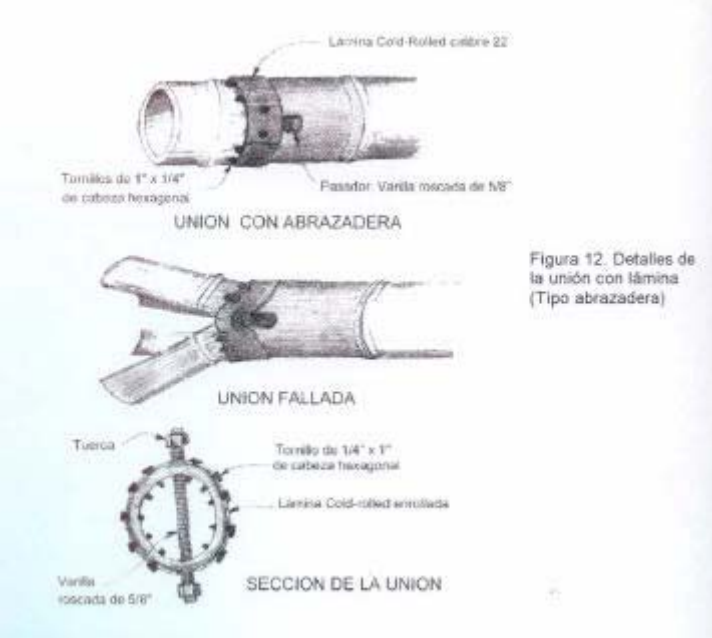


Figura 12. Detalles de la unión con lámina (Tipo abrazadera)

Esta unión cuando falla “ahorca” a la guadua y provoca que se raje. Luego de que la lámina haya “ahorcado” la guadua, y que la cabeza de los tornillos se entierre en la pared de la guadua, se produce la falla. Su resistencia última promedio es de 9648 kgf. (96 kN). Su gran defecto radica en que sufre grandes deformaciones antes de fallar.

<u>Unión con mortero y varilla</u>**:**

La segunda propuesta utiliza mortero. Al transmitir las cargas del mortero a las paredes de la guadua por medio de una serie de varillas lisas de 6.35mm (1/4”) de diámetro. Su gran defecto radica en que el mortero falla rápidamente, seguramente se puede mejorar esta unión mejorando la calidad del mortero. La resistencia última promedio de esta unión es de 5970 kgf. (60 kN).

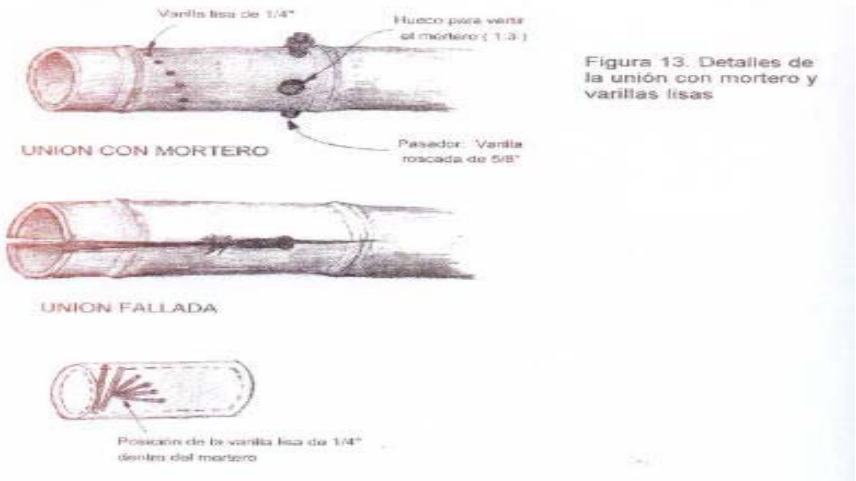


Figura 13. Detalles de la unión con mortero y varillas lisas

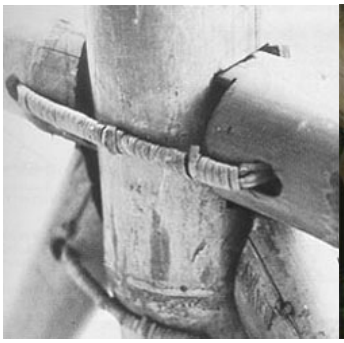


Fig. Unión con mortero Fig. Unión manual y cuerda Fig. Unión con “boca de pescado”

Foto 30 Unión con madera *Foto 31 Unión cónica* *Foto 32 Unión con platina*

Foto 33 Unión con concreto *Foto 34 Unión con platina* *Foto 35 Unión con tornillos*

Estudiando las propuestas y resultados existentes lo más eficiente nos parece utilizar pasadores que transmitan la fuerza a un elemento de acero al interior de la guadua.
Concluimos que el uso de varios pasadores medianos transmitiendo la fuerza de la guadua a un elemento de acero que se conecta a una esfera nos parece lo más adecuado para una unión resistente, liviana y apta para estructuras espaciales.

4. INFORMACIÓN TEÓRICA DE LAS VUELTAS DURANTE LA HISTORIA

4.1 Introducción

La intención de esta sesión es mostrar una manera de interpretar las estructuras antiguas de vueltas, partiendo de un enfoque cercano referido al comportamiento de las estructuras con temporáneas. En ocasiones, mostrar procesos aparentemente inconexos y distantes en el tiempo puede acabar señalando comportamientos relacionados entre ellos, en el modo e interés en que Javier Rui-Wamba se refiere a la teoría unificada de las estructuras[1]. Aspectos como pesadez y ligereza serán matizados o enfrentados a otros de más interés en investigaciones recientes como el de eficacia estructural, coeficiente de carga o capacidad de transporte de los esfuerzos (Tra, Bic). Así, de una descripción aparentemente referida a las estructuras mínimas podremos encontrar valores que, directa o reversiblemente, nos ayudarán a definir los procesos antiguos.

Para ello, recurrimos a algunos maestros contemporáneos de la teoría y práctica de estructuras, como Frei Otto y Emilio Pérez Piñero (EPP) o a algunos investigadores como J.E. Gordon, Adriaan Beukers, Juhani Pallasmaa[2] o Jacques Heyman. *Sus trabajos ilustran comportamientos estructurales naturales con fundamentos lógicos, mínimos y eficaces.* En algunos casos, sus principios o leyes de comportamiento serán aplicables a las estructuras humanas de diversas épocas.
Churtichaga, cuando analiza las estructuras de Emilio Pérez-Piñero, explica que: *la coherencia de las grandes estructuras reside en su capacidad para minimizar la cantidad de material y simplificar los flujos de las tensiones y que, por el contrario, la escala menor permite mayor versatilidad y complejidad material y de comportamientos.* Intentaremos mostrarlo en una serie de ejemplos, y como uno de ellos es traducible al comportamiento de los arcos.

1 Tema de investigación y conferencia propuesta por Rui-Wamba durante el congreso internacional de Calculistas de Cataluña. Barcelona, febrero de 2006.
2 PALLASMAA Juhani, Animales arquitectos. El funcionalismo ecológico de las construcciones animales.
Cuadernas, Fundación César Manrique, 2001. pag 11- 38.

4.2 Determinación de la forma general del conjunto

La conciencia de la forma estructural es, junto al material, uno de los temas capitales sobre el que se desenvuelve la ciencia estructural.
La forma general de la estructura o "macro-forma", será la primera y gran decisión de los problemas. Ella indicará por si sola una manera propia de enfrentarse a las fuerzas actuantes sobre la estructura, delimitando con su comportamiento el abanico de materiales con que realizarla.

4.3 Aspectos básicos sobre comportamiento de las estructuras

4.3.1 Causa y efecto: acciones y forma.

Se establece una relación entre forma y acciones: la forma global de la estructura responde, en un primer intento de definición, a unas acciones externas. Si aceptamos que una forma deriva de su función, en el contexto de las estructuras las causas y efectos externos (acciones y reacciones) van a ser responsables de las opciones de forma de la estructura. En concreto, su misión principal es la de transportar de manera coherente las acciones hacia los enlaces externos, esto es, estableciendo relaciones lógicas de equilibrio entre las acciones y las respuestas (solicitaciones) en cada sección de la estructura.
Así, los problemas estructurales tendrán unas formas, un formalismo aliado para resolverlos. En él, no se buscará resolver los problemas de una forma determinada, sino que el objetivo es encontrar la forma de los problemas.

Recordemos aquella tercera ley de Newton por la que toda acción produce una reacción del mismo valor y sentido contrario, entendiendo dicho equilibrio en un punto, en un fragmento o en la totalidad de la estructura. Incluso algunos investigadores, como Gordon, nos recuerdan como a nivel atómico se producen fuerzas de atracción o repulsión, estableciendo vínculos a modo de muelles, capaces de deformarse.

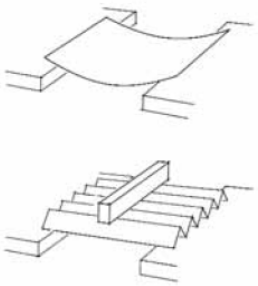
La reflexión de Churtichaga, en su estudio de las estructuras de Pérez Piñero, se inicia con la descripción de concepto de forma general de la estructura, o "macro-forma", con lo que establece una primera intuición de cómo responder a las fuerzas externas: *"la forma*

indicará, por si sola, una manera propia de enfrentarse a las fuerzas actuantes sobre la estructura, delimitando en su comportamiento el abanico de materiales con que realizarla"[3].

Dicho de otra forma, la determinación de la retícula interna, o "micro-forma", deberá estar inspirada en las trayectorias de tensión que en la forma general, o "macro-forma", produzca el sistema de cargas exteriores....

Evidentemente, cuando más precisas y estables sean las fuerzas actuantes sobre la estructura, más definida o "dibujada" quedará pues la "forma del problema". En las cubiertas, especialmente de luces considerables, donde el peso propio es casi el principal problema, este territorio resulta de enorme fertilidad para la investigación del "formalismo resistente".

El ejemplo más elemental de este principio puede observarse tomando una hoja de papel.



Basta una variación en su forma para que una simple hoja de papel alcance por su forma una estimable capacidad resistente.

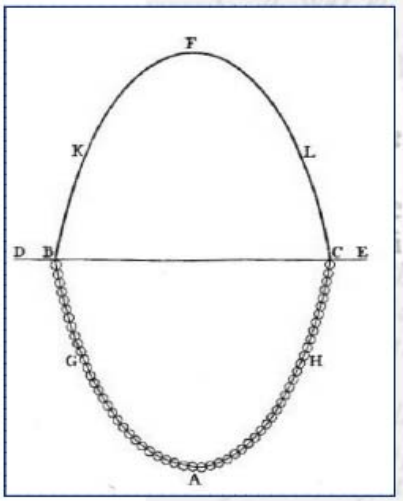
Por si sola la hoja resulta insuficiente para soportar su peso propio. Sin embargo, basta una variación en su forma para que la misma materia dispuesta de otro modo en el espacio alcance por su forma una capacidad resistente nada despreciable. Si la misma hoja de papel se pliega, la capacidad resistente de la nueva forma obtenida se multiplica, lo que muestra un nuevo y sorprendente significado para formalismo.

Para entender una forma resistente tan eficaz como el arco, basta observar un objeto elemental. Una cadena, colgando entre dos puntos, adoptará bajo su propio peso único la forma bajo la cual puede resistir:

3 CHURTICHAGA Jose María, "La estructura veloz. Trayectorias estructurales a propósito de la obra de Emilio Piñero y Félix Candela", dentro de Candela Pérez Piñero nº3 Arquitecturas Ausentes. Ministerio de Vivienda, 2004, pag 133.

ROBERT HOOKE (1635-1703)

Principi de la catenària invertida

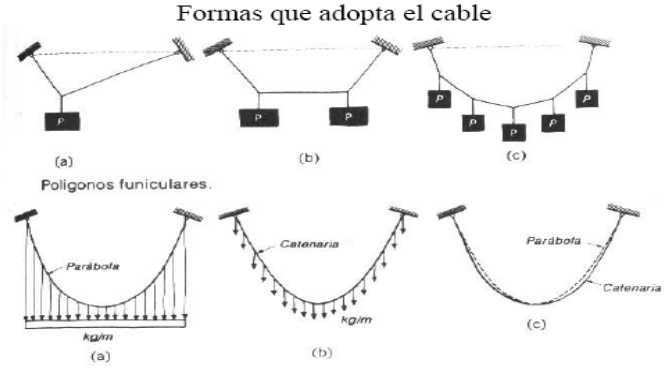


Mathematical and Mechanichal form of all ... for Building, with the true butment neceſſary ... A Problem which no Architectonick ... attempted, much leſs performed.

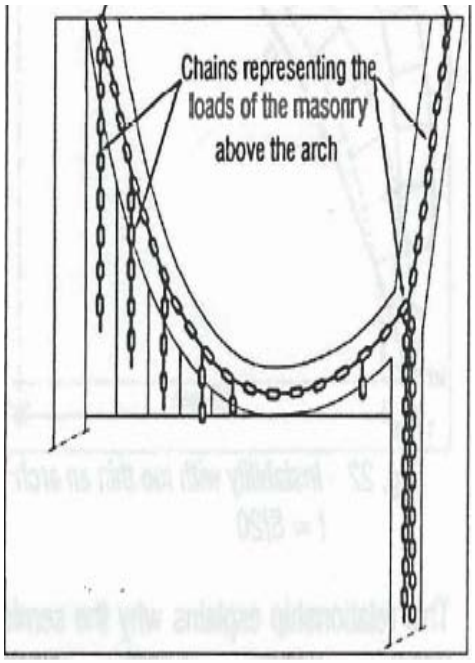
En 1675 proporciona la solució a l'equilibri d'un arc mitjançant un anagrama que sols serà desxifrat després de la seva mort en 1705.

La solució: "Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum" – **així com penja una corda flexible, invertida, es mantenen estables les peces que formen un arc.**

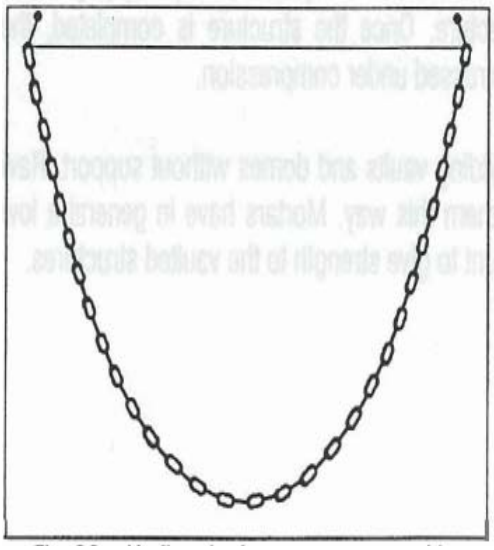
Trabajando a tracción. Cualquier otra fuerza sobre la misma deformaría su trazado y por tanto aquí tenemos un elemento estructural que sólo puede trabajar "estirándose". Como se observa en el dibujo del tratado de Poleni de 1748 sobre arcos, *basta invertir la forma de la cadena para obtener un arco en el que las únicas fuerzas actuantes se transmitan a través de su línea con esfuerzos inversos a la tracción: sólo estará comprimido*. Este principio elemental de que una cadena se adapte a su propio peso es igualmente válido para el caso en que deba soportar pesos ajenos*. Si aplicamos pesos en una cadena, esta adoptará diversas formas, que al invertirse, como en el ejemplo de Poleni, mostrarán el perfil del arco "ideal" para esos pesos, (llamado antifunicular de las cargas).*



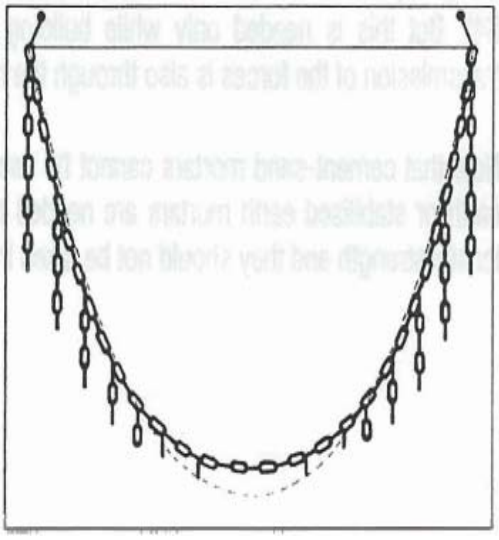
Esquema formas funiculares. Bajo los pesos, el cable adopta la forma óptima para trabajar como únicamente puede: en tracción.



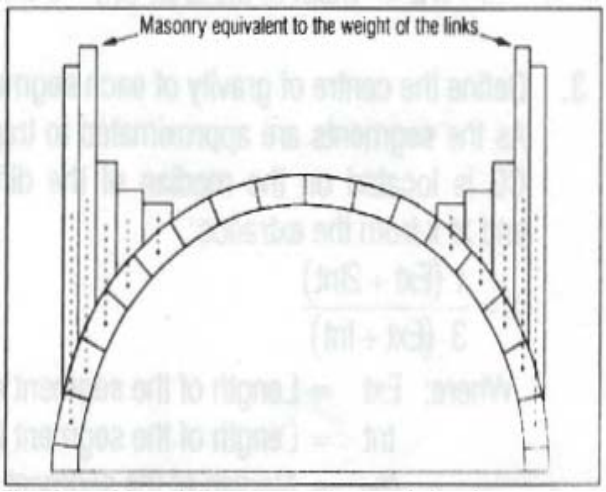
Parque Güell, donde Gaudi pudo desarrollar toda su imaginación basándose en el método de las cadenas, las formas adoptadas tenían su lógica estructural constructiva.



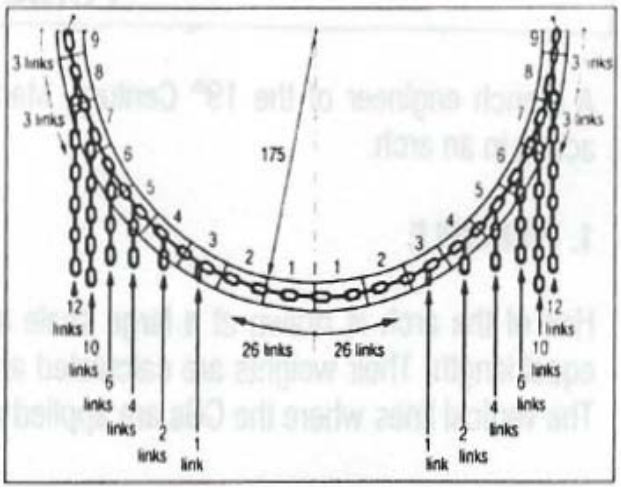
Metodo de calculo de las cadenas



Antifunicular de las cargas producido en el arco por la hipótesis de pesos



Peso teórico.



Peso representado por eslabones.

Desde esta sencilla observación puede entenderse perfectamente el sabio "formalismo" de Félix Candela (FC). Su primera cáscara experimental, realizada en 1949, planteaba todos estos recursos "formales" como elementos generadores de resistencia.

FELIX CANDELA (1910-1997)
Primera cáscara experimental, 1949

Su macro-forma será una catenaria invertida. De este modo bajo su peso propio la bóveda solo trabajará compresión. En este principio tan elemental se basa toda la historia de la construcción abovedada, como ejemplos tan impresionantes como el palacio de Ctesifonte, realizado por el imperio Sasánida en el siglo III d.J.C.

Palacio de Ctesifonte, Iraq.
Imperio Sasánida s.III dJC.
Luz de la bóveda=26,3m

Ahora bien, en una estructura de edificación, además de su peso propio pueden actuar otras cargas como el viento, la nieve, las dilataciones térmicas...Además, sabemos que mientras la tracción es una fuerza estabilizante (cuanto más tiramos, mas firme será el cable), la compresión resulta desestabilizante, pues el propio peso puede desestabilizar la forma por la que viaja, del mismo modo que un bastón se dobla bajo nuestro peso.

Así que no basta con trazar un delgadísimo y teórico arco catenario para resolver su cáscara. Si se quiere dotar a la estructura de estabilidad para resistir estas fuerzas o tendencias desestabilizadoras, la propia forma tendrá que ser en esta tarea también la aliada.

Forma y material son dos aspectos de un mismo problema, pues de las formas se derivan las tensiones o modos de trabajo que permita un material.

4.3.2 . Cantidad de energía

La forma global tiene una expresión primera en forma de procesos de energía mínima. Es decir, que tienden a perpetuarse aquellos procesos o formas en que se establezcan tensiones comparativamente reducidas. Por ejemplo, aquellas formas de doble curvatura que tensan los puntos de una membrana en dos direcciones opuestas (formas anticlásticas), o la única solución de película de jabón que cierra el espacio de un fragmento de alambre curvo. La forma también tiene capacidad de prosperar o perpetuarse cuando supone un estado evolutivo en la que ha reducido su tensión o energía, como en el caso de dos gotas de agua que, al unirse, reducen (comparativamente a la suma de las dos aisladas) la piel envolvente y por tanto su cantidad de energía superficial[4].

En el caso del arco gótico, la forma general responde al modelo de arco apuntado formado por dos segmentos del mismo radio, con una clave que separa ambas semiformas. Lo interesante de su forma reside en que se acerca a los modos de comportamiento óptimo de trabajo a compresión en comparación a otros arcos como el de medio punto, pues podrá

4 GORDON J.E. Estructuras, Calamar Ed 2004, pag 144.

incluir, como comprobación de estabilidad, un umbral amplio de posibilidades de arcos antifuniculares (opuesto a la cadena traccionada). *Cuanto más peraltado (apuntado) sea dicho arco gótico, menos material necesitará el muro lateral o contrafuerte, para equilibrar los empujes horizontales y converger la resultante de las presiones hacia el sector central de su base.*

4.3.3. Reversibilidad de tracción y compresión

Cuando Poleni, hacia 1748, es consultado sobre la estabilidad de la forma de cúpula de San Pedro de Roma, utiliza el siguiente recurso gráfico y de modelado: identifica comportamiento radial y anular; analiza el equilibrio de un gajo de la estructura; cuantifica las cargas gravitatorias en fragmentos de dicho sector y los modeliza como esferas; y equipara el comportamiento traccionado de la cadena de esferas con el comportamiento comprimido de las dovelas teóricas que representan cada una de las esferas. Es decir, aplica mediante una maqueta de cadenas y unos gráficos un principio de comportamiento estructural que había sido identificado a finales del siglo XVII.

Desde entonces, poco había avanzado la teoría de las estructuras referida a la identificación de formas óptimas de compresión y tracción. Dichos sistemas de experimentación permiten mostrar que, cuando están bloqueados comportamientos de segundo orden como el pandeo, realmente se necesitaría poco material como sección admisible para un determinado flujo de presiones basado en la forma catenaria[5].
La aportación de Otto reside en que gracias a los ensayos y restituciones de edificios históricos (mediante cadenas, cartones, telas y escayolas entre otros) que se inician hacia finales de los años 40 en el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart, se han establecido las claves para el planteamiento de láminas y entramados curvos de grandes luces. Uno de las restituciones de edificios históricos más conocida es la referida al

5 A nivel práctico, recordemos que la catenaria es la forma definida por una acción de carga constante a lo largo de ella misma, mientras que la parábola es provocada por una carga uniforme horizontal. En realidad ambas serán muy próximas, siendo restituible la segunda de ellas con mayor facilidad con las herramientas gráficas. Es útil comparar ambos trazados con la elipse o con el trazado de un determinado arco apuntado, y establecer el nivel de precisión que se quiera para cada escala de análisis

Panteón de Roma, donde la cadena invertida se usa, particularmente, para determinar las acciones exteriores (aparte de las gravitatorias) que hacían estable y posible la forma de la cúpula[6].

Heyman y Huerta, en sus trabajos sobre las estructuras de fábrica de piedra, enfatizan esta línea de análisis recuperando el método de los cortes como modelo de comportamiento de la bóveda cuatripartita, mediante el cual se otorga importancia a los nervios diagonales, en detrimento de los torales (ortogonales al eje de la nave) para recoger los segmentos de bóveda que se van apoyando sobre él[7]. De nuevo, el método de la cadena invertida, aplicado a un sistema espacial compuesto de dos cadenas principales y múltiples cadenas secundarias apoyadas en aquellas.

4.3.4. La forma material

Forma y material son dos aspectos de un mismo problema, pues de las formas se derivan las tensiones o modos de trabajo que permita un material. Material es forma pues de las formas se derivan las tensiones o modos de trabajo que permita un material. EPP, continúa:

..."la determinación de la retícula interna, o "micro-forma", deberá estar inspirada… en las trayectorias de tensión que en la forma general, o "macro-forma", produzca el sistema de cargas exteriores...."

EMILIO PEREZ PIÑERO (EPP)
"la estructura en la forma es lo que hace posible su subsistencia como tal...en el concepto primero, forma y estructura se identifican..." EPP Forma y material son dos aspectos de un mismo problema, pues de las formas se derivan las tensiones o modos de trabajo que permita un material

6 OTTO Frei, RASCH Bodo, Finding form. Toward an architecture of the minimal. Ed Axel Menges,1995 pag 152. En ocasiones, los ensayos eran de simples cadenas con algún sistema de grafiar la forma y poder invertirla; o se usaban maquetas complejas que conseguían fijar una forma mediante fraguado, por ejemplo, de una tela de escayola; y en otras, bastaba girar el resultado de una imagen fotográfica.
7 HUERTA Santiago, Mechanics of masonry vaults: the equilibrium approach, publicado en Actas del Congreso Historical Construction 2001. 3er Seminario Internacional, Guimaraes, Un Minho, nov 2001. pag 57, en base a los procedimientos de análisis expuestos por Herman.

Casi podemos identificar en esta sutil reflexión el término “micro-forma” con material, pues retícula interna también es la estructura interna del material y de ella se deriva su capacidad resistente. De nada sirve elegir una forma (macro-forma) que someta al material (micro-forma) a tensiones que éste último es incapaz de asumir.
Existe pues una indisoluble relación forma-material. La escala del problema añadirá a este binomio un grado mayor de complejidad estrechando el abanico de soluciones estructurales.

4.3.5. Material continuo y material discontinuo

Este carácter reversible de la línea de empujes se referirá tan sólo a los modelos de análisis, pues la evolución constructiva de cada material tenderá a establecer un modo habitual de comportamiento. Si bien en la naturaleza será frecuente la presencia de sistemas tensados (por ejemplo en las telas de araña), el hombre los ha evitado históricamente debido a la complejidad de las uniones, a pesar de que algunos materiales como la madera tienen una capacidad mayor a tracción. Gordon lo expresa del siguiente modo: “…todo el asunto de hacer estructuras traccionadas está plagado de dificultades, complicaciones y trampas escondidas para el incauto. Esto ocurre cuando queremos hacer una estructura de más de una pieza, de forma que tengamos que enfrentarnos con el problema de impedir que se separe el material por las uniones…[8]”.
Beukers, por su parte, dramatiza de manera didáctica el tema señalando que toda estructura tiene al menos un principio y un fin, que constituirán los lugares de mayor riesgo y que la eficacia del sistema dependerá de las juntas y continúa: “… a menudo, los compuestos tenderán a eliminar las juntas mediante procesos de integración funcional…[9]”
También cuando el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart, dirigido por Otto, lleva a cabo extensivos estudios sobre la construcción y comportamiento de las telas de araña, busca entender las soluciones de enlace de los nudos donde se incorporan incluso mecanismos de amortiguación de golpes, como nos recuerda Pallasmaa[10].

8 GORDON J.E. Estructuras, op cit, pag 167.
9 BEUKERS Adriaan, Lightness The inevitable renaissance of minimum energy structures 010 1998. pag 73.
10 PALLASMAA Juhani, Animales arquitectos. Op cit pag 17.

Así, la gran virtud de cualquier fábrica de material es que optará por los comportamientos de compresión, adoptará una geometría que la hará estable y la fijará mediante material aglomerante y por rozamiento entre las piezas.
Por otro lado, todos los autores citados enfatizan que la gran aportación de los sistemas estructurales modernos no es tanto el uso de materiales nuevos como las tecnologías que han desarrollado para resolver los enlaces entre piezas así como entre materiales de naturaleza diferente y que aportan cada uno su función resistente.

Podríamos aventurar una definición de estructura clásica como un sistema en el que la línea de presiones viaja sin brusquedades hasta los enlaces o entregas con el terreno, como en una cuerda colgada de dos puntos o en un arco diafragma de dormitorio cisterciense apoyado en estribos o muros laterales, donde no hay discontinuidades (inversiones en el signo de los esfuerzos) a lo largo del camino directo a los soportes.

Entendemos que los entramados de celosía supondrán, en este sentido, una aportación novedosa cuando el sistema esté solicitado a flexión: será capaz de transformar dicha complejidad en flujos de tracción y compresión. En ellos, tendrán mayor éxito aquellos materiales, como la madera primero y el acero después, capaces de responder a ambas estados tensiónales. Churtichaga reconoce que la piedra y la fábrica se limitarán a estados de compresión: *"…otros materiales, como la piedra, incapaces de trabajar a flexión, mostraron las posibilidades de la superficie y el arco como engendrador de espacios, encontrando en la masividad el aliado constructor…*[11]".

El concepto de tensegridad[12] acabará convirtiéndose, hoy en día, en la variante más radical y avanzada de los sistemas de barras/cables tridimensionales donde los elementos comprimidos se minimizan y son envueltas por líneas de tracción, continuas y pretensadas. Este sistema define formas ecoeficaces (donde la economía de material es notable) y mínimas (si se cambia un elemento, se altera todo el sistema tensional y de equilibrio).

11 CHURTICHAGA jose María, "La estructura veloz... Op cit, pag 139.
12 Consultar Verb Matter ed Actar 2004 y en concreto las referencias históricas sobre Buckminster Fuller y la
experiencia reciente del Blur building en Yverdon-Les-Bains, de Diller+Scofidio, para la Expo 2002 de Suiza.

4.3.6. Eficacia estructural

La explicación gráfica más elemental sobre el concepto de eficacia estructural en los materiales nos la proponen Zalewski, Allen y Iano[13], cuando reflexionan sobre el límite de longitud de una barra sujeta por uno de sus extremos, traccionada o comprimida (caso de que coartáramos la inestabilidad lateral por pandeo) debido a su peso propio. La eficacia estructural se mide en unidades de longitud (se le llama también longitud de rotura), relaciona la resistencia de la sección con su peso específico, y constituye un indicador de las propiedades mecánicas de materiales nuevos y antiguos, naturales y artificiales. Por ejemplo, permite equiparar la madera conífera con los cables de alta resistencia (en los casos de tracción) y valorar el rendimiento de la madera respecto de la fábrica o el hormigón (en los casos de compresión). Su sencilla expresión matemática se deduce de:

$$P = \gamma \cdot A \cdot L_{rot}\,; \quad F_{max} = A \cdot \sigma$$

Siendo P la resultante del peso propio y Fmax la fuerza máxima admisible en la sección más desfavorable. Así, la expresión de la eficacia estructural queda de la siguiente manera:

$$L_{rot} = E_e = \frac{\sigma}{\gamma}$$

Los mismos autores usarán este concepto para una pequeña disertación acerca de la altura máxima que puede tener un edificio, mostrando la bondad de crecimientos en base a prismas progresivamente menores, pirámides triangulares o trazados de perfil curvo, como será el caso de la Torre Eiffel.

Otros autores como Adriaan Beukers[14] parten de la expresión de carga crítica de Euler y reescriben dicho concepto sustituyendo la resistencia de la sección, σ, por el módulo de elasticidad, E, matizando la expresión de eficacia estructural si se trata de compresión en elementos lineales (columnas) o en elementos superficiales (láminas o paneles). En resumen, aplican, (en lugar de la fuerza máxima Fmax), despejando de la expresión de Euler el valor de la inercia I, y resolviendo la expresión de P /W, donde P es la carga

13 ZALEWSKI, ALLEN Y IANO, Shaping Structures. Statics. Ed John Wiley, NY,1998, Pag 30.
14 BEUKERS Adriaan, Lightness… op cit. pag 70.
soportada y W el peso de la estructura.

$$\frac{P}{W} = cte \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \left(\frac{\sqrt{E}}{\gamma} \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{N_{cr}}}{L^2} \right)$$

Donde:

Ncr es el límite de Euler para las cargas de compresión

P es la carga soportada

W es el peso de la estructura

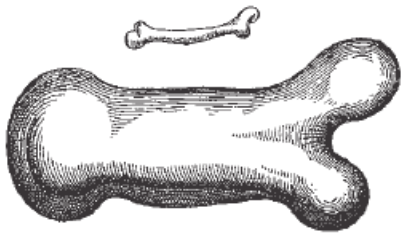
En dicha expresión el valor $\frac{\sqrt{E}}{\gamma}$ también se conoce como eficacia estructural, esta vez relacionando la tensión con la deformación elástica o módulo de Young[15]. Beukers resume de modo acertado el concepto de eficacia, como energía posible en relación a su densidad, respecto del tipo de esfuerzo adecuado para dicho material. Lo expresa así: *"… la madera no es buena trabajando a compresión, mientras que el hormigón si. Acero, vidrio, seda, polietileno y carbono son excelentes a tracción; los huesos y la cerámica lo son a compresión…"* y concluye: *"lo sabio, si es que quieres construir algo ligero, es diferenciar claramente en el sistema los estados de tracción y de compresión pura, escogiendo los materiales a tal efecto…*[16]*"*

4.3.7. Tamaño, proporción y coeficiente de carga

Estamos acostumbrados, hoy en día, a diseñar una sección estructural para acercarnos a los límites tensionales establecidos por las normativas (límite elástico, plástico o de rotura), no hay margen en el diseño para acciones imprevistas. O bien, dichos márgenes pueden entenderse como un porcentaje de los coeficientes de seguridad (siendo la obligación de quien diseña respetar dichos márgenes). En estructuras antiguas, no tiene porqué producirse eso. Y en estructuras biológicas, aspectos vinculados al propio crecimiento pueden incorporar situaciones mejoradas.

15 GORDON J.E. Estructuras…, op cit, apéndice 4. En dicho apéndice se explica detalladamente como obtener la expresión de la eficacia estructural en soportes y muros, a partir de la expresión de la carga crítica de Euler.
16 BEUKERS Adriaan, Lightness… op cit. pag 25.

La falta de margen importa cuando alteramos la proporción de una estructura, por ejemplo, al trabajar con modelos. Ya lo había indicado Galileo en 1638[17], cuando comparaba gráficamente dos huesos de distintos tamaños y que, para ser eficaces (mantener una determinada tensión normal de trabajo) alteraba la proporción robusteciendo al mayor.



Ilustraciones del huesos Discorsi e Dimostrazioni Matematiche Intorno a Due Nuove Scienze Galileo Galilei(1638)

Galileo le llamaba la ley del cuadrado-cubo, pues las propiedades resistentes de la sección dependen del área de la sección, mientras que la resultante de la carga gravitatoria depende del volumen de la pieza, y Churtichaga la ilustra con el ejemplo de una cereza: "… si una cereza se hiciera el doble de grande, su peso aumentaría en relación directa al volumen, mientras que el tallo que la sostiene solo incrementa su resistencia con relación directa a su área. Esto hace que una cereza que crezca linealmente acabaría en el suelo…". Podemos relacionar este fenómeno con el de la eficacia mecánica explicado en el apartado anterior, que establecía un valor límite en el tamaño (longitud) de la estructura para que la tensión resulte admisible.

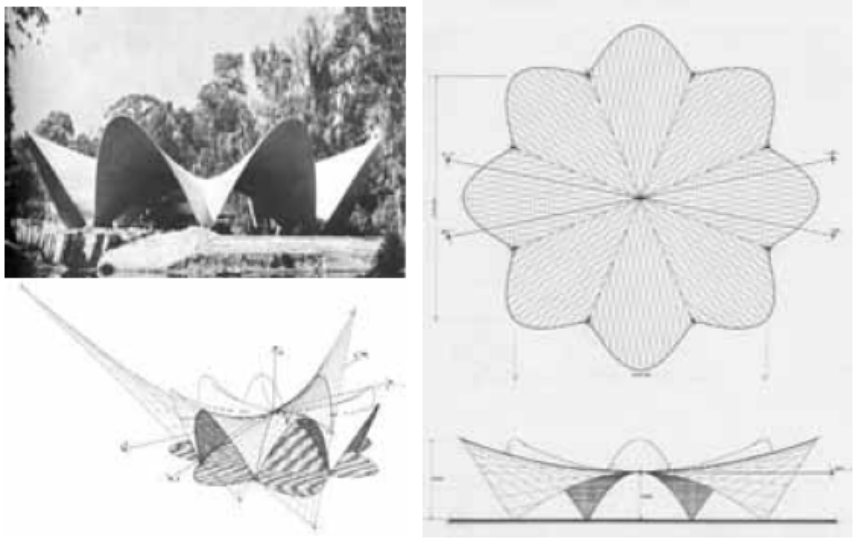
Resulta significativo que Schlaich, escogido entre todos los expertos internacionales hace ahora unos diez años para la gran exposición del Georges Pompidou[18], autor de cubiertas ligeras de entramado de cables que soportan un cerramiento de vidrio en las instalaciones olímpicas de Munich, inicia su definición de las estructuras ligeras mediante tres principios elementales, el primero de los cuales se refiere al sencillo ejemplo de una viga, que debe aumentar su espesor no en proporción lineal de la luz creciente del vano, sino en función del cuadrado de la misma. De nuevo, el mismo problema de la escala, en esta ocasión desde la óptica de la flexión.

17 GALILEI Galileo, Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze. 1638. Citado GORDON, op cit, pag 189 a 192, por THOMPSON D'Arcy, On grow and form, pag 19.
18 SCHLAICH Jörg, Structures légères incorporado en la publicación L'art de l'ingénieur, pag 477. Exposición que tuvo lugar en el centro Georges Pompidou, París, 1997.

Tanto Churtichaga cuando se refiere a la obra de Pérez Piñero y Candela como Schlaich cuando prosigue su disertación sobre el tema están de acuerdo en que las grandes luces requieren una limitación en los tipos de solicitaciones y en concreto señalan *que éstas deberán ser de tracción o de compresión, que los esfuerzos más directos serán los más económicos y que un buen diseño consistirá en minimizar y situar adecuadamente estas trayectorias,* dando la razón a aquel lema de Robert Le Ricolais según el cual la estructura es el arte de situar los vacíos[19]. Por el contrario, a menor tamaño relativo, mayor versatilidad en las soluciones.

En conclusión, cada escala de diseño vendrá justificada por unos determinados materiales y viceversa, cada material condicionará un umbral de forma estructural. A mayor valor de eficacia mecánica, mayor tamaño posible (caso de los cables de alta resistencia) y permite entender que cada material tendrá un umbral de formas límite, como apuntaba Félix Candela con el valor de unos 30m en referencia a las cáscaras de hormigón[20].

Gordon habla del coeficiente de carga como concepto para entender la capacidad de las estructuras cuando deben absorber solicitaciones accidentales. Un coeficiente reducido implica materiales con tensiones alejadas de sus límites elásticos, plásticos o de rotura. Eso, que Gordon identifica en las estructuras naturales, no se produce en el caso de la arquitectura contemporánea, pero sí en las fábricas antiguas.



FELIX CANDELA
(1910-1997)
Restaurante en Xochimilco, Méjico.
1957
Luz =30m
espesor=4cm

19 MC CLEARY Peter, Robert Le Ricolais e la ricerca dell'"idea indistruttible", en revista Lotus 99, ed Electa, 1993, pag 127.
20 CHURTICHAGA, op cit. Pag 141.

4.3.8. Masa, transporte de fuerzas y esbeltez relativa

Los estudios de Frei Otto pretenden establecer un sistema de comparación de estructuras (y de componentes dentro de ellas) que posibiliten juicios de valor sobre su diseño. En Términos de sostenibilidad, intervienen factores como la masa requerida y el recorrido que efectúan los esfuerzos a lo largo de las barras (de tracción o compresión).

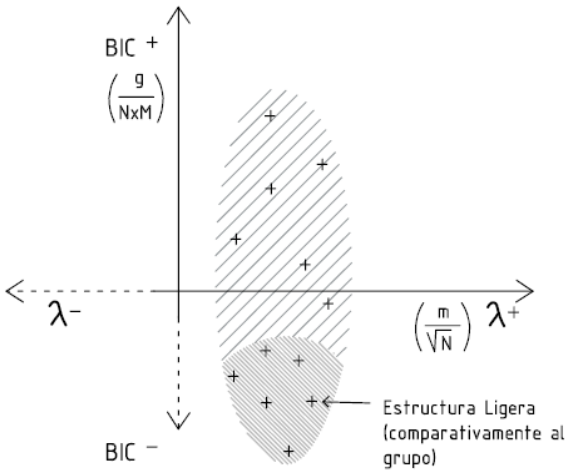
Para él, una solución será buena o eficaz no sólo porque las tensiones no superen los límites establecidos, sino también cuando los recursos empleados (material y camino de cargas) son mínimos.

Dos conceptos, la esbeltez estructural relativa (λ) y el valor de eficacia llamado Bic, se referenciarán como ejes cartesianos para ordenar con escala logarítmica todas las estructuras posibles, atirantadas, comprimidas y en flexión, con diversas condiciones de enlace, artificiales y naturales, en escala micro y macroscópica. Si bien dicha tabla resulta prácticamente ilegible cuando se grafía la totalidad, es interesante cuando se refiere a una sola estructura, condición de soporte, o material. Sería el ejemplo los puentes civiles a lo largo de la historia. Una vez establecida la tabla, cualquier diseño nuevo puede ubicarse respecto a los anteriores y medir el progreso en términos de eficacia. Un valor bajo del Bic y alto de (λ), en comparación con el resto de la serie, se acerca la concepto de eficacia de las estructuras ligeras. Evidentemente, los primitivos puentes romanos se sitúan en el extremo opuesto al de los contemporáneos de luces extremas.

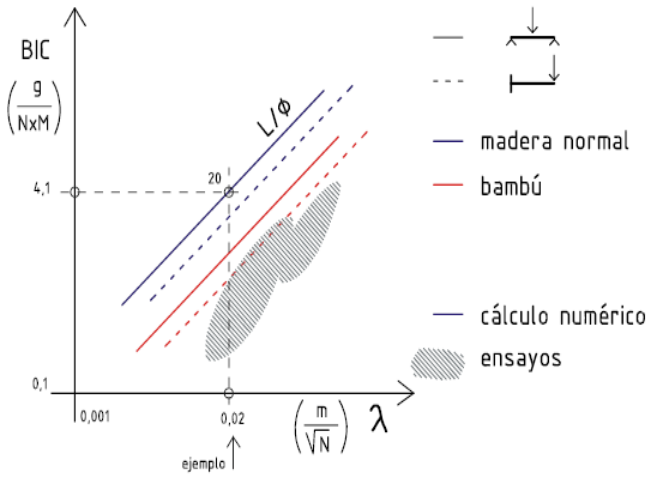
$$\text{Bic} = \frac{\text{Masa}}{\text{Fuerza x Distancia}}, \qquad \lambda = \frac{\text{Longitud}}{\sqrt{\text{Fuerza}}}$$

En general, la masa se refiera a la requerida en la estructura y se mide en gramos (g); el esfuerzo es la fuerza transmitida (tracción o compresión)[21] a que está sometida la barra y se mide en newtons (N); y distancia es la longitud en que se transporta el esfuerzo (normalmente la longitud de la barra) y se mide en metros (m). Frei Otto llamará *Tra* al producto de fuerza por distancia.

21 En algunos ejemplos mostrados por Otto en IL 34 (caso de viga en voladizo) se equiparan fuerzas puntuales externas con los esfuerzos de tracción o compresión en barras, lo que puede ocasionar una cierta confusión al realizar el análisis.



A nivel más práctico, en otra serie de tablas derivadas de la anterior se comparan materiales, (por ejemplo madera, bambú y acero) con casos de comportamiento (viga biarticulada o en voladizo), incorporando reglas de dimensionado canto/luz basadas en los estándares alemanes de la época en que se confeccionaron las tablas.



Cuadro Bic-(λ) Flexión en madera y bambú. Tabla resumen a partir de Otto (IL 31 pag 279 y sig).

4.3.9. EL CÁLCULO INNECESARIO

Cálculo mecánico y dimensionamiento de las barras.

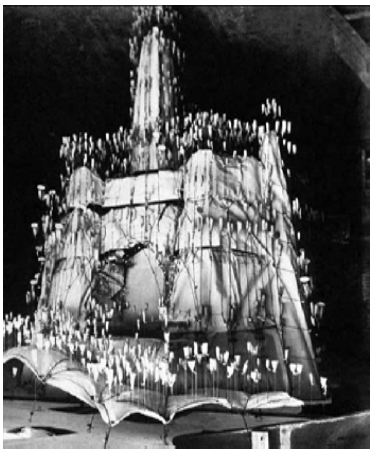
"una estructura bien proyectada casi no necesita calcularse" F. CANDELA *"lo que necesitamos es una estructura, no un análisis"* H. CROSS En el año 1951, Félix Candela presentaba una Memoria al Congreso Científico Mejicano titulada *"hacia una nueva filosofía de las estructuras"*. El trabajo provocó gran indignación entre los presentes, pero poco después daba la vuelta al mundo en varios idiomas llevándose con él toda una manera de analizar con métodos elásticos las estructuras. Si el hormigón armado no es homogéneo, es decir, no es isótropo, tampoco será en rigor elástico, y por tanto los métodos empleados hasta entonces para su análisis tampoco reflejarían su verdadero comportamiento. FC, anclado siempre a la realidad constructiva, busca enmarcar el problema, acotarlo, mantenerlo dentro de unos márgenes que le permitan acometerlo. FC quería construir cubiertas, no matizar quimeras analíticas. Así, con conceptos analíticos sencillos pero precisamente por ello poderosos, se enfrenta al cálculo de sus construcciones. Él destaca que *"la tragedia de la ciencia es trabajar para un resultado que nunca alcanzará. Tenemos, pues, que conformarnos de antemano con cerrar, aunque sea en pequeñísima medida, el enorme círculo dentro del cual tratamos de aprisionar la realidad".*

Con esta inteligente y rara distancia, puede uno embarcarse en semejante despliegue de formas resistentes. FC sencillamente construía sus láminas. En la medida en que sus métodos de cálculo coincidían con la realidad construida, su interés se deslizaba en afinar un espesor, en suprimir una viga de borde, en canalizar de otro modo las fuerzas, en entender al fin las formas resistentes. FC disfrutaba en este enfrentamiento con la gravedad, tratando de aprisionar o cerrar algo más ese gran circulo. Pero conociendo las limitaciones del cálculo, puede decir con elegante distancia que *"Felizmente, las estructuras, más prudentes que el hombre, se empeñan en no caerse y ello nos permite seguir engañándonos con nuestro inocente juego".*

EPP, respecto al cálculo, lo enfrenta directamente con la realidad: *“el cálculo y dimensionamiento de las barras, salvo en determinadas casos simplificables...es de graves inconvenientes teóricos, haciéndose preciso el ensayo en modelos a escala.”*

De nuevo aquí la misma distancia entre el análisis y el comportamiento real del objeto. Ensayando a escala la estructura, (corrigiendo como Galileo factores escala-proporción)

se deducen de modo directo las leyes que parecen gobernar su comportamiento, del mismo modo que Gaudí imaginaba sus espacios con las cargas que los cubrían.



ANTONIO GAUDI (1852-1926)
maqueta funicular de la Iglesia de la Colonia Güell, Santa Coloma de Cervelló, Barcelona. hacia1908 imagen invertida de la maqueta.
Los saquitos de arena y las telas forman al colgar la forma catenaria invertida del conjunto. Construida de este modo, toda la estructura trabajaría únicamente a compresión bajo cargas propias.

En el cálculo mecánico, la propia construcción en su concreta realidad se enrosca con él en un bucle en espiral de mutuos acercamientos al problema estructural.

4.3.10. Malla, masa y superficie

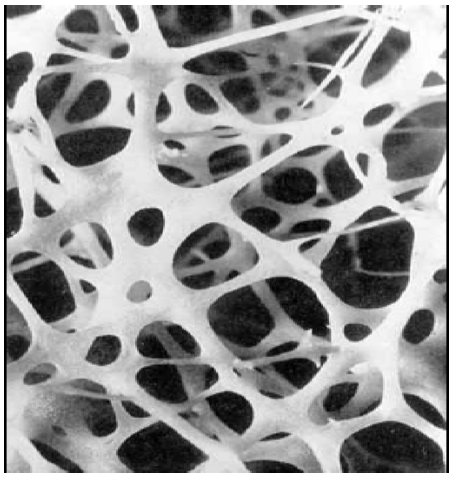
Determinación de la retícula, disposición y longitud de las barras.

Esto puede llamarse *"cálculo geométrico*" de la estructura. *"Si en lugar de trabajar con elementos sólidos pensamos en los huecos llegaremos a la verdad...el arte de la estructura es cómo y dónde colocar los huecos"* Robert Le Ricolais (1894-1977) Canalizar los esfuerzos de una estructura exige un vehículo, un medio en cual desplazarse. Y este no puede ser otro que la materia. En cada punto de una estructura existirán unas tensiones en equilibrio, y por transmisión y entrega de esas tensiones se canalizarán las fuerzas exteriores a través de la estructura en función de su forma. En último término, es decir, molecularmente, las tensiones en cada punto tendrán unas direcciones y por tanto un resultado vectorial.

Así, la masa se nos descubre ahora como una malla apretada de partículas, de elementos. Como explica el propio EPP *"...la retícula aparece como esqueleto de la forma general, que se supone determinada y fijada previamente. La barra es una condensación de masa en la línea de fuerza y los huecos son una supresión de masa inerte."*

En la estructura interna de un hueso seccionado se aprecia como la masa puede especializarse, ahuecarse en direcciones de esfuerzo que atienda las solicitaciones de la

estructura. La superficie es en definitiva una retícula, y por extensión la masa es una malla apretada.



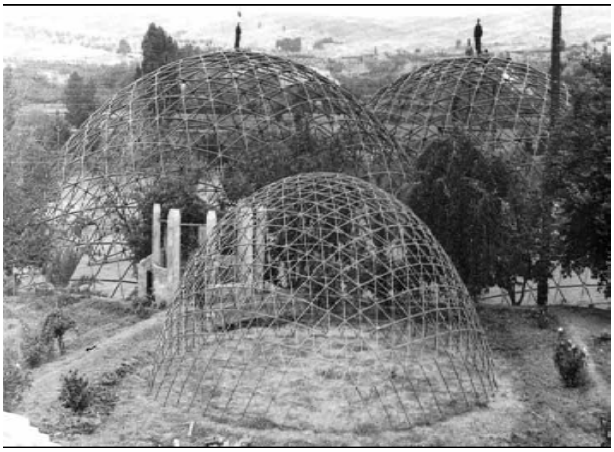
Fotografía de hueso seccionado y esquema de respuesta a sus solicitaciones principales.
La masa ósea en su micro-forma, se revela como una malla orientada de masa, como una materia especializada.

Para cumplir su condición de retícula o malla tridimensional, sus partes integrantes han de tener cierta cohesión, ciertos vínculos vitales con sus partículas adyacentes. La malla y la superficie serán lo mismo, y sus posibilidades, enormes. En la bóveda-viga de Torroja para el Frontón Recoletos en Madrid la superficie de la lámina de hormigón es perforada por la luz en una malla triangulada donde la tensiones se acomodan canalizadas por estas *"líneas de fuerza"*. Los trabajadores que construyeron junto a EPP en Calasparra, Murcia, cúpulas reticulares en 1966 para una exposición itinerante, quedan misteriosamente apoyados en la superficie casi inmaterial de sus mallas cupuliformes.

EDUARDO TORROJA 1899-1961
Frontón Recoletos, Madrid, 1925

4.3.11. Triangulo rígido

Al ahuecarse la masa, al hacerse el vacío evidente, las partes restantes que canalizan los esfuerzos, podrán deformarse, y para mantener los esfuerzos dentro de ellas, para evitar la aparición de esfuerzos indirectos perversos para sus elementos, será necesaria en toda malla una ley esencial: la triangulación.



EMILIO PEREZ PIÑERO
cupulas reticulares, 1966
en la parte posterior cúpulas macladas para "Festivales de España"

El triángulo es la figura indeformable básica. Una malla o una retícula formada por triángulos tendrán una rigidez geométrica inherente, lo que la identifica plenamente con una superficie continua.

Con el principio de triangulación pronto se comprenden las posibilidades estructurales, la ligereza de los elementos así conformados y la rigidez obtenida del conjunto. Ya intuidas para la madera este tipo de soluciones, como muestra por ejemplo un puente giratorio diseñado por Leonardo da Vinci, es con el acero cuando su utilización se extiende a multitud de situaciones y tipos estructurales.

Las posibilidades de la triangulación son enormes, especialmente para aquellos elementos que tienen su trabajo fundamental a flexión. En poco tiempo su comprensión, facilitada por el desarrollo del propio análisis tensional, proporciona pronto un viaje espectacular, en muy pocos años, desde estructuras ingenuas que muestran dudosas el principio triangulador, hasta estructuras tan maduras como el puente para el ferrocarril de Forth en Escocia.(fig 25), una de las primeras mega estructuras de acero.

12. La desproporción del tamaño

Observando éste fenómeno en los materiales de construcción, podemos deducir (sin considerar otros fenómenos como el pandeo) cual sería la altura máxima de material bajo cuyo peso el propio material llegara al límite de su resistencia. Esto, dependerá de la relación tensión de rotura/densidad de material, lo cual nos muestra una clasificación donde los materiales se ordenarían por eficacia resistente.

El bambú, la madera y el acero resulta ser del orden de seis veces más eficaces en este aspecto que materiales como el ladrillo o el hormigón. Por esta razón, la escala de los problemas estructurales marcará también por si sola el repertorio de materiales disponibles.

Por el método de “prueba y error” Félix Candela, demarco con su experiencia, que el límite razonable de luz para cascarones está en torno a los 30 metros. Por encima de esa cifra, la escala, el tamaño del problema modifica sustancialmente las implicaciones y prioridades de elección. Parece que cada material no solo tiene implícito un abanico formal, sino que determina incluso el tamaño de su propio repertorio.

Centro Social Y Cultural De La Infancia (Naiju Shoei Yoh JAPON)

Es el resultado de la interacción entre la artesanía loca “bambú” y la tecnología avanzada “hormigón”.

Su ejecución cumplió los requisitos de sencillos aportado por la misma comunidad, siendo replica de la unión de muchos sistemas constructivos autóctonos, adoptados durante la historia y que aun con el paso de los tiempo se sostienen para observarlos.

5. METODO GRAFICO DEL POLIGONO FUNICULAR APLICADO A LA VUELTA DE BAMBU.

5. METODO GRAFICO DEL POLIGONO FUNICULAR APLICADO A LA VUELTA DE BAMBU.

Un ingeniero francés del siglo XIX, Mery, desarrolló un método del funicular, teniendo como fin el de calcular las fuerzas que actúan en una vuelta.

Sus principios de calculo esta basado en su propia geometría, en la cual busca resultante de presión dentro de la misma figura, demarcara el paso del empuje de las cargas y su posible deformación en el punto mas conflictivo.

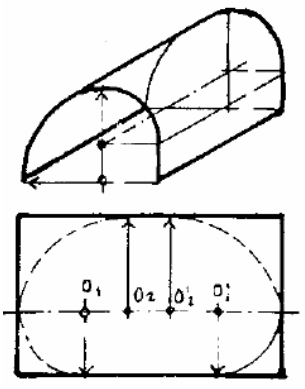
5.1. Como actúan las fuerzas en una vuelta:

Las vueltas generan fuerzas horizontales que se deben absorber en los apoyos mediante contrafuertes o tensores enterrados. Cuando el material de los cimientos no es apropiado el empuje de las vueltas hacia afuera se absorbe mediante un tensor.

5.2. La forma:

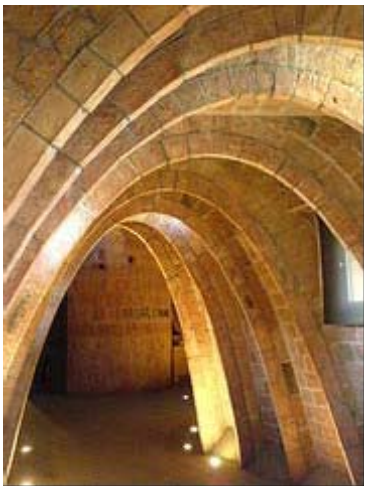
La forma de una vuelta no se elige por motivos puramente estructurales. La vuelta de medio punto, usado exclusivamente por los romanos, posee propiedades constructivas que justifican su empleo. Asimismo, las vueltas de tipo gótico poseen ventajas tanto visuales como estructurales, mientras que la vuelta árabe, típica de las mezquitas y de cierta arquitectura veneciana, es "incorrecta"" desde un punto de vista puramente estructural.

La forma que utilizaremos en este proyecto será la siguiente:



BÓVEDA DE CAÑÓN SEGUIDO EN ARCO RAMPANTE

5.3. Funiculares-cables-tracción



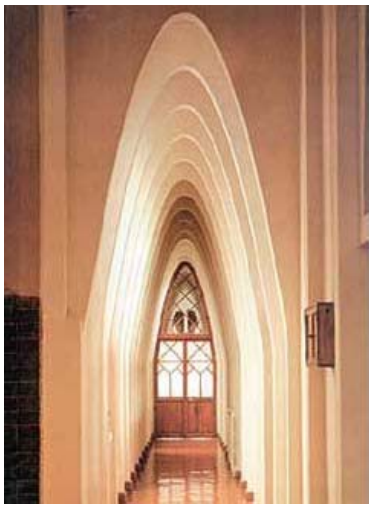
Podemos considerar a las vueltas cuyo eje coincide con la *línea de presiones*, llamados arcos "funiculares", como sistemas simétricos respecto al de los cables y en ese sentido incorporarlos a la familia estructural en estudio.

Claro que la palabra funicular refiere a *funiculares-cables-tracción*. Usamos ahora el término, asociado a vuelta, exclusivamente para asociar estas vueltas a sus cables simétricos que podrían equilibrar las mismas cargas.

Las diferencias entre los dos se traducen en características diferenciales que se incorporan fuertemente al diseño, o a la expresión formal:

• En un caso la solicitación será tracción pura (cables), en el otro, compresión pura (arcos), y la consideración (compleja a veces) del fenómeno del pandeo dará secciones y formas de las secciones, diferentes, más importantes, con mayor peso.

• En un caso la flexibilidad permitirá la adaptación a la forma necesaria en cada caso, en el otro, la rigidez de la vuelta llevará a que no lo pueda hacer resultando que la vuelta será "funicular "solo para un estado de carga particular. También esto lleva a dar secciones para la vuelta sensiblemente más importante.

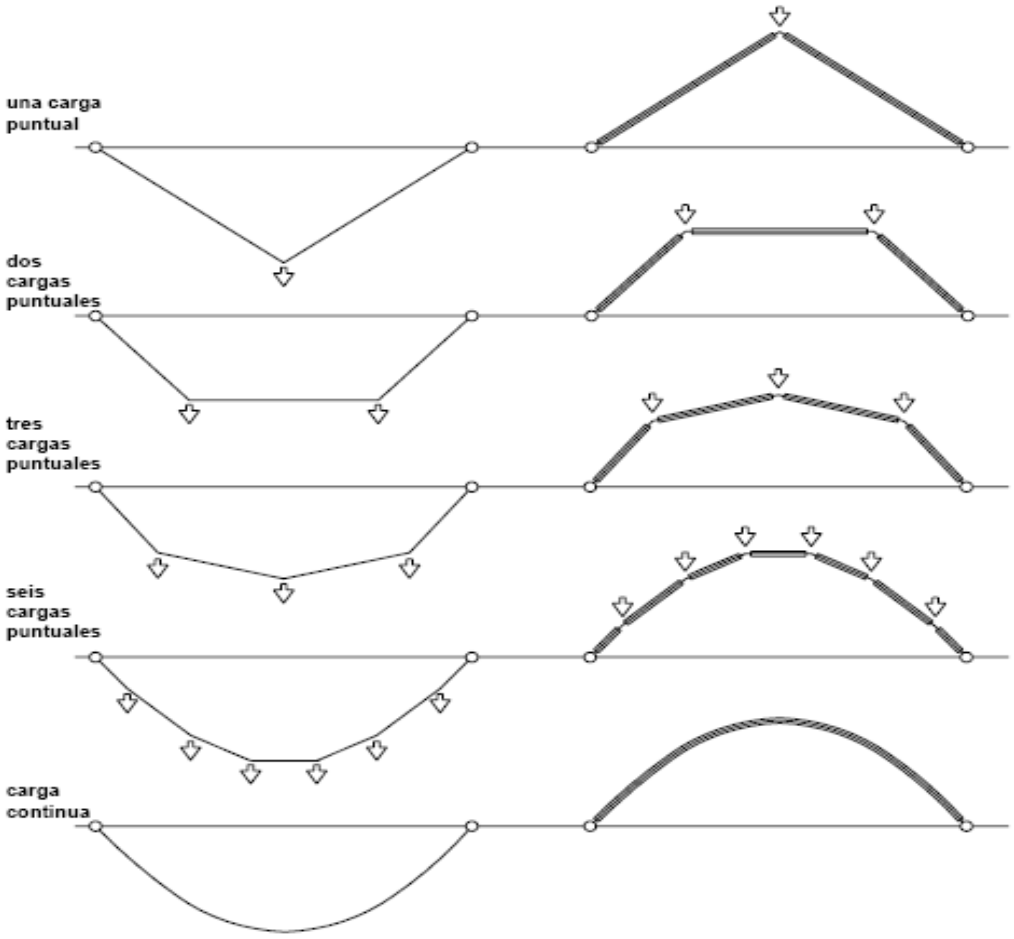


Existen otras diferencias y complejidades por ejemplo, en la fijación la vuelta a los apoyos, en que la rigidez de la vuelta generará nuevas particularidades y complejidades.

Estos elementos hacen que la simetría entre los dos sistemas sea relativa y que expresivamente se marquen como distintos.

De todas formas, sin distinguir entre los dos subsistemas (vuelta-cables), debido a que sólo están sometidos a solicitaciones de compresión o tracción simples permiten cubrir grandes luces y configurar grandes espacios, empleando la mínima cantidad de material posible.

5.4. Relación entre cable suspendido y arco funicular.



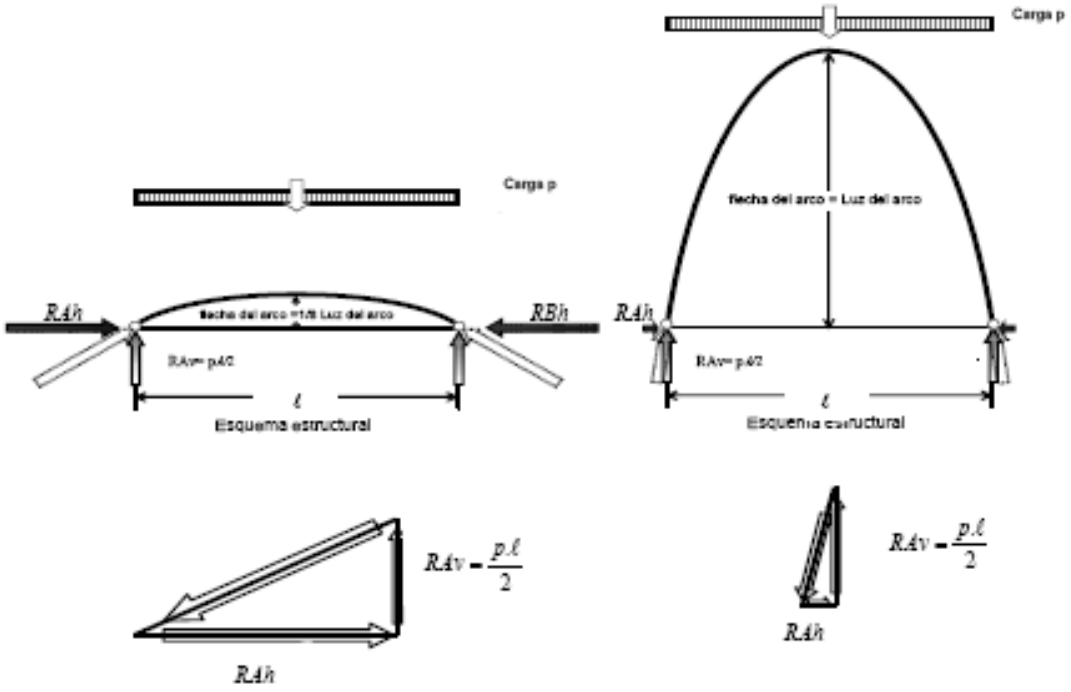
La vuelta es en esencia una estructura comprimida utilizada para cubrir grandes y pequeñas luces, y puede considerarse como uno de los elementos estructurales básicos en todo tipo de arquitectura.

La forma ideal de una vuelta capaz de resistir cargas determinadas por un estado de compresión simple, pueden hallarse siempre con la forma del polígono funicular correspondiente invertido.

El método que utilizó Gaudí para establecer la forma de sus obras fue una compleja y laboriosa maqueta funicular de hilos colgados traccionados con pesos representativos de las diferentes partes del edificio, cuya inversión de 180°, mediante croquis o fotografía, daba la posición y la dirección en el espacio de los ejes de los elementos constructivos exclusivamente lineales, pilares o vueltas, que estarían sometidos sólo a

esfuerzos de compresión pura. En el paso del hilo a la materia genera los elementos portantes con una corporeidad suficiente para no sufrir los efectos del pandeo.

Las vueltas generan fuerzas horizontales que se deben absorber en los apoyos mediante contrafuertes o tensores. Analicemos la variación de los esfuerzos en el arco, manteniendo constantes el valor de la fuerza (F) y la distancia entre los puntos de apoyo (l), variando la altura del arco (h)



Vemos que la componente vertical se mantiene constante: RAv = RBv = F/2, en tanto que el valor del esfuerzo horizontal RAh crece a medida que disminuye la altura (h).

El valor del empuje horizontal es inversamente proporcional a su altura, para reducir el empuje horizontal en los apoyos el arco debería ser lo más alto posible.

El valor del esfuerzo al que está sometido el arco aumenta, a mayor altura mayor compresión.

5.5. Estado tensional

Hablamos de vueltas, diseñadas, con su eje coincidiendo con la línea de presiones (entonces todo lo dicho para los cables podría repetirse para estos arcos en compresión pura, para una “geometría simétrica”).

La línea de presiones está asociada a un estado de cargas, el eje de dicha vuelta coincidirá con el estado de carga correspondiente a los pesos propios, exclusivamente.

Cualquier variación en las condiciones de carga modifica la forma del arco funicular y crea una nueva forma estructural. Mientras el cable suspendido adopta por sí mismo la nueva línea de presiones al variar las cargas, el arco funicular ha de absorber a través de su rigidez la variación en la línea de presiones.

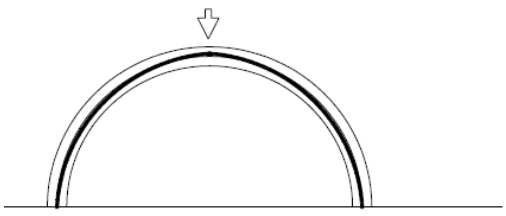
Para otro estado de carga el axil N, tendrá una excentricidad e, y la secciones estarán en presoflexión, es decir comprimidas por el axil y flechadas por la excentricidad de la carga.

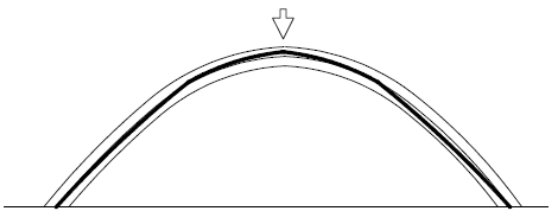
De manera que en los arcos esbeltos en acero y también en hormigón armado, no podrán, estrictamente, ser considerados dentro de la familia, ya que aparece la flexión asociada a los diferentes estados de carga.

Para arcos pétreos o de mampostería, con materiales sin capacidad importante para trabajar en tracción, y con importante peso propio, podemos si considerar a los arcos como arcos comprimidos exclusivamente.

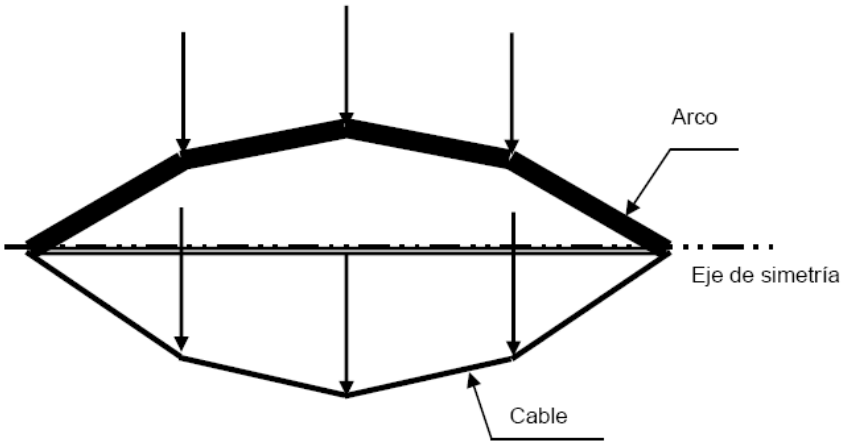
Las líneas de presiones, correspondiente a los diferentes estados de carga, dan una “medida del espacio” adecuada al diseño para esa situación concreta.

Pensemos ahora en esos arcos en que las líneas de presión, de los diferentes estados de carga, se apartan poco de la correspondiente, a la de los pesos propio, que define el eje del arco.





En ese caso el diseño debe asegurar que el axil esté siempre poco apartado del centro de gravedad, de la sección, es decir que la excentricidad de la solicitación axil, sea pequeña, de forma que todo el material esté siempre comprimido, evitando la aparición de tracción en las diferentes secciones. Esto se asegura por la poca separación de las distintas líneas de presión, respecto al eje de la vuelta.



Así podríamos asociar a estas vueltas como los simétricos de los cables “estabilizados mediante peso propio”. Obsérvese que la situación no es idéntica, o no es “estrictamente simétrica”.

En un caso el cable se deforma hasta coincidir con la nueva línea de presiones, pero esa nueva posición es muy cercana a la primera, en el otro caso el arco permanece (para análisis de primer orden) en su forma original, apartándose de la nueva línea de presiones, pero ésta excentricidad es menor, de forma de que toda la sección permanezca sin “fibras” traccionadas. Es decir que en éste último caso aparece la flexión para estados de carga y estrictamente no deberíamos considerarlo dentro de la familia en estudio.

Esa zona de la geometría de la sección que asegura, que si el axil, “cae” en ella, no hay fibras traccionadas, es el llamado “núcleo central”. Esa geometría naturalmente se desarrolla entorno al centro gravitacional de la sección, tiene como centro a éste y es de fácil determinación.

5.6 Núcleo central.

La excentricidad ”e”, crea el momento flector M:

M = e.N

Las tensiones normales σ por el axil N serán:

σ = N/ A

Las tensiones normales σ máximas, (de tracción y de compresión) por el flector M será:

$$\sigma = \frac{M}{Wx} = \frac{e.N}{Wx}$$

Con A, área de la sección (b.h, para el caso de la figura);

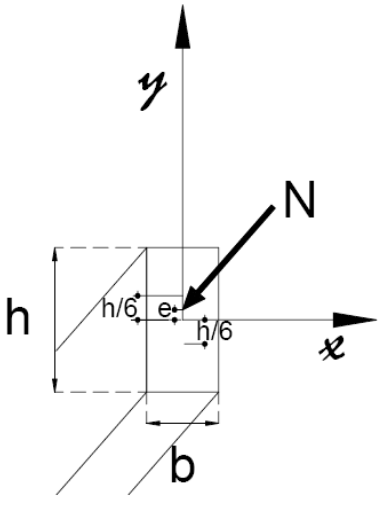
Y con Wx, módulo resistente de la sección ($\frac{b.h^2}{6}$, para el caso de la figura).

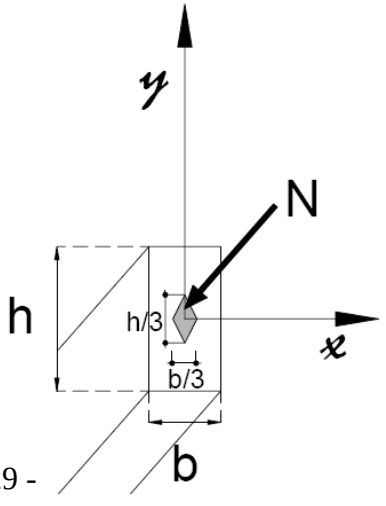
Al aumentar la excentricidad aumenta la tracción que se resta a las compresiones del axil, (ver flexión simple y preso-flexión), el límite para que no haya tracciones será cuando esa resta sea cero:

$0 = \frac{N}{A} - \frac{e.N}{Wx}$ Dividiendo los dos términos por N obtenemos, $0 = \frac{1}{A} - \frac{e}{Wx}$

Despejando

$e = \frac{Wx}{A}$, Que para el caso de la figura, $e = \frac{Wx}{A} = \frac{b.h^2}{6.b.h} = \frac{h}{6}$





6. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA VUELTA DE BAMBÚ

ESTUDIO CASO PRÁCTICO. UNA VUELTA DE BAMBÚ

6.1 Localización.

El caso de seguimiento práctico se ha basado en la construcción de una vuelta de bambú. Está situada en el municipio gerundense de Maçanet de la Selva (Girona). (Foto 36) (altitud 100m.).

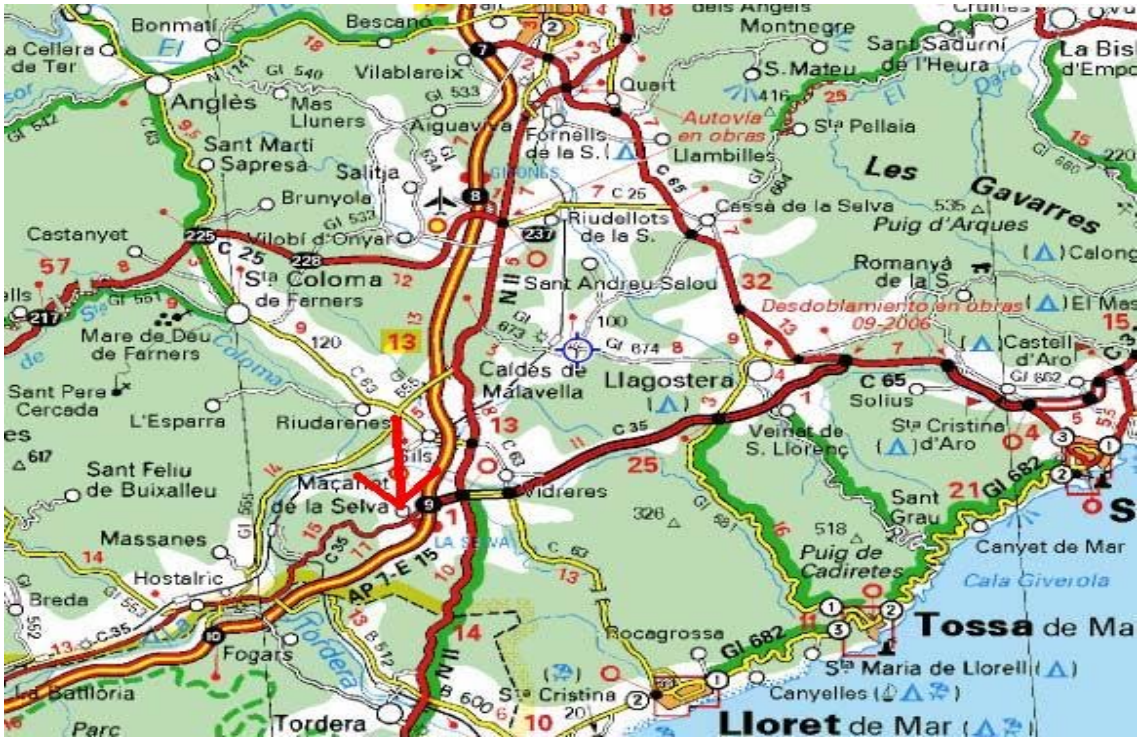


Foto 36 - Mapa ubicación del municipio donde se realiza el estudio práctico

6.2 Descripción del proceso constructivo de la vuelta.

El uso principal de esta vuelta será de vestuarios, duchas y WC's para una empresa privada de campamentos de verano.

Las dimensiones de la vuelta son: 10,30m. de largo, 4,00m. de ancho y 3,46m. de alto. La vuelta está empotrada en su perímetro con muros de carga de bloque de mortero 20x20x40cms con relleno de hormigón. Los muros nacen de una cimentación de zapatas de 70x70x60cms con armaduras ∅ 12 cada 20 cm. (Foto 37). Se dispuso de armaduras del ∅12 cada 20cm. (1∅12 por cada hilada del muro) a través de los muros verticalmente para darle más estabilidad una vez realizado el vertido de hormigón en el interior. Los muros se coronaron con ambos zunchos perimetrales de 20 x 20cm. de hormigón armado HA/25/P/IIB con 4∅8 mm. cada 15cm. reforzados con

2∅16cm. para recibir el empuje horizontal de la vuelta una vez puesta en carga.

Foto 37 - Formación de los muros de carga de bloque de hormigón.

Foto 38 .Detalle formación muro perimetral lateral para empotramiento del bambú.

En la parte posterior de los muros laterales y del principal, se colocaron membranas impermeable tipo Tyveck de polietileno, Geodrain con geotéxtil de la casa Bettor. En el metro inferior se reforzó con membrana de EPDM caucho butil Giscolene 120(Foto 39)

Foto 39 - Detalle capas de impermeabilización del muro en contacto con el terreno.

En la parte inferior del muro se colocó un tubo de drenaje de polipropileno de ∅160mm. perforado previa preparación de media caña de mortero. Se rellenó la parte posterior del muro con grava y con un relleno de tierra estabilizada al 8% con cal en estado ligeramente húmedo y compactada con martillo pequeño por partes de 15cm. (Foto 40)

Foto 40 - Vista posterior del muro de coronación de la vuelta de bambú donde se rellenará de tierras.

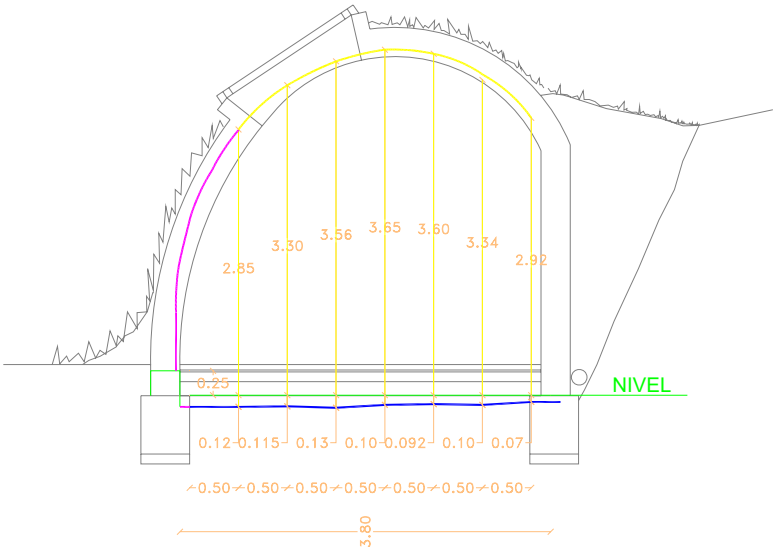
Se realizó el pertinente hormigonado en los interiores de los muros perimetrales con hormigón HA/25/P/IIB. (Foto 41)

Foto 41 - Hormigonado interior de los muros perimetrales de empotramiento de la vuelta de bambú

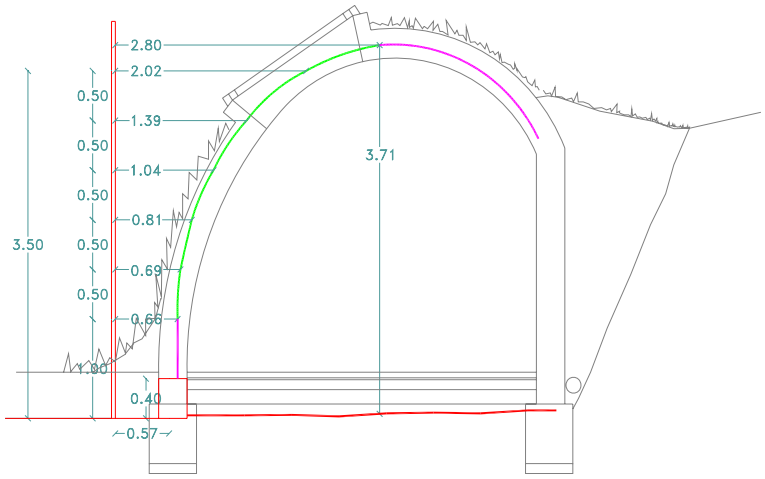
Una vez realizados los muros exteriores e impermeabilizados por las caras de las tierras de relleno posterior, se procedió a montar la vuelta de bambú. Estará formada por una malla – entramado de bambusa guadua de 15x15cms y ∅ 20mm. (Foto 42) Las características físico mecánicas de esta variante de bambú las hemos analizado en la introducción del proyecto.

Foto 42 - Formación del entramado de bambú empotrado a su perímetro.

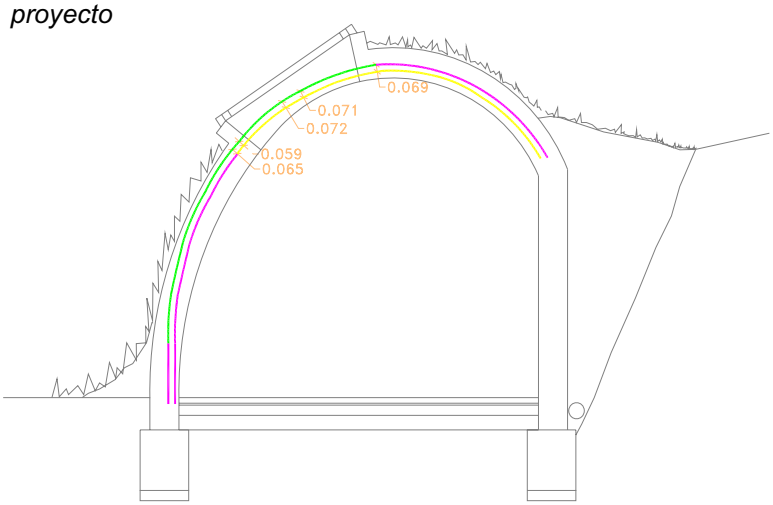
Medición ejecutada en obra al entramado de bambú, desde el interior



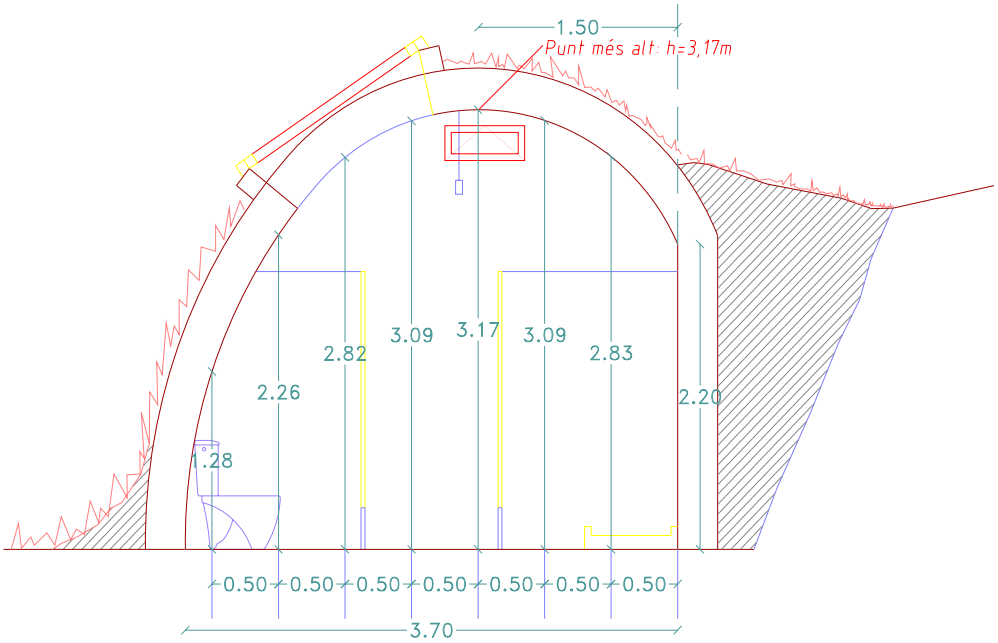
Medición ejecutada en obra al entramado de bambú, desde el exterior



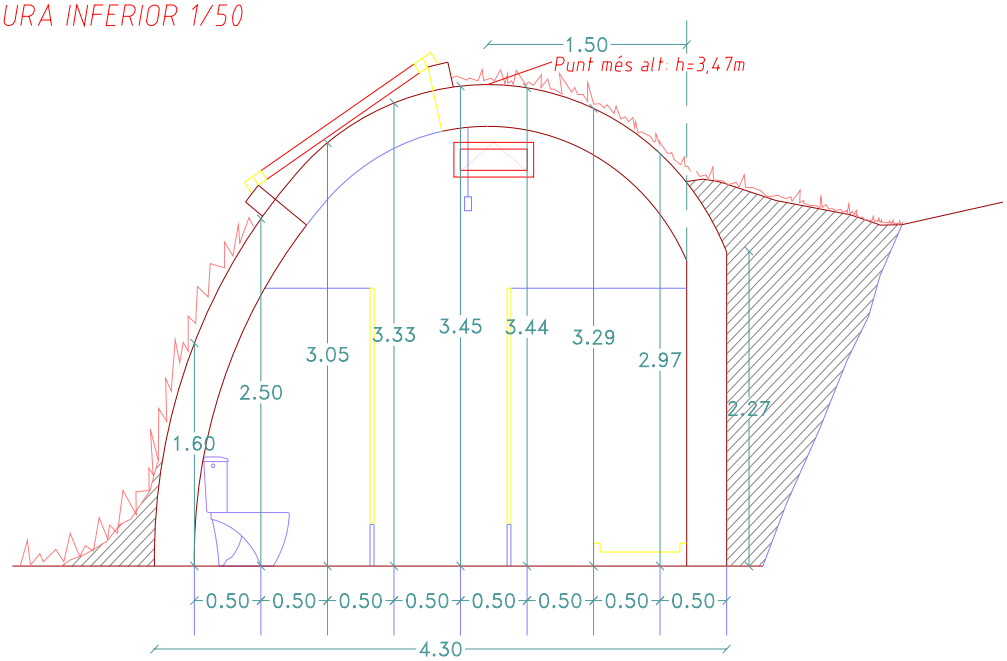
comprobación de la diferencia entre las medidas interiores y exteriores, las cuales fueron verificadas con cotas del proyecto



Valores de cotas de proyecto.



CURVATURA INFERIOR 1/50



CURVATURA SUPERIOR 1/50

Foto 43 - Detalle de anclaje a muro perimetral con refuerzo horizontal para soportar los empujes de la vuelta. Las uniones se realizan con bridas de plástico reforzándolas en puntos conflictivos.

Foto 44 - Refuerzo de la zona inferior de la vuelta de bambusa guadua con ∅ 20mm cada 20cm. de forma horizontal

En las fotos observamos como se realizó el anclaje de las armaduras de bambú guadua con los muretes perimetrales (foto 43). En obra, la dirección facultativa hizo la previsión de reforzar la armadura inferior horizontal doblando barras de bambú de forma que soportara los esfuerzos axiles del césped, tierras y posibles cargas variables que pudiera sufrir en un futuro (foto 44). En nuestras hipótesis de cálculo estas zonas no cumplen en cuanto a flecha y compresiones.

Foto 45 - Detalle de entrega de las armaduras de bambú guadua en las esquinas de los muros

Una vez armada la vuelta en toda su superficie y reforzada en sus puntos críticos según las hipótesis de cálculo previas, se colocaron mallas de tela de gallinero en la cara interior de la vuelta de bambú para gunitar los 15cms de hormigón aislante con una dosificación del 60% de residuos de viruta de madera, corcho, paja y adicciones puzolánicas (volcánicas, cerámica triturada…). Este compuesto unido al entramado de bambú será el que nos proporcionará la losa en forma de vuelta para soportar las cargas predimensionadas.

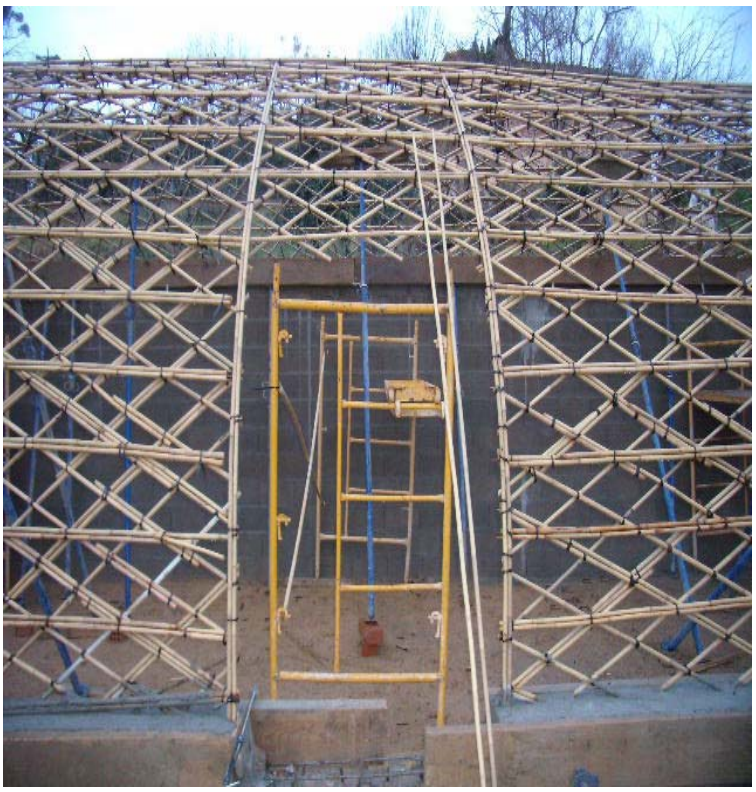


Foto 46 - Formación de la puerta de entrada. Efectuada una vez arriostrado todo el entramado al perímetro.

Foto 47 - Detalle de unión del entramado de bambú guadua con el perímetro una vez hormigonado.

Foto 48 - Recepción en obra de las mallas de tela de gallinero.

Para la formación de la puerta de entrada en la vuelta (foto 46), se tuvo que cortar lógicamente el entramado de bambú creado para resistir las cargas. Esto provocó que

este punto pasara a ser considerado delicado al perder capacidades de resistir esfuerzos en flexión y compresión al verse cortada la transmisión de las cargas. Analizada la situación, en el momento de la elaboración de la entrada se reforzó su perímetro con hormigón para dotarle más fortaleza en las entregas.

Las telas de gallinero nos permitirán realizar el gunitado de forma que la pasta proyectada se adhiera a los filamentos metálicos y se unan entre si con el entramado y el cuerpo del bambú. Este fue un momento de especial trascendencia por el conocimiento de los posibles problemas de retracción de la unión del bambú con el gunitado. Fue uno de los puntos críticos de la construcción estudiada. De modo que se dobló la superficie de malla para aglutinar al máximo los elementos del gunitado (foto 49).

Foto 49 - Colocación del doblado de malla de gallinero por su cara inferior al entramado de bambú

Se valoraron las opciones de sustituir la malla metálica por malla sintética para evitar los campos magnéticos pero finalmente por la capacidad de adherencia superior de la

malla de gallinero se escogió esta última. En cuanto al sistema de colocación se decidió usar la malla en la zona inferior al bambú, es decir, en la parte interior de la vuelta. La solución adoptada daba más problemas para gunitar con la máquina pero respondía mejor a las necesidades del proyecto. La vuelta de bambú soportaría mejor los esfuerzos a flexión de las cargas predimensionadas con el doblado de mallas metálicas debajo del entramado.

Foto 50 - Vista del andamiaje en el momento de preparación de los soportes para empezar a gunitar y formar la vuelta de bambú

Foto 51 - Detalle colocación de la malla de gallinero en uno de los muros laterales de la vuelta.

En la foto 48 apreciamos como se solucionó la formación de la parte volada de la vuelta. Se prolongó la armadura de bambú guadua unos 30cm. arriostrándolos en la cara superior del muro y se adhirió la malla de gallinero por la cara inferior previo al gunitado.

Foto52 - Formación artesanal del gunitado de paja, hormigón aislante, residuos de corcho, viruta de madera. El proyectado se efectuará con maquina gunitadora hacia la vuelta de bambú una vez colocadas las mallas de gallinero

Sobre los lavamanos, se colocaron aberturas de ventilación e iluminación. Se formaron con una pieza cerámica de agujero 20 x 20cm. en la cubierta (pieza utilizada en chimeneas) produciendo una obertura de iluminación con pavés. Se tuvo en cuenta el buen replanteo de la superficie para ejecutar bien las aberturas proyectadas. (Foto 53)

Foto 53 - Detalle abertura de iluminación en la parte superior de la vuelta de bambú.

Se colocaron dos ventanas tipo Velux en la parte superior de la vuelta. Se constituyeron con un refuerzo en sus perímetros con zunchos de hormigón armado después de colocar la malla de gallinero en el inferior del entramado de bambú (2 capas). Vemos a continuación algunos detalles de su formación. (Foto 54-55)

Foto 54 - Detalle formación ventanales exteriores tipo Velux en la parte alta de la vuelta.

Foto 55 - Detalle de la formación de los ventanales tipo Velux. Vista desde el interior de la vuelta.

Por dentro ya se ha doblado la vuelta con rasilla de 2ª con mortero rápido de cal. Los conductos de iluminación y ventilación ya se han instalado por fuera. El siguiente paso será gunitar la vuelta por el exterior. Durante todo el proceso se mantiene apuntalada la estructura con puntales en el punto de más altura para reforzar el entramado hasta la consolidación del gunitado después de su retracción. (Foto 53)

Foto 56 - Preparación máquina gunitadora donde se introducirán los materiales comentadas para extenderlos a presión sobre la vuelta de bambú

Foto 57 - Finalización del gunitado. Colocación de aberturas de ventilación sobre los lavamanos con piezas cerámicas en los agujeros de 20 x 20cm.

Durante el gunitado se mantuvo montado el andamiaje que permitiera extender la pasta con la máquina por toda la superficie de la vuelta con absoluta seguridad para el trabajador. Después se le pasó un regle para nivelar el gunitado y mantener los 15cm. de losa que estaban inicialmente en el proyecto. (Foto 57).

Esta vuelta empotrada a los muros perimetrales soportará todas las tierras y la vegetación que se formará finalmente en su parte superior.

Posteriormente analizaremos con detenimiento el comportamiento estructural de la vuelta para soportar todas las cargas, centrándonos principalmente en su capacidad de trabajar a flexión y compresión simple contrarrestando la flecha inicial de las cargas con la misma losa de bambú volteada.

Foto 58 – Colocación lámina impermeabilizante en la superficie de la vuelta ya formada.

Al acabar el proceso de gunitado se dispuso la formación de las distintas capas encargadas de evitar la filtración de humedades al interior y solventar que las raíces de la vegetación dañen las telas impermeabilizantes.

Foto 59 - Detalle colocación de la impermeabilización encima de la losa de bambú entregándose con la ventana tipo Velux

Foto 60 - Vista lateral de la vuelta después de gunitar y colocar la lámina geotextil y la membrana impermeable para el posterior relleno de tierras.

Se dispondrán por este orden encima de la vuelta de bambú: (foto 62)

- Membrana impermeable tipo Tyveck
- Cajones cuadrados de polipropileno para que cuando las raíces traspasen la lámina geotextil se nutran del agua que permanecerá dentro y no llegue a dañar la membrana impermeable.
- Structure Geodrain con geotéxtil de la casa Bettor.
- Subbase de arena
- Capa fina 8/11cm. de tierra vegetal con vegetación autóctona.

Estas capas estarán reforzadas como hemos explicado anteriormente con membrana de EPDM caucho butil Imperlen 120 en el perímetro de los muros a rellenar de tierras.

Foto 61 - Colocación cajones de polipropileno en la vuelta de bambú, sobre la lámina impermeabilizante

Foto 62 - Detalle de las capas que conforman la cubierta. Por orden, lámina impermeabilizante, huevera de polipropileno y lámina geotéxtil. Preparada para recibir tierras y vegetación encima.

Foto 63 - Finalización de colocación de los ventalanes tipo Velux en la vuelta de bambú.

En la foto 63 observamos el momento de la colocación de la carpintería exterior de ventanales tipo Velux realizando una correcta unión a la vuelta, proporcionándole impermeabilidad al sistema y aislándose térmicamente en sus juntas.

En la cara interior de la vuelta después de doblarla con rasilla de 2ª se ha enlucido con mortero el paramento, para prepararse a recibir la capa de acabado final.

Foto 64 - Detalle microfisuras de retracción producidas con el tiempo después del gunitado en la vuelta.

En la foto 64 vemos con exactitud las microfisuras producidas por la retracción del gunitado en la cara interior de la vuelta. No son producidas por las cargas. Con la mano de acabado final se borraran estas huellas propias de este sistema estructural.
La solera previa al pavimento está formada por un mallazo de 15 x 15 cm. ∅8 mm. de bambusa guadua hormigonada con hormigón aligerado con corcho y arlita (e = 10cm.)
Entre la solera y la capa de gravas se dispuso de una lámina de polietileno que formara de barrera de vapor y evitara la capilaridad del terreno en forma de humedades.

Foto 65 - Colocación conductos evacuación aguas grises y negras bajo solera de hormigón

El pavimento interior de la construcción es de gres catalán natural antideslizante 20x20 cm. colocado con mortero bastardo de cal y cemento (e = 4cm.). Se colocaron tubos de tierra radiante de polietileno previamente

Foto 66 - Colocación suelo radiante bajo pavimento final de la vuelta de bambú

Foto 67 Detalle del paso de instalaciones entre el muro perimetral y el tabique interior cerámico (e=4cm)

Foto 68 - Formación tabique interior para paso instalaciones

Como se observa en las fotos 68 y 69 se realizó un tabique cerámico de 4cm. para permitir el paso de instalaciones entre este y el muro perimetral. De este modo evitamos realizar regatas en el muro de carga. El suelo está preparado para recibir el gres catalán antideslizante. Se instalaran también los sanitarios, mecanismos de instalaciones y las separaciones de madera entre compartimentos.

Foto 69 - Momento de relleno de las tierras para vegetación sobre la vuelta de bambú

Foto 70 – Vista lateral de la vuelta terminada.

Foto 71 – Vista superior de la vuelta finalizada. La vegetación al crecer envolverá la construcción dejando una imagen parecida a una cueva.

Como observamos en las fotos 70 y 71 la vuelta de bambú llegó al fin y todo fue como se proyectó en el inicio.
Una vez vertidas las tierras por encima de la vuelta y sus laterales se realizó el acabado de los conductos de iluminación. Se acabaron con pavés de 15x15cm aferrados con mortero. Sobresalen unos 30cm de la vuelta y dan un toque estético característico.

Las ventanas velux se impermeabilizaron en su entrega con la vuelta para evitar la entrada de humedades de las tierras que tienen a su alrededor.

Foto 72 – Vista del interior de la vuelta en fase de acabados

Por el interior se procuraron que las regatas en la vuelta para pasar instalaciones fueran realizadas con su debida precaución. Las manos de pintura final al silicato le otorgan elegancia al interior de la sala y nos mostró que las microfisuras de retracción son sólo muestras lógicas de un secado de gunitado con bambú.

Foto 73. Prueba de carga efectuada a una vuelta gunitada a escala de la real, este modelo se le coloco 20kg/m2.

Foto 74. Modelo de prueba que demostró repartir bien las cargas y no generó ninguna micro-fisura.

Foto 75. Carga puntual de 6 sacos de 210 kg/ 0,16m2 a la vuelta real.

Foto 76. Pruebas de carga efectuada por el constructor de la obra.

Las cargas fueron colocadas en la zona mas desfavorable de la vuelta ejerciendo un axil por pilada de sacos de 314kg /0.16 m2.

Así sabemos con datos certeros que los cambios de temperatura desde que se proyecta hasta que se empieza a secar la pasta y la absorción de H2O del bambú para después soltarlo provocan esas microfisuras.

No cabe duda que a priori da la sensación que pueda ser una estructura poco estable basándonos en nuestras hipótesis de carga, las cuales, no garantizan la estabilidad de la estructura como veremos a continuación.

Pero la realidad es que la vuelta a dia de hoy está terminada y por su condición de equilibrio y de ejecución proyectada al inicio, no ha tenido deformaciones estructurales Se trata de una nueva arquitectura, otra forma de entender el concepto de crear espacios y darle forma a volúmenes que en otras ocasiones podrían resultar monótonos.

El bambú como material está claro que jamás tendrá la misma resistencia estructural que el acero pero no podemos olvidar todas sus propiedades físico-mecánicas que hemos analizado con exactitud.

Construcciones como la que hemos realizado un seguimiento de obra tienen buena acogida en entornos rurales y en obras de poco volumen. Se adaptan perfectamente al entorno natural y trabajamos con materiales ecológicos de base para formar la estructura.

7-ANÁLISIS DE LA VUELTA DE BAMBÚ CON RISA3D

7. CÁLCULO RESISTENCIA ESTRUCTURAL DE LA VUELTA DE BAMBÚ

A continuación vamos a realizar un análisis específico del comportamiento estructural de la vuelta de bambú. Para tal estudio, hemos trabajado con el programa de cálculo estructural RISA 3D. Podríamos haber trabajado con otro programa de los muchos que hay en el mercado para calcular estructuras pero nos decidimos por este ya que se adaptaba bien a la vuelta por la multitud de nudos existentes, de tal modo que resultara mejor para valorar los esfuerzos realizados de forma más precisa.

En este tutorial explicaremos paso a paso como hemos ido analizado el entramado de bambú, sus uniones con los muros de carga perimetrales, las reacciones en cada nudo (obteniendo datos claros de cuales son los nudos que necesitan ser reforzados), y las flechas producidas por las diversas solicitaciones externas a las que se verá expuesta la vuelta una vez puesta en carga.

Trabajando conjuntamente con las pruebas y ensayos del bambú, con los métodos teóricos para la formación de la vuelta y con el seguimiento minucioso del transcurso de la obra, hemos conseguido los objetivos claros iniciales, plasmar en la realidad una vuelta sustentada con un material vegetal y con el cuerpo de un gunitado.

Proceso de cálculo en RISA 3D

7.1 Creación del entramado de bambú en Autocad y traslado al RISA 3D.

Empezamos realizando una medición en obra completa para obtener todos los datos numéricos de separación entre barras, número de nudos, número de nudos empotrados con el perímetro del muro y del diámetro de las barras.
Tomamos valores cien por cien reales de las alturas por tramos, del muro inferior, de los laterales y del posterior, así como la altura máxima de la vuelta.
Estos valores serán clave para formar el entramado lo más real posible y en el momento de analizar numéricamente las reacciones y las flechas, todo es más exacto.

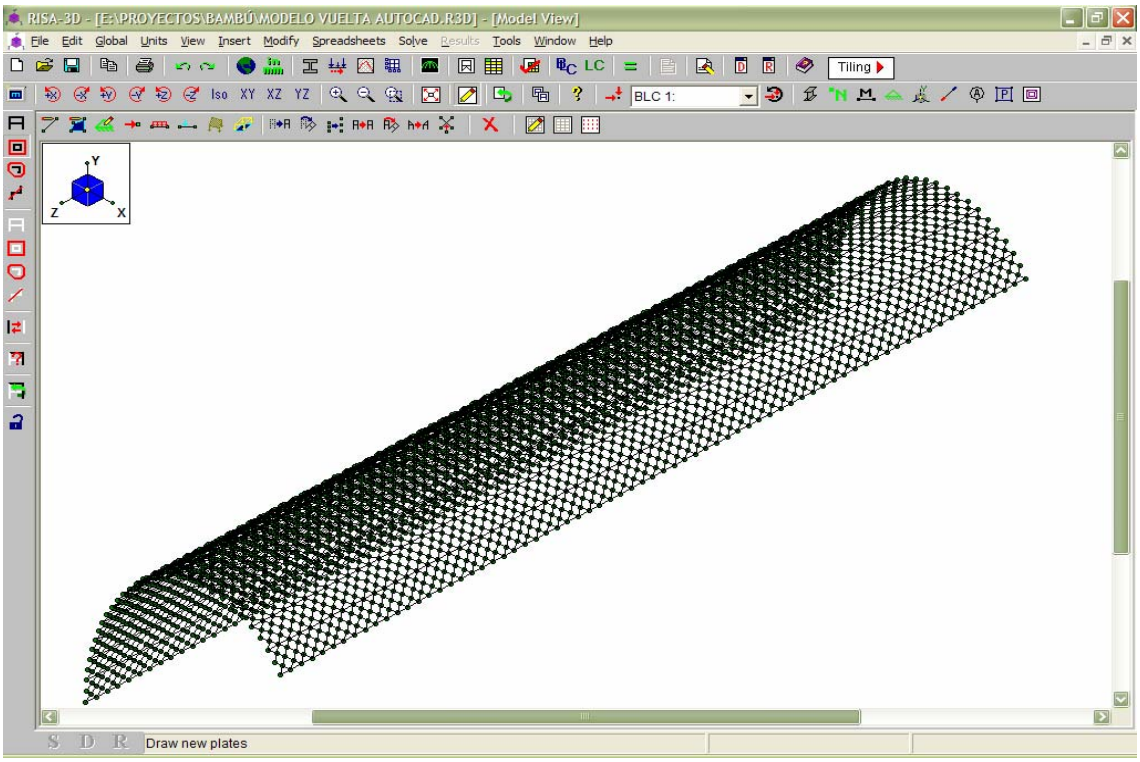


Imagen 1 – Entrada en formato .dxf de la vuelta con el entramado de bambú al programa RISA 3D

Entramos el entramado de bambú al programa RISA 3D en formato .dxf, previo File - Import – Dxf File.

Una vez aceptado procedemos a definir los ejes siendo el Y vertical, X horizontal y Z el dimensional.

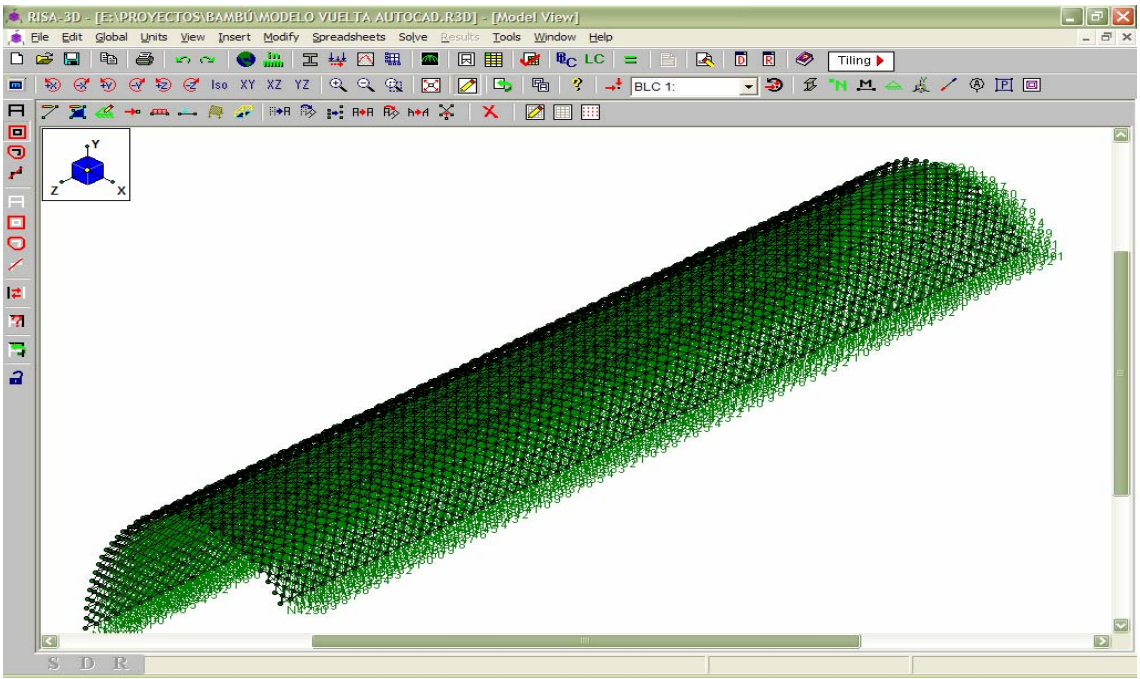


Imagen 2 – Vuelta en el eje ISO con todos los nudos visibles en verde

Una vez definidos todos los ejes, hemos de trabajar con nuestras unidades métricas, y como el programa trabaja por sistema con el sistema imperial nosotros le aplicamos todas las unidades del sistema métrico internacional.

Procedemos al cambio con "Units" – y en la nueva ventana cambiamos nuestras unidades seleccionando "Standard Metric" y validamos con "Ok".

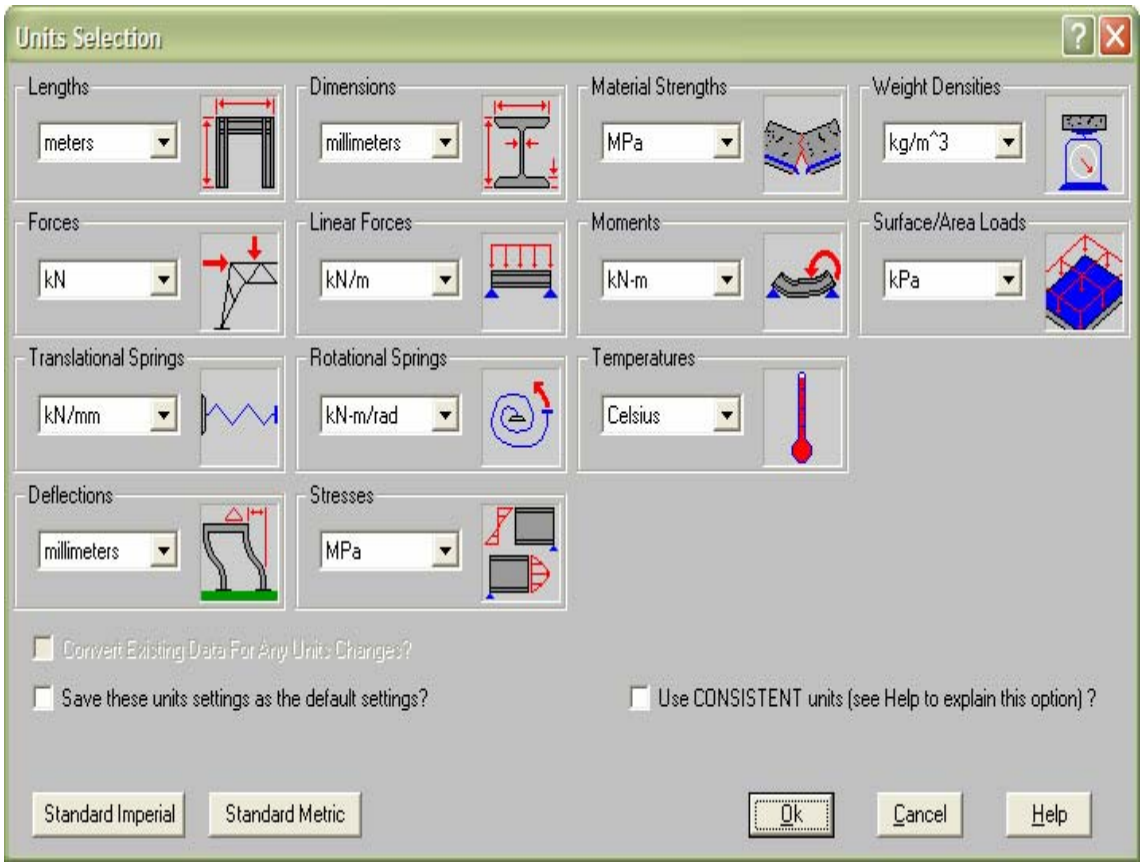


Imagen 3 – Selección de unidades

De este modo trabajaremos con las siguientes unidades:

- Fuerzas en KN
- Flechas en milímetros
- Momentos en mKN
- Densidades en Kg/m3
- Dimensiones en milímetros
- Cargas lineales en KN/m

7.2 Definir el grado de empotramiento de la vuelta

El siguiente paso es limitar el movimiento los muros perimetrales según nuestra consideración de empotrados.

El programa nos propone 4 tipos de movimientos: free, fixed, pinned y Roller.

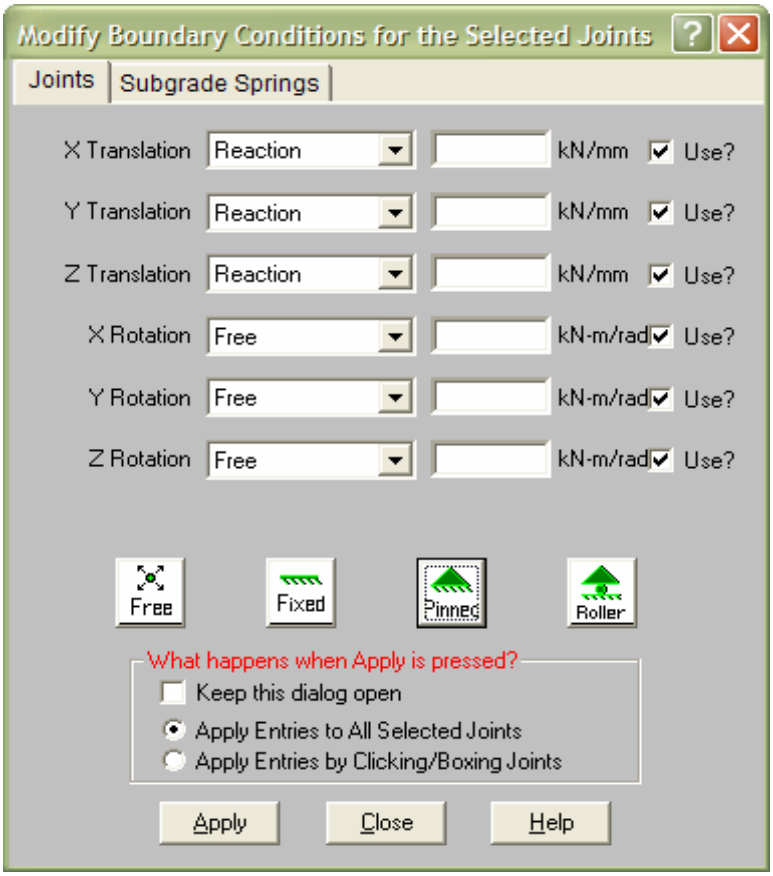


Imagen 4 – Selección del grado de empotramiento de los muros perimetrales

Nuestros muros de carga de bloques de mortero rellenos de hormigón se entregan de forma “pinned” con el entramado de bambú.

De tal forma tendrá traslación en los ejes X, Y y Z y no rotará en ningún eje.

Seleccionamos el icono verde con lápiz amarillo (“modify boundary conditions for the selected joints”). Deseleccionamos todos los nudos y encuadramos solamente el último nudo de cada lado de la vuelta. Automáticamente tendremos los nudos “pinned” tal como trabajarán en la realidad.

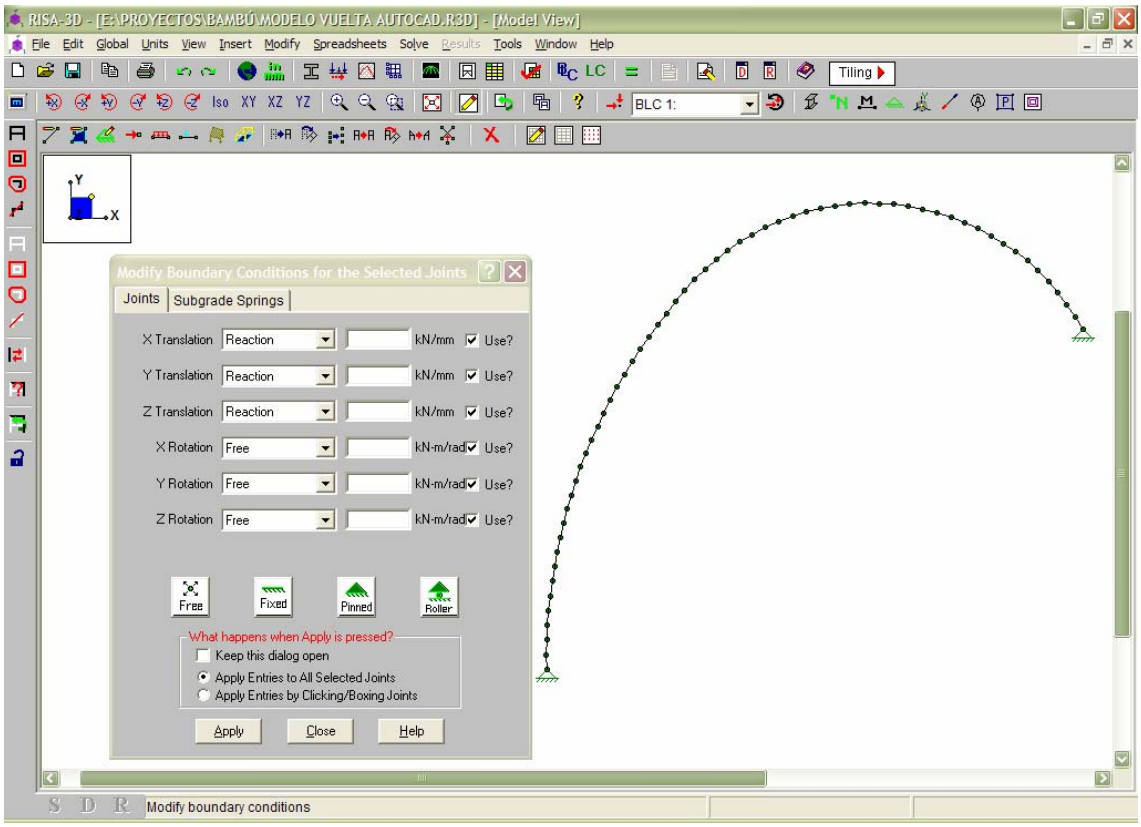


Imagen 5 – Definición de los nudos empotrados de la vuelta de bambú

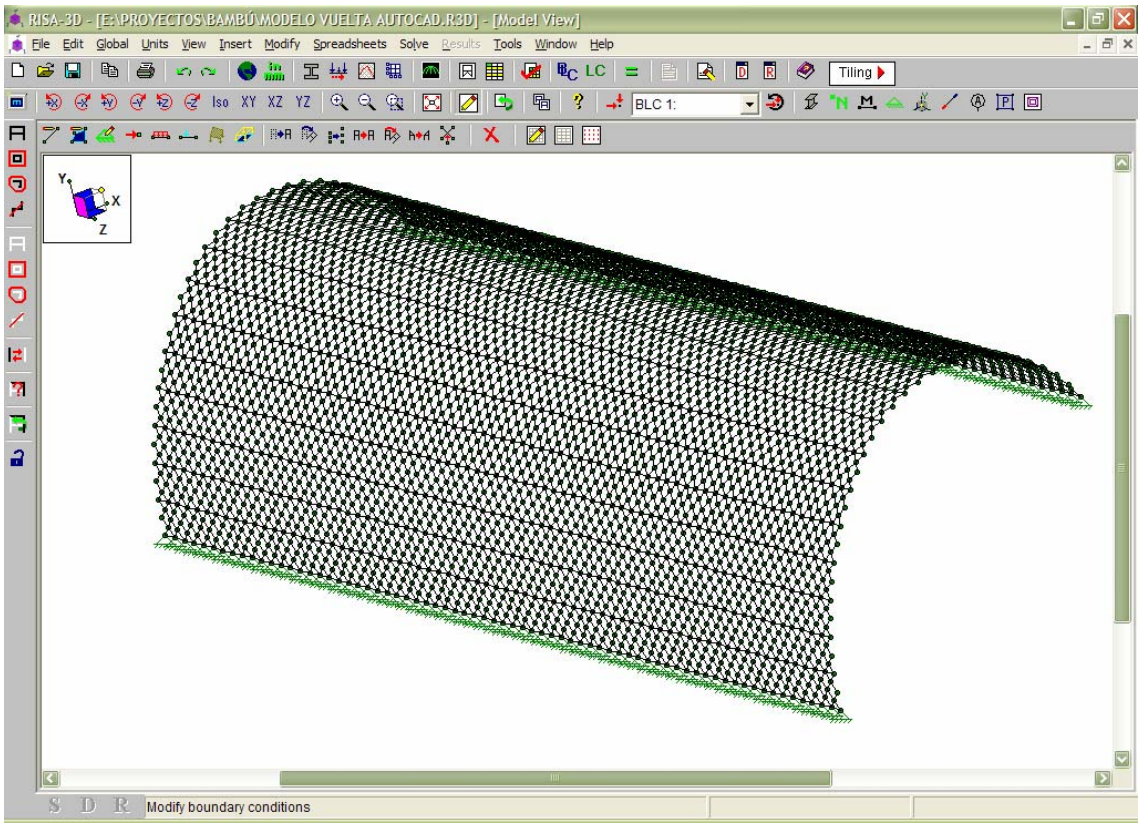


Imagen 6 – Vista final de la formación del empotramiento de los nudos con los muros de carga

7.3 Definir el material

Se trata de introducir en el programa todos los parámetros del bambú para que este reconozca el entramado como tal y de esta forma trabaje finalmente con total realidad.

Nos basamos en las condiciones físico-mecánicas que hemos estudiado con antelación, en especial con la especie bambú guadua que forma la armadura de la vuelta. Datos tomados de la hoja de características técnicas de recepción del material a pie de obra.

AREA BAMBÚ = $(\eta (R2 – r2))= \eta((26,5*26,5)- 17,5 * 17.5.)= 1244.07mm2$

INERCIA BAMBÚ = $\frac{\eta (26,5mm – 17,5mm)}{64} = 0.4417mm4$

MÓDULO ELASTICIDAD (E) = 17900 MPa

DENSIDAD = 790 kg/M3

∅ EXTERIOR = 265mm

∅ INTERIOR = 175mm

En la pestaña “Spreadsheets” entramos en “materials”. Aparece una hoja de cálculo con las propiedades de los materiales creados por el programa. Aparecen “Hot Rolled” (perfil laminado en caliente), “Cold Formed” (Perfiles formados en frío), “Word” (maderas), “Concrete” (Hormigón) y “General” (Imagen 7).

Dentro de “General”, creamos el material Bambú y le introducimos el módulo de elasticidad E (MPa) y la densidad en Kg/m3.
Ahora una vez creado el nuevo material tenemos que definir la sección de las barras de bambú.
Nos movemos a “Modify” y seleccionamos “members”. Dirigiéndonos a “General” (donde hemos creado el material), podemos definir como “Assign a section set” o como “Assign shape directly” (Imagen 8). Dentro de la segunda opción procedemos en “Start shape” y “Pipe” a introducir los valores de los diámetros de las barras de la armadura.

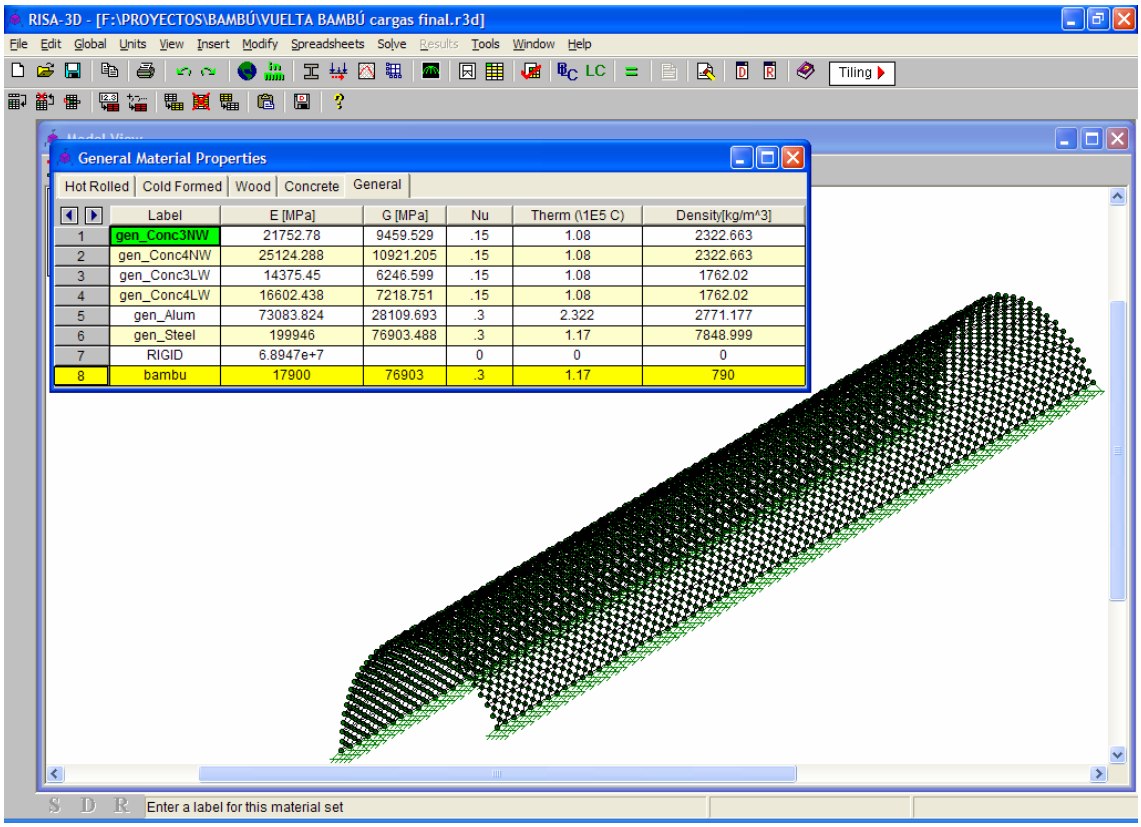


Imagen 7 – Introducción del módulo de elasticidad y la densidad del bambú

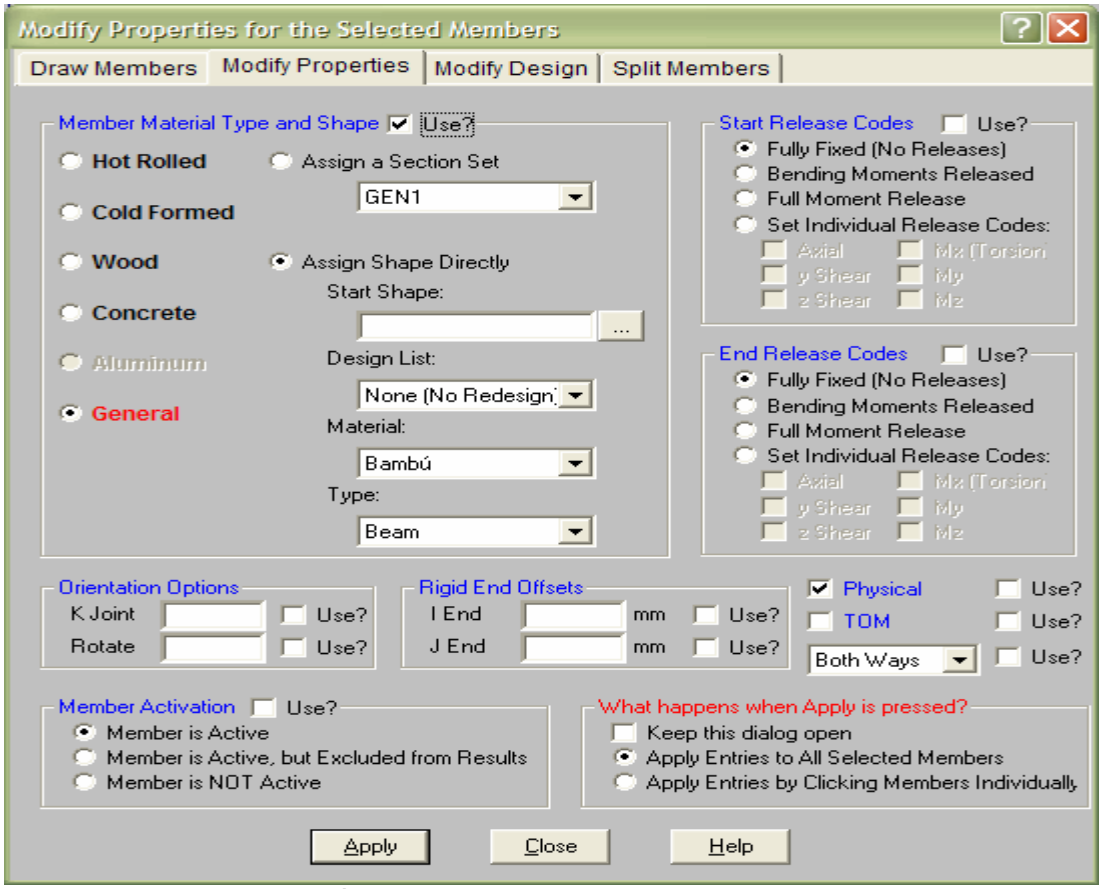


Imagen 8 – Asignar la sección directamente con los valores introducidos del material

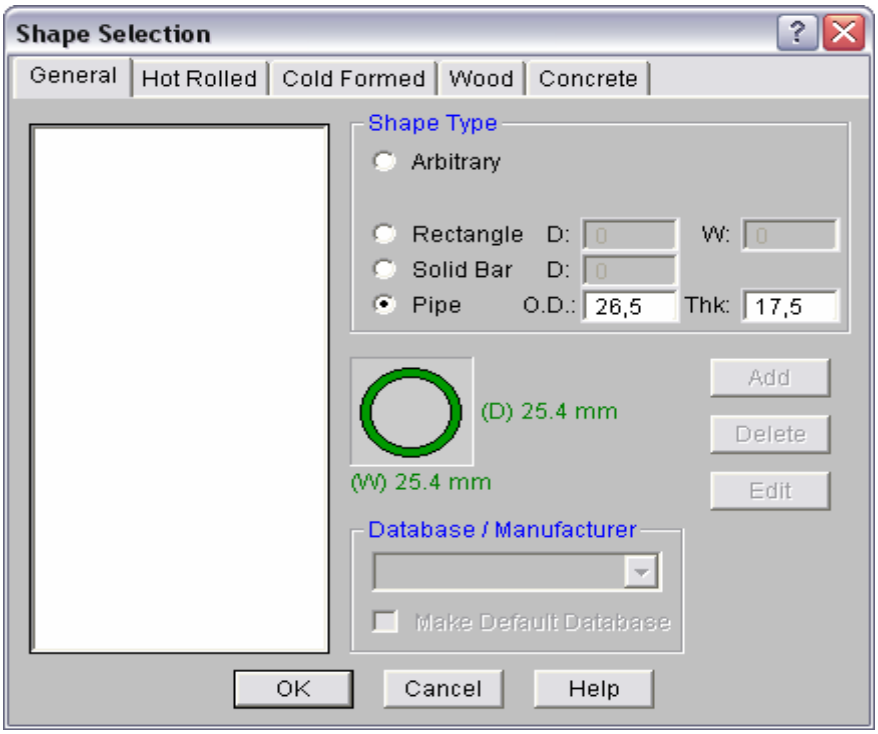


Imagen 9 – Introducción ∅ exterior e interior de las barras de la estructura de la vuelta.

Los valores (Ø mm.) de la imagen 9 y 10 son los reales para el cálculo de la capacidad portante de la vuelta. Una vez el programa interpreta los valores introducidos comprobamos que todas las barras y todos los nudos están formados por bambú con las características que le hemos comunicado.

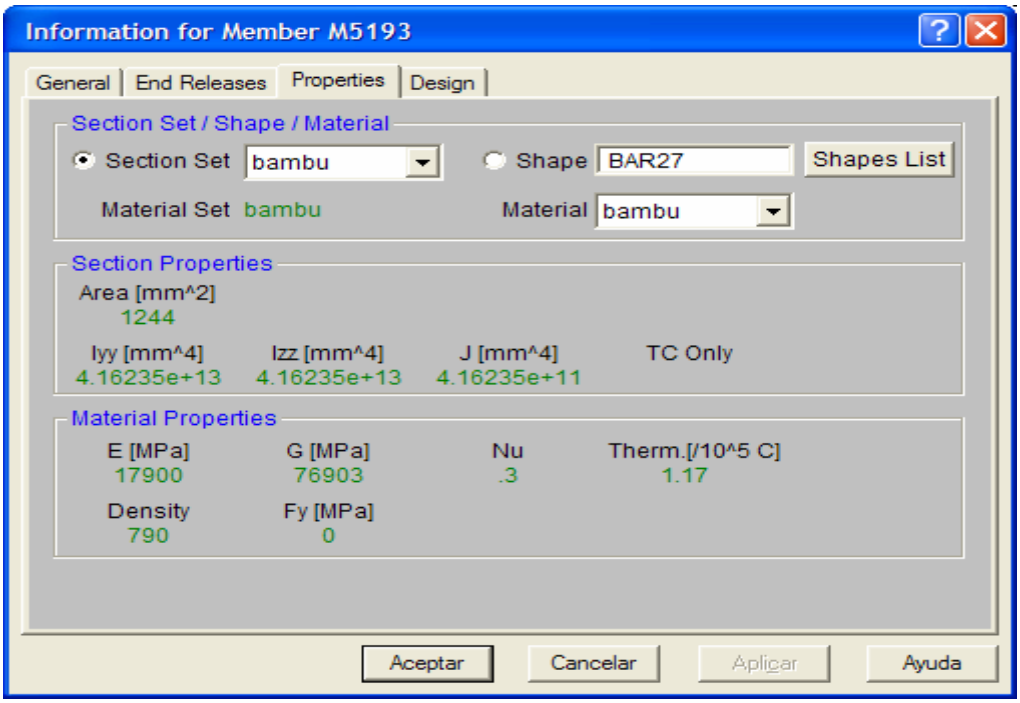


Imagen 10 – Información de propiedades físico-mecánicas de las barras que conforman la armadura

7.4 Introducción de las cargas permanentes y variables

Las cargas permanentes que consideramos son:

- Peso propio del Bambú
- Peso propio de la vuelta con el gunitado y el doblado de malla metálica (15cm)
- Tierra y vegetación encima de la vuelta.
- Relleno de tierras frontal a la vuelta.

Como cargas variables consideramos:

- Nieve
- Viento

Para el peso propio de la vuelta y la tierra con su vegetación hemos analizado cuanto peso soporta cada nudo de la vuelta.

	volumen losa	peso kg/m3	volumen tierra+paja	peso kg/m3	P. TOTAL
d=		1700		800	
0.1	0,0021	3,57	0,0006	0,48	4,05
0.2	0,0021	3,57	0,0006	0,48	4,05
0.3	0,0044	7,48	0,0013	1,04	8,52
0.4	0,0044	7,48	0,0013	1,04	8,52
0.5	0,0046	7,82	0,0014	1,12	8,94
0.6	0,0046	7,82	0,0014	1,12	8,94
0.7	0,0047	7,99	0,0015	1,2	9,19
0.8	0,0047	7,99	0,0015	1,2	9,19
0.9	0,0048	8,16	0,0016	1,28	9,44
0.10	0,0048	8,16	0,0016	1,28	9,44
0.11	0,0049	8,33	0,0016	1,28	9,61
0.12	0,0049	8,33	0,0016	1,28	9,61
0.13	0,005	8,5	0,0016	1,28	9,78
0.14	0,005	8,5	0,0016	1,28	9,78
0.15	0,0052	8,84	0,0017	1,36	10,2
0.16	0,0052	8,84	0,0017	1,36	10,2
0.17	0,0054	9,18	0,0018	1,44	10,62
0.18	0,0054	9,18	0,0018	1,44	10,62
0.19	0,005	8,5	0,0017	1,36	9,86
0.20	0,005	8,5	0,0017	1,36	9,86
0.21	0,005	8,5	0,0016	1,28	9,78
0.22	0,005	8,5	0,0016	1,28	9,78
0.23	0,0049	8,33	0,0016	1,28	9,61
0.24	0,0049	8,33	0,0016	1,28	9,61
0.25	0,0049	8,33	0,0016	1,28	9,61

0.26	0,0049	8,33	0,0016	1,28	9,61
0.27	0,0048	8,16	0,0016	1,28	9,44
0.28	0,0048	8,16	0,0016	1,28	9,44
0.29	0,0048	8,16	0,0015	1,2	9,36
0.30	0,0048	8,16	0,0015	1,2	9,36
0.31	0,0047	7,99	0,0015	1,2	9,19
0.32	0,0047	7,99	0,0015	1,2	9,19
0.33	0,0047	7,99	0,0015	1,2	9,19
0.34	0,0047	7,99	0,0015	1,2	9,19
0.35	0,0047	7,99	0,0015	1,2	9,19
0.36	0,0047	7,99	0,0015	1,2	9,19
0.37	0,0046	7,82	0,0014	1,12	8,94
0.38	0,0046	7,82	0,0014	1,12	8,94
0.39	0,0046	7,82	0,0014	1,12	8,94
0.40	0,0046	7,82	0,0014	1,12	8,94
0.41	0,0045	7,65	0,0013	1,04	8,69
0.42	0,0045	7,65	0,0013	1,04	8,69
0.43	0,0044	7,48	0,0013	1,04	8,52
0.44	0,0044	7,48	0,0013	1,04	8,52
0.45	0,0042	7,14	0,0012	0,96	8,1
0.46	0,0042	7,14	0,0012	0,96	8,1
0.47	0,004	6,8	0,0011	0,88	7,68
0.48	0,004	6,8	0,0011	0,88	7,68
0.49	0,0038	6,46	0,001	0,8	7,26
0.50	0,0038	6,46	0,001	0,8	7,26
0.51	0,0035	5,95	0,0009	0,72	6,67
0.52	0,0035	5,95	0,0009	0,72	6,67
0.53	0,0031	5,27	0,0007	0,56	5,83
0.54	0,0031	5,27	0,0007	0,56	5,83
0.55	0,0025	4,25	0,0006	0,48	4,73
0.56	0,0025	4,25	0,0006	0,48	4,73
0.57	0,0018	3,06	0,0004	0,32	3,38
0.58	0,0018	3,06	0,0004	0,32	3,38
0.59	0,0018	3,06	0,0004	0,32	3,38
0.60	0,0017	2,89	0,0004	0,32	3,21
0.61	0,0017	2,89	0,0004	0,32	3,21

Los 61 nudos están de derecha (punto más alto del muro) a izquierda y hemos introducido una a una las cargas propias de la vuelta gunitada como las cargas de las tierras y la vegetación superiores. Al seleccionar cada nudo con el encuadre estamos aplicando los KN. a todos los nudos del eje en la vista XY.

Las cargas serán puntuales en cada nudo de esta forma repartirán esfuerzos con sus contiguas como en la realidad. Pasamos los valores de Kg/m3 a KN. por nudo.

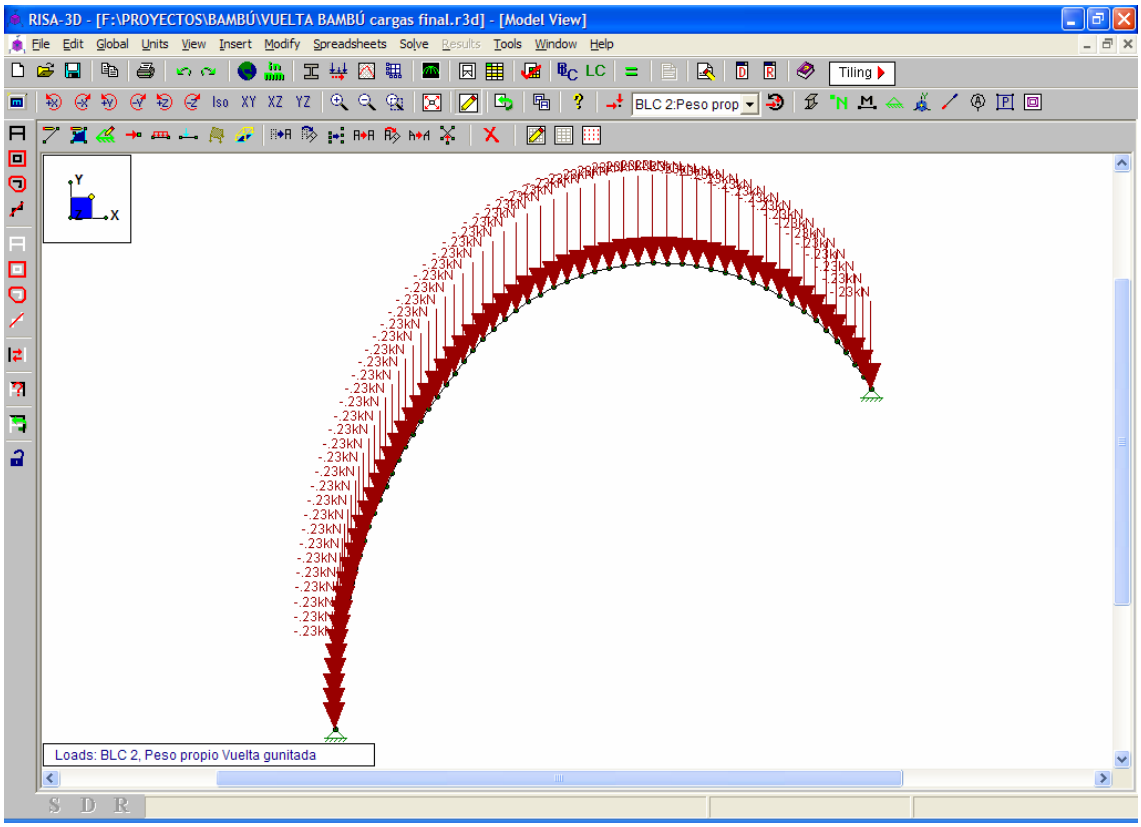


Imagen 11 - Cargas del peso propio de la vuelta gunitada

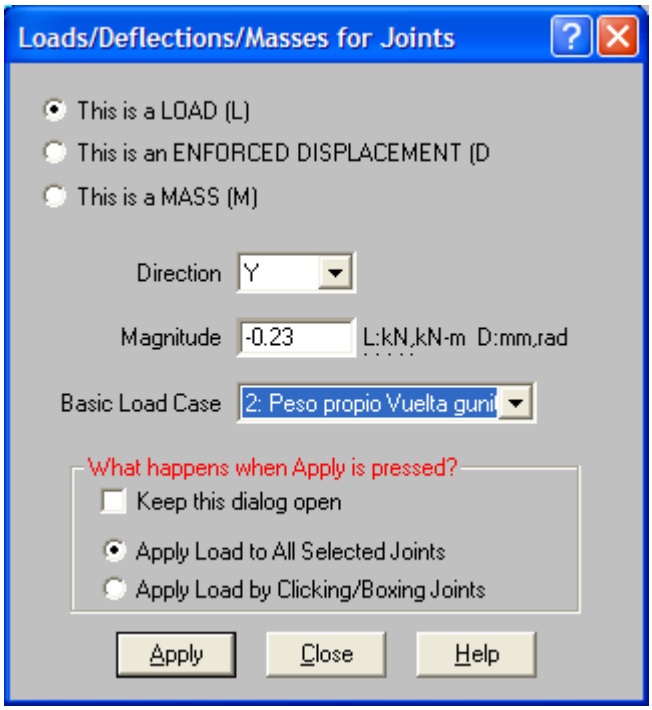


Imagen 12– Introducción de cargas puntuales en cada nudo para el peso de la vuelta gunitada

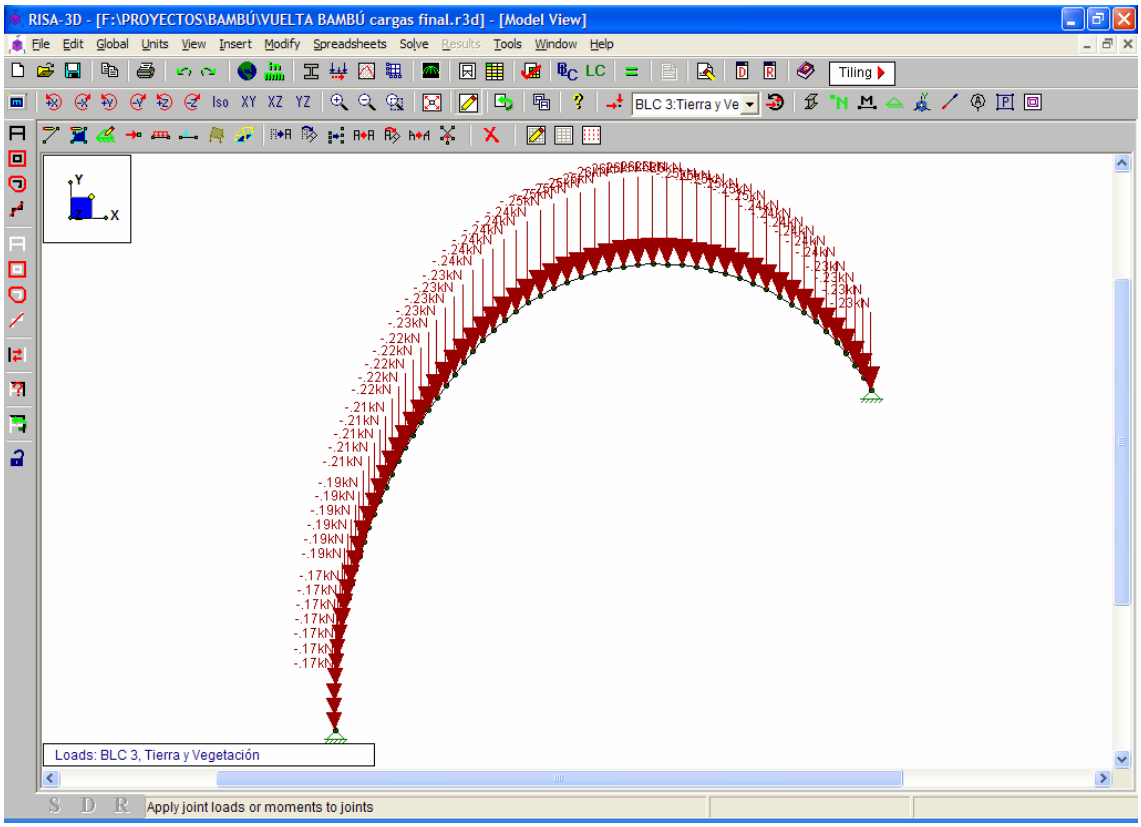


Imagen 13 – Cargas del peso de las tierras y vegetación encima de la vuelta.

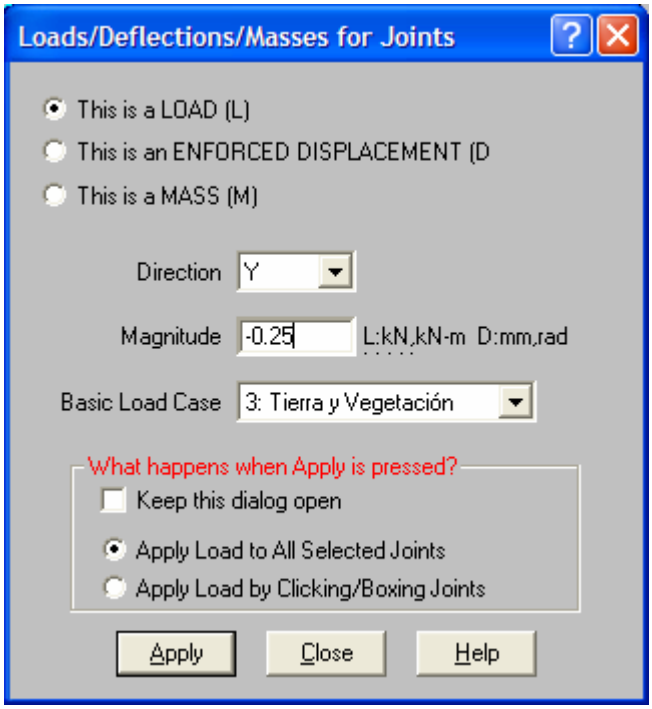


Imagen 14– Introducción de cargas puntuales en cada nudo para el peso de las tierras superiores

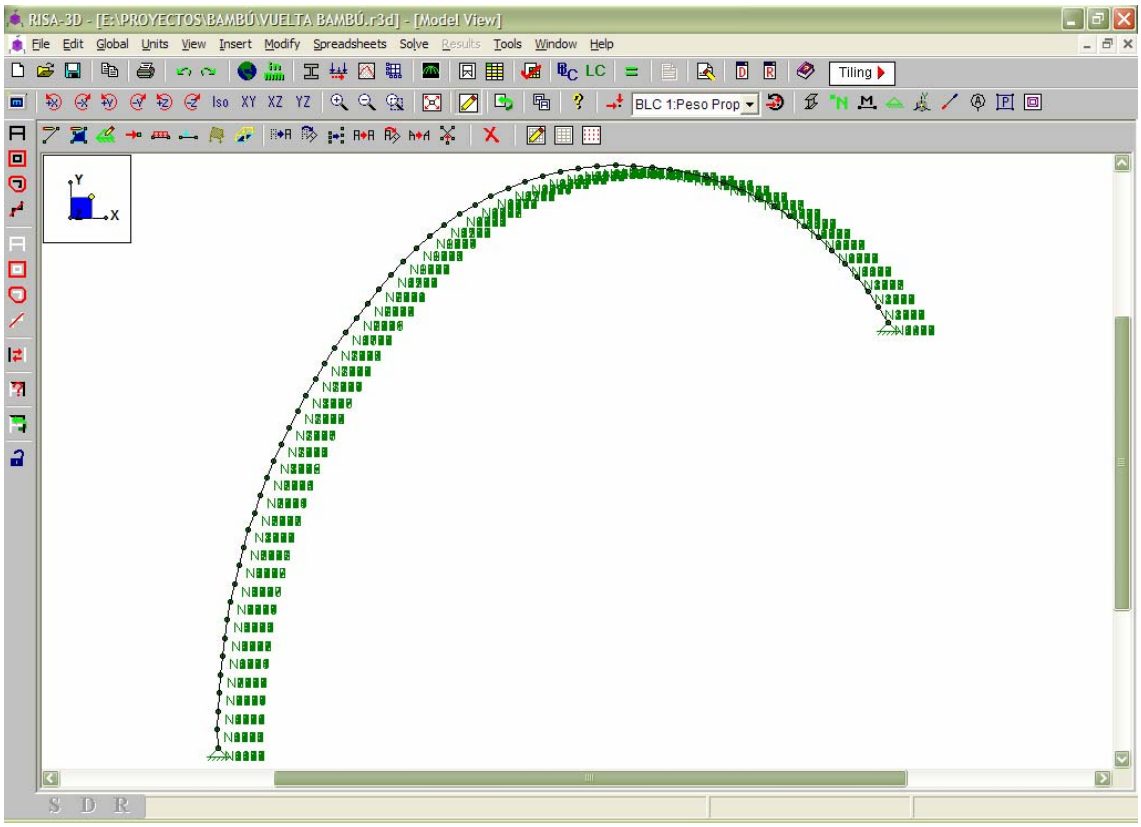
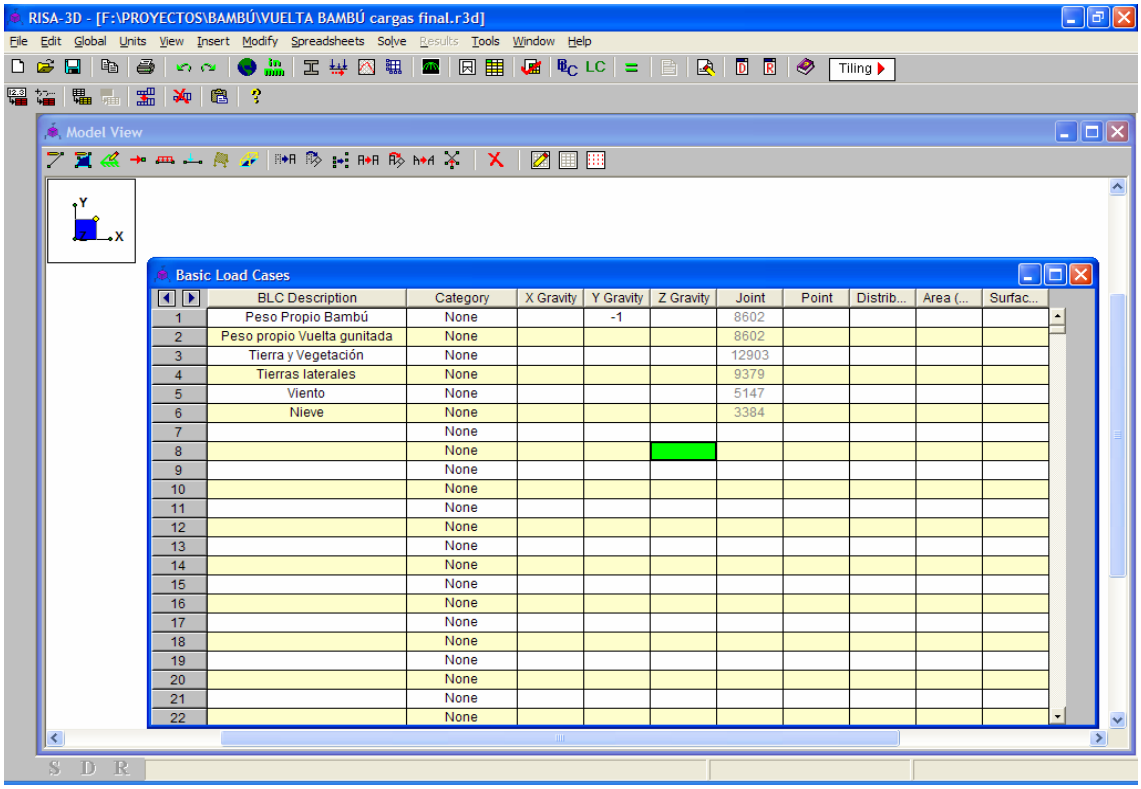


Imagen 15 – Vista lateral de los nudos para aplicarle las cargas permanentes y variables



	BLC Description	Category	X Gravity	Y Gravity	Z Gravity	Joint	Point	Distrib...	Area (...	Surfac...
1	Peso Propio Bambú	None		-1		8602				
2	Peso propio Vuelta gunitada	None				8602				
3	Tierra y Vegetación	None				12903				
4	Tierras laterales	None				9379				
5	Viento	None				5147				
6	Nieve	None				3384				
7		None								
8		None								
9		None								
10		None								
11		None								
12		None								
13		None								
14		None								
15		None								
16		None								
17		None								
18		None								
19		None								
20		None								
21		None								
22		None								

Imagen 16 – Introducción de las cargas en Basic Load Case

Introducimos las cargas permanentes y variables en BLC (Imagen 16), posteriormente las diferenciaremos al hacer las distintas hipótesis de cálculo.

Para la introducción de las tierras laterales tenemos 1 metro de tierras que producen un empuje activo a la vuelta y al muro.

Considerando: - Densidad de las tierras de empuje de 1800 Kg/cm3

- Ángulo de fregamiento interno del terreno ∅ 30º

El coeficiente de empuje de estas tierras es $Ea = \frac{1-\sin 30º}{1+\sin 30º} = 0.33333$

Por tanto su Empuje activo es:

$Ea = \frac{1800kg/cm3 \times 1m. \text{ (altura tierras a muro)} \times 1m \times 0.33333}{2} = 300kg$

Estos 300kg de tierras contra la vuelta y el muro se convierten en 0,06 KN por cada nudo de la vuelta. Introducimos los valores en el programa como carga puntual en los nudos seleccionados (Imagen 13).

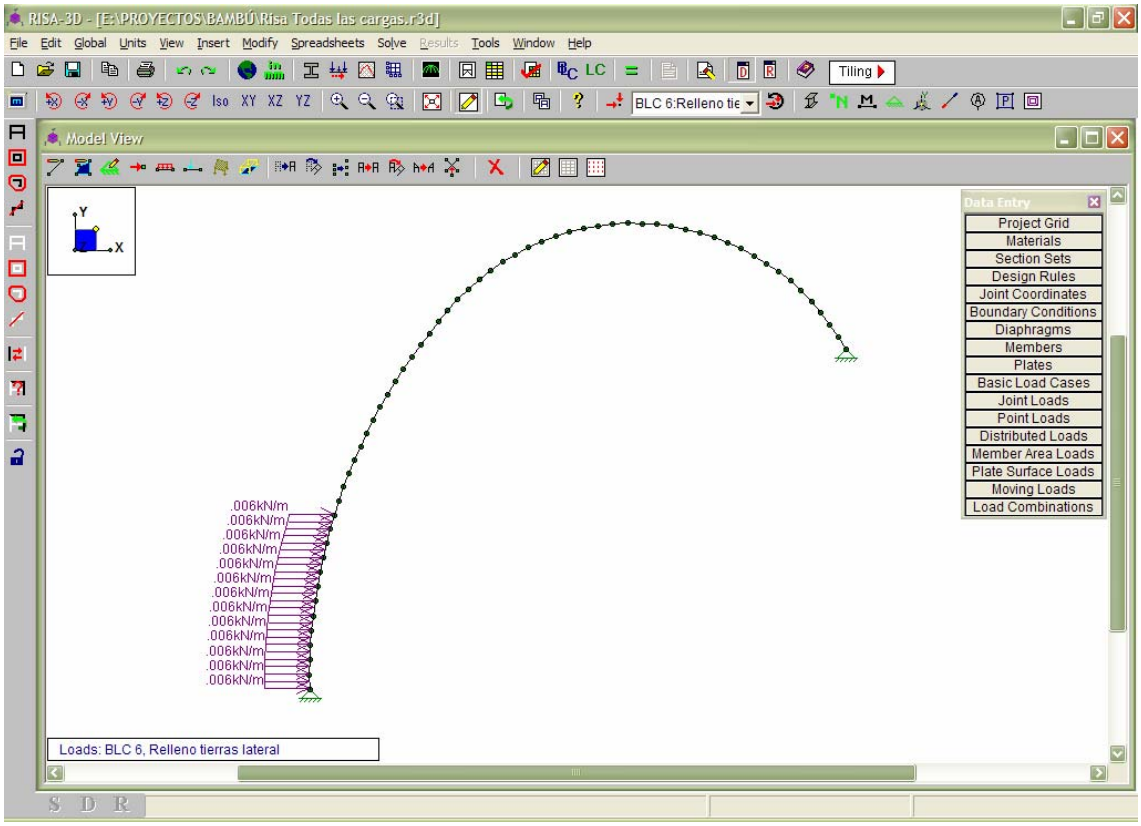


Imagen 17 – Cargas de tierra laterales a la vuelta.

Ahora introducimos la carga variable del viento. Para tal, nos hemos basado en los principios básicos del C.T.E.

Acción del viento

1 - La acción de viento, en general es una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto, o presión estática, que puede expresarse como:

qe = qb · ce · cp

Siendo:

qb la presión dinámica del viento. De forma simplificada, como valor en cualquier punto del territorio español, puede adoptarse 0,5 kN/m2.

ce el coeficiente de exposición, variable con la altura del punto considerado, en función del grado de aspereza del entorno donde se encuentra ubicada la construcción. Se determina de acuerdo con lo establecido en el mapa característico, en nuestro caso será de 1.6.

cp el coeficiente eólico o de presión, dependiente de la forma y orientación de la superficie respecto al viento, y en su caso, de la situación del punto respecto a los bordes de esa superficie; un valor negativo indica succión.

Nuestro estudio situado en Maçanet de la Selva (Girona) por lo tanto en el grado C.

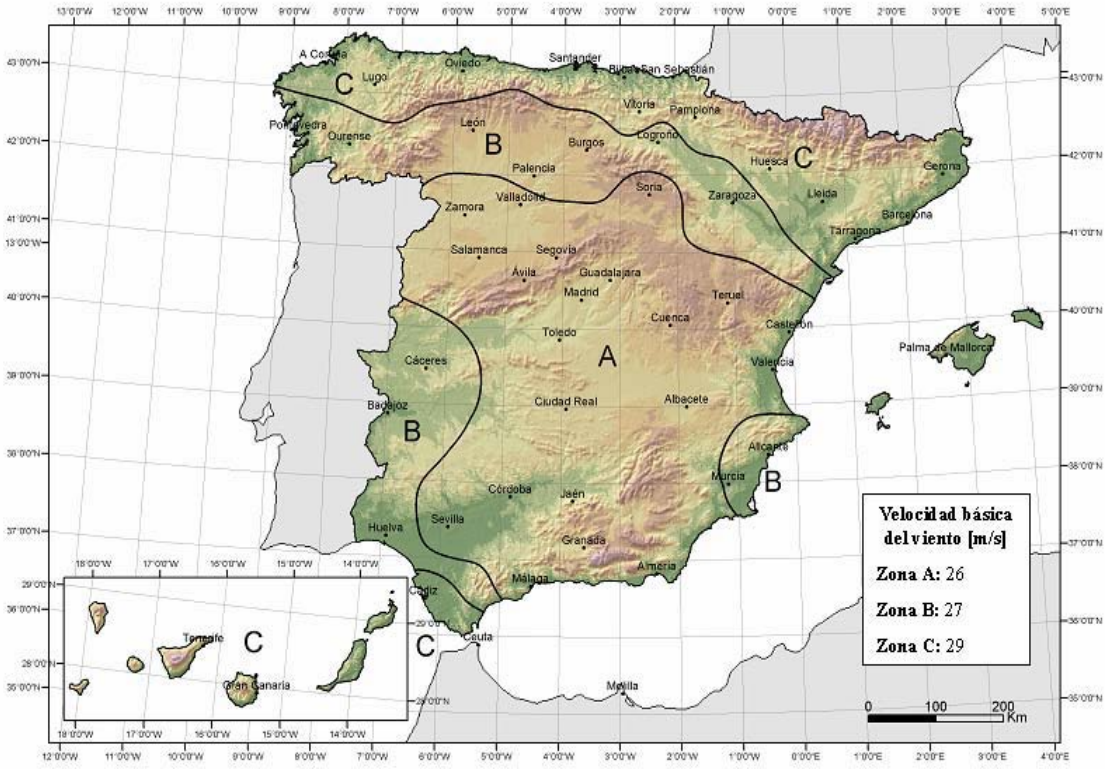


Imagen 18 – Mapa estatal de velocidad básica del viento (m/s) C.T.E

Presión dinámica

1 El valor básico de la presión dinámica del viento puede obtenerse con la expresión:

$qb = 0,5 \cdot \delta \cdot vb$

Siendo δ la densidad del aire y vb el valor básico de la velocidad del viento.

2.El valor básico de la velocidad del viento corresponde al valor característico de la velocidad media del viento a lo largo de un período de 10 minutos, tomada en una zona plana y desprotegida frente al viento a una altura de 10 m sobre el suelo. El valor característico de la velocidad del viento mencionada queda definido como aquel valor cuya probabilidad anual de ser sobrepasado es de 0,02 (periodo de retorno de 50 años).

3 La densidad del aire depende, entre otros factores, de la altitud, de la temperatura ambiental y de la fracción de agua en suspensión. En general puede adoptarse el valor de 1,25 kg/m3. En emplazamientos muy cercanos al mar, en donde sea muy probable la acción de rocío, la densidad puede ser mayor.

4 El valor básico de la velocidad del viento en cada localidad puede obtenerse del mapa de la figura 14. El de la presión dinámica es, respectivamente de 0,42 kN/m2, 0,45 kN/m2 y **0,52 kN/m2** para las zonas A, B y C del mapa (Imagen18).

Para nuestro caso será de 0.52 kN/m2

Por tanto repartimos la presión de 0.52KN/m2 en KN. puntuales (0.13KN/nudo)en los nudos expuestos al viento. Lateralmente no soplará el viento ya que está tapado con tierras. Sólo soplará de cara por la entrada a la vuelta y por el efecto de la succión interior también prevemos un empuje . (Imagen 19).

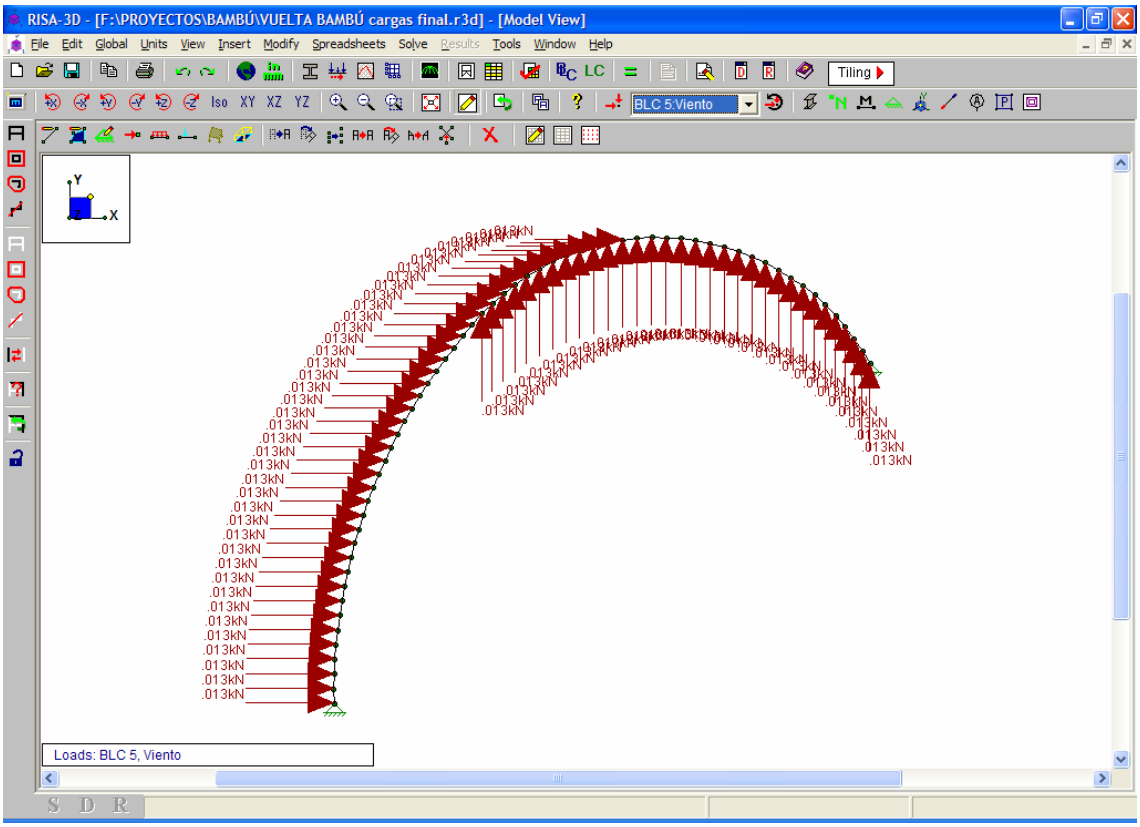


Imagen 19 – Cargas variables de viento.

Para la carga variable de nieve también nos hemos basado en los apartados específicos del "Código Técnico de la Edificación".

Determinación de la carga de nieve

1 En cubiertas planas de edificios de pisos situados en localidades de altitud inferior a 1.000 m, es **suficiente considerar una carga de nieve de 1,0 kN/m2**. En otros casos o en estructuras ligeras, sensibles a carga vertical, los valores pueden obtenerse como se indica a continuación.

2 Como valor de carga de nieve por unidad de superficie en proyección horizontal, qn, puede tomarse:

q n = μ · sk

Siendo:

μ = coeficiente de forma de la cubierta

sk el valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal

3 Cuando la construcción esté protegida de la acción de viento, el valor de carga de nieve podrá reducirse en un 20%. Si se encuentra en un emplazamiento fuertemente

expuesto, el valor deberá aumentarse en un 20%.

4 Para el cálculo de los elementos volados de la cubierta de edificios situados en altitudes superiores a 1.000 m. debe considerarse, además de la carga superficial de nieve, una carga lineal pn, en el borde del elemento, debida a la formación de hielo, que viene dada por la expresión (donde k = 3 metros):
p n = k ·μ2 · s k

5 La carga que actúa sobre elementos que impidan el deslizamiento de la nieve, se puede deducir a partir de la masa de nieve que puede deslizar. A estos efectos se debe suponer que el coeficiente de rozamiento entre la nieve y la cubierta es nulo

Para Girona y por tanto Maçanet de la Selva, según la tabla 3.7 CTE, en sobrecargas de nieve tenemos una altura de 100m. y un coeficiente **Sk = 0.4kN/m2**.
El peso específico de la nieve acumulada es muy variable, pudiendo adoptarse 1,2 kN/m3 para la recién caída, 2,0 kN/m3 para la prensada o empapada, y 4,0 kN/m3 para la mezclada con granizo.

Hemos de adaptar el valor 0.4KN/m2 a KN puntuales sobre cada nudo expuesto a la carga de nieve. Por tanto 0,2Kn/nudo en la parte más alta de la vuelta y valores correlativos inferiores conforme aumenta la pendiente hasta llegar a los 60º.

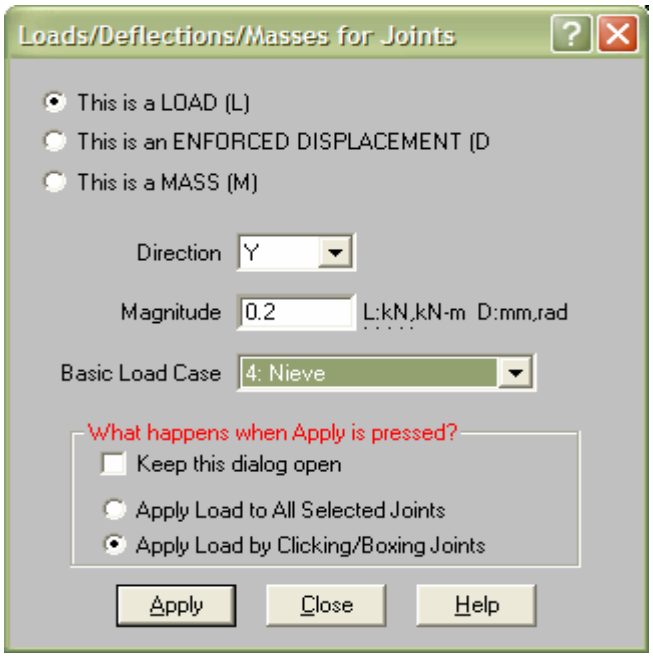


Imagen 20 – Introducción carga de nieve en el programa informático

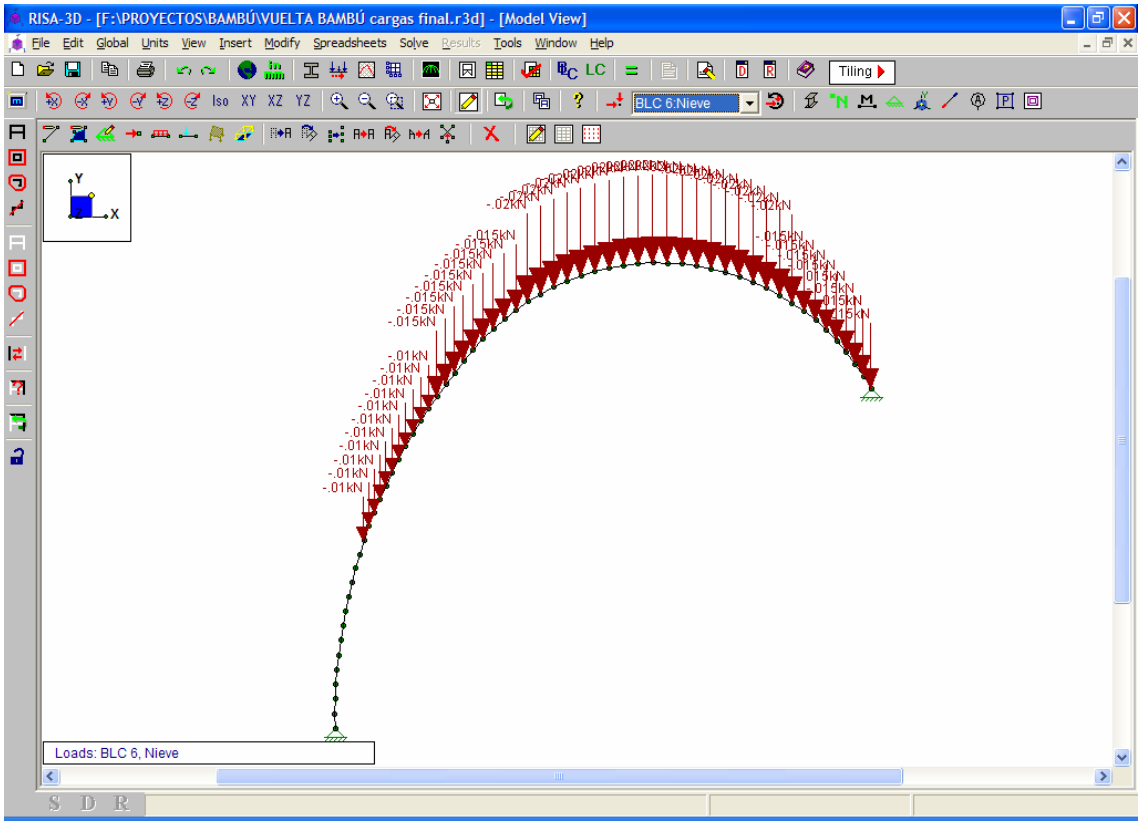


Imagen 21 – Cargas de nieve aplicadas a la vuelta.

7.5 Formación de hipótesis de cálculo.

Una vez introducidas todas las cargas permanentes y variables existentes podemos empezar a trabajar formulando las hipótesis de cálculo en las cuales buscaremos como trabaja nuestro caso práctico según este método numérico.

Sabemos que en esta vuelta que estamos construyendo, el armado de bambú trabaja a flexión y la capa de gunitado que da cuerpo a la losa trabaja a compresión ya que su bulbo de presiones así lo indica en el método gráfico. Esto lo analizaremos en el siguiente apartado. Los muros de carga se empotran en la vuelta por su perímetro.

Hemos previsto 3 formas de hipótesis en el programa de cálculo:

1. Peso propio de la vuelta

   Será lo que simplemente soportará la losa
2. Peso propio de la vuelta y tierras superiores
3. Todas las cargas permanentes y variables previstas.

Las cargas variables las introducimos en el programa de cálculo, pero de por si cobran más importancia por kilogramos el propio cuerpo de la vuelta y las tierras con la vegetación superiores.

Hipótesis 1 – Peso propio de la losa.

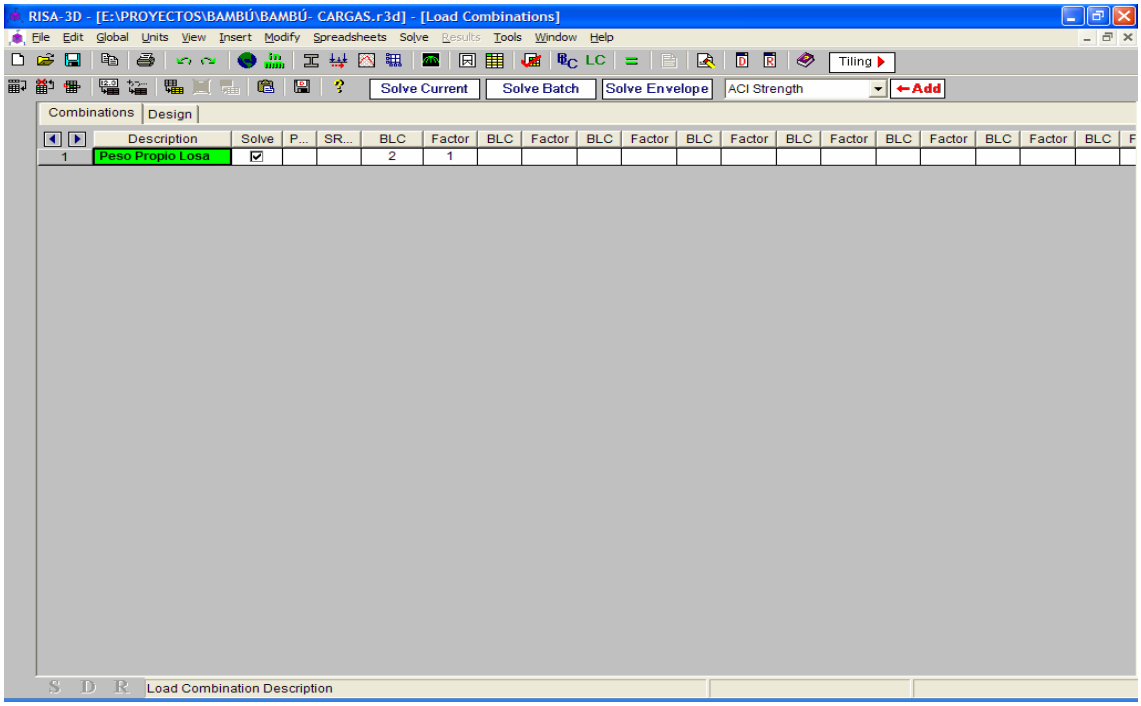


Imagen 22 – Introducción en LC (Load Case) de la hipótesis de cálculo 1.

La hipótesis la creamos en el icono “LC” (Load Case). Describimos que queremos calcular, seleccionamos “solve” para que nos reconozca que queremos calcular, y en “BLC” introducimos la carga o cargas que queremos en cada caso.

En “Factor” lo dejamos en 1. Sería para mayorar las cargas pero en nuestro caso no nos interesa. Estamos hablando de bambú con gunitado de tierras, cemento y paja, de modo que el sistema de mayorado es diferente al de las estructuras de hormigón armado.

En las estructuras de hormigón armado para armar se multiplican las cargas permanentes por el factor de seguridad 1.5 y las cargas variables por el factor de seguridad 1.6.

Nosotros buscamos localizar los puntos conflictivos a flexión en la superficie de la vuelta. El armado ya está colocado y no variará.

Afirmamos, lógicamente, que si hubiéramos puesto un bambú guadua de entramado de diámetro superior, las cargas soportadas también serían mayores.

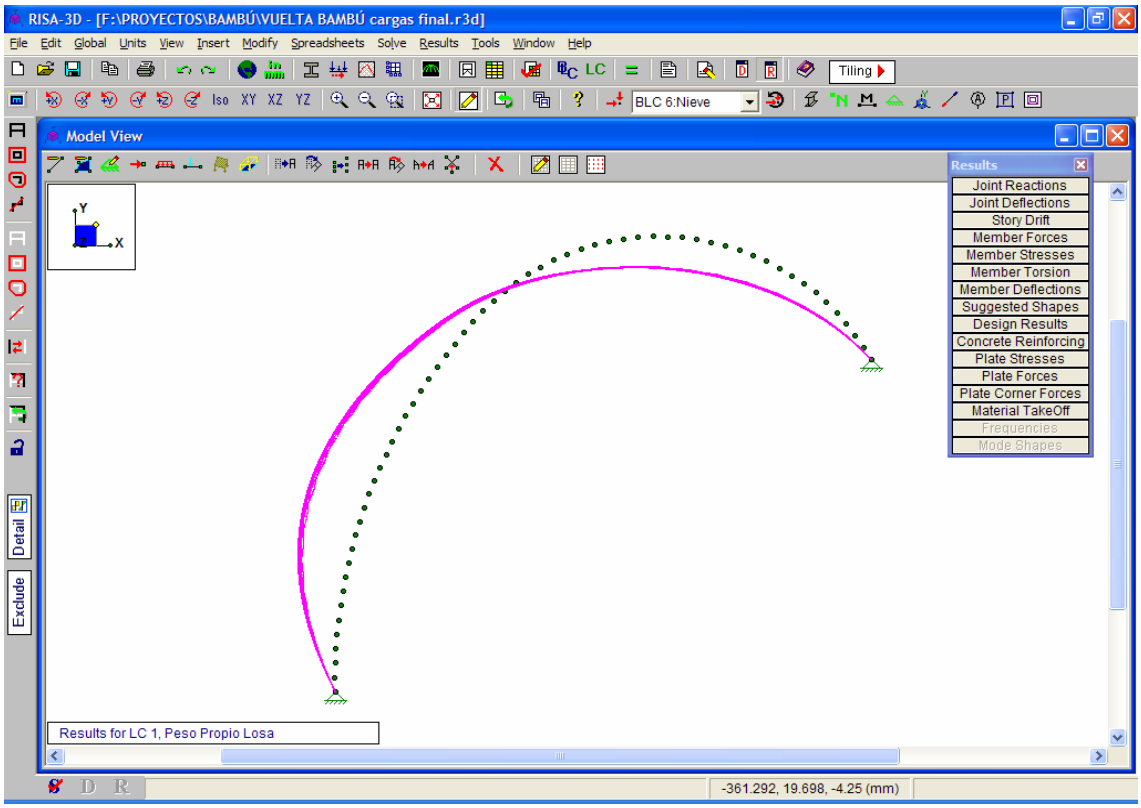
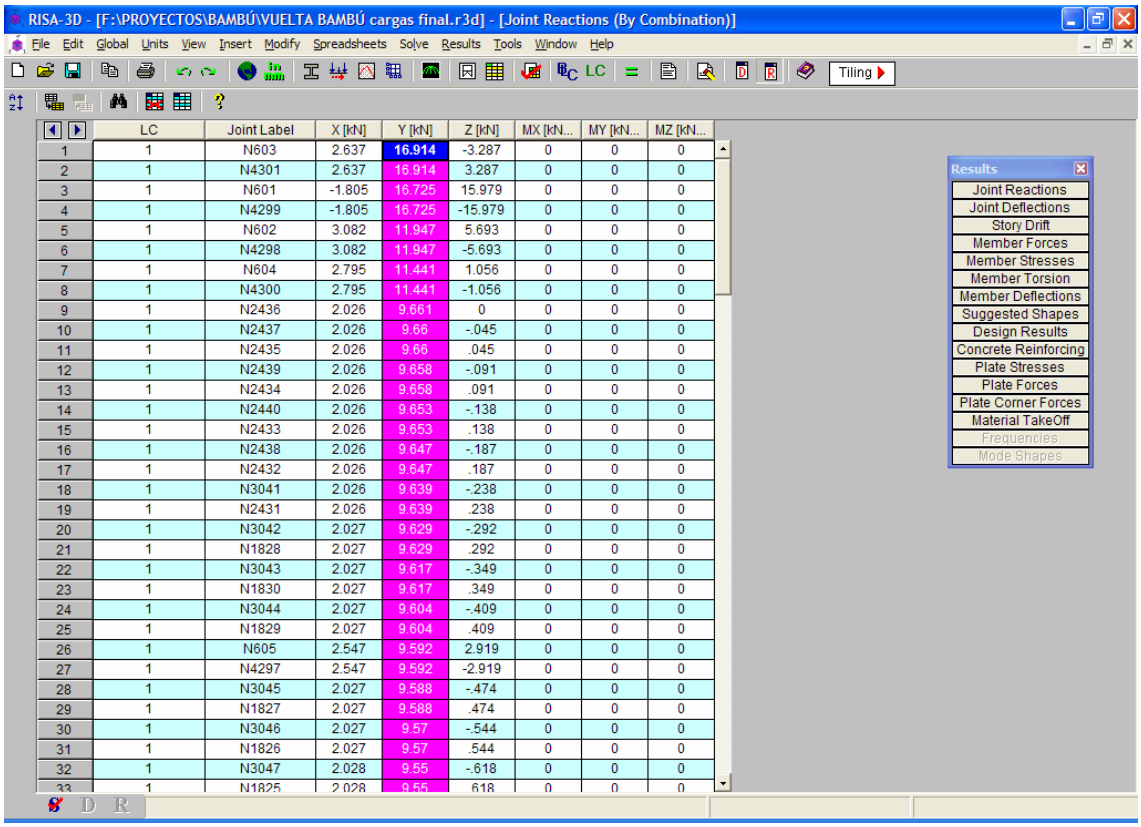


Imagen 23 – "Deflection diagram" del peso propio de la vuelta.



	LC	Joint Label	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	MX [kN...	MY [kN...	MZ [kN...
1	1	N603	2.637	16.914	-3.287	0	0	0
2	1	N4301	2.637	16.914	3.287	0	0	0
3	1	N601	-1.805	16.725	15.979	0	0	0
4	1	N4299	-1.805	16.725	-15.979	0	0	0
5	1	N602	3.082	11.947	5.693	0	0	0
6	1	N4298	3.082	11.947	-5.693	0	0	0
7	1	N604	2.795	11.441	1.056	0	0	0
8	1	N4300	2.795	11.441	-1.056	0	0	0
9	1	N2436	2.026	9.661	0	0	0	0
10	1	N2437	2.026	9.66	-.045	0	0	0
11	1	N2435	2.026	9.66	.045	0	0	0
12	1	N2439	2.026	9.658	-.091	0	0	0
13	1	N2434	2.026	9.658	.091	0	0	0
14	1	N2440	2.026	9.653	-.138	0	0	0
15	1	N2433	2.026	9.653	.138	0	0	0
16	1	N2438	2.026	9.647	-.187	0	0	0
17	1	N2432	2.026	9.647	.187	0	0	0
18	1	N3041	2.026	9.639	-.238	0	0	0
19	1	N2431	2.026	9.639	.238	0	0	0
20	1	N3042	2.027	9.629	-.292	0	0	0
21	1	N1828	2.027	9.629	.292	0	0	0
22	1	N3043	2.027	9.617	-.349	0	0	0
23	1	N1830	2.027	9.617	.349	0	0	0
24	1	N3044	2.027	9.604	-.409	0	0	0
25	1	N1829	2.027	9.604	.409	0	0	0
26	1	N605	2.547	9.592	2.919	0	0	0
27	1	N4297	2.547	9.592	-2.919	0	0	0
28	1	N3045	2.027	9.588	-.474	0	0	0
29	1	N1827	2.027	9.588	.474	0	0	0
30	1	N3046	2.027	9.57	-.544	0	0	0
31	1	N1826	2.027	9.57	.544	0	0	0
32	1	N3047	2.028	9.55	-.618	0	0	0
33	1	N1825	2.028	9.55	.618	0	0	0

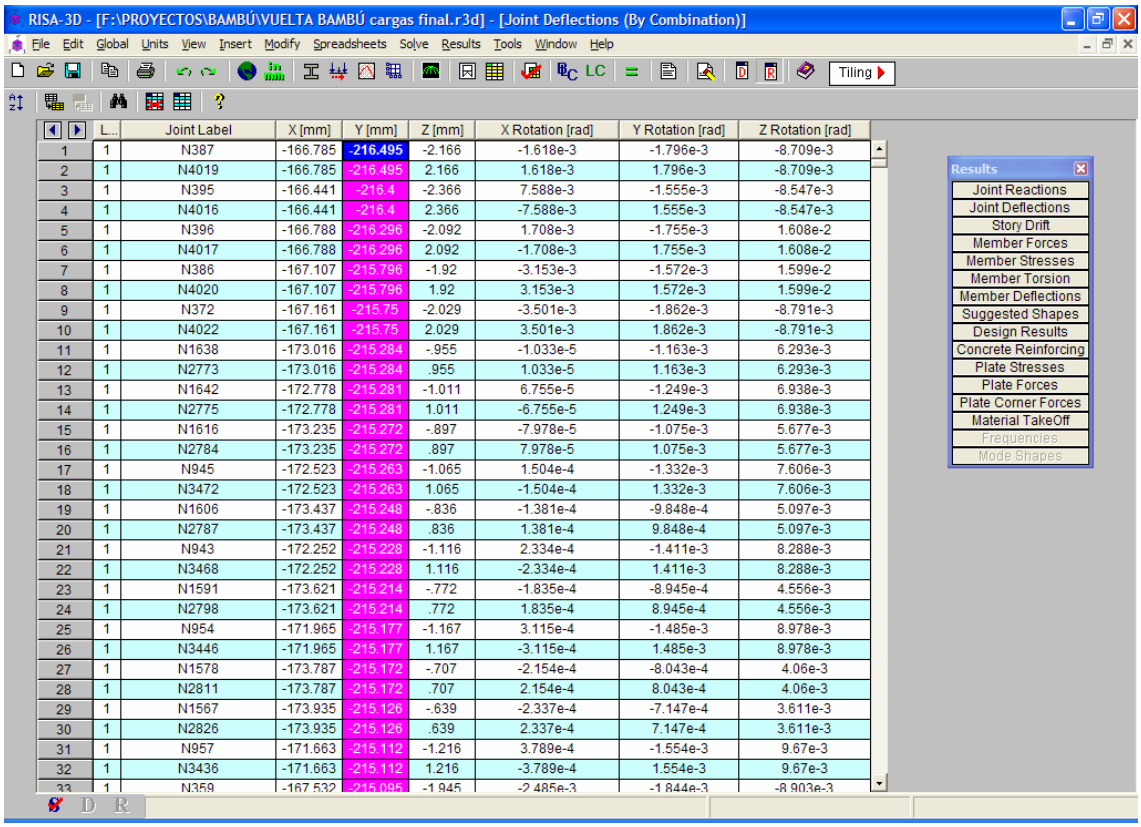
Imagen 24 – Reacciones en las uniones en los 3 ejes después de aplicar la carga de la losa. Eje Y remarcado

Analizando los resultados obtenidos después de poner en carga la vuelta de bambú, vemos que el punto o las uniones que reciben más solicitaciones externas están justo en el centro de la vuelta. Buscamos la reacción máxima en el eje Y en este punto: es de 16.91 KN. en el punto más desfavorable. El resto de reacciones son inferiores a la del nudo N603, que es el más desfavorable de todos.

Como vemos en la imagen, las flechas máximas (“Joint Deflections”) se encuentran en los riñones de le vuelta, el punto de máximo esfuerzo del entramado.

La deformación máxima del eje Y está situada en los nudos N387 y N 4019. Estos nudos están situados en los riñones de la vuelta como podemos observar en la imagen 26. Sabemos entonces los puntos conflictivos de la vuelta, de tal forma que al introducir los valores permanentes de tierras superiores y las cargas variables, será obvio que aún se deformará más, especialmente en el eje Y (donde se concentran las mayores cargas).

Con la primera hipótesis nuestro sistema no es estable. Recibe más carga de lo que es capaz de soportar.



	L...	Joint Label	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X Rotation [rad]	Y Rotation [rad]	Z Rotation [rad]
1	1	N387	-166.785	-216.495	-2.166	-1.618e-3	-1.796e-3	-8.709e-3
2	1	N4019	-166.785	-216.495	2.166	1.618e-3	1.796e-3	-8.709e-3
3	1	N395	-166.441	-216.4	-2.366	7.588e-3	-1.555e-3	-8.547e-3
4	1	N4016	-166.441	-216.4	2.366	-7.588e-3	1.555e-3	-8.547e-3
5	1	N396	-166.788	-216.296	-2.092	1.708e-3	-1.755e-3	1.608e-2
6	1	N4017	-166.788	-216.296	2.092	-1.708e-3	1.755e-3	1.608e-2
7	1	N386	-167.107	-215.796	-1.92	-3.153e-3	-1.572e-3	1.599e-2
8	1	N4020	-167.107	-215.796	1.92	3.153e-3	1.572e-3	1.599e-2
9	1	N372	-167.161	-215.75	-2.029	-3.501e-3	-1.862e-3	-8.791e-3
10	1	N4022	-167.161	-215.75	2.029	3.501e-3	1.862e-3	-8.791e-3
11	1	N1638	-173.016	-215.284	-.955	-1.033e-5	-1.163e-3	6.293e-3
12	1	N2773	-173.016	-215.284	.955	1.033e-5	1.163e-3	6.293e-3
13	1	N1642	-172.778	-215.281	-1.011	6.755e-5	-1.249e-3	6.938e-3
14	1	N2775	-172.778	-215.281	1.011	-6.755e-5	1.249e-3	6.938e-3
15	1	N1616	-173.235	-215.272	-.897	-7.978e-5	-1.075e-3	5.677e-3
16	1	N2784	-173.235	-215.272	.897	7.978e-5	1.075e-3	5.677e-3
17	1	N945	-172.523	-215.263	-1.065	1.504e-4	-1.332e-3	7.606e-3
18	1	N3472	-172.523	-215.263	1.065	-1.504e-4	1.332e-3	7.606e-3
19	1	N1606	-173.437	-215.248	-.836	-1.381e-4	-9.848e-4	5.097e-3
20	1	N2787	-173.437	-215.248	.836	1.381e-4	9.848e-4	5.097e-3
21	1	N943	-172.252	-215.228	-1.116	2.334e-4	-1.411e-3	8.288e-3
22	1	N3468	-172.252	-215.228	1.116	-2.334e-4	1.411e-3	8.288e-3
23	1	N1591	-173.621	-215.214	-.772	-1.835e-4	-8.945e-4	4.556e-3
24	1	N2798	-173.621	-215.214	.772	1.835e-4	8.945e-4	4.556e-3
25	1	N954	-171.965	-215.177	-1.167	3.115e-4	-1.485e-3	8.978e-3
26	1	N3446	-171.965	-215.177	1.167	-3.115e-4	1.485e-3	8.978e-3
27	1	N1578	-173.787	-215.172	-.707	-2.154e-4	-8.043e-4	4.06e-3
28	1	N2811	-173.787	-215.172	.707	2.154e-4	8.043e-4	4.06e-3
29	1	N1567	-173.935	-215.126	-.639	-2.337e-4	-7.147e-4	3.611e-3
30	1	N2826	-173.935	-215.126	.639	2.337e-4	7.147e-4	3.611e-3
31	1	N957	-171.663	-215.112	-1.216	3.789e-4	-1.554e-3	9.67e-3
32	1	N3436	-171.663	-215.112	1.216	-3.789e-4	1.554e-3	9.67e-3
33	1	N359	-167.532	-215.095	-1.945	-2.485e-3	-1.844e-3	-8.903e-3

Imagen 25 – Flechas en las uniones en los 3 ejes después de aplicar la carga de la losa. Eje Y remarcado

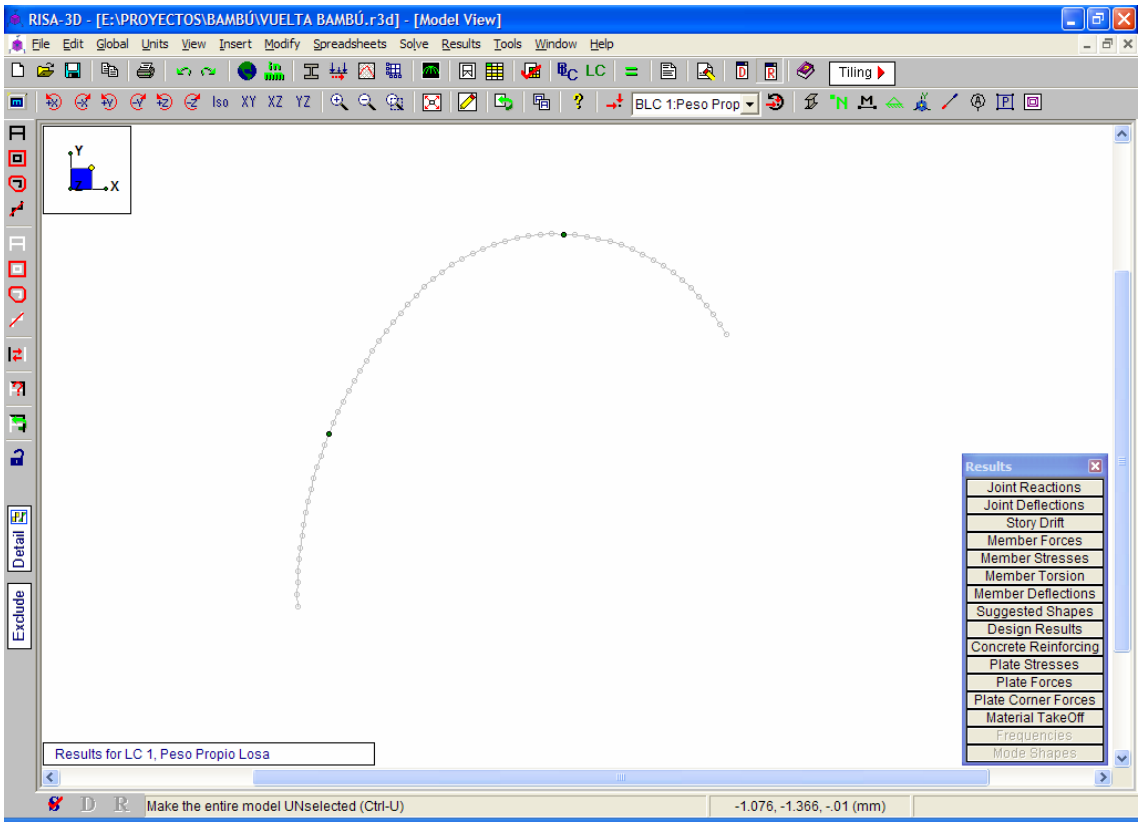


Imagen 26- Puntos de la vuelta con más flecha después de aplicar la carga propia de la losa.

Hipótesis 2

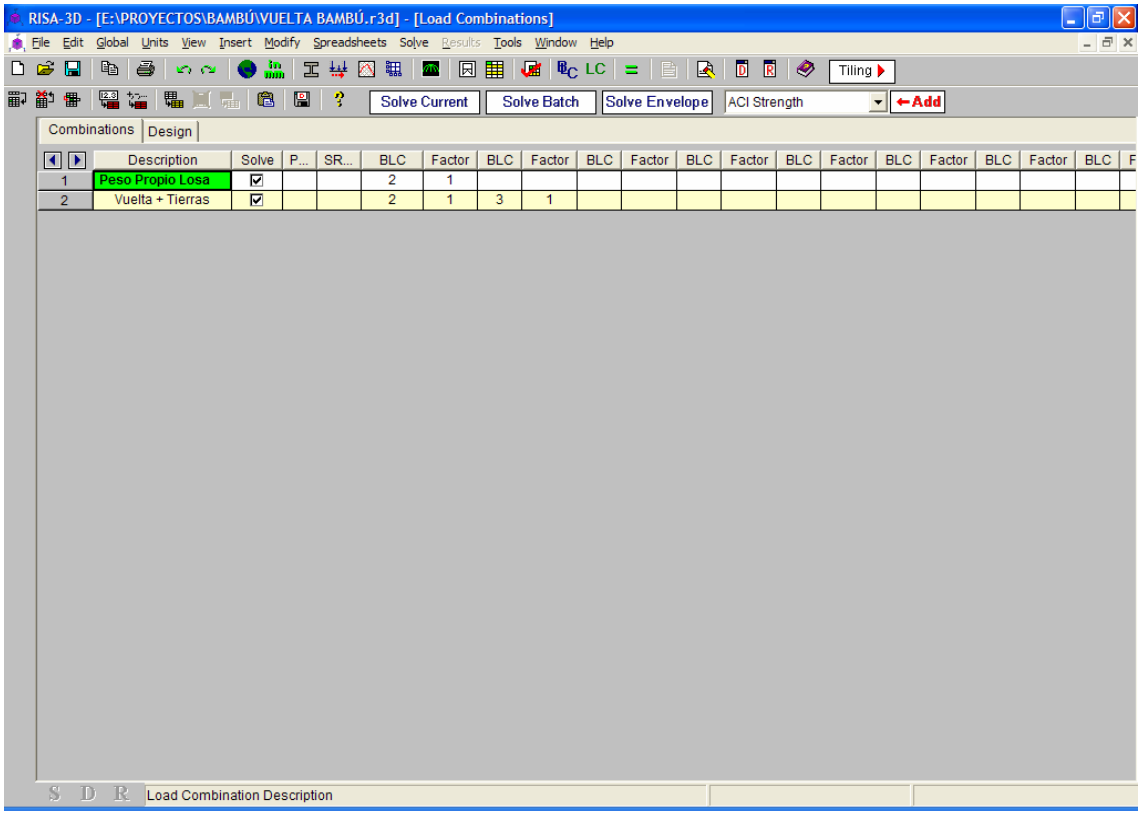


Imagen 27 – Introducción en "Load Case" de hipótesis de cálculo 2

Ahora una vez analizadas las reacciones y deformaciones de la ejecución de la vuelta, vamos a sumarle el peso de las tierras que irán encima por toda la vuelta. Este resultado será clave ya que si las deformaciones cumplen podremos dar la afirmación que la vuelta podrá ser puesta en servicio aunque sabemos que flechará aún más.
Creamos la hipótesis en el programa y le damos a "Solve" para proceder al estudio.

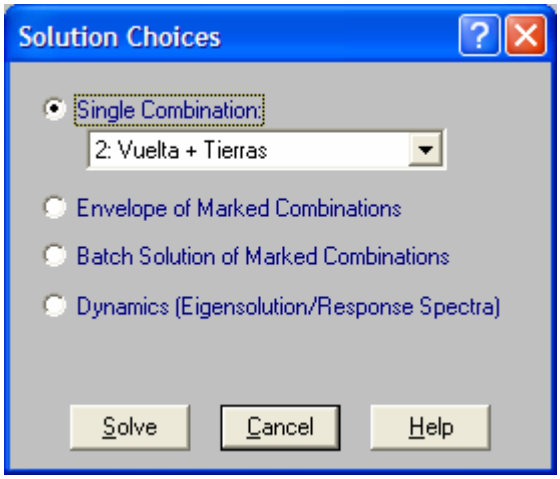


Imagen 28 – Solicitar al programa que calcule las deformaciones y reacciones de la hipótesis 2

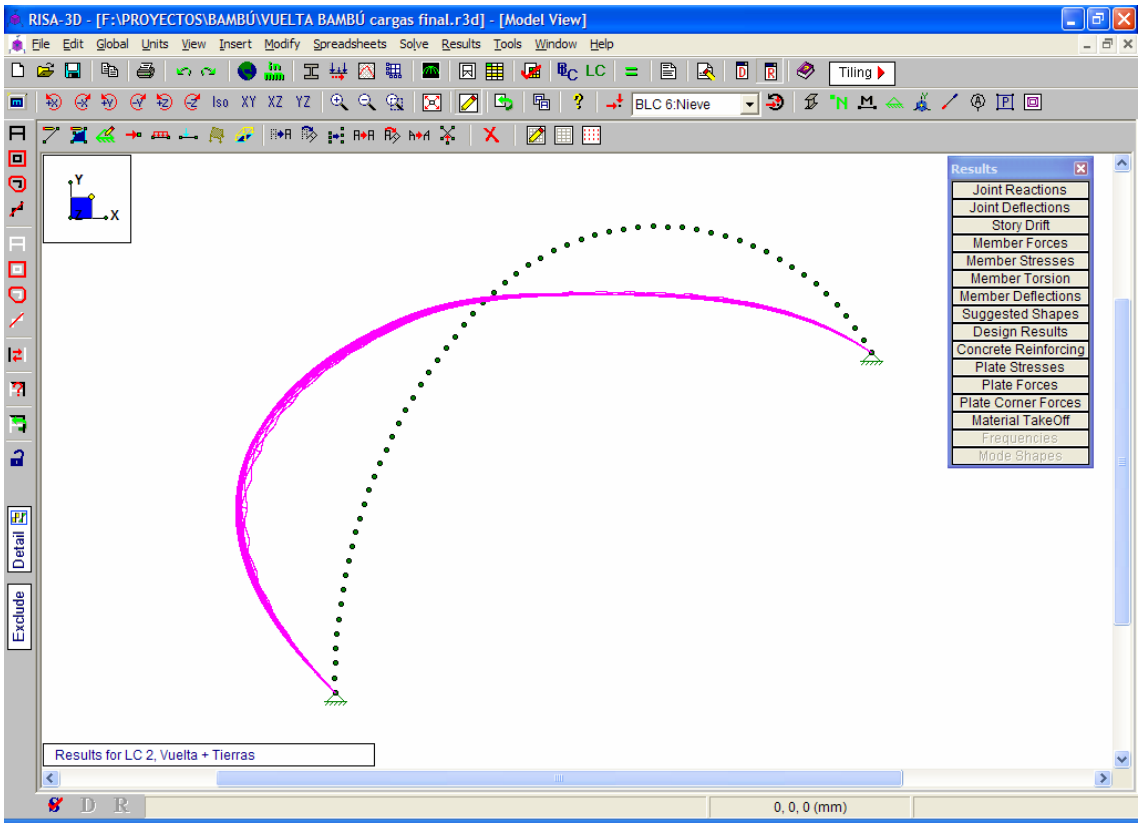
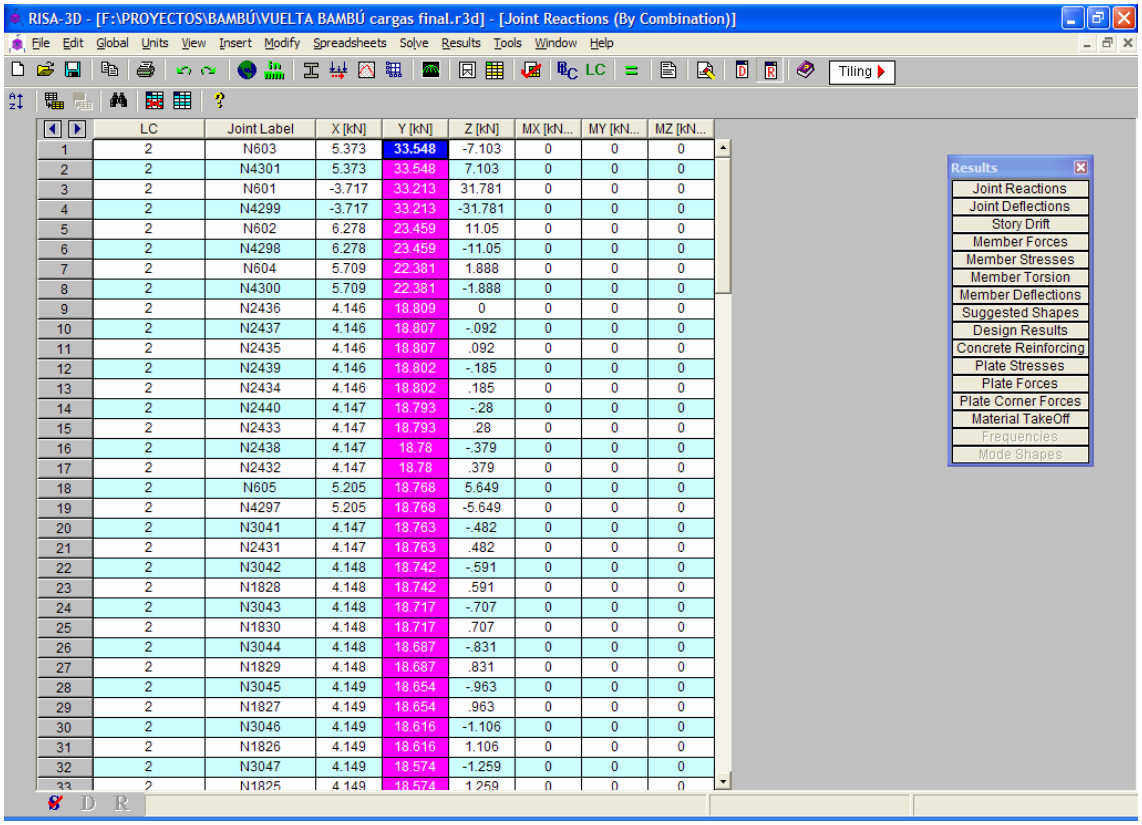


Imagen 29 – "Deflection diagram" del peso propio de la vuelta y las tierras con vegetación.



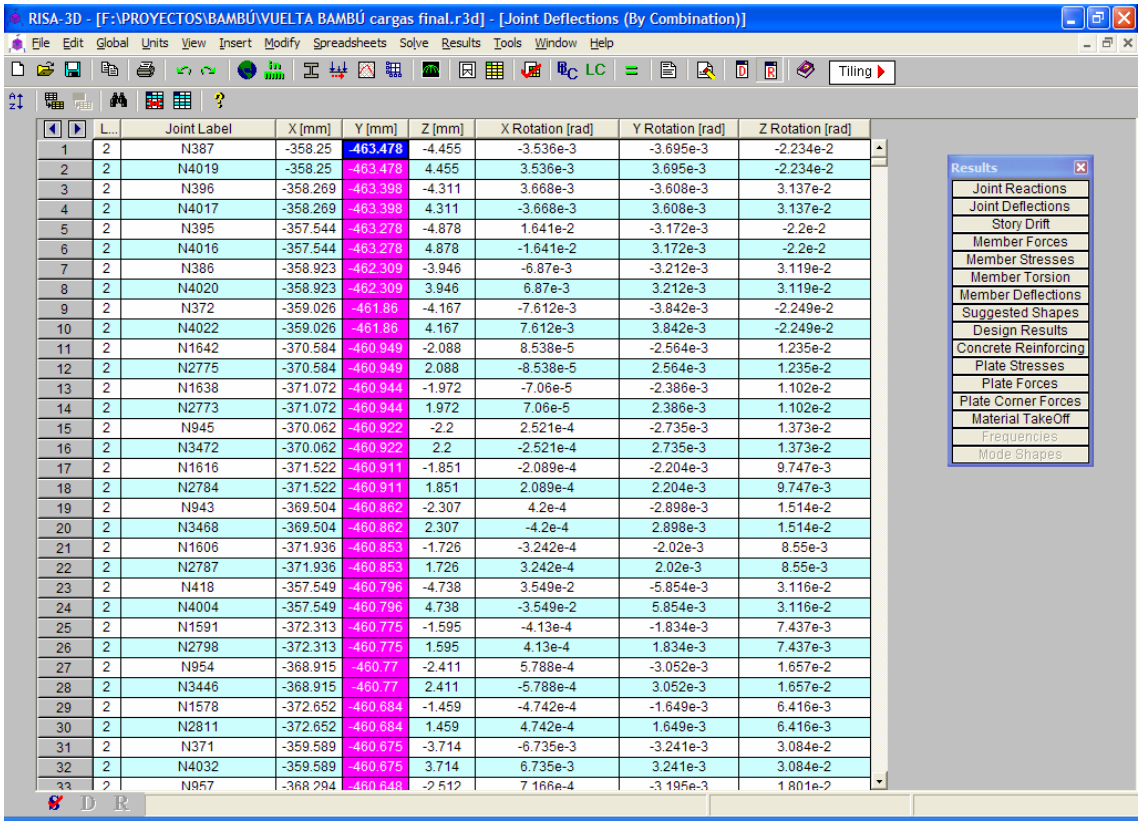
	LC	Joint Label	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	MX [kN...	MY [kN...	MZ [kN...
1	2	N603	5.373	33.548	-7.103	0	0	0
2	2	N4301	5.373	33.548	7.103	0	0	0
3	2	N601	-3.717	33.213	31.781	0	0	0
4	2	N4299	-3.717	33.213	-31.781	0	0	0
5	2	N602	6.278	23.459	11.05	0	0	0
6	2	N4298	6.278	23.459	-11.05	0	0	0
7	2	N604	5.709	22.381	1.888	0	0	0
8	2	N4300	5.709	22.381	-1.888	0	0	0
9	2	N2436	4.146	18.809	0	0	0	0
10	2	N2437	4.146	18.807	-.092	0	0	0
11	2	N2435	4.146	18.807	.092	0	0	0
12	2	N2439	4.146	18.802	-.185	0	0	0
13	2	N2434	4.146	18.802	.185	0	0	0
14	2	N2440	4.147	18.793	-.28	0	0	0
15	2	N2433	4.147	18.793	.28	0	0	0
16	2	N2438	4.147	18.78	-.379	0	0	0
17	2	N2432	4.147	18.78	.379	0	0	0
18	2	N605	5.205	18.768	5.649	0	0	0
19	2	N4297	5.205	18.768	-5.649	0	0	0
20	2	N3041	4.147	18.763	-.482	0	0	0
21	2	N2431	4.147	18.763	.482	0	0	0
22	2	N3042	4.148	18.742	-.591	0	0	0
23	2	N1828	4.148	18.742	.591	0	0	0
24	2	N3043	4.148	18.717	-.707	0	0	0
25	2	N1830	4.148	18.717	.707	0	0	0
26	2	N3044	4.148	18.687	-.831	0	0	0
27	2	N1829	4.148	18.687	.831	0	0	0
28	2	N3045	4.149	18.654	-.963	0	0	0
29	2	N1827	4.149	18.654	.963	0	0	0
30	2	N3046	4.149	18.616	-1.106	0	0	0
31	2	N1826	4.149	18.616	1.106	0	0	0
32	2	N3047	4.149	18.574	-1.259	0	0	0
33	2	N1825	4.149	18.574	1.259	0	0	0

Imagen 30 – Reacciones en las uniones en los 3 ejes después de aplicar la cargas de la losa y las tierras. Eje Y remarcado

En la imagen 29 vemos que el nudo N603, igual que en caso1, es el que tiene unas reacciones mayores. Es el nudo que soporta más esfuerzo de las cargas. Su reacción es de 33.54 KN en el eje Y, 5.37 en el eje X y -7.10 en el eje Z. Ligeramente superior al anterior, lógicamente por el peso de las tierras.

En cuanto a las flechas (Imagen 31), buscamos cuales son los nudos de más a menos solicitación, y también volvemos a encontrarnos con los nudos N387 y N4019 que son los que más se deforman en el eje Y.

El bambú no es capaz de absorber todos los esfuerzos a flexión y vuelve a flechar aún más.



	L...	Joint Label	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X Rotation [rad]	Y Rotation [rad]	Z Rotation [rad]
1	2	N387	-358.25	-463.478	-4.455	-3.536e-3	-3.695e-3	-2.234e-2
2	2	N4019	-358.25	-463.478	4.455	3.536e-3	3.695e-3	-2.234e-2
3	2	N396	-358.269	-463.398	-4.311	3.668e-3	-3.608e-3	3.137e-2
4	2	N4017	-358.269	-463.398	4.311	-3.668e-3	3.608e-3	3.137e-2
5	2	N395	-357.544	-463.278	-4.878	1.641e-2	-3.172e-3	-2.2e-2
6	2	N4016	-357.544	-463.278	4.878	-1.641e-2	3.172e-3	-2.2e-2
7	2	N386	-358.923	-462.309	-3.946	-6.87e-3	-3.212e-3	3.119e-2
8	2	N4020	-358.923	-462.309	3.946	6.87e-3	3.212e-3	3.119e-2
9	2	N372	-359.026	-461.86	-4.167	-7.612e-3	-3.842e-3	-2.249e-2
10	2	N4022	-359.026	-461.86	4.167	7.612e-3	3.842e-3	-2.249e-2
11	2	N1642	-370.584	-460.949	-2.088	8.538e-5	-2.564e-3	1.235e-2
12	2	N2775	-370.584	-460.949	2.088	-8.538e-5	2.564e-3	1.235e-2
13	2	N1638	-371.072	-460.944	-1.972	-7.06e-5	-2.386e-3	1.102e-2
14	2	N2773	-371.072	-460.944	1.972	7.06e-5	2.386e-3	1.102e-2
15	2	N945	-370.062	-460.922	-2.2	2.521e-4	-2.735e-3	1.373e-2
16	2	N3472	-370.062	-460.922	2.2	-2.521e-4	2.735e-3	1.373e-2
17	2	N1616	-371.522	-460.911	-1.851	-2.089e-4	-2.204e-3	9.747e-3
18	2	N2784	-371.522	-460.911	1.851	2.089e-4	2.204e-3	9.747e-3
19	2	N943	-369.504	-460.862	-2.307	4.2e-4	-2.898e-3	1.514e-2
20	2	N3468	-369.504	-460.862	2.307	-4.2e-4	2.898e-3	1.514e-2
21	2	N1606	-371.936	-460.853	-1.726	-3.242e-4	-2.02e-3	8.55e-3
22	2	N2787	-371.936	-460.853	1.726	3.242e-4	2.02e-3	8.55e-3
23	2	N418	-357.549	-460.796	-4.738	3.549e-2	-5.854e-3	3.116e-2
24	2	N4004	-357.549	-460.796	4.738	-3.549e-2	5.854e-3	3.116e-2
25	2	N1591	-372.313	-460.775	-1.595	-4.13e-4	-1.834e-3	7.437e-3
26	2	N2798	-372.313	-460.775	1.595	4.13e-4	1.834e-3	7.437e-3
27	2	N954	-368.915	-460.77	-2.411	5.788e-4	-3.052e-3	1.657e-2
28	2	N3446	-368.915	-460.77	2.411	-5.788e-4	3.052e-3	1.657e-2
29	2	N1578	-372.652	-460.684	-1.459	-4.742e-4	-1.649e-3	6.416e-3
30	2	N2811	-372.652	-460.684	1.459	4.742e-4	1.649e-3	6.416e-3
31	2	N371	-359.589	-460.675	-3.714	-6.735e-3	-3.241e-3	3.084e-2
32	2	N4032	-359.589	-460.675	3.714	6.735e-3	3.241e-3	3.084e-2
33	2	N957	-368.294	-460.648	-2.512	7.166e-4	-3.195e-3	1.801e-2

Imagen 31 – Flechas en las uniones en los 3 ejes después de aplicar la carga de la losa y tierras. . Eje Y remarcado

Hipótesis 3

Como última estimación y principal vamos a introducir todas las cargas a la vez y comprobar finalmente las reacciones, tensiones, compresiones y flechas del bambú conforme nuestro modelo estructural.

Tendremos en cuenta por ejemplo que rara ocasión estará la vuelta completamente nevada por toda su superficie, y sople un viento máximo previsto en el momento de introducir las cargas.

De esta forma y sin mayorar como antes hemos comentado, será una hipótesis con estimación superior de solicitaciones a lo previsto, aunque fiable para sacar conclusiones.

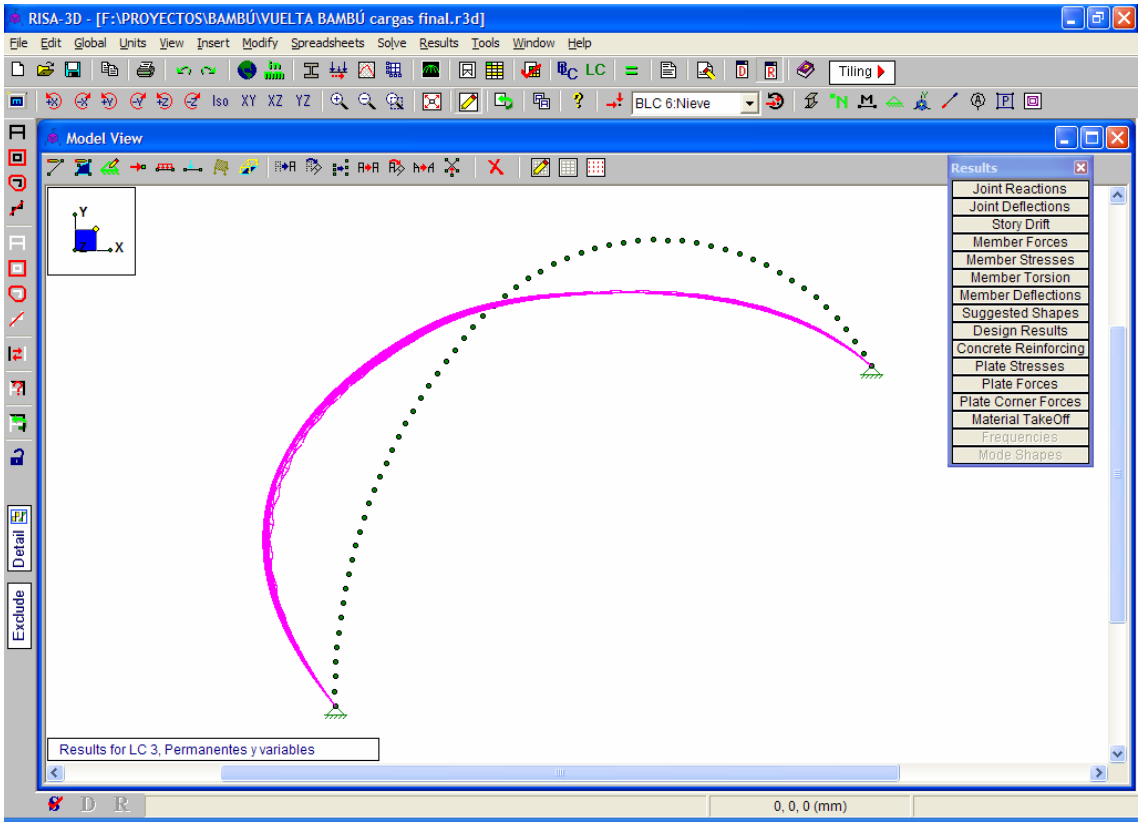


Imagen 32 – "Deflection diagram" de todas las cargas aplicables a la vuelta. Permanentes y varibles.

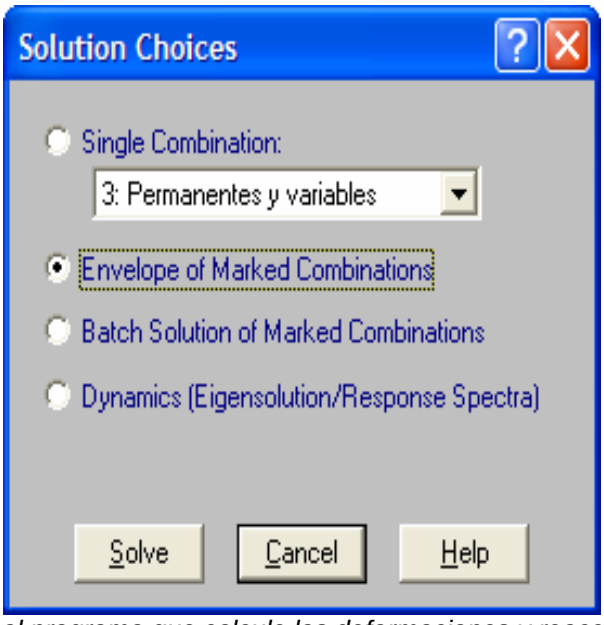


Imagen 33 – Solicitar al programa que calcule las deformaciones y reacciones de la hipótesis 2

Como anteriormente, y con más esfuerzos aún, siguen los nudos N603 y N4301 soportando las reacciones máximas que esta vez son de 3.17KN en el eje X, 33.19 KN en el eje Y ,y 31.78KN en el eje Z.

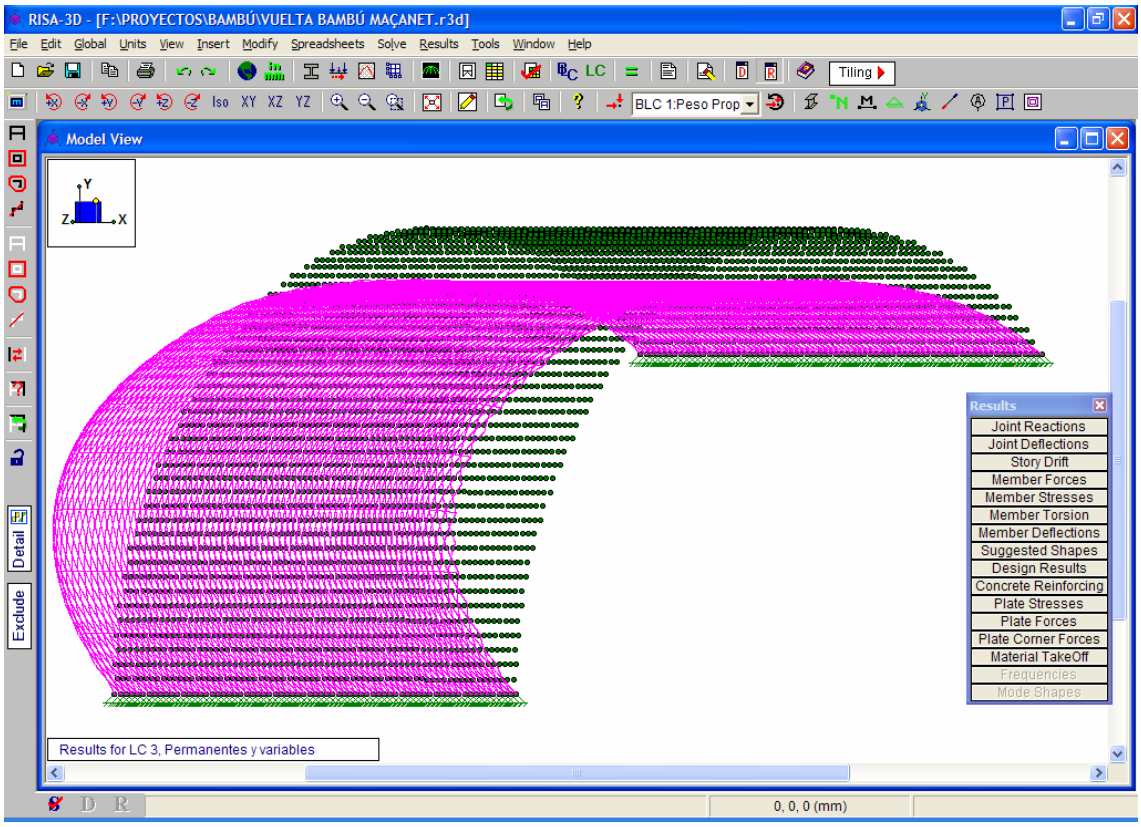


Imagen 34 – Vista 3D de la deformación del entramado al entrar todas las cargas

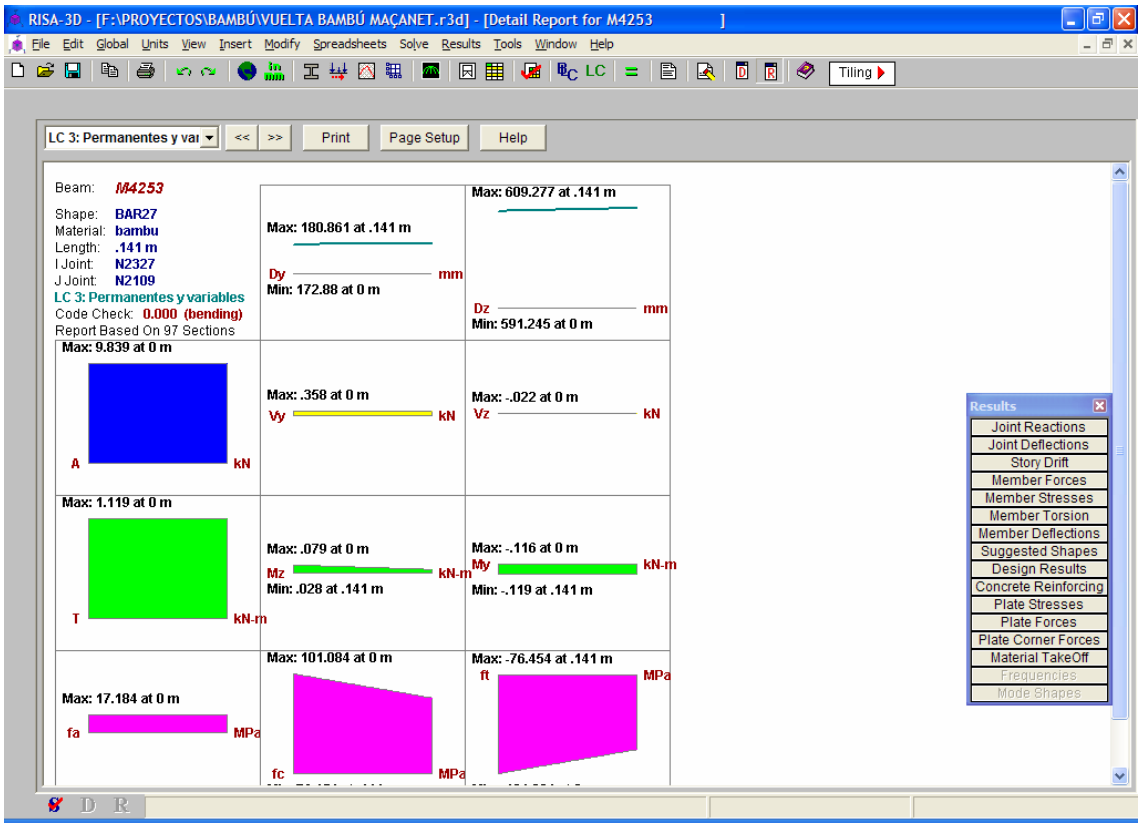


Imagen 10 – Diagramas de esfuerzos de la barra mas deformada en el eje X.

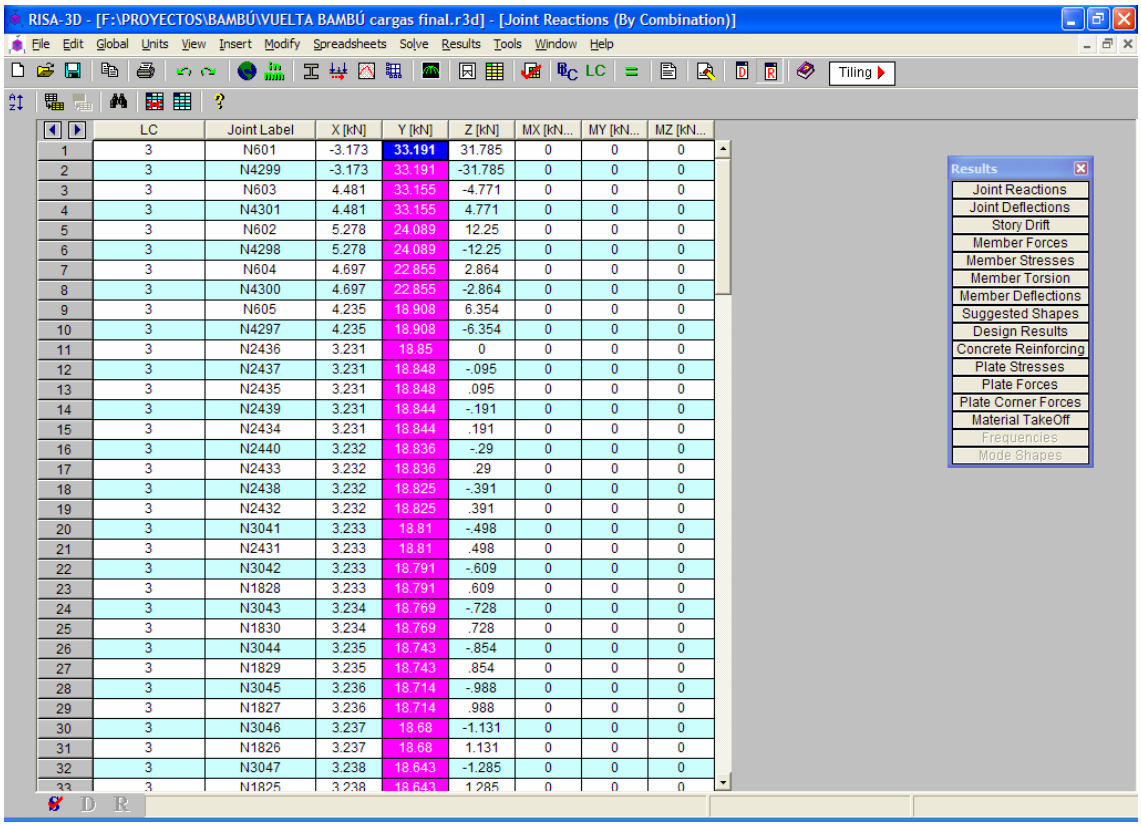
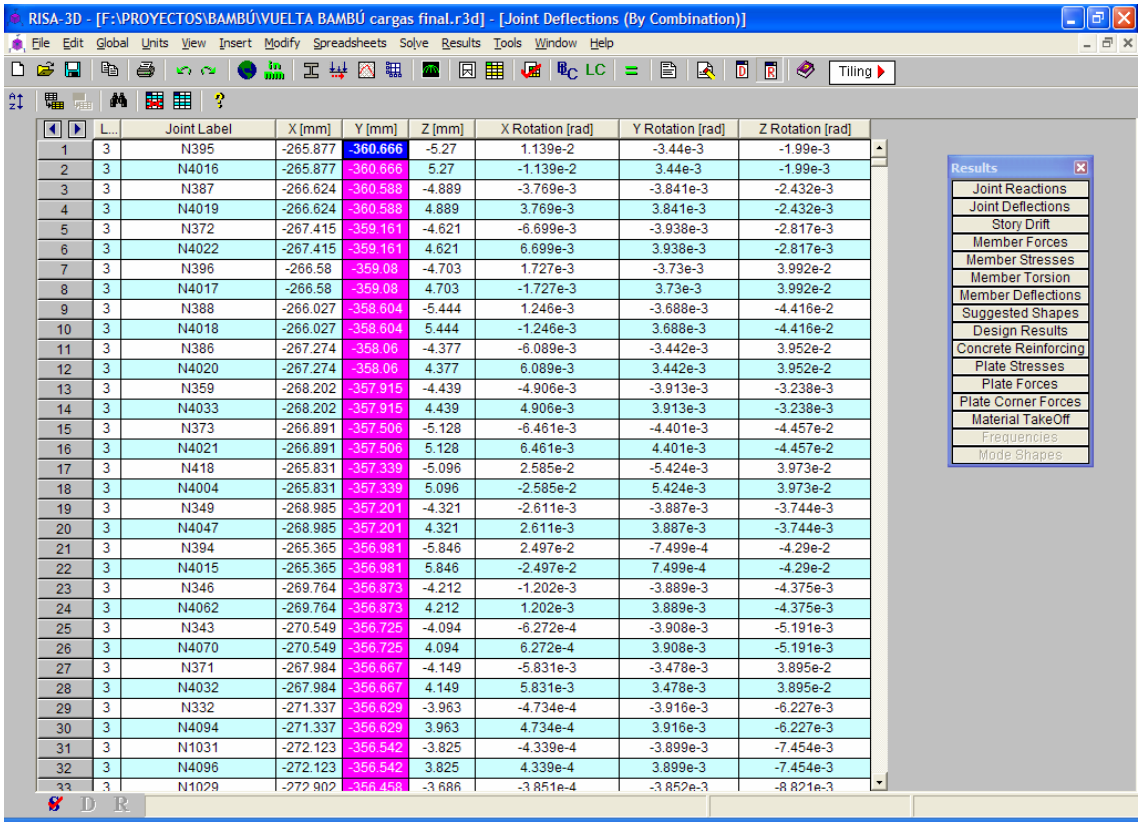


Imagen 34 – Reacciones en las uniones en los 3 ejes después de aplicar las cargas permanentes y varibles. Eje Y remarcado

En cuanto a las flechas, buscamos cuales son los nudos de más a menos solicitación, y también volvemos a encontrarnos con los nudos N387 y N4019 que son los que más se vuelven a deformar, pero comprobamos como flecha 10cm. menos en el eje Y debido principalmente al empuje de las tierras laterales y por la succión interior de la carga de viento.

En el eje Y en la parte central de la vuelta llega a deformarse unos 35cm. mientras que la deformación máxima se encuentra en el eje X a la altura de la puerta de entrada.

De manera que la hipótesis más desfavorable en cuanto a flecha es la hipótesis 2 dónde le aplicábamos a la vuelta su propio peso y las tierras superiores.



	L...	Joint Label	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X Rotation [rad]	Y Rotation [rad]	Z Rotation [rad]
1	3	N395	-265.877	-360.666	-5.27	1.139e-2	-3.44e-3	-1.99e-3
2	3	N4016	-265.877	-360.666	5.27	-1.139e-2	3.44e-3	-1.99e-3
3	3	N387	-266.624	-360.588	-4.889	-3.769e-3	-3.841e-3	-2.432e-3
4	3	N4019	-266.624	-360.588	4.889	3.769e-3	3.841e-3	-2.432e-3
5	3	N372	-267.415	-359.161	-4.621	-6.699e-3	-3.938e-3	-2.817e-3
6	3	N4022	-267.415	-359.161	4.621	6.699e-3	3.938e-3	-2.817e-3
7	3	N396	-266.58	-359.08	-4.703	1.727e-3	-3.73e-3	3.992e-2
8	3	N4017	-266.58	-359.08	4.703	-1.727e-3	3.73e-3	3.992e-2
9	3	N388	-266.027	-358.604	-5.444	1.246e-3	-3.688e-3	-4.416e-2
10	3	N4018	-266.027	-358.604	5.444	-1.246e-3	3.688e-3	-4.416e-2
11	3	N386	-267.274	-358.06	-4.377	-6.089e-3	-3.442e-3	3.952e-2
12	3	N4020	-267.274	-358.06	4.377	6.089e-3	3.442e-3	3.952e-2
13	3	N359	-268.202	-357.915	-4.439	-4.906e-3	-3.913e-3	-3.238e-3
14	3	N4033	-268.202	-357.915	4.439	4.906e-3	3.913e-3	-3.238e-3
15	3	N373	-266.891	-357.506	-5.128	-6.461e-3	-4.401e-3	-4.457e-2
16	3	N4021	-266.891	-357.506	5.128	6.461e-3	4.401e-3	-4.457e-2
17	3	N418	-265.831	-357.339	-5.096	2.585e-2	-5.424e-3	3.973e-2
18	3	N4004	-265.831	-357.339	5.096	-2.585e-2	5.424e-3	3.973e-2
19	3	N349	-268.985	-357.201	-4.321	-2.611e-3	-3.887e-3	-3.744e-3
20	3	N4047	-268.985	-357.201	4.321	2.611e-3	3.887e-3	-3.744e-3
21	3	N394	-265.365	-356.981	-5.846	2.497e-2	-7.499e-4	-4.29e-2
22	3	N4015	-265.365	-356.981	5.846	-2.497e-2	7.499e-4	-4.29e-2
23	3	N346	-269.764	-356.873	-4.212	-1.202e-3	-3.889e-3	-4.375e-3
24	3	N4062	-269.764	-356.873	4.212	1.202e-3	3.889e-3	-4.375e-3
25	3	N343	-270.549	-356.725	-4.094	-6.272e-4	-3.908e-3	-5.191e-3
26	3	N4070	-270.549	-356.725	4.094	6.272e-4	3.908e-3	-5.191e-3
27	3	N371	-267.984	-356.667	-4.149	-5.831e-3	-3.478e-3	3.895e-2
28	3	N4032	-267.984	-356.667	4.149	5.831e-3	3.478e-3	3.895e-2
29	3	N332	-271.337	-356.629	-3.963	-4.734e-4	-3.916e-3	-6.227e-3
30	3	N4094	-271.337	-356.629	3.963	4.734e-4	3.916e-3	-6.227e-3
31	3	N1031	-272.123	-356.542	-3.825	-4.339e-4	-3.899e-3	-7.454e-3
32	3	N4096	-272.123	-356.542	3.825	4.339e-4	3.899e-3	-7.454e-3
33	3	N1029	-272.902	-356.458	-3.686	-3.851e-4	-3.852e-3	-8.821e-3

Imagen 35 – Flechas en las uniones en los 3 ejes después de aplicar todas las cargas permanentes y variables.

Vamos a analizar como trabajan las barras de bambú:

REACCIONES

Las mayores reacciones de los nudos empotrados a los muros están en las esquinas como vemos en la imagen 36.

El mayor valor de reacción en el eje Y es de 33.2 KN y los valores medios en los tramos centrales son del orden de 8KN.

Vemos con las flechas las zonas con más problemas para soportar los pesos.

En el eje X el tramo empotrado de la puerta recibe en su recorrido 3.2KN subiendo hasta 5.3KN en las esquinas, mientras el empotramiento con el muro en el centro tiene 4.6KN y en las esquinas hasta 6.6KN.

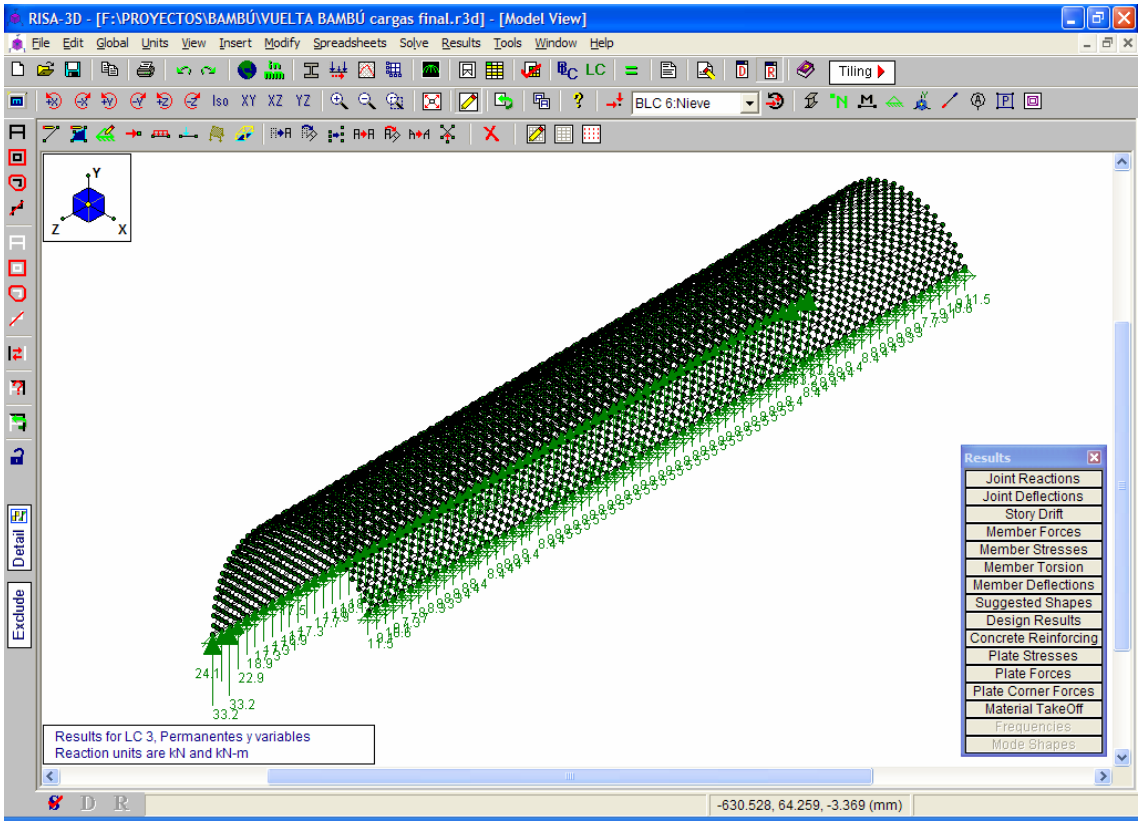


Imagen 36 – Reacciones en los nudos inferiores en el eje Y

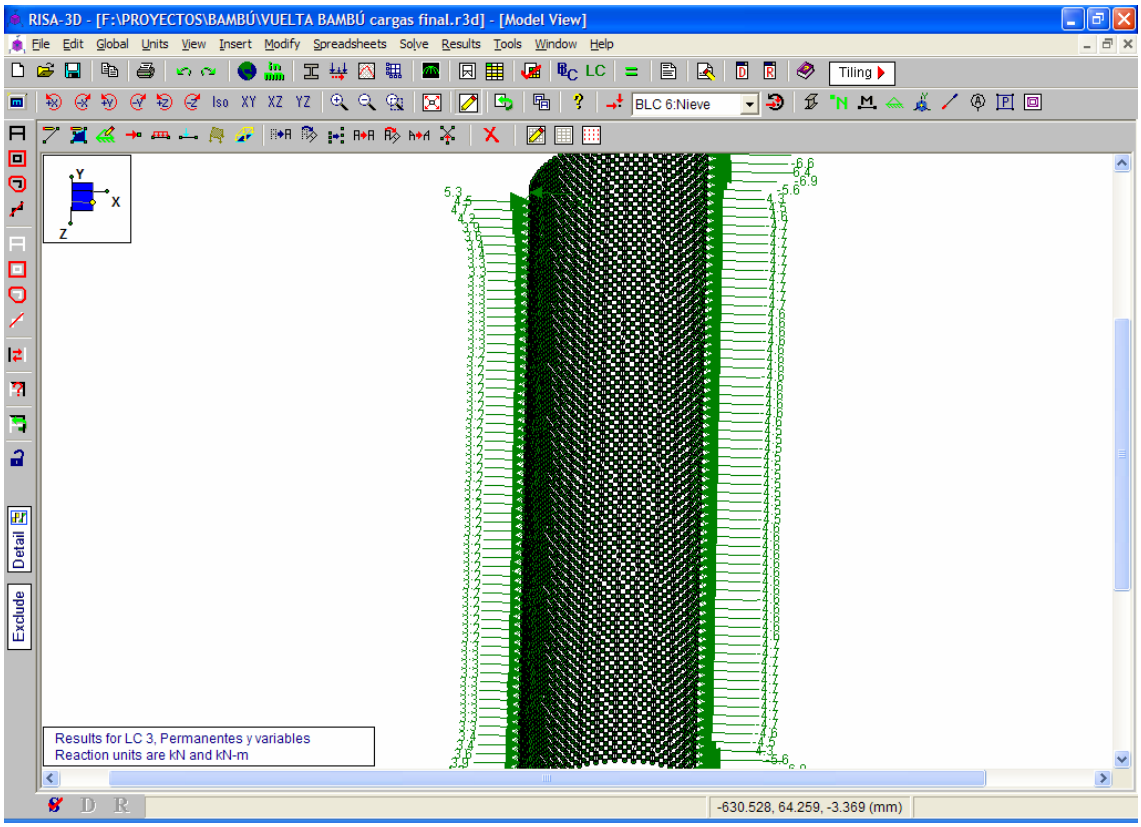


Imagen 37- Reacciones en los nudos inferiores eje X.

TENSIONES

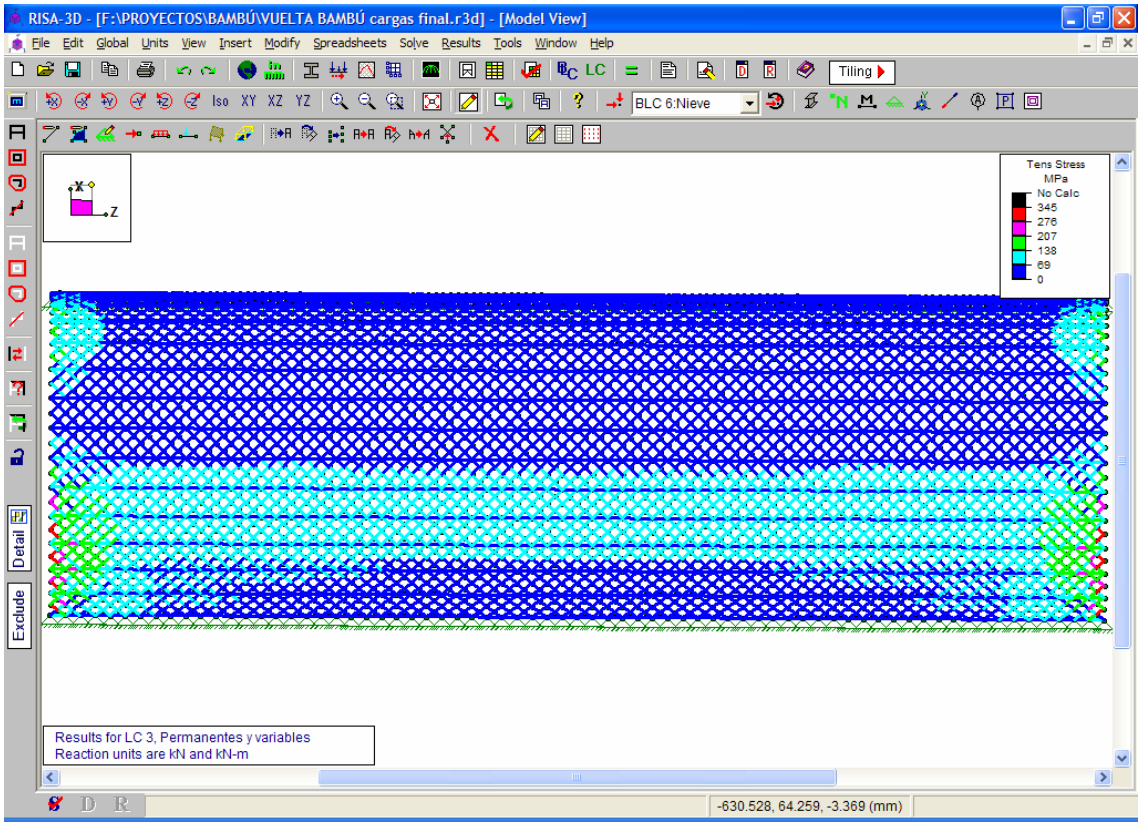


Imagen 38 – Diagrama de tensiones

El bambú soporta bien hasta los 69 mPa (azul) y al pasar de esta tensión empieza a sufrir retorciéndose, como vemos visto antes, en el punto más alto de la vuelta por los laterales y principalmente en las uniones con el empotramiento inferior donde recibe tensiones de hasta 345 mPa (rojo).

Coinciden los puntos que soportaban mayores reacciones con el gráfico coloreado de tensiones.
Por lo tanto aquí vemos porqué el material por nuestro método numérico no soporta la totalidad de pesos aplicados.
Analizaremos también como es su gráfico de compresiones. (Imagen 39).

La zona más comprimida es la misma que la más tensionada. Llega tener una compresión máxima de 360mPa. La resistencia de compresión al igual que el hormigón, la resiste el gunitado (el propio cuerpo de la losa).

COMPRESIONES

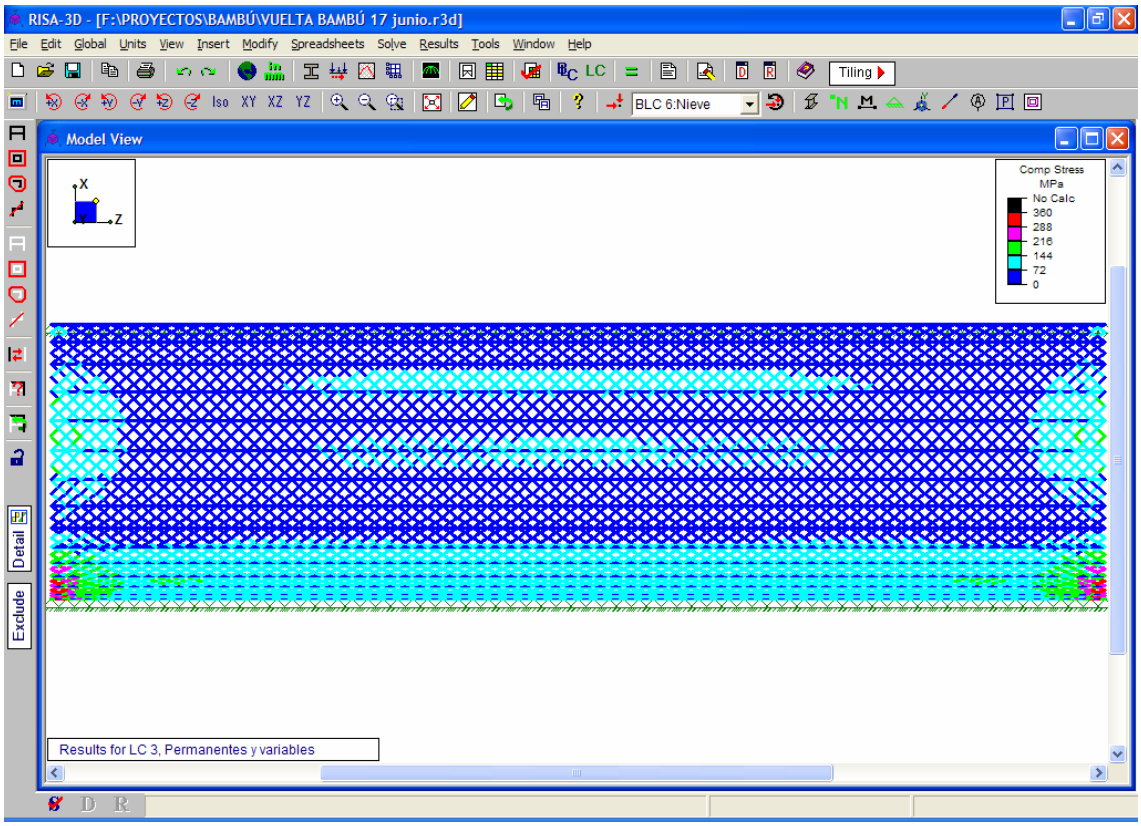


Imagen 39 – Diagrama de compresiones.

Según nuestro modelo de cálculo, la losa sólo soportará esfuerzos a compresión en la zona azul oscuro, hasta 72 mPa.
Los demás nudos se ven saturados ante la compresión y ceden deformándose como hemos visto antes.

El gunitado al no soportar la compresión de la carga deforma, y el bambú como que trabaja principalmente a flexión, tampoco ayuda a evitar las deformaciones y la torsión como vemos a continuación en las siguientes imágenes.

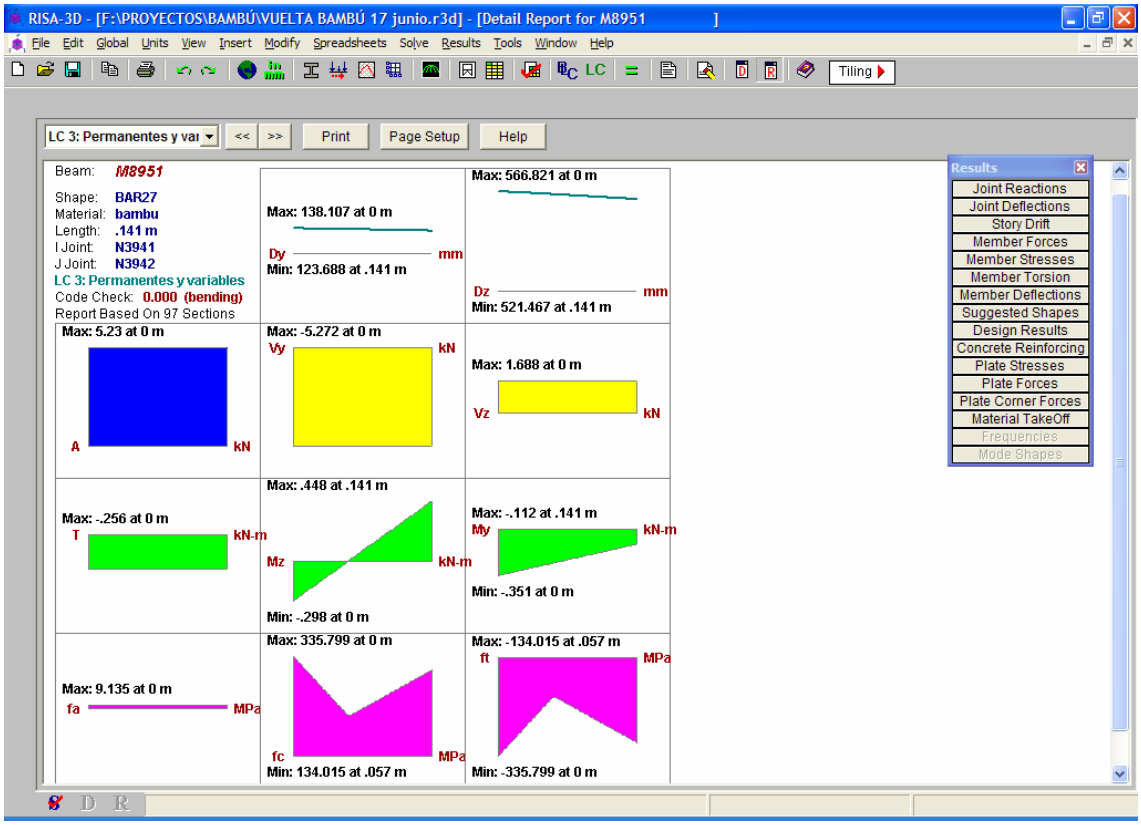


Imagen 40. Diagramas de esfuerzos en nudos de compresión máxima (rojo)

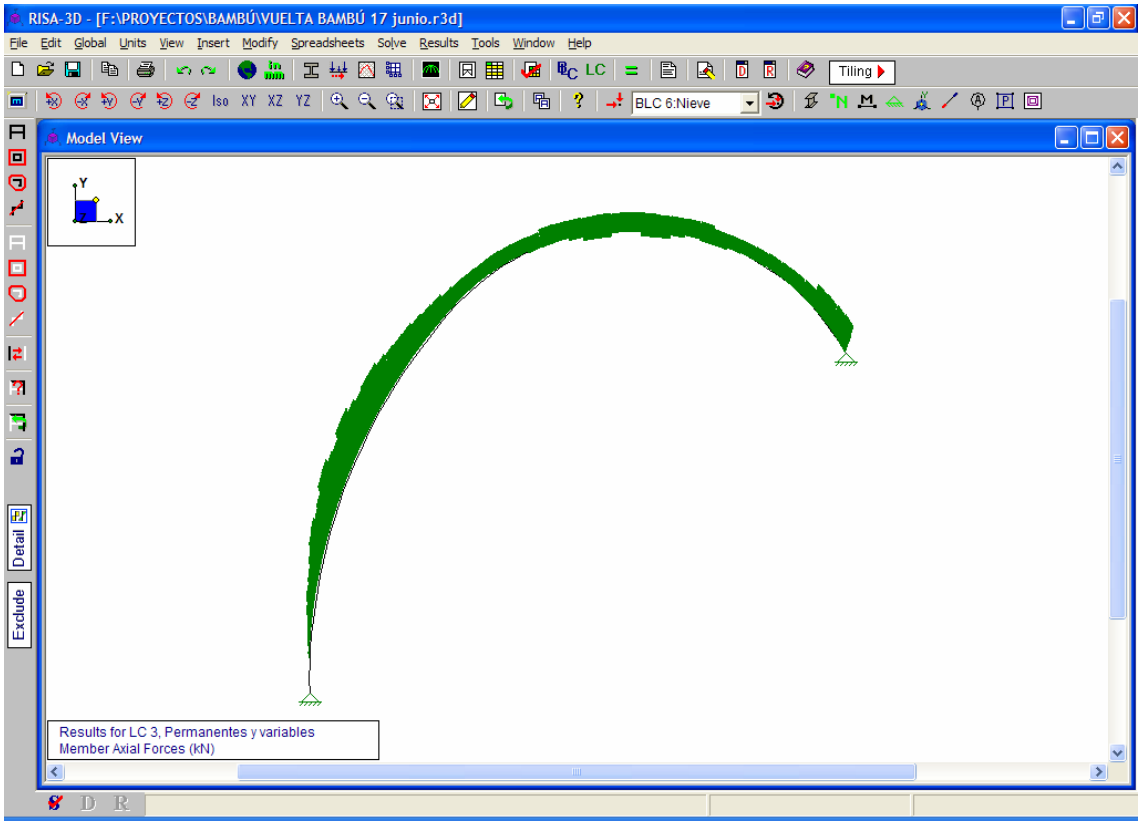


Imagen 40 – Diagrama de fuerzas axiles.

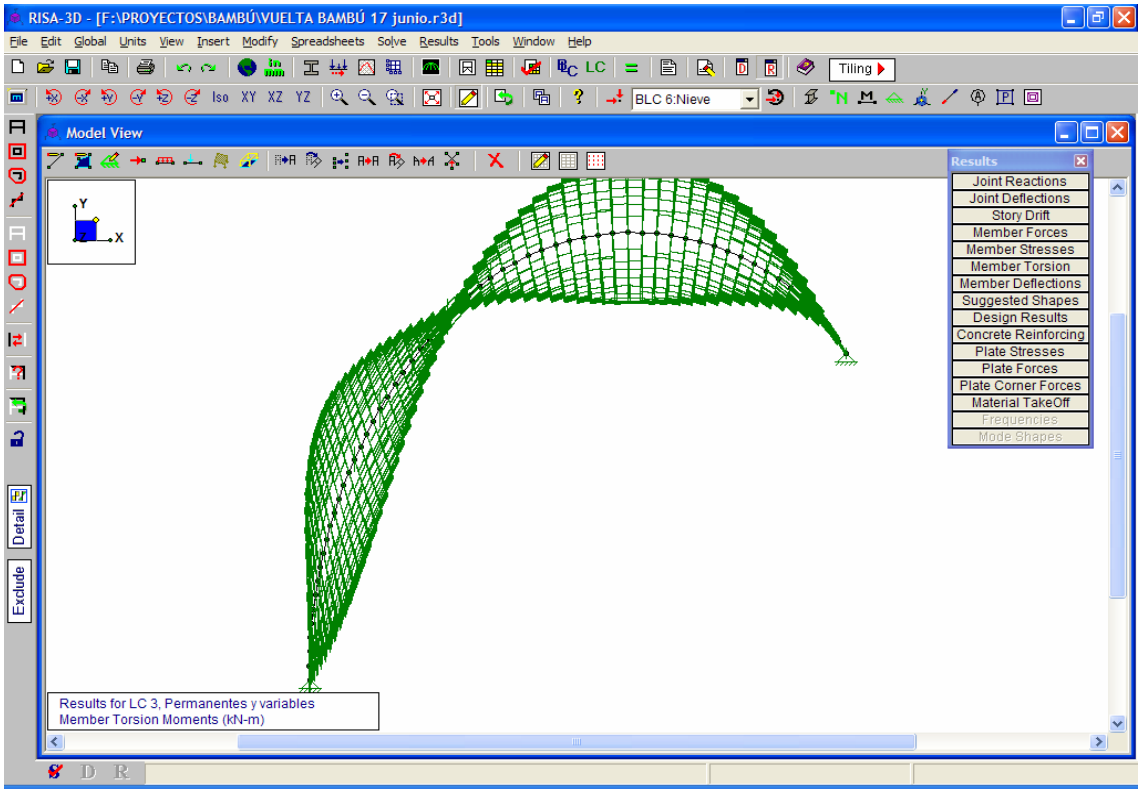
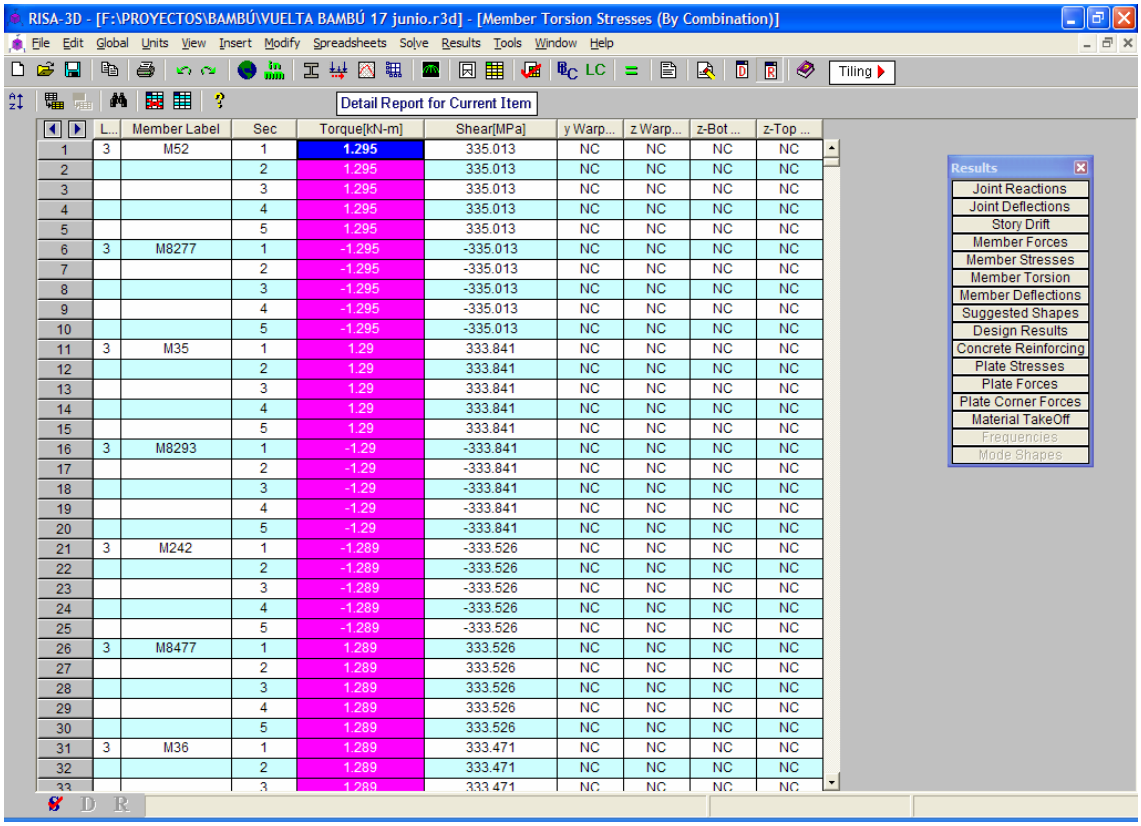


Imagen 41 – Diagrama de momentos torsores.



RISA-3D - [F:\PROYECTOS\BAMBÚ\VUELTA BAMBÚ 17 junio.r3d] - [Member Torsion Stresses (By Combination)]

File Edit Global Units View Insert Modify Spreadsheets Solve Results Tools Window Help

Tiling

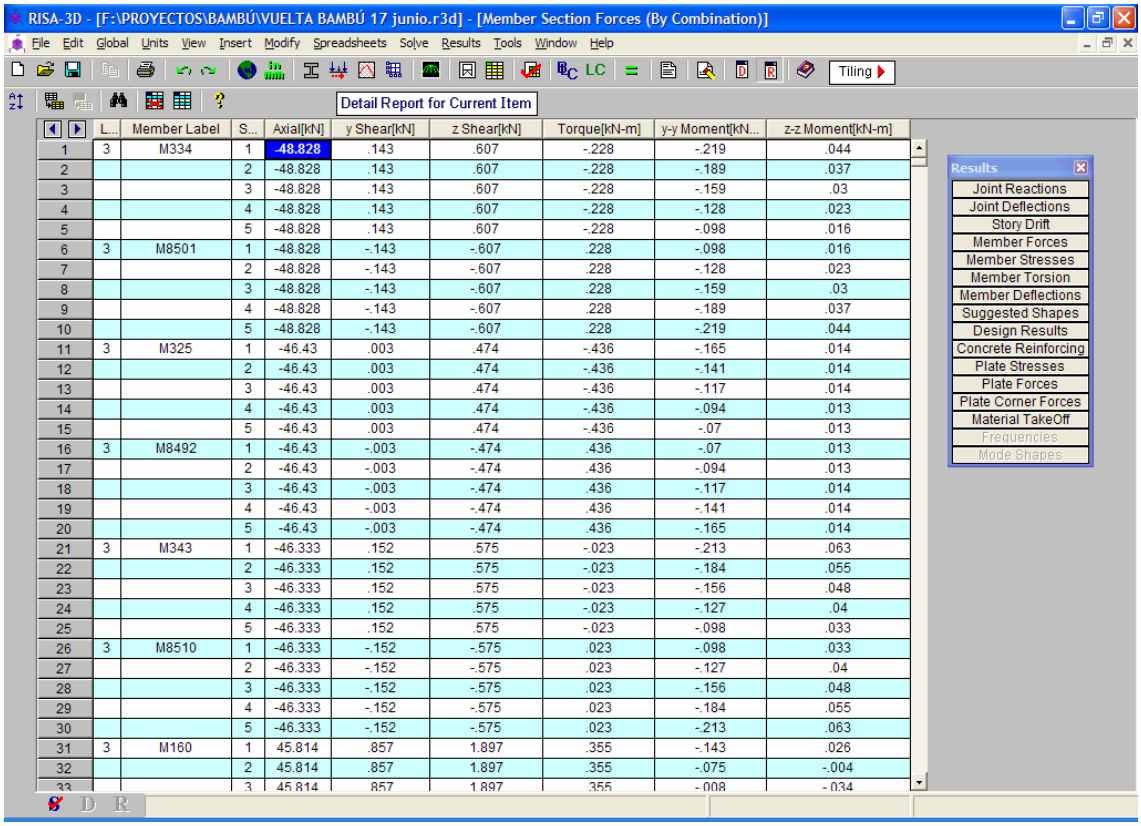
Detail Report for Current Item

	L...	Member Label	Sec	Torque[kN-m]	Shear[MPa]	y Warp...	z Warp...	z-Bot ...	z-Top ...
1	3	M52	1	1.295	335.013	NC	NC	NC	NC
2			2	1.295	335.013	NC	NC	NC	NC
3			3	1.295	335.013	NC	NC	NC	NC
4			4	1.295	335.013	NC	NC	NC	NC
5			5	1.295	335.013	NC	NC	NC	NC
6	3	M8277	1	-1.295	-335.013	NC	NC	NC	NC
7			2	-1.295	-335.013	NC	NC	NC	NC
8			3	-1.295	-335.013	NC	NC	NC	NC
9			4	-1.295	-335.013	NC	NC	NC	NC
10			5	-1.295	-335.013	NC	NC	NC	NC
11	3	M35	1	1.29	333.841	NC	NC	NC	NC
12			2	1.29	333.841	NC	NC	NC	NC
13			3	1.29	333.841	NC	NC	NC	NC
14			4	1.29	333.841	NC	NC	NC	NC
15			5	1.29	333.841	NC	NC	NC	NC
16	3	M8293	1	-1.29	-333.841	NC	NC	NC	NC
17			2	-1.29	-333.841	NC	NC	NC	NC
18			3	-1.29	-333.841	NC	NC	NC	NC
19			4	-1.29	-333.841	NC	NC	NC	NC
20			5	-1.29	-333.841	NC	NC	NC	NC
21	3	M242	1	-1.289	-333.526	NC	NC	NC	NC
22			2	-1.289	-333.526	NC	NC	NC	NC
23			3	-1.289	-333.526	NC	NC	NC	NC
24			4	-1.289	-333.526	NC	NC	NC	NC
25			5	-1.289	-333.526	NC	NC	NC	NC
26	3	M8477	1	1.289	333.526	NC	NC	NC	NC
27			2	1.289	333.526	NC	NC	NC	NC
28			3	1.289	333.526	NC	NC	NC	NC
29			4	1.289	333.526	NC	NC	NC	NC
30			5	1.289	333.526	NC	NC	NC	NC
31	3	M36	1	1.289	333.471	NC	NC	NC	NC
32			2	1.289	333.471	NC	NC	NC	NC
33			3	1.289	333.471	NC	NC	NC	NC

Results

Joint Reactions
Joint Deflections
Story Drift
Member Forces
Member Stresses
Member Torsion
Member Deflections
Suggested Shapes
Design Results
Concrete Reinforcing
Plate Stresses
Plate Forces
Plate Corner Forces
Material TakeOff
Frequencies
Mode Shapes

Imagen 42 – Tabla de esfuerzos torsores máximos en las barras.



RISA-3D - [F:\PROYECTOS\BAMBÚ\VUELTA BAMBÚ 17 junio.r3d] - [Member Section Forces (By Combination)]

File Edit Global Units View Insert Modify Spreadsheets Solve Results Tools Window Help

Tiling

Detail Report for Current Item

	L...	Member Label	S...	Axial[kN]	y Shear[kN]	z Shear[kN]	Torque[kN-m]	y-y Moment[kN...	z-z Moment[kN-m]
1	3	M334	1	-48.828	.143	.607	-.228	-.219	.044
2			2	-48.828	.143	.607	-.228	-.189	.037
3			3	-48.828	.143	.607	-.228	-.159	.03
4			4	-48.828	.143	.607	-.228	-.128	.023
5			5	-48.828	.143	.607	-.228	-.098	.016
6	3	M8501	1	-48.828	-.143	-.607	.228	-.098	.016
7			2	-48.828	-.143	-.607	.228	-.128	.023
8			3	-48.828	-.143	-.607	.228	-.159	.03
9			4	-48.828	-.143	-.607	.228	-.189	.037
10			5	-48.828	-.143	-.607	.228	-.219	.044
11	3	M325	1	-46.43	.003	.474	-.436	-.165	.014
12			2	-46.43	.003	.474	-.436	-.141	.014
13			3	-46.43	.003	.474	-.436	-.117	.014
14			4	-46.43	.003	.474	-.436	-.094	.013
15			5	-46.43	.003	.474	-.436	-.07	.013
16	3	M8492	1	-46.43	-.003	-.474	.436	-.07	.013
17			2	-46.43	-.003	-.474	.436	-.094	.013
18			3	-46.43	-.003	-.474	.436	-.117	.014
19			4	-46.43	-.003	-.474	.436	-.141	.014
20			5	-46.43	-.003	-.474	.436	-.165	.014
21	3	M343	1	-46.333	.152	.575	-.023	-.213	.063
22			2	-46.333	.152	.575	-.023	-.184	.055
23			3	-46.333	.152	.575	-.023	-.156	.048
24			4	-46.333	.152	.575	-.023	-.127	.04
25			5	-46.333	.152	.575	-.023	-.098	.033
26	3	M8510	1	-46.333	-.152	-.575	.023	-.098	.033
27			2	-46.333	-.152	-.575	.023	-.127	.04
28			3	-46.333	-.152	-.575	.023	-.156	.048
29			4	-46.333	-.152	-.575	.023	-.184	.055
30			5	-46.333	-.152	-.575	.023	-.213	.063
31	3	M160	1	45.814	.857	1.897	.355	-.143	.026
32			2	45.814	.857	1.897	.355	-.075	-.004
33			3	45.814	.857	1.897	.355	-.008	-.034

Results

Joint Reactions
Joint Deflections
Story Drift
Member Forces
Member Stresses
Member Torsion
Member Deflections
Suggested Shapes
Design Results
Concrete Reinforcing
Plate Stresses
Plate Forces
Plate Corner Forces
Material TakeOff
Frequencies
Mode Shapes

Imagen 43 – Fuerzas máximas aplicadas a las barras.

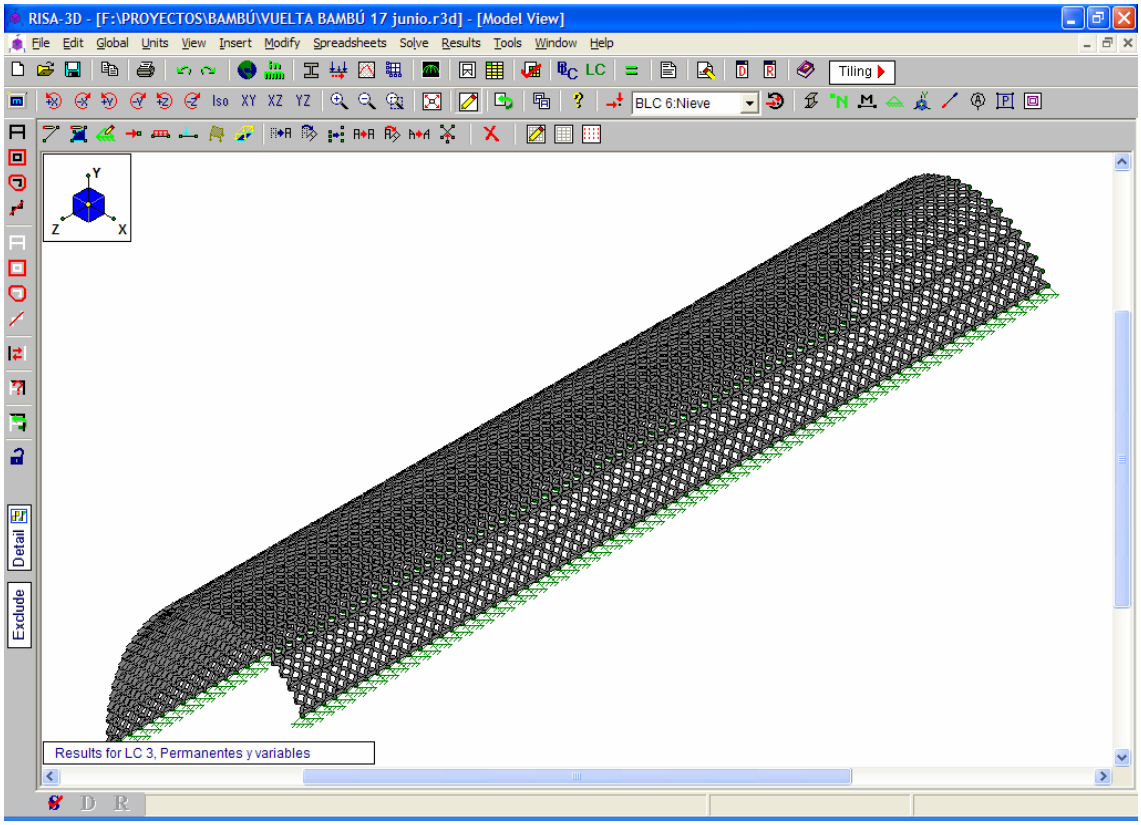


Imagen 44. Vista en 3D del entramado de nuestro modelo numérico.

8. CONCLUSIONES

8.CONCLUSIONES

Después de conocer las políticas existentes por parte de los estados y de los sectores privados en la reciente iniciativa denominada *"La cadena de la guadua",* de estudiar los nuevos adelantos e investigaciones relacionadas con nuevas técnicas de cultivo del "*bambú colombiano",* sistemas de producción, consumo y comercialización de productos y servicios relacionados con la guadua en el mundo. Teniendo una visión mas profunda de la problemática en estudio, que nos permite tener claridad acerca de la realidad actual y proyección de futuro de la arquitectura de bambú mundial, podemos afirmar lo siguiente:

- La arquitectura de bambú en el mundo se encuentra en un proceso de crecimiento muy importante, no obstante hay que anotar que dicho crecimiento se esta produciendo de una manera un poco desorganizada.

- Respecto al "*Futuro de la arquitectura de bambú",* además de todo lo expresado anteriormente, es necesario anotar, que muchos países poco desarrollados tienen en *"la guadua"* un recurso natural excepcional, conociendo la situación actual que atraviesa el planeta desde el punto de vista ambiental. Este recurso desde ya se vislumbra como un potencial extraordinario, desde el punto de vista de sostenibilidad en arquitectura y económico.

En relación al estudio de las características del bambú como material estructural:

Las ventajas son las siguientes:

- El **bambú** guadua está dotado de extraordinarias características físicas que permiten su empleo en todo tipo de miembros estructurales.
- Su forma circular y su sección hueca lo hacen un material liviano, fácil de transportar y de almacenar, lo que permite la construcción rápida de estructuras temporales o permanentes.
- En cada uno de los nudos del **bambú** hay un tabique o pared transversal que además de hacerlo más rígido y elástico evita su ruptura al curvarse; por esta característica es un material apropiado para construcciones anti-sísmicas.

- La constitución de las fibras de las paredes del **bambú** permite que pueda ser cortado transversal o longitudinalmente en piezas de cualquier longitud, empleando herramientas manuales sencillas como el machete.
- La superficie natural del **bambú** es lisa, limpia, de color atractivo y no requiere ser pintada, raspada o pulida.
- Los bambúes no tienen corteza o partes que puedan considerarse como desperdicio
- Además de usarse como elemento estructural el **bambú** puede usarse para otras funciones en la construcción. Tales como tuberías para el transporte de agua y en pequeñas secciones para drenaje.
- El **bambú** puede emplearse en combinación con todo tipo de materiales de construcción como elementos de refuerzo.
- Del **bambú** pueden obtenerse diversos materiales para enchapes tales como esteras, paneles contrachapados, etc.
- El **bambú** continua siendo el material de construcción de más bajo precio.

Las desventajas:

- El **bambú** en contacto permanente con la humedad del suelo presenta pudrición y aumenta el ataque de termitas y otros insectos; por ello no deben utilizarse como cimiento por enterramiento a menos que se trate previamente.
- El **bambú** una vez cortado es atacado por insectos como *Dinoderus minutus* que construye grandes galerías en su pared debilitándolo. Por ello, una vez cortado debe someterse inmediatamente a tratamientos de curado y secado.
- El **bambú** es un material altamente combustible cuando está seco; por ello debe recubrirse con una sustancia o material a prueba de **fuego**.
- El **bambú** cuando envejece pierde su resistencia si no se trata apropiadamente.
- El **bambú** no tiene diámetro igual en toda su longitud, tampoco es constante el espesor de la pared por lo que algunas veces presentan dificultades en la construcción.
- El **bambú** al secarse se contrae y se reduce su diámetro; esto tiene implicaciones en la construcción.
- Las uniones de miembros estructurales no pueden hacerse a base de empalmes, como en la madera, lo que implica dificultades como material de

construcción.

- El **bambú** por su tendencia a rajarse no debe clavarse con puntillas o clavos que generalmente se emplean en la madera.

Conclusiones sobre el caso práctico de la vuelta de bambú:

- Sabiendo que la mejor propiedad mecánica que posee el bambú es su alta resistencia a la tensión paralela a la fibra (200-300 N/mm2) , en nuestro método numérico no soporta tensiones superiores a los 100 N/mm2. No logrando transmitirlas al terreno y flechando en demasía (hasta 60cm. en X y 35 en Y)

- Las fisuras de retracción están vinculadas al fenómeno del agrietamiento superficial a que son más o menos propensas todas las especies de bambú durante el secado. Por lo general las grietas o rajaduras en la superficie se presentan cuando los esfuerzos que se crean durante el secado exceden a la resistencia del bambú a tensión perpendicular a la fibra (como hemos visto en el análisis numérico). Por ésta razón, la tendencia que el bambú tiene a rajarse limita el uso de clavos o clivajes para asegurar las uniones (en nuestro caso usamos bridas plasticas).

- El esfuerzo final de flexión de la bambusa angustifolia es de 73N/mm2 (Tabla 9). En nuestro estudio viendo el gráfico de flexiones vemos como no soporta más de 69 N/mm deformándose a medida que el esfuerzo aumenta. Este valor es muy importante ya que la principal acción del bambú en esta vuelta es trabajar a flexión.

- La poca exactitud existente para valorar el modulo de elasticidad E del bambú (lo hemos valorado del orden de 17900 kg/cm2) hace que los resultados no tengan la fiabilidad deseada. Los valores de E varían desde 17900 kg/cm2 (Janssen 1982) hasta los 100000kg/cm2 (Dunkelberg 1985).

- La vuelta se deforma y no cumple estructuralmente pero en la realidad está soportando todas las acciones, de forma que por sus propiedades físico-mecánicas, está cumpliendo mínimamente un grado de equilibrio para estar en pie.

En cuanto al estudio de la vuelta por el método del polígono funicular:

- El arco sólo trabaja a compresión eliminando toda flexión durante el proceso de cálculo, para obtener el bulbo de presión.

- Las tierras estabilizadas (gunitado) soportan todas las cargas a compresión. El entramado de bambú actúa como encofrado perdido al no poder soportar los pesos a compresión, pero si es tenido en cuenta en los zonas demarcadas donde las tierras estabilizadas pueden estar trabajando a flexión, estos puntos son reforzado con doble entramado de bambú.

- La forma de nuestro arco, por su relación ancho-luz, y su altura, ayuda a la distribución de tensiones al suelo.

- Las zonas de empotramiento del bambú con los zunchos, por su mayor verticalidad, son zonas no favorables para el cumplimiento del bulbo de presión debido a su verticalidad.

- Las cargas repartidas uniformemente y con el mismo peso, en el arco cumplen el bulbo de presión y no modifican la resultante, pero si las cargas son puntuales y en las zonas mas desfavorables (coronamiento del arco), generan reacciones a flexión que hace que la resultantes salgan del tercio central .

- Al colocar las cargas puntuales generan una flexión, que en nuestro caso buscamos que las asuma el bambú en las zonas reforzadas.

- Este estudio es una base, una pauta en la que los resultados son negativos estructural y numéricamente para el bambú. Estamos convencidos que seguramente generándose más estudios del comportamiento del bambú y la tierra estabilizada, con valores mejorados, ensayos y pruebas de laboratorio, se lograrán obtener mayores posibilidades constructivas del material avanzando día a día hacia nuevos conocimientos.

- El objetivo en un futuro es obtener datos más específicos que los nuestros, para que las estructuras de bambú con tierra estabilizada puedan tener más rendimiento aprovechando sus propiedades mecánicas y que los valores de los métodos de cálculo se asemejen más a la realidad.

9-LISTADO DE ILUSTRACIONES-GLOSARIO-BIBLIOGRAFIA

Listado de fotografías, tablas, figuras e imágenes.

9.1 Ilustraciones interiores

Foto 1	Cultivo de guadua en Quindio (Colombia).	12
Foto 2	Pruebas de laboratorio para medición de un tipo de guadua.	14
Foto 3	Detalle Bambú negro.	14
Foto 4	Gráfico de una plántula de guadua angustifolia.	15
Foto 5	Cultivo de guadua en la zona cafetera de Colombia.	16
Foto 6	Bosques de bambú en Japón.	17
Foto 7	Aporte de biomasa de la guadua al suelo.	18
Foto 8	Raíz de guadua en el centro nacional para el estudio del bambú.	21
Foto 9	Cultivo y transporte de guadua en Colombia.	23
Foto 10	Cultivo tecnificado de guadua en el centro nacional del bambú (Colombia).	24
Foto 11	Culmo de guadua recién cortado.	25
Foto 12	Cultivo de guadua Montenegro- Quindio.	26
Foto 13	Plano de zonas aptas para el cultivo de bambú en el mundo.	27
Foto 14	Conformación de un culmo de guadua.	28
Foto 15	Resistencia de la guadua a compresión.	31
Foto 16	Resistencia de la guadua a flexión.	32
Foto 17	Aerofotografía de cultivo tecnificado de guadua.	32
Foto 18	Savia que sale de la guadua verde o “viche”.	33
Foto 19	Características típicas de la guadua Joven.	36
Foto 20	Guadua sobremadura.	37
Foto 21	Guadua Madura “hecha”.	37
Foto 22	Suelo de bosque de guadual en la región cafetera del Once Caldas (Colombia).	39
Foto 23	Plántula de guadua.	50
Foto 24	Trazado para el establecimiento de un guadual distancia 4 X 4.	51
Foto 25	Trazado para el establecimiento de un guadual distancia 4 X 4.	52
Foto 26	Estructura Madera y guadua. Simón Vélez . Construcción típica para el secado del café.	54
Foto 27	Casa en la Calera (Colombia) Simón Vélez.	55

Foto 28	Puente actual de bambú guadua en Colombia de Jörg Stamm.	89
Foto 29	Puente de bambú guadua en Costa Rica.	*94*
Foto 30	Unión del bambú con madera.	97
Foto 31	Unión del bambú cónica.	97
Foto 32	Unión con platina.	97
Foto 33	Unión con concreto.	97
Foto 34	Unión con platina 2º	97
Foto 35	Unión con tornillos.	97
Foto 36	Mapa ubicación del municipio donde se realiza el estudio práctico.	132
Foto 37	Formación de los muros de carga de bloque de hormigón.	133
Foto 38	Detalle formación muro perimetral lateral para empotramiento del bambú.	133
Foto 39	Detalle de las capas de impermeabilización del muro en contacto con el terreno.	134
Foto 40	Vista posterior del muro de coronación de la vuelta de bambú.	134
Foto 41	Hormigonado interior de los muros perimetrales de empotramiento de la vuelta de bambú.	135
Foto 42	Formación del entramado de bambú empotrado a su perímetro.	135
Foto 43	Detalle de anclaje a muro perimetral con refuerzo horizontal para soportar los empujes de la vuelta. Las uniones se realizan con bridas de plástico reforzándolas en puntos conflictivos.	138
Foto 44	Refuerzo de la zona inferior de la vuelta de bambusa guadua con ∅ 20mm cada 20cm. de forma horizontal.	138
Foto 45	Detalle de entrega de las armaduras de bambú guadua en las esquinas de los muros.	139
Foto 46	Formación de la puerta de entrada. Efectuada una vez arriostrado todo el entramado al perímetro.	139
Foto 47	Detalle de unión del entramado de bambú guadua con el perímetro una vez hormigonado.	140
Foto 48	Recepción en obra de las mallas de tela de gallinero.	140
Foto 49	Colocación del doblado de malla de gallinero por su cara inferior al entramado de bambú.	141

Foto 50	Vista del andamiaje en el momento de preparación de los soportes para empezar a gunitar y formar la vuelta de bambú.	142
Foto 51	Detalle colocación de la malla de gallinero en uno de los muros laterales de la vuelta.	143
Foto 52	Formación artesanal del gunitado de paja, hormigón aislante, residuos de corcho, viruta de madera. El proyectado se efectuará con maquina gunitadora hacia la vuelta de bambú una vez colocadas las mallas de gallinero.	143
Foto 53	Detalle abertura de iluminación en la parte superior de la vuelta de bambú.	144
Foto 54	Detalle formación ventanales exteriores tipo Velux en la parte alta de la vuelta.	144
Foto 55	Detalle de la formación de los ventanales tipo Velux. Vista desde el interior de la vuelta.	145
Foto 56	Preparación máquina gunitadora donde se introducirán los materiales comentadas para extenderlos a presión sobre la vuelta de bambú.	145
Foto 57	Finalización del gunitado. Colocación de aberturas de ventilación sobre los lavamanos con piezas cerámicas en los agujeros de 20 x 20cm.	146
Foto 58	Colocación lámina impermeabilizante en la superficie de la vuelta ya formada.	147
Foto 59	Detalle colocación de la impermeabilización encima de la losa de bambú entregándose con la ventana tipo Velux.	147
Foto 60	Vista lateral de la vuelta después de gunitar y colocar la lámina geotéxtil y la membrana impermeable para el posterior relleno de tierras.	148
Foto 61	Colocación cajones de polipropileno en la vuelta de bambú, sobre la lámina impermeabilizante.	148
Foto 62	Detalle de las capas que conforman la cubierta. Por orden, lámina impermeabilizante, huevera de polipropileno y lámina geotéxtil. Preparada para recibir tierras y vegetación encima.	149
Foto 63	Finalización de colocación de los ventalanes tipo Velux en la vuelta de bambú.	149
Foto 64	Detalle microfisuras de retracción producidas con el tiempo después del gunitado en la vuelta.	150

Foto 65	Colocación conductos evacuación aguas grises y negras bajo solera de hormigón.	150
Foto 66	Colocación suelo radiante bajo pavimento final de la vuelta de bambú.	151
Foto 67	Detalle del paso de instalaciones entre el muro perimetral y el tabique interior cerámico (e=4cm).	151
Foto 68	Formación tabique interior para paso instalaciones.	152
Foto 69	Momento de relleno de las tierras para vegetación sobre la vuelta de bambú.	152
Foto 70	Vista lateral de la vuelta terminada.	153
Foto 71	Vista superior de la vuelta finalizada. La vegetación al crecer envolverá la construcción dejando una imagen parecida a una cueva.	153
Foto 72	Vista del interior de la vuelta en fase de acabados.	154
Foto 73	Prueba de carga efectuada a una vuelta gunitada a escala de la real, este modelo se le colocó 20kg/m2.	155
Foto 74	Modelo de prueba que demostró repartir bien las cargas y no generó ninguna micro-fisura.	155
Foto 75	Carga puntual de 6 sacos de 210 kg/ 0,16m2 a la vuelta real.	156
Foto 76	Pruebas de carga efectuada por el constructor de la obra.	*156*

9.2 Tablas

Tabla 1	Módulo de elasticidad a solicitaciones externas en bambú.	29
Tabla 2	Resistencia a tracción, compresión y flexión de bambú y otras maderas.	*30*
Tabla 3	Energía de tensión acumulada: hormigón, acero, madera y bambú.	58
Tabla 4	Eficiencia: hormigón, acero, madera, bambú.	58
Tabla 5	Comparación eficiencia hormigón, acero, madera y bambú en hipotético puente de luz corta (3m.)	59
Tabla 6	Esfuerzos de tensión en culmos y secciones o láminas (Dunkelberg 1985)	61

Tabla 7	Esfuerzo de compresión en culmos y varas (Dunkelberg, 1985)	62
Tabla 8	Cargas de trabajo máximas, según luces para guadua angustifolia.	*63*
Tabla 9	Posición del esfuerzo a lo largo del culmo. (Janssen, 1981)	65
Tabla 10	Resultados Módulo de Elasticidad por Edad de la Guadua.	73
Tabla. 11	Resultados Módulo de Elasticidad por Tramo de la Guadua y Ambiente.	73
Tabla 12	Resultados MOR (N/mm2) por Ambiente	74
Tabla. 13	Resultados MOR (N/mm^2) por Edad de la Guadua	74
Tabla 14	Esfuerzo último para elementos de Guadua angustifolia Kunth sometidos a tensión paralela al grano.	80
Tabla 15	Esfuerzo último.	82
Tabla 16	Resistencia de elementos de Guadua angustifolia Kunth sometidos a cizalladura.	82
Tabla 17	Resistencia al clivaje para algunas especies de gran porte (Urrutia,1983)	83
Tabla 18	Módulo de elasticidad en compresión para algunas especies de gran porte con nudo y sin nudo (Urrutia, 1983)	84
Tabla 19	Módulo de elasticidad en tensión para algunas especies de gran porte (Urrutia, 1983).	84
Tabla 20	Resistencia y módulo de elasticidad a la tensión en la zona del nudo.	85
Tabla 21	Resistencia y módulo de elasticidad a la compresión.	85
Tabla 22	Resistencia y módulo de elasticidad a la flexión.	85

9.3 Figuras

Figura 1	Curva esfuerzo – deformación.	67
Figura 2	Esquema probeta para prueba de flexión y sitio de extracción en la Guadua.	71
Figura 3	Esfuerzo último a tensión obtenido para Guadua Angustifolia Kunth.	81
Figura 4	Ensayo de flexión de una probeta de Guadua.	72

Imágenes de RISA 3D

Imagen 1	Entrada en formato .dxf de la vuelta con el entramado de bambú al programa RISA 3D.	160
Imagen 2	Vuelta en el eje ISO con todos los nudos visibles en verde.	160
Imagen 3	Selección de unidades.	161
Imagen 4	Selección del grado de empotramiento de los muros perimetrales.	162
Imagen 5	Definición de los nudos empotrados de la vuelta de bambú.	163
Imagen 6	Vista final de la formación del empotramiento de los nudos con los muros de carga.	163
Imagen 7	Introducción del módulo de elasticidad y la densidad del bambú.	165
Imagen 8	Asignar la sección directamente con los valores introducidos del material.	165
Imagen 9	Introducción ∅ exterior e interior de las barras de la estructura de la vuelta.	166
Imagen 10	Información de propiedades físico-mecánicas de las barras que conforman. la armadura.	166
Imagen 11	Cargas del peso propio de la vuelta gunitada.	169
Imagen 12	Introducción de cargas puntuales en cada nudo para el peso de la vuelta gunitada.	169
Imagen 13	Cargas del peso de las tierras y vegetación encima de la vuelta.	170
Imagen 14	Introducción de cargas puntuales en cada nudo para el peso de las tierras. superiores.	170
Imagen 15	Vista lateral de los nudos para aplicarle las cargas permanentes y variables.	171
Imagen 16	Introducción de las cargas en Basic Load Case.	171
Imagen 17	Cargas de tierra laterales a la vuelta.	172
Imagen 18	Mapa estatal de velocidad básica del viento (m/s) C.T.E.	173
Imagen 19	Cargas variables de viento.	175
Imagen 20	Introducción carga de nieve en el programa informático.	176
Imagen 21	Cargas de nieve aplicadas a la vuelta.	177
Imagen 22	Introducción en LC (Load Case) de la hipótesis de cálculo 1.	178

Imagen 23	“Deflection diagram” del peso propio de la vuelta.	179
Imagen 24	Reacciones en las uniones en los 3 ejes después de aplicar la carga de la losa. Eje Y remarcado.	180
Imagen 25	Flechas en las uniones en los 3 ejes después de aplicar la carga de la losa. Eje Y remarcado.	181
Imagen 26	Puntos de la vuelta con más flecha después de aplicar la carga propia de la losa.	181
Imagen 27	Introducción en “Load Case” de hipótesis de cálculo 2.	182
Imagen 28	Solicitar al programa que calcule las deformaciones y reacciones de la hipótesis 2.	182
Imagen 29	“Deflection diagram” del peso propio de la vuelta y las tierras con vegetación.	183
Imagen 30	Reacciones en las uniones en los 3 ejes después de aplicar la cargas de la losa y las tierras. Eje Y remarcado.	183
Imagen 31	Flechas en las uniones en los 3 ejes después de aplicar la carga de la losa. Eje Y remarcado.	184
Imagen 32	“Deflection diagram” de todas las cargas aplicables a la vuelta. Permanentes y variables.	185
Imagen 33	Solicitar al programa que calcule las deformaciones y reacciones de la hipótesis 2.	186
Imagen 34	Vista 3D de la deformación del entramado al entrar todas las cargas.	186
Imagen 35	Flechas en las uniones en los 3 ejes después de aplicar todas las cargas, permanentes y variables.	187
Imagen 36	Reacciones en los nudos inferiores en el eje Y.	189
Imagen 37	Reacciones en los nudos inferiores eje X.	190
Imagen 38	Diagrama de tensiones	190
Imagen 39	Diagrama de compresiones.	191
Imagen 40	Diagramas de esfuerzos en nudos de compresión máxima (rojo).	192
Imagen 41	Diagrama de momentos torsores.	193
Imagen 42	Tabla de esfuerzos torsores máximos en las barras.	194
Imagen 43	Fuerzas máximas aplicadas a las barras.	194
Imagen 44	Vista en 3D del entramado de nuestro modelo numérico.	195

9.5 GLOSARIO TÉCNICO PARA EFIFICACIONES DE CAñA DE BAMBÚ.

- **Acabado:** Estado final, natural o artificial, en la superficie de una pieza de madera o guadua. Estado final del recubrimiento o del revoque.
- **Acción conjunta:** Participación de varios elementos estructurales con separación no mayor a 60 cm. para soportar una carga o sistema de cargas.
- **Aserrado:** Proceso mediante el cual se corta una troza para obtener piezas de madera de sección transversal cuadrada o rectangular.
- **Carrera:** Solera superior que corona una estructura de muros. Vigas de amarre.
- **Carga de servicio:** Sistema ortogonal de vigas que transfieren las cargas de las curvas estructurales al suelo. Malla o retícula.
- **Columna:** Piezas cuyo trabajo principal es la compresión.
- **Contracción:** Reducción de las dimensiones de una pieza de madera causada por la disminución del contenido de humedad.
- **Correa:** Elemento horizontal componente de la estructura de la cubierta.
- **Diafragma:** Elemento estructural que reparte las fuerzas inerciales laterales a los elementos verticales del sistema de resistencia sísmica, o sea, a los muros.
- **Distancia centro a centro:** Distancia del centro de un elemento de unión al centro del elemento adyacente.
- **Entramado:** Sistema estructural primario de una edificación.
- **Fibra:** Células alargadas con extremos puntiagudos y casi siempre con paredes gruesas.
- **Hinchamiento:** Aumento de las dimensiones de una pieza por causa del incremento de su contenido de humedad.
- **Losa - base:** Elemento de concreto o mortero con arena o grava colocado sobre material de afirmado y que sirve de sustento al piso.
- **Madera y/o guadua tratada:** Bambú al que se le han aplicado tratamientos específicos antihongos o para aumentar sus propiedades físico-mecánicas.
- **Malla expandida:** Malla que no se basa en tejer o soldar alambres sino que resulta de expandir una lámina metálica troquelada.
- **Muro:** Elemento vertical que soporta los diafragmas horizontales y transfieren cargas a las cimentaciones.
- **Pie de amigo:** Elementos oblicuos que transfieren cargas a los elementos verticales.
- **Pie derecho:** Elemento vegetal en posición vertical de la estructura de un muro.

- **Preservación:** Tratamiento para prevenir o contrarrestar la acción de organismos destructores.
- **Recebo:** Material granular seleccionada de relleno que se coloca entre el afirmado y la superficie de piso.
- **Retiro:** Espacio obligatorio entre construcción y el límite del lote o entre dos construcciones.
- **Recubrimiento:** Material que conforma las caras de un muro.
- **Riostra:** Pieza que asegura la invariabilidad de la forma de una estructura.
- **Revoque:** (Repello-Pañete-Enlucido) Capa exterior construida con base en mortero, y que se aplica en la superficie de un muro.
- **Rolliza:** Estado cilíndrico natural de los tallos de guadua o madera.
- **Secado:** Proceso natural o artificial mediante el cual se reduce el contenido de humedad de la madera o guadua.
- **Solera:** Elemento horizontal que sirve de base a la estructura de un muro e integra las cargas de los pies derechos.
- **Vigueta:** Elemento secundario que trabaja a flexión.
- **Viga:** Elemento cuyo trabajo principal es a flexión.

9.6 BIBLIOGRAFIA

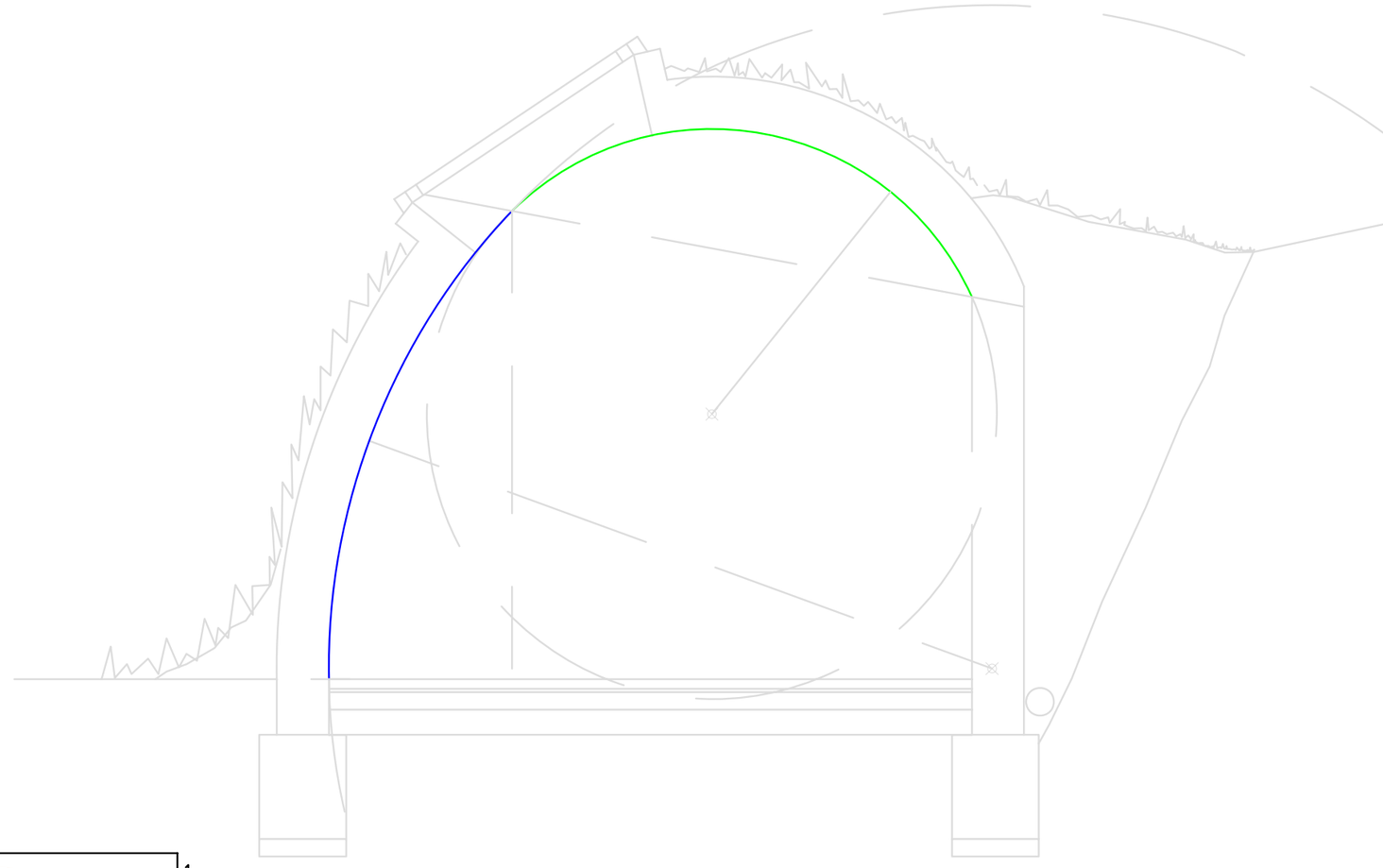
- **Dunkelberg Klaus** (1985): *Bambus* – Institut Leichte Flachentragwerke (IL) – Universitat Stuttgart.
- **Engel Heinrich** (1970): *Sistemas de Estructuras* – Editorial Blume- España.
- **Hidalgo López Oscar**: *Bambu-* - Estudios Técnicos Colombianos - Sta. Fe de Bogotá.
- **Saleme Horacio, Comoglio Susana y José Méndez Muñoz** (1998) *Teaching Architecture with Bamboo* –
- Anales del V Congreso Internacional del Bambú - San José de Costa Rica.
- **Saleme Horacio** (1995): *El Proyecto Bambú de la Universidad Nacional de Tucumán* - Anales del V Encuentro Brasileño en Maderas y Estructuras de Madera - Belo Horizonte – Brasil.
- **Siegel Curt** (1966) : *Formas Estructurales de la Arquitectura Moderna* – Compañía Editorial Continental S. A. – México.
- **Villegas Marcelo** (1989): *Bambusa Guadua* – Villegas Editores - Sta. Fe de Bogotá – ISBN 958-91
- **Susana Comoglio, Horacio Saleme y José Méndez Muñoz** (2000) - *Tucumán Educación y Sismo* **– cet**
- Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería – UNT - Nº 18.
- **Susana Comoglio, Horacio Saleme y J. Méndez Muñoz** (1999) – Formas Estructurales de Bambú – **cet**
- Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería – UNT - Nº 16.
- **Susana Comoglio, José Méndez Muñoz y María F. Sabaté** (2001) - *Una Respuesta Arquitectónica y Tecnológica adecuada al medio Rural* – Revista **cet** Nº 19. UNT.
- **Susana Comoglio, José Méndez Muñoz** (2004) **-** *Arquitectura y Diseño Estructural – La Enseñanza del Diseño Estructural desde un Taller Experimental* **–** Revista A y C. Arquitectura y Construcción. Nº 9.
- **Susana Comoglio, José Méndez Muñoz y Arturo Terán Navarro** (2004) - *El Método Experimental en el Estudio de la Configuración Sismorresistente* – Rev. **cet** Nº 25. UNT.

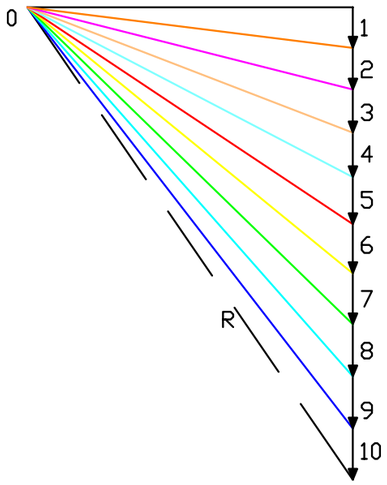
- **Hidalgo, L.O.** 1978. Nuevas técnicas de construcción con bambú. Estudios Técnicos Colombianos Ltda. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. p:26-137.
- **Janssen, J.J.A.** 1980. The mechanical properties of bamboo used in construction. Eindhoven University of Technology, Netherlands. *In*: Proceedings: Bamboo Research in Asia. IDRC- IUFRO. p:173-188.
- **Janssen, J.J.A**. 1981. The relationship between the mechanical properties and biological and chemical composition of bamboo. Eindhoven University of Technology, Netherland. Proceedings of Congress Group 5.3. Production and Utilization of Bamboo and Related Species. XVII IUFRO World.
- **Janssen, Jules J**. 1998 Building with bamboo a handbook. Holanda: Intermediate technology publications.
- **Jayanetti, D.L**. 1975. Some methods of preservative treatment of bamboo. The Sri Lanka Forester, Vol. 12(2):101-103.
- **Liese, Walter**. 1986. Characterization and utilization of bamboo. University of Hamburg, FRG. *In*: Proceedings of project group P 5.04. Production and utilization of bamboo and related Species. XVIII IUFRO World Congress. Ljubljana, Yugoslavia. p:11- 16.
- **Liese, Walter**. Bamboo: biology, silvics, properties, utilization. GTZ. Eschborn, 1985.
- **Mejía S., Ma. T. y G. Castillo C**. 1987. El Bambú. INIREB Informa. Comunicado No. 81. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Xalapa, Ver. México. 4 p.
- **Mohmod, A.L.., Amin, A.H., Kasim, J. y Jusuh, M.Z**. 1993. Effects of anatomical characteristics on the physical and mechanical properties of *Bambusa blumeana*. Journal of Tropical Forest Science 6(2):159-170. Forest Research Institute of Malaysia.
- **Espiloy, Z.B**. 1971. Some properties and uses of bamboos. Technical Note No. 109, Forest Products Research and Industries Development Comission. National Science Development Borrad College. Filipinas.
- **Grover, P.N**. 1957. Preservation of bamboos by modified Boucherie process. Journal of Timber Dryers. Vol. III(3):16-23.
- **Cruz, R.H.** 1994. La Guadua: Nuestro bambú. Corporación Autónoma Regional del Quindio. Centro Nacional para el Estudio del Bambú-Guadua. Colombia. 293 p.
- **HE INTERNATIONAL NETWORK FOR BAMBOO AND RATTAN**. Inbar standart for determination of physical and mechanical properties of bamboo. INBAR., 1999

- **Churtichaga** jose María, “La estructura veloz. Trayectorias estructurales a propósito de la obra de Emilio Piñero y Félix Candela”, dentro de Candela Pérez Piñero nº3 Arquitecturas Ausentes. Ministerio de Vivienda, 2004, pag 133
- **Gordon** J.E. Estructuras, Calamar Ed 2004, pag 144
- **Otto** Frei, RASCH Bodo, Finding form. Toward an architecture of the minimal. Ed Axel Menges,1995 pag 152 OTTO Frei, RASCH Bodo, Finding form. Toward an architecture of the minimal. Ed Axel Menges,1995 pag 152
- **Huerta** Santiago, Mechanics of masonry vaults: the equilibrium approach, publicado en Actas del Congreso Historical Construction 2001. 3er Seminario Internacional, Guimaraes, Un Minho, nov 2001. pag 57
- **Gordon** J.E. Estructuras, op cit, pag 167.
- **Beukers** Adriaan, Lightness The inevitable renaissance of minimum energy structures 010 1998. pag 73.
- **Pallasmaa** Juhani, Animales arquitectos. Op cit pag 17
- **RISA 3D 5.5** Copyright 2005 Risa Technologies

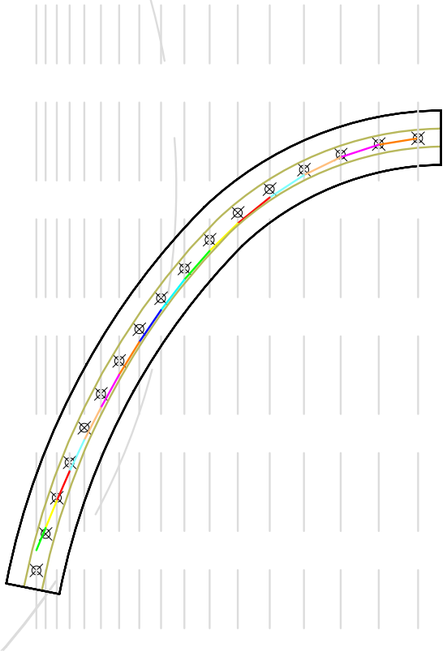
10. ANEXOS

METODO GRAFICO DEL POLIGONO FUNICULAR



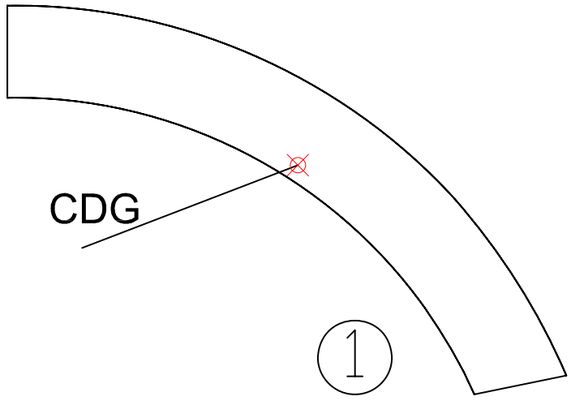


Analizaremos el porque de la forma adoptada en la vuelta de bambu, segun el procedimiento del poligono funicular, sacando conclusiones de acuerdo al estado de cargas adoptadas.

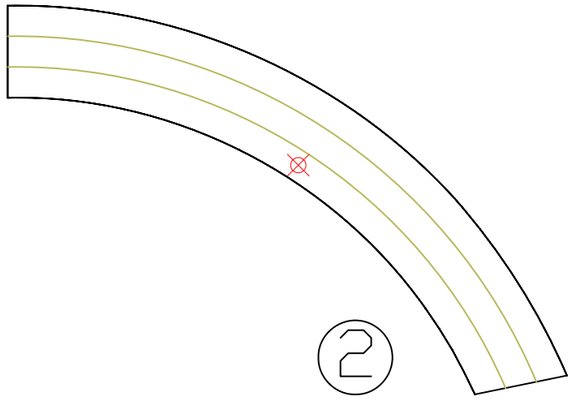


PROYECTO: BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA		
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA	UBICACION Maçanet De La Selva
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR	Método Gráfico del Polígono Funicular	1

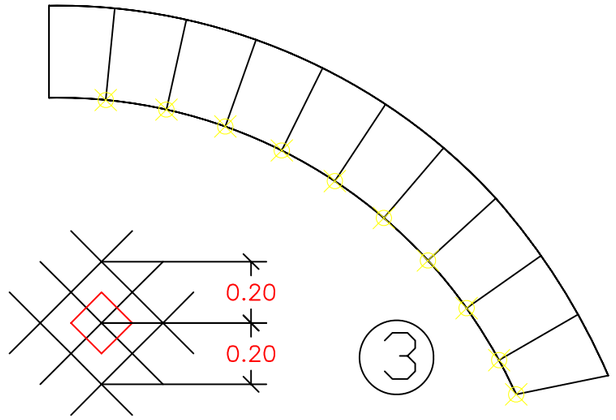
PRINCIPIOS DE CALCULO



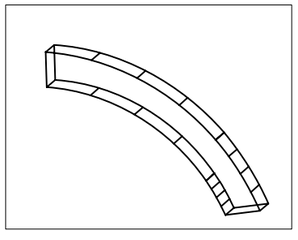
1. Como ejemplo práctico tomaremos la sección en vertical de un grosor de 20cm (distancia estipulada por el área del nudo del entramado) y buscaremos su centro de gravedad

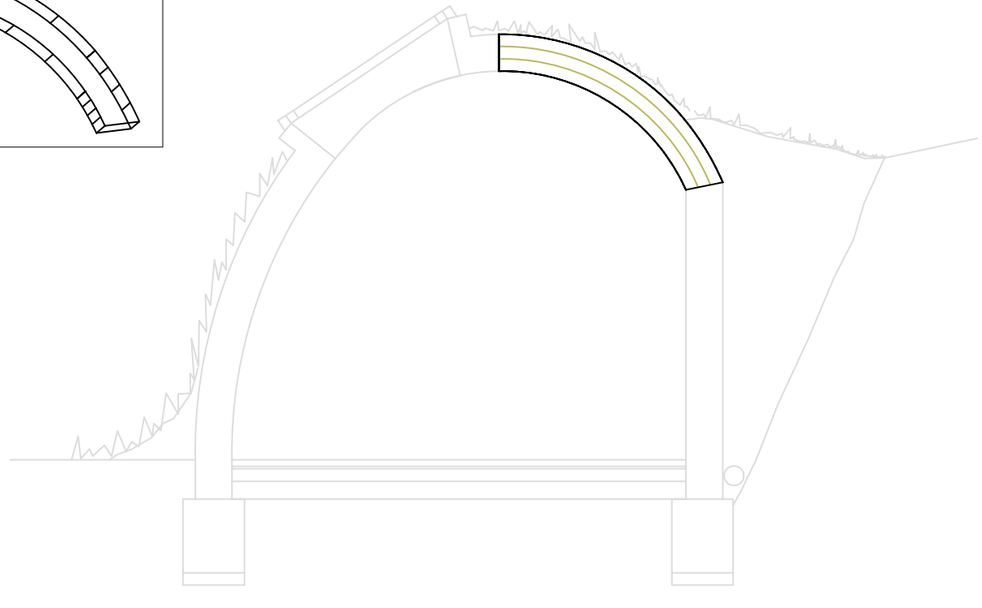


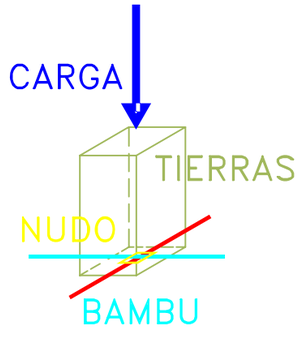
2- Dividimos el arco en tres tercios, los cuales nos servirán para comprobar el cálculo del bulbo de presiones.

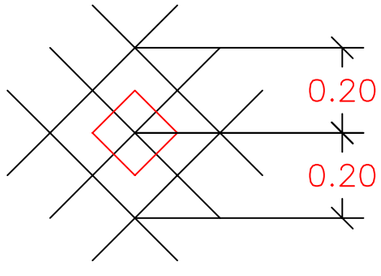


3-Dividimos estos segmentos, teniendo en cuenta que deben ser cortos y preferentemente de igual longitud, en nuestro caso hemos tomado tramos de 20cm, tratando que coincida con el nudo del entramado de bambú.



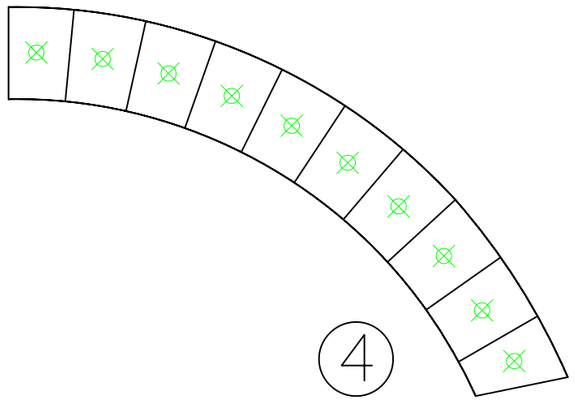




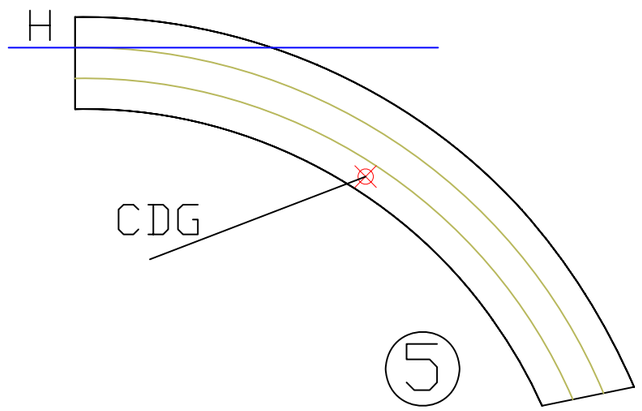


PROYECTO: BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA		
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA	UBICACION Maçanet De La Selva
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR	Método Gráfico del Polígono Funicular	2

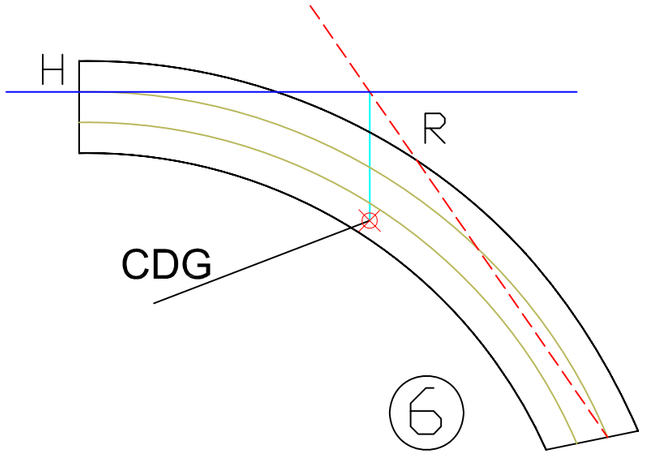
PRINCIPIOS DE CALCULO



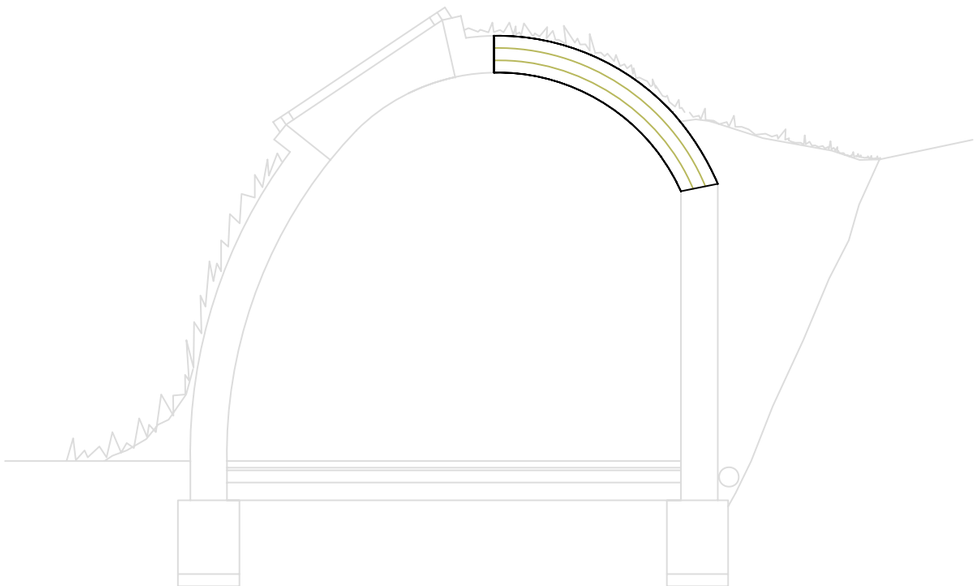
4- Buscamos el centro de gravedad por cada tramo dividido, de los cuales también tendremos que calcular sus pesos.



5- Realización de una horizontal que pasa por el primer tercio central.



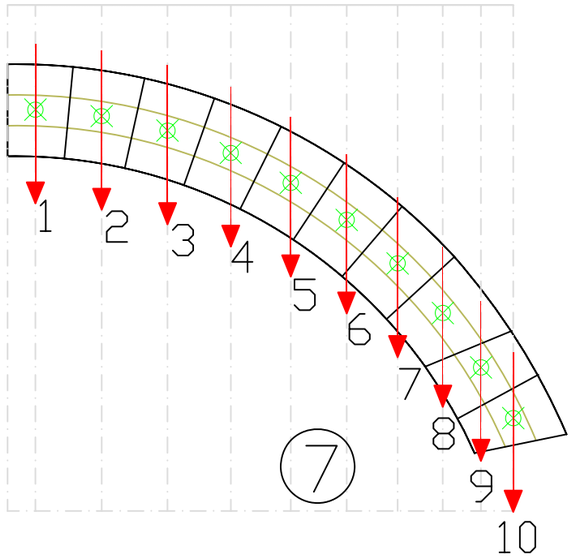
6- Trazar la resultante (R) que parte del primer tercio central y la vertical del centro de gravedad.

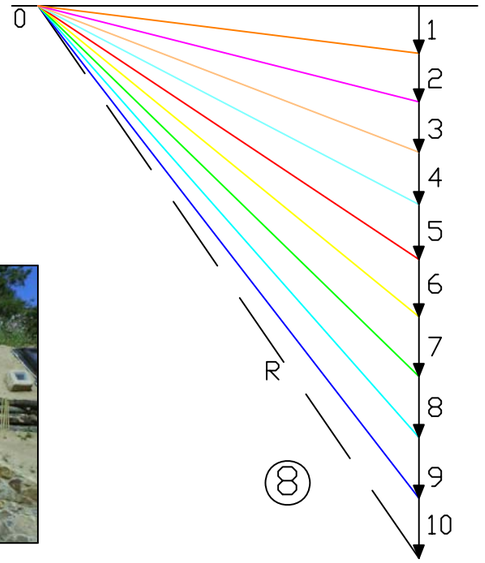


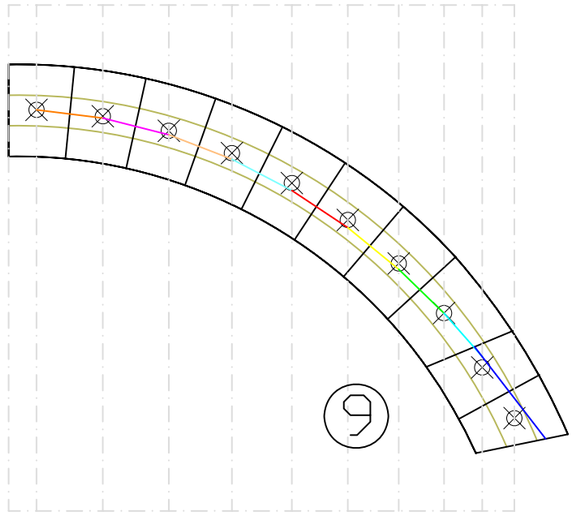
La intensidad del empuje horizontal tiene que ser evaluada para comenzar el estudio. R es el componente horizontal de la línea de empuje, y se grafica con una horizontal sobre la cima del arco y representa el equilibrio de la segunda mitad del arco.

PROYECTO: BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA			
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA	UBICACION Maçanet De La Selva	
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR		Método Gráfico del Polígono Funicular	3

PRINCIPIOS DE CALCULO





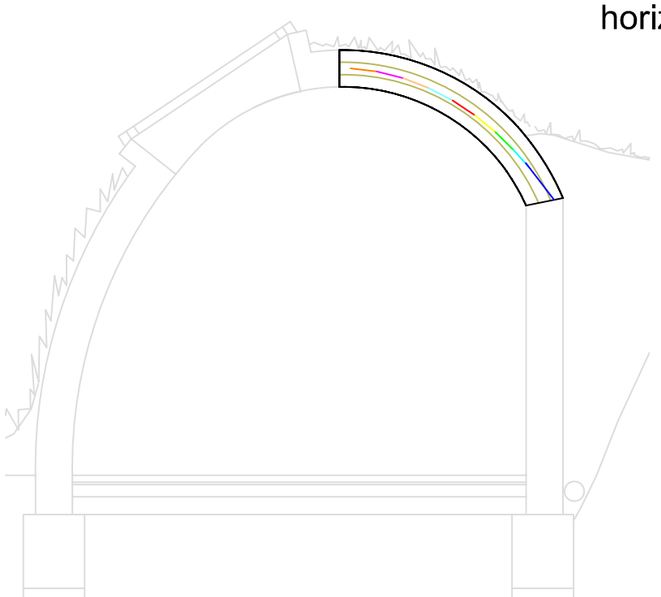


7- Cálculo por tramo de las cargas a la cuales se someterá el arco, incluido el peso propio de la losa, estas cargas pasaran por un eje ubicado en el centro de gravedad de cada tramo.

8- Ejecución del polígono funicular, el cual consiste en:
-Colocar verticalmente la sumatoria de todas las cargas
-Trazar una horizontal (H) al inicio de las cargas
-Reproducir la resultante obtenida anteriormente y trazarla desde el final de las cargas hasta el encuentro con la horizontal generando el punto (0)

En este paso queda representadas las resultantes por cada peso, que iran desde su punta de la carga hasta el encuentro de la horizontal con la resultante (0)

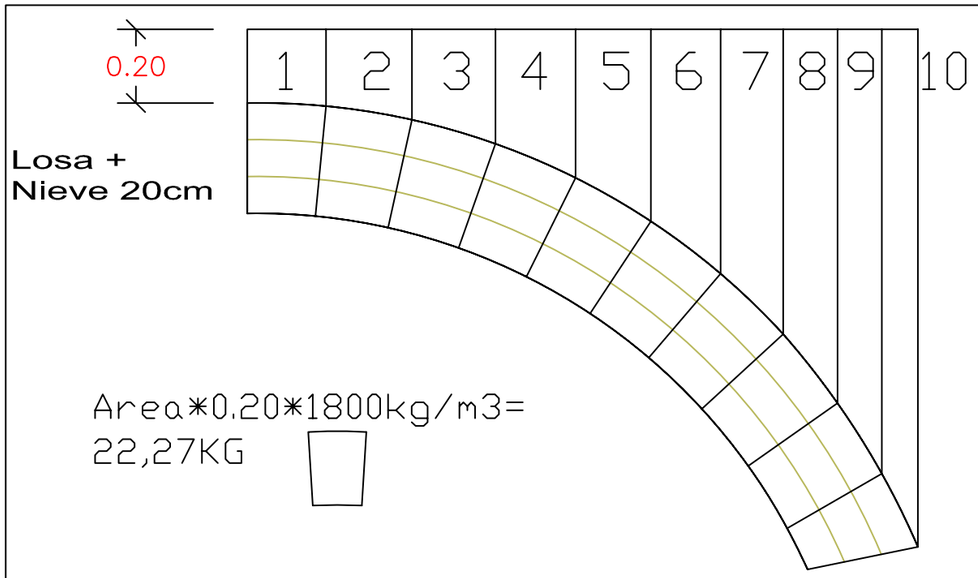
9- Colocación de las resultantes por tramo, su trayectoria iniciará parte en el primer tercio central superior hasta la vertical que pasa por el centro de gravedad del tramo siguiente, las siguientes resultantes consecutivas irán desde el punto de intersección de la anterior resultante con la vertical hasta la vertical del centro de gravedad del siguiente tramo.



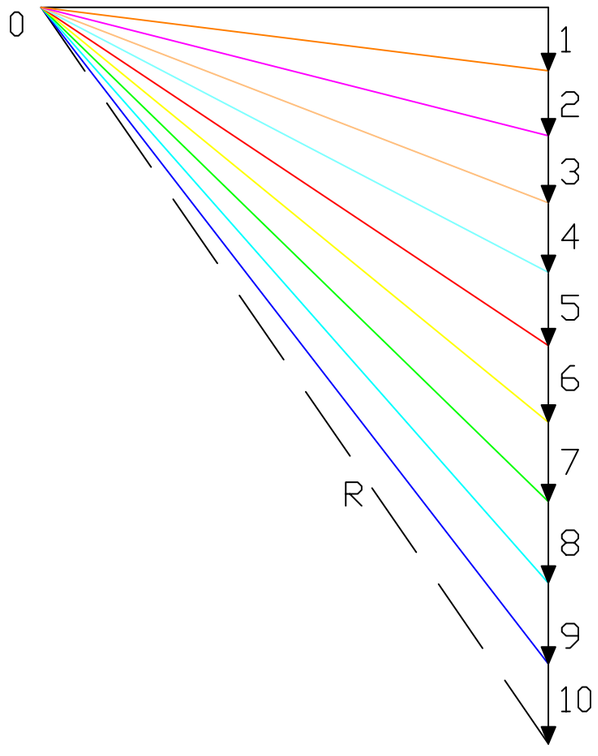
Las hipótesis de los tramos deben tenerse en cuenta las cargas que afectaran a la estructura y la geometría del arco teniendo siempre el principio de que un tramo que no este dentro del trazado puede hacer que genere variaciones en la resultante.

En los casos de que la resultante la resultante de las cargas quede fuera del núcleo de presión, se tendría que hacer las siguientes consideraciones:
-Replantear la vuelta según las cargas.
-Replantear la vuelta según la forma adoptada.
-Replantear la cargas que actúan en los diferentes puntos.
-Replantear el centro de gravedad.

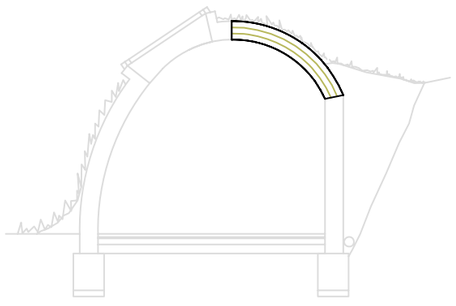
PROYECTO:	BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA		
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA	UBICACION Maçanet De La Selva	
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR		Método Gráfico del Polígono Funicular	4

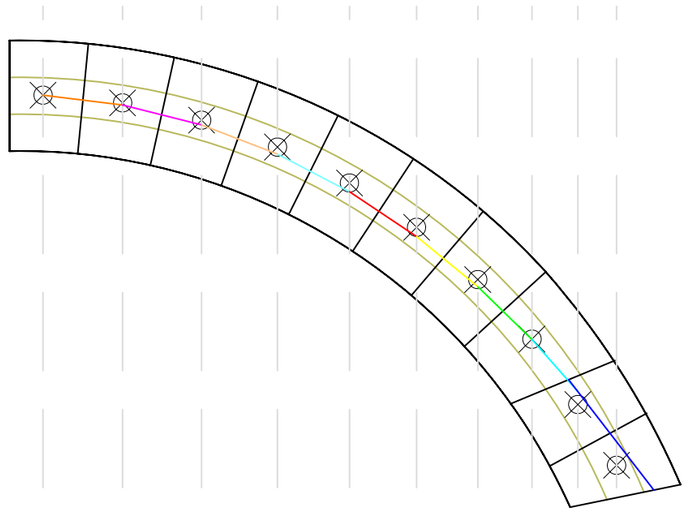


	Alzada	Perimetro	Volumen	D. Nieve	P.L. Kg	P.N. Kg	P.TOTAL kg
	m2	m	m3	400kg/m3	P. Losa	P. Nieve	PL+PN
1	0,0438	0,2	0,00876	400	22,27	3,504	25,774
2	0,0531	0,2	0,01062	400	22,27	4,248	26,518
3	0,0633	0,2	0,01266	400	22,27	5,064	27,334
4	0,0777	0,2	0,01554	400	22,27	6,216	28,486
5	0,0947	0,2	0,01894	400	22,27	7,576	29,846
6	0,1119	0,2	0,02238	400	22,27	8,952	31,222
7	0,1269	0,2	0,02538	400	22,27	10,152	32,422
8	0,1361	0,2	0,02722	400	22,27	10,888	33,158
9	0,134	0,2	0,0268	400	22,27	10,72	32,99
10	0,1282	0,2	0,02564	400	22,27	10,256	32,526



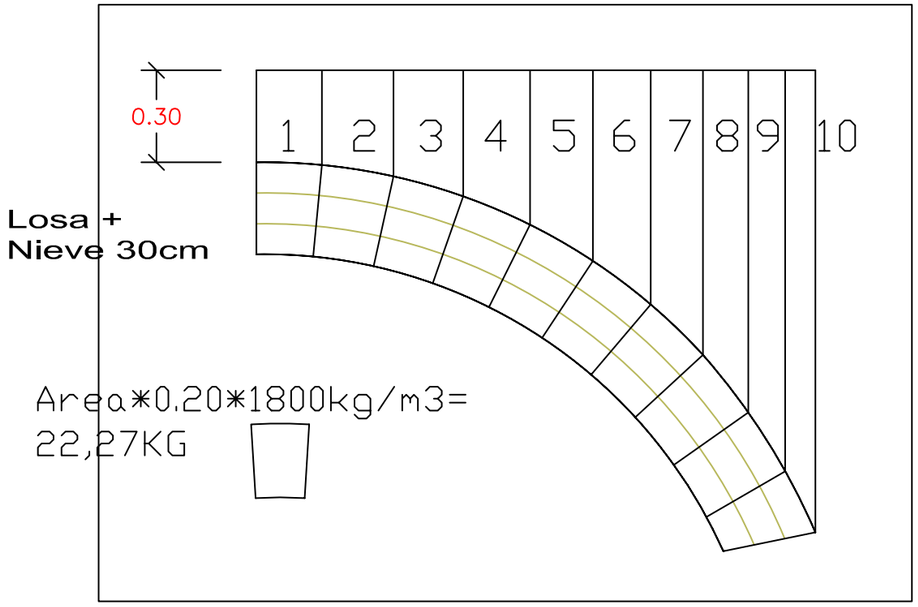
CARGA POR TRAMO
1- 25,774 Kg
2- 26,518 Kg
3- 27,334 Kg
4- 28,486 Kg
5- 29,846 Kg
6- 31,222 Kg
7- 32,422 Kg
8- 33,158 Kg
9- 32,990 Kg
10- 32,526 Kg



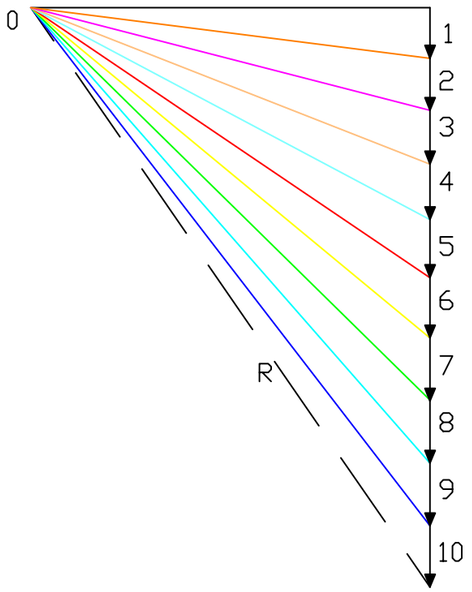


En esta hipótesis de calculo de peso de la losa + 20cm de nieve, nos muestra que la resultante de las cargas pasa por el tercio central, la carga es uniforme y la vuelta trabaja a compresión sin presentar en ningún punto desviación por flexión.

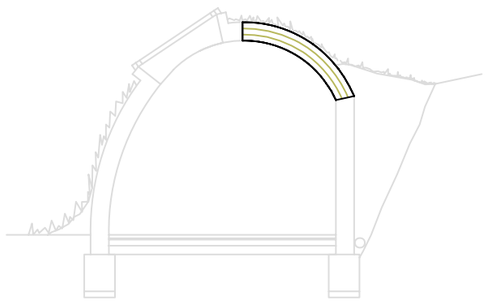
PROYECTO: BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA		
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA 1:20	UBICACION Maçanet De La Selva
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR	Método Gráfico del Polígono Funicular	5

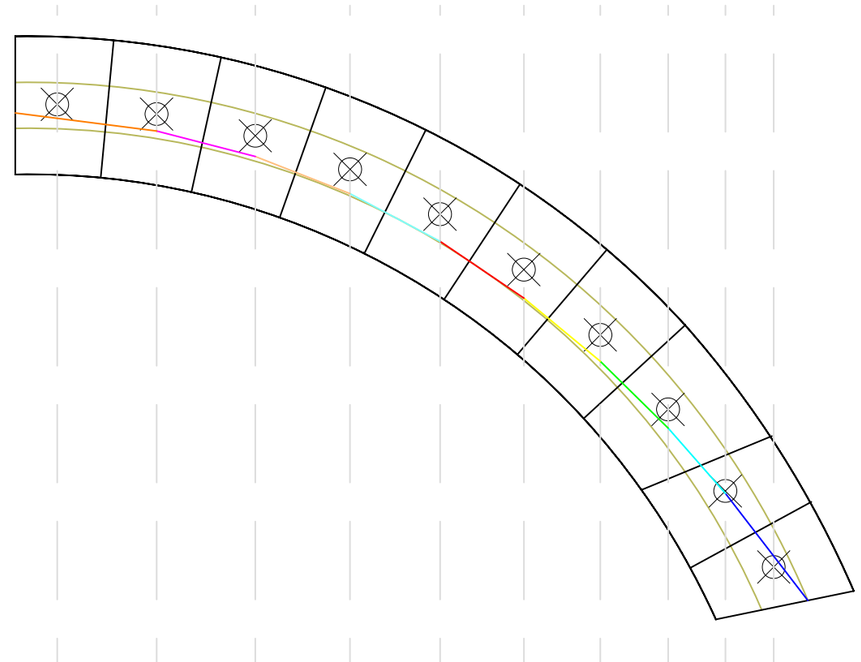


	Alzada	Perimetro	Volumen	D. Nieve	P.L. Kg	P.N. Kg	P.TOTAL kg
	m2	m	m3	400kg/m3	P. Losa	P. Nieve	PL+PN
1	0,0652	0,2	0,01304	400	5,216	22,27	27,486
2	0,0764	0,2	0,01528	400	6,112	22,27	28,382
3	0,086	0,2	0,0172	400	6,88	22,27	29,15
4	0,0995	0,2	0,0199	400	7,96	22,27	30,23
5	0,1152	0,2	0,02304	400	9,216	22,27	31,486
6	0,1308	0,2	0,02616	400	10,464	22,27	32,734
7	0,1439	0,2	0,02878	400	11,512	22,27	33,782
8	0,1508	0,2	0,03016	400	12,064	22,27	34,334
9	0,146	0,2	0,0292	400	11,68	22,27	33,95
10	0,138	0,2	0,0276	400	11,04	22,27	33,31



CARGA POR TRAMO
1- 27,486 Kg
2- 28,382 Kg
3- 29,150 Kg
4- 30,230 Kg
5- 31,486 Kg
6- 32,734 Kg
7- 33,782 Kg
8- 34,334 Kg
9- 33,950 Kg
10- 33,310 Kg

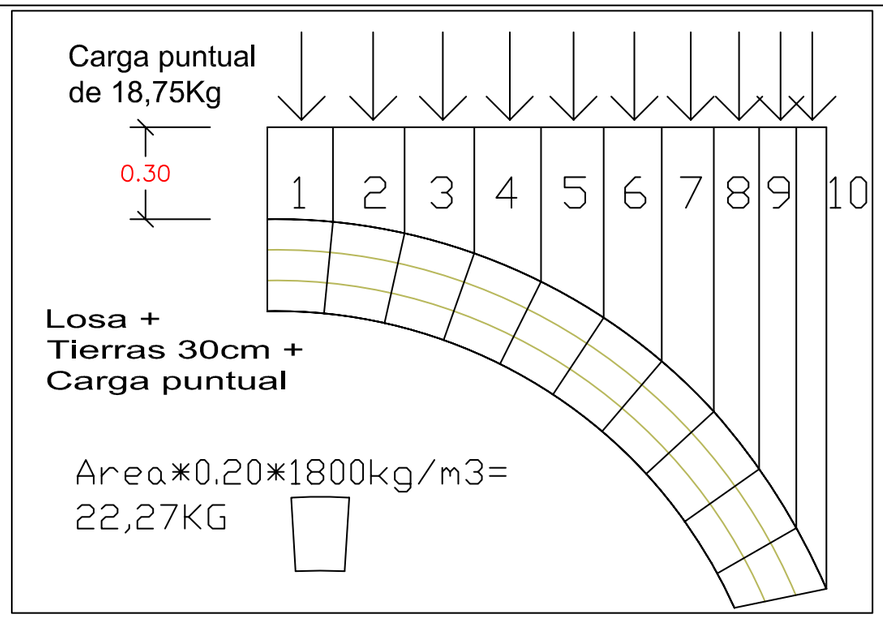




Hipótesis de calculo en fase de ejecución: Losa + Nieve 30cm

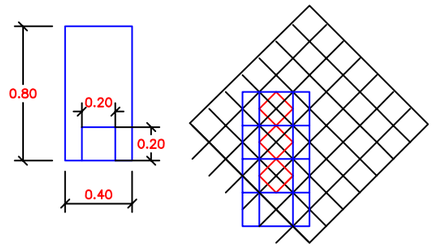
Al aumentar la carga de nieve, genera una leve desviación de la zona de compresión (El tercio central), la resultante tiende a dejar de trabajar a compresión aunque sigue estando en el margen de la línea de presión.

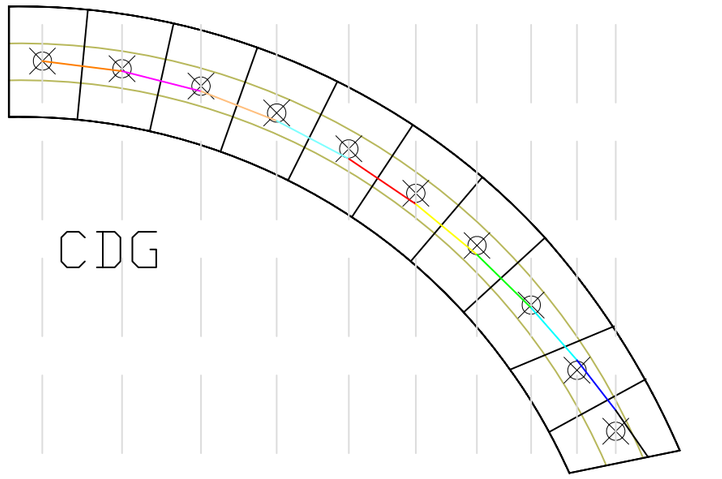
PROYECTO: BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA		
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA 1:50	UBICACION Maçanet De La Selva
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR	Método Gráfico del Polígono Funicular	6

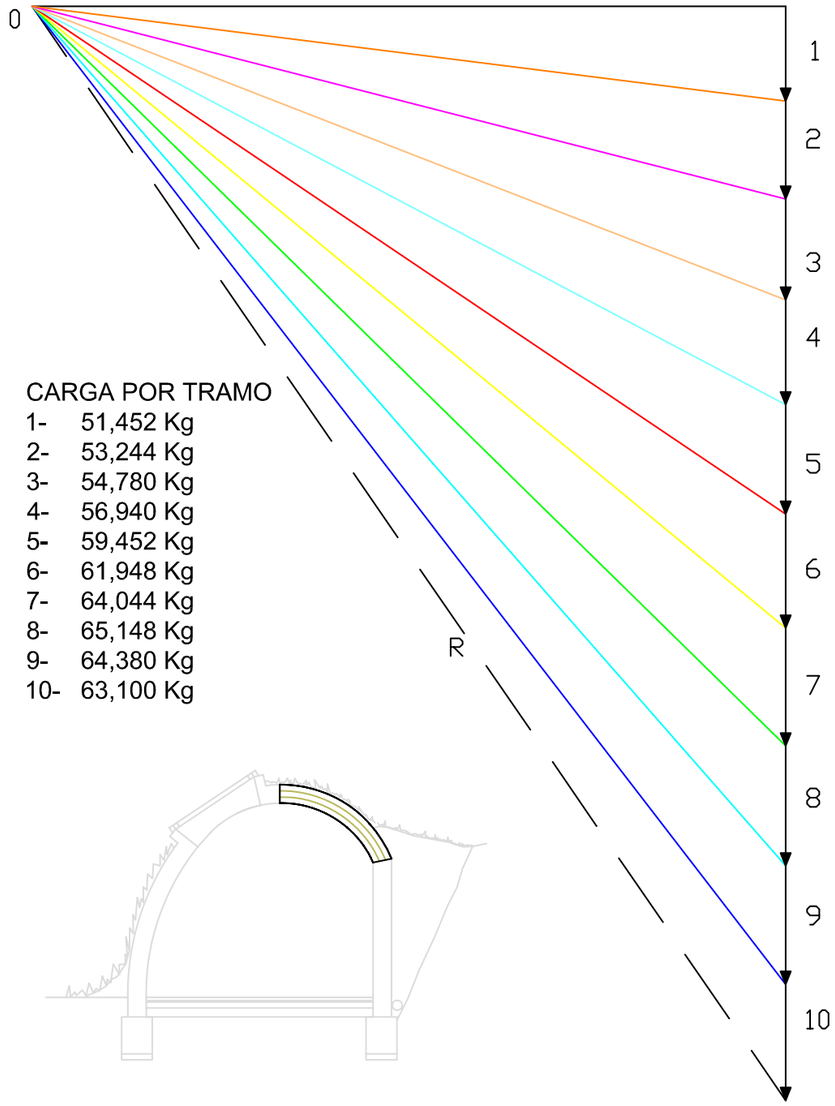


	Alzada	Perimetro	Volumen	D. Tierra	P.L. Kg	P.N. Kg	P.TOTAL kg	Carga	P.Total kg
	m2	m	m3	400kg/m3	P. Tierras	P. Losa	PT+PL	Puntual Kg	
1	0,0652	0,2	0,01304	800	10,432	22,27	32,702	18,75	51,452
2	0,0764	0,2	0,01528	800	12,224	22,27	34,494	18,75	53,244
3	0,086	0,2	0,0172	800	13,76	22,27	36,03	18,75	54,78
4	0,0995	0,2	0,0199	800	15,92	22,27	38,19	18,75	56,94
5	0,1152	0,2	0,02304	800	18,432	22,27	40,702	18,75	59,452
6	0,1308	0,2	0,02616	800	20,928	22,27	43,198	18,75	61,948
7	0,1439	0,2	0,02878	800	23,024	22,27	45,294	18,75	64,044
8	0,1508	0,2	0,03016	800	24,128	22,27	46,398	18,75	65,148
9	0,146	0,2	0,0292	800	23,36	22,27	45,63	18,75	64,38
10	0,138	0,2	0,0276	800	22,08	22,27	44,35	18,75	63,1

Hipotesis de carga de un saco que pesa 30kg
Area 0.32m2 30kg
0.04m2 3.75kg
5 Sacos generan carga puntual en nudo de 18,75kg



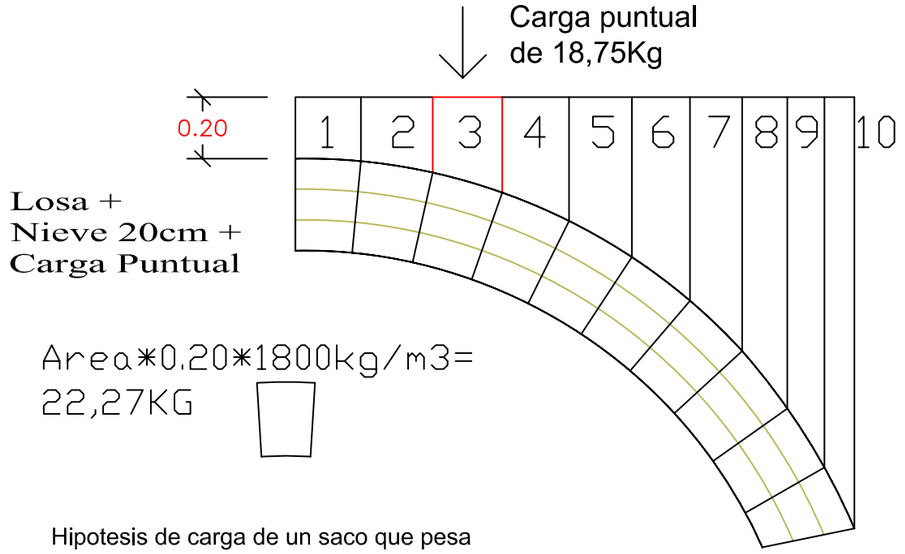




CARGA POR TRAMO
1- 51,452 Kg
2- 53,244 Kg
3- 54,780 Kg
4- 56,940 Kg
5- 59,452 Kg
6- 61,948 Kg
7- 64,044 Kg
8- 65,148 Kg
9- 64,380 Kg
10- 63,100 Kg

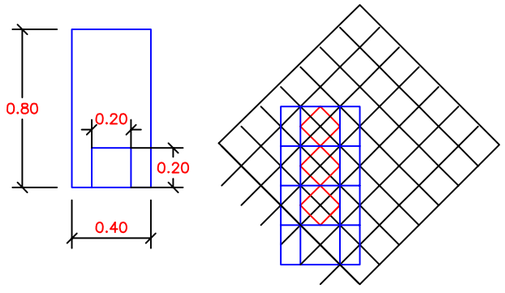
Hipótesis de calculo en fase de ejecución: Losa + Tierras 30cm + Carga Puntual de 18.75kg:
Comparando con el caso anterior, tenemos una carga puntual que pasa por todos los centros de gravedad, la resultante de compresión es la misma, ya que este sistema de análisis solo creara dificultad a flexión cuando las cargas este sectorizadas, este tipo de cargas repartidas por igual o si se aumenta el peso por las tierras, su resultante seguirá trabajando a compresión y estara dentro del núcleo de presión

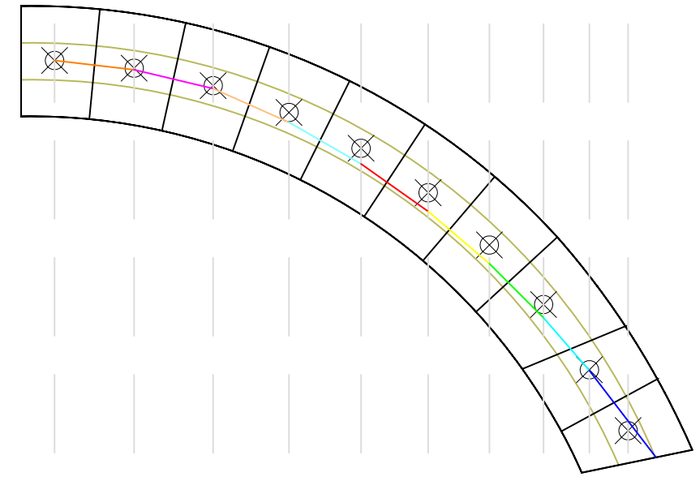
PROYECTO:	BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA	
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA 1:50	UBICACION Maçanet De La Selva
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR	Método Gráfico del Polígono Funicular	7

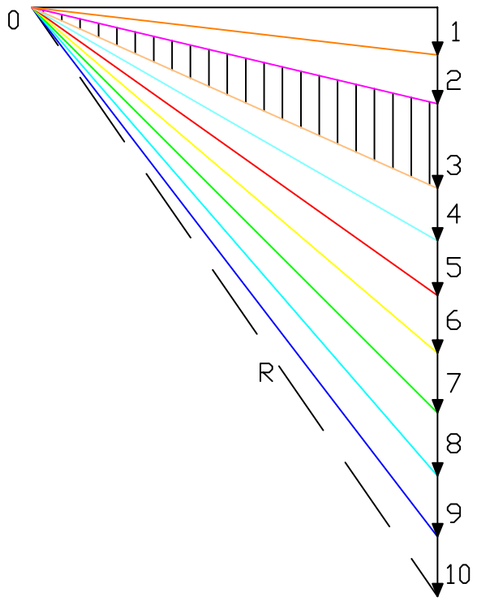


	Alzada	Perimetro	Volumen	D. Nieve	P.L. Kg	P.N. Kg	P.TOTAL kg	Carga	P.Total kg
	m2	m	m3	400kg/m3	P. Losa	P. Nieve	PL+PN	Puntual Kg	Punto 3
1	0,0438	0,2	0,00876	400	22,27	3,504	25,774		
2	0,0531	0,2	0,01062	400	22,27	4,248	26,518		
3	0,0633	0,2	0,01266	400	5,064	22,27	27,334	18,75	46.084
4	0,0777	0,2	0,01554	400	22,27	6,216	28,486		
5	0,0947	0,2	0,01894	400	22,27	7,576	29,846		
6	0,1119	0,2	0,02238	400	22,27	8,952	31,222		
7	0,1269	0,2	0,02538	400	22,27	10,152	32,422		
8	0,1361	0,2	0,02722	400	22,27	10,888	33,158		
9	0,134	0,2	0,0268	400	22,27	10,72	32,99		
10	0,1282	0,2	0,02564	400	22,27	10,256	32,526		

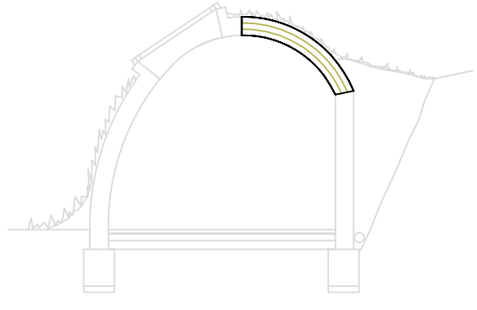
Hipotesis de carga de un saco que pesa 30kg
Area 0.32m2 30kg
0.04m2 3.75kg
5 Sacos generan carga puntual en nudo de 18,75kg







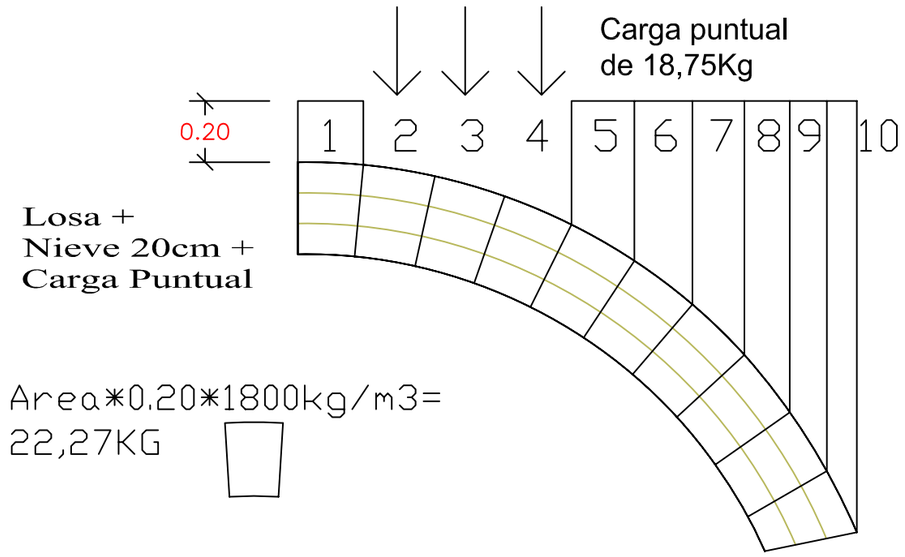
CARGA POR TRAMO
1- 25,774 Kg
2- 26,518 Kg
3- 46,084 Kg
4- 28,486 Kg
5- 29,846 Kg
6- 31,222 Kg
7- 32,422 Kg
8- 33,158 Kg
9- 32,990 Kg
10- 32,526 Kg



Hipótesis de calculo en fase de ejecución: Losa + 20cm de nieve + Carga Puntual de 18.75kg

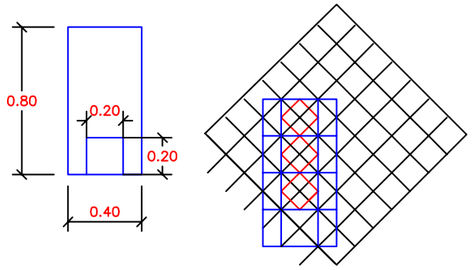
Aunque se presenta un decaimiento por culpa del peso en puntual, la resultante grafica sigue demarcándose por el tercio central.
Las cargas puntuales aisladas no son favorables para las vueltas, les obliga a predimensionar el grosor o cambiar la inclinación.

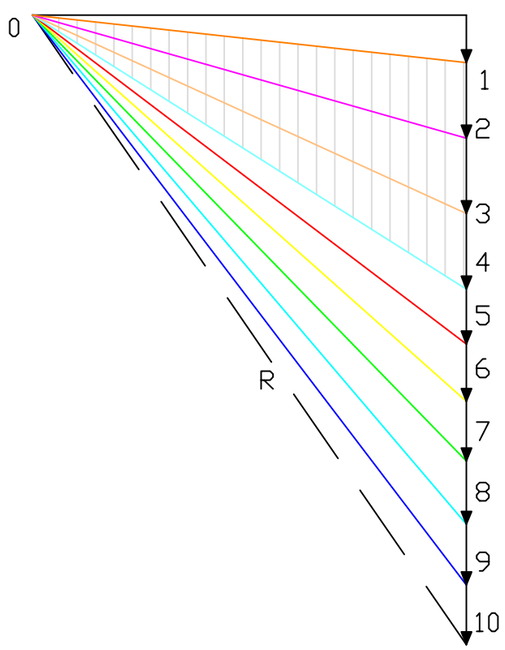
PROYECTO:	BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA	
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA 1:50	UBICACION Maçanet De La Selva
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR	Método Gráfico del Polígono Funicular	8



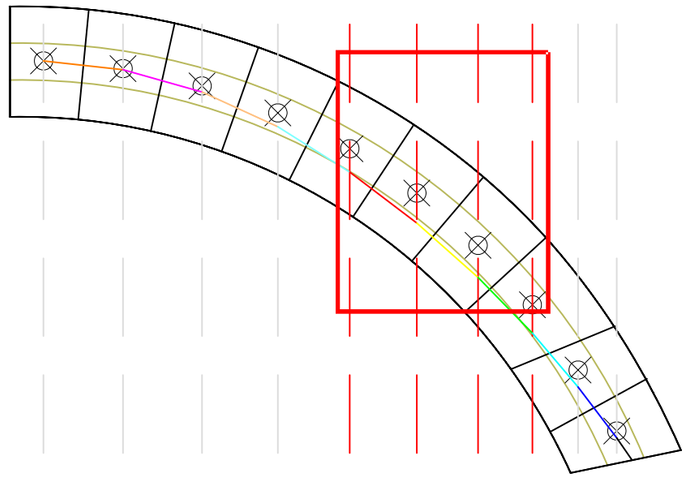
	Alzada	Perimetro	Volumen	D. Nieve	P.L. Kg	P.N. Kg	P.TOTAL kg	Carga	P.Total kg
	m2	m	m3	400kg/m3	P. Losa	P. Nieve	PL+PN	Puntual Kg	Punto 2,3,4
1	0,0438	0,2	0,00876	400	22,27	3,504	25,774		
2					22,27	0	22,27	18,75	41,02
3					22,27	0	22,27	18,75	41,02
4					22,27	0	22,27	18,75	41,02
5	0,0947	0,2	0,01894	400	22,27	7,576	29,846		
6	0,1119	0,2	0,02238	400	22,27	8,952	31,222		
7	0,1269	0,2	0,02538	400	22,27	10,152	32,422		
8	0,1361	0,2	0,02722	400	22,27	10,888	33,158		
9	0,134	0,2	0,0268	400	22,27	10,72	32,99		
10	0,1282	0,2	0,02564	400	22,27	10,256	32,526		

Hipotesis de carga de un saco que pesa 30kg
Area 0.32m2 30kg
0.04m2 3.75kg
5 Sacos generan carga puntual en nudo de 18,75kg

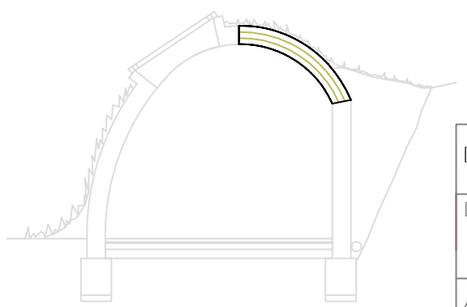




Zona afectada por las cargas puntuales



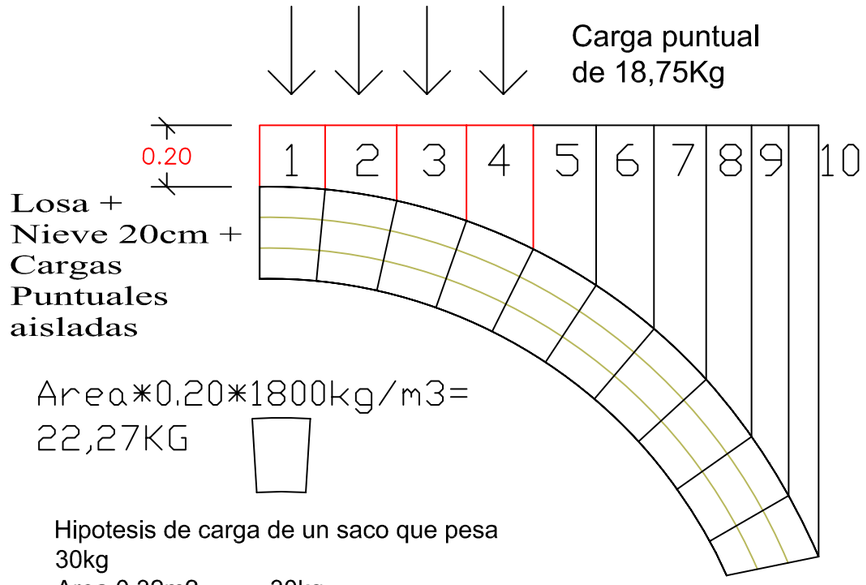
CARGA POR TRAMO
1- 25,774 Kg
2- 41,020 Kg
3- 41,020 Kg
4- 41,020 Kg
5- 29,846 Kg
6- 31,222 Kg
7- 32,422 Kg
8- 33,158 Kg
9- 32,990 Kg
10- 32,526 Kg



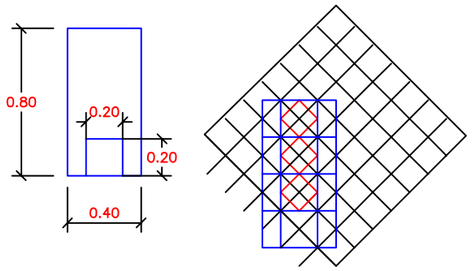
Hipótesis de cálculo de ejecución:
Colocación de cargas puntuales + zonas con nieve.

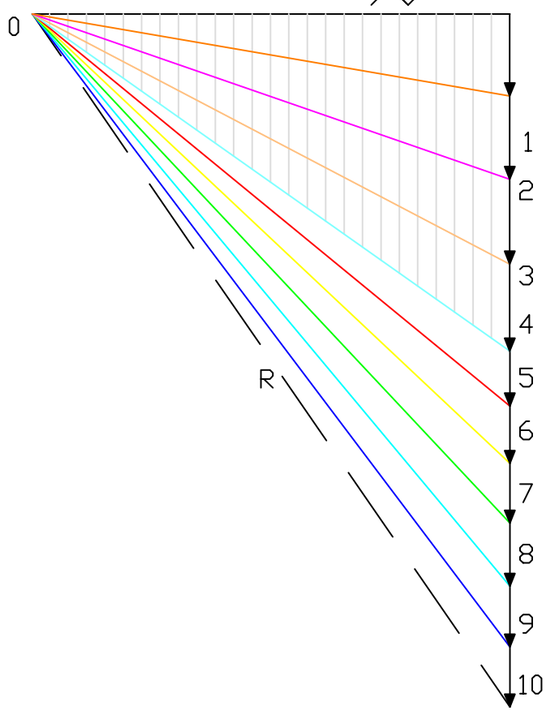
Este resultado nos demarca la zona que posiblemente tendríamos que reforzar a flexión, teniendo en cuenta siempre el porcentaje con relación al total sea menor. En nuestro caso los cambios de forma o replanteo de vuelta están descartados, solo tendríamos que analizar la función directa que cumpliría el Bambú como material que empezaría a trabajar a flexión.

PROYECTO:	BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA	
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA 1:50	UBICACION Maçanet De La Selva
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR	Método Gráfico del Polígono Funicular	9



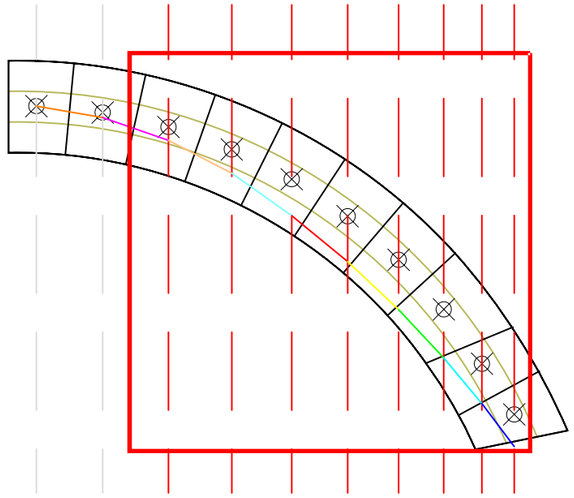
Hipotesis de carga de un saco que pesa 30kg
Area 0.32m2 30kg
0.04m2 3.75kg
5 Sacos generan carga puntual en nudo de 18,75kg



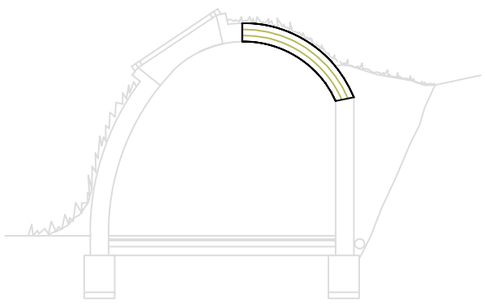


	Alzada	Perimetro	Volumen	D. Nieve	P.L. Kg	P.N. Kg	P.TOTAL kg	Carga	P.Total kg
	m2	m	m3	400kg/m3	P. Losa	P. Nieve	PL+PN	Puntual Kg	Punto 1,2,3,4
1	0,0438	0,2	0,00876	400	22,27	3,504	25,774	18,75	44,524
2	0,0531	0,2	0,01062	400	22,27	4,248	26,518	18,75	45,268
3	0,0633	0,2	0,01266	400	5,064	22,27	27,334	18,75	46,084
4	0,0777	0,2	0,01554	400	22,27	6,216	28,486	18,75	47,236
5	0,0947	0,2	0,01894	400	22,27	7,576	29,846		
6	0,1119	0,2	0,02238	400	22,27	8,952	31,222		
7	0,1269	0,2	0,02538	400	22,27	10,152	32,422		
8	0,1361	0,2	0,02722	400	22,27	10,888	33,158		
9	0,134	0,2	0,0268	400	22,27	10,72	32,99		
10	0,1282	0,2	0,02564	400	22,27	10,256	32,526		

Zona afectada por las cargas puntuales



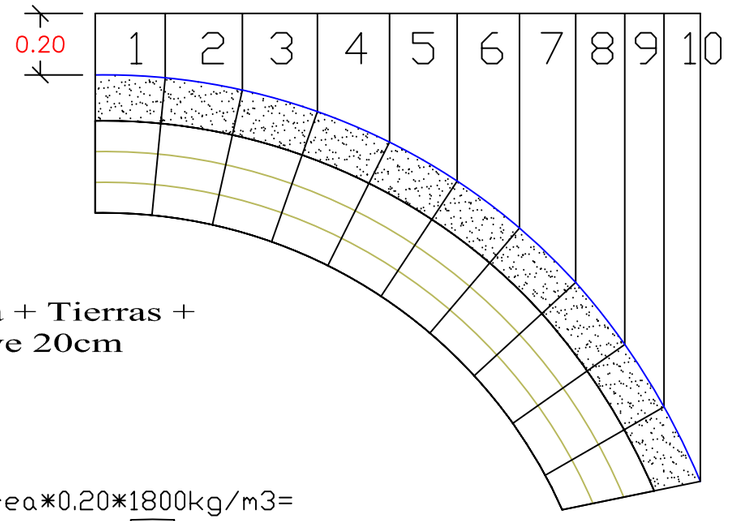
CARGA POR TRAMO
1- 44,524 Kg
2- 45,268 Kg
3- 46,084 Kg
4- 47,236 Kg
5- 29,846 Kg
6- 31,222 Kg
7- 32,422 Kg
8- 33,158 Kg
9- 32,990 Kg
10- 32,526 Kg



Hipótesis de cálculo de ejecución:
Colocación de cargas puntuales +zonas con nieve.

El criterio a seguir con este caso es que las cargas puntuales están en el lugar mas desfavorable de la vuelta, la geometría de la vuelta no favorece el soporte de estos pesos y es el momento que la resultante marca la zona que estaría entrando a trabajar a flexión.
El porcentaje de la resultante esta en mayor proporción en las exterior que en las del interior
En este caso se replantaría la geometría o la inclinación de la vuelta para que asuma estos axiles puntuales.

PROYECTO:	BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA 1:50
UBICACION Maçanet De La Selva	
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR	Método Gráfico del Polígono Funicular
10	



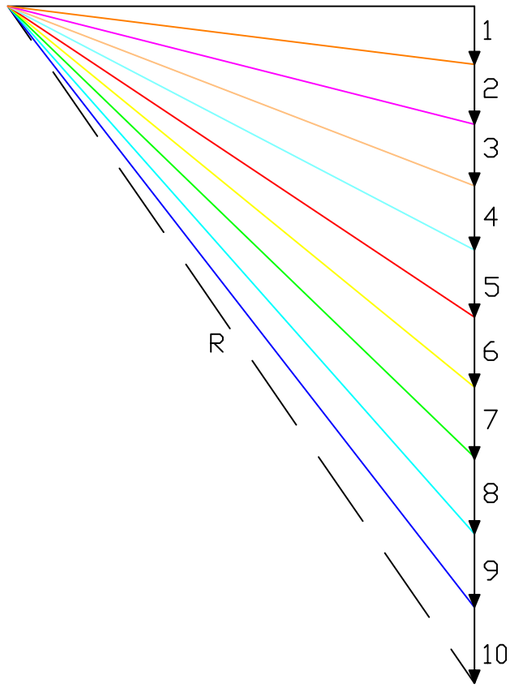
Losa + Tierras +
Nieve 20cm

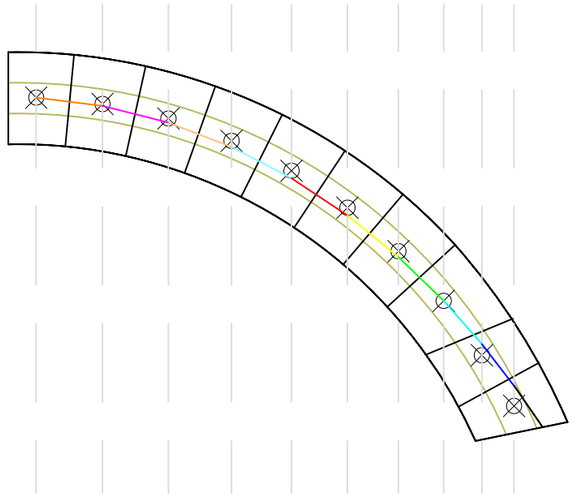
Area*0.20*1800kg/m3=
22,27KG

	Area	Alzada	Volumen	D. Nieve	P.N. Kg	P.T. Kg	P.L. Kg	P.TOTAL kg
	m2	m	m3	400kg/m3	P. Nieve	P. Tierras	P. Losa	PL+PT+PN
1	0,0468	0,2	0,00936	400	3,744	5,632	22,27	31,646
2	0,0577	0,2	0,01154	400	4,616	5,632	22,27	32,518
3	0,0702	0,2	0,01404	400	5,616	5,632	22,27	33,518
4	0,0871	0,2	0,01742	400	6,968	5,632	22,27	34,87
5	0,1065	0,2	0,0213	400	8,52	5,632	22,27	36,422
6	0,1268	0,2	0,02536	400	10,144	5,632	22,27	38,046
7	0,1445	0,2	0,0289	400	11,56	5,632	22,27	39,462
8	0,1543	0,2	0,03086	400	12,344	5,632	22,27	40,246
9	0,1509	0,2	0,03018	400	12,072	5,632	22,27	39,974
10	0,1658	0,2	0,03316	400	13,264	5,632	22,27	41,166

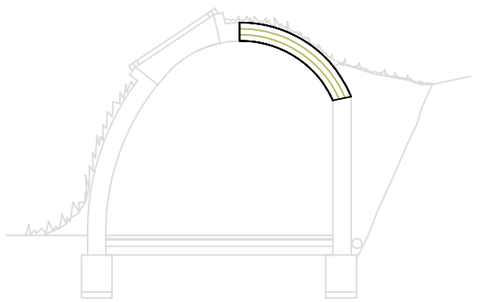
Hipótesis de calculo en fase de acabado: Losa + Tierras 10cm + 20cm de nieve:

La resultante de compresión es la misma, con tierras y que sin tierras, ya que este sistema de análisis solo creara dificultad a flexión cuando las cargas esten sectorizadas. Este tipo de cargas repartidas por igual, si se aumenta el peso su resultante seguirá trabajando a compresión y estará dentro del núcleo de presión.

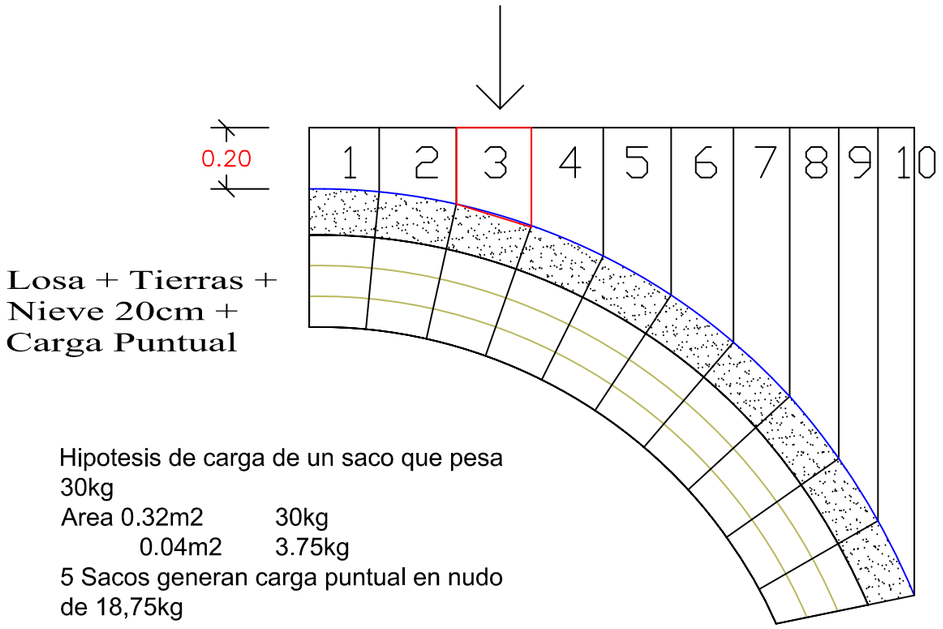




1- 31,646 Kg
2- 32,518 Kg
3- 33,518 Kg
4- 34,870 Kg
5- 36,422 Kg
6- 38,046 Kg
7- 39,462 Kg
8- 40,246 Kg
9- 39,974 Kg
10- 41,166 Kg

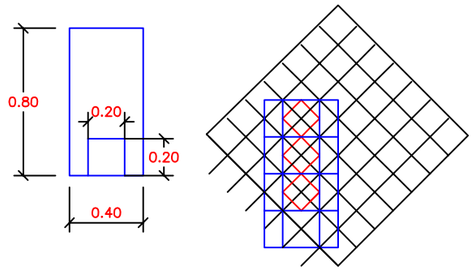


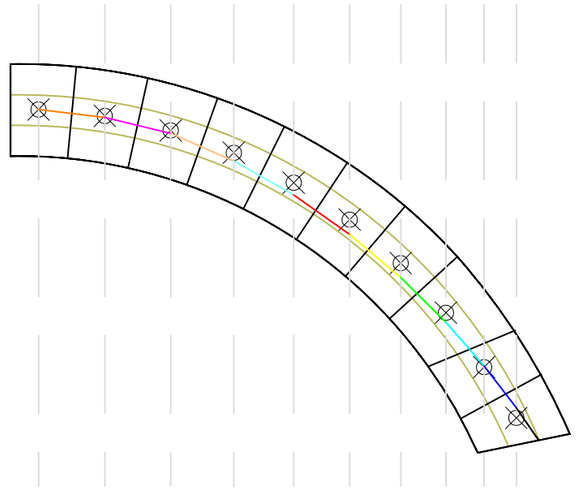
PROYECTO:	BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA
FECHA: 11 Julio 2008	ESCALA: 1:50
UBICACION: Maçanet De La Selva	
ALUMNOS: MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR	Método Gráfico del Polígono Funicular
	11

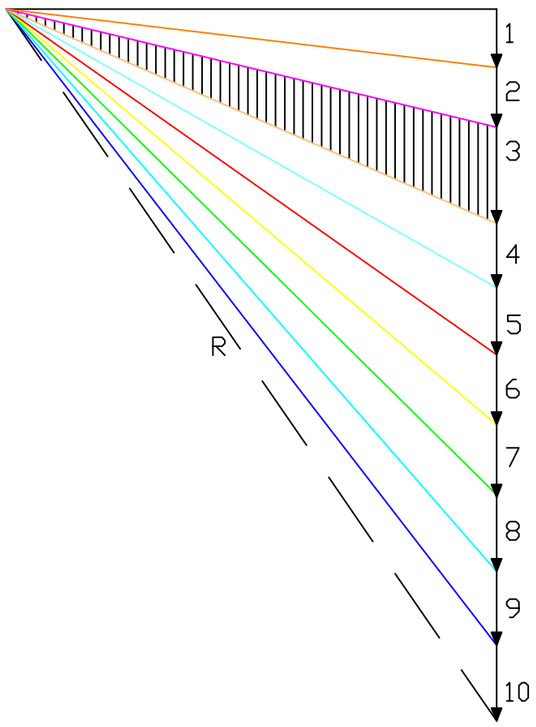


Hipotesis de carga de un saco que pesa 30kg
Area 0.32m2 30kg
0.04m2 3.75kg
5 Sacos generan carga puntual en nudo de 18,75kg

	Alzada	Perimet	Volumen	D. Nieve	P.N. Kg	P.L. Kg	P.T.	P.Total kg	P.Total kg
	m2	m	m3	400kg/m3	P. Nieve	P. Losa	P. Tierras	PN+PL+PT	Punto 3
1	0,0468	0,2	0,00936	400	3,744	22,27	5,632	31,646	
2	0,0577	0,2	0,01154	400	4,616	22,27	5,632	32,518	
3	0,0702	0,2	0,01404	400	5,616	22,27	5,632	33,518	52,268
4	0,0871	0,2	0,01742	400	6,968	22,27	5,632	34,87	
5	0,1065	0,2	0,0213	400	8,52	22,27	5,632	36,422	
6	0,1268	0,2	0,02536	400	10,144	22,27	5,632	38,046	
7	0,1445	0,2	0,0289	400	11,56	22,27	5,632	39,462	
8	0,1543	0,2	0,03086	400	12,344	22,27	5,632	40,246	
9	0,1509	0,2	0,03018	400	12,072	22,27	5,632	39,974	
10	0,1658	0,2	0,03316	400	13,264	22,27	5,632	41,166	

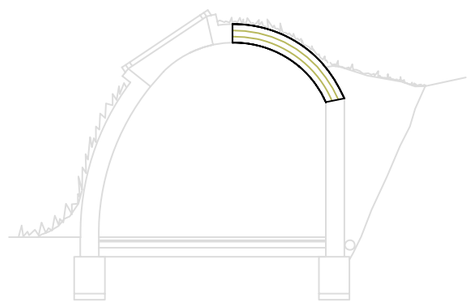






1- 31,646 Kg
2- 32,518 Kg
3- 52,268 Kg
4- 34,870 Kg
5- 36,422 Kg
6- 38,046 Kg
7- 39,462 Kg
8- 40,246 Kg
9- 39,974 Kg
10- 41,166 Kg

Area*0.20*1800kg/m3=
22,27KG

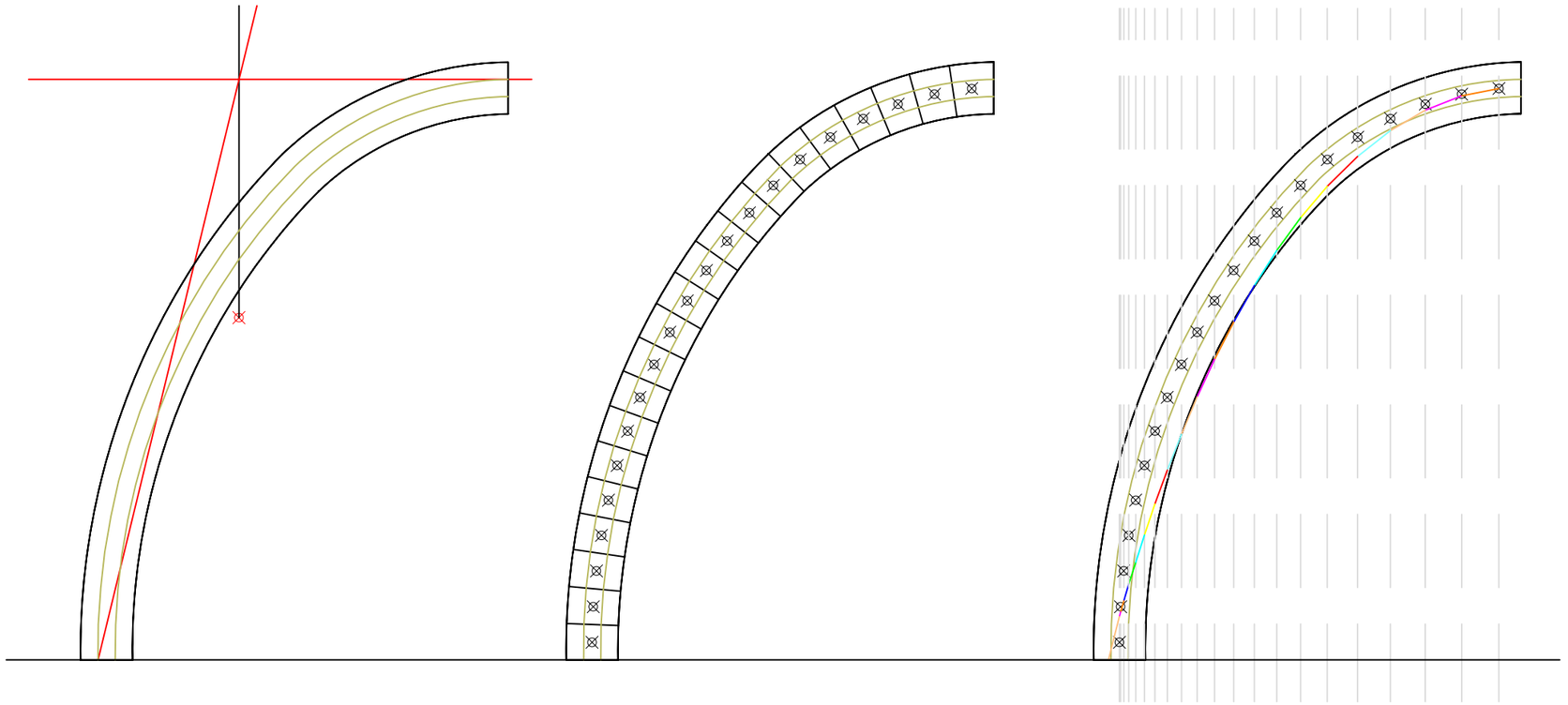


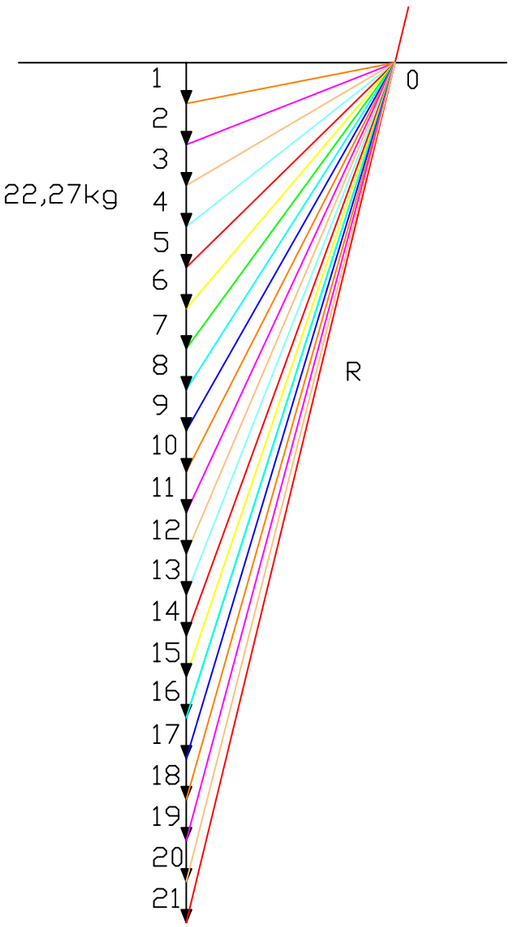
Hipótesis de calculo en fase de acabados: Losa + Tierras+ 20cm de nieve + Carga Puntual de 18.75kg

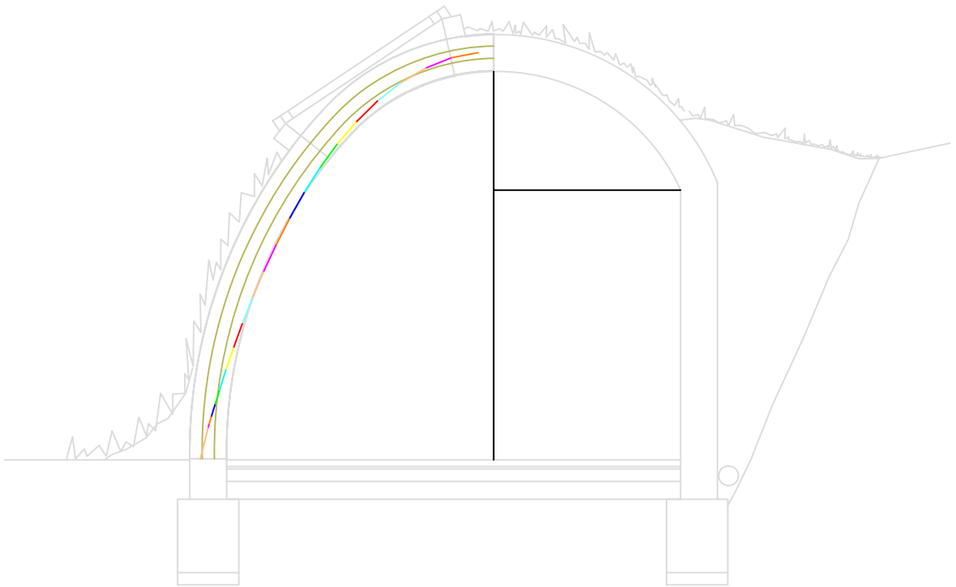
Aunque se presenta un decaimiento por culpa del peso en punta de la resultante grafica sigue demarcándose por el tercio central.
Las cargas puntuales aisladas no son favorables en las vueltas, estas obligan a replantear la geometria o la inclinación.

El caso parecido a este modelo, era el de fase de ejecucion, la diferencia son las tierras, aunque es un peso de mas, está uniformemente distribuido por toda la vuelta, lo que no genera cambios en su resultante de presión.

PROYECTO:	BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA		
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA 1:50	UBICACION Maçanet De La Selva	
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR	Método Gráfico del Polígono Funicular	12	

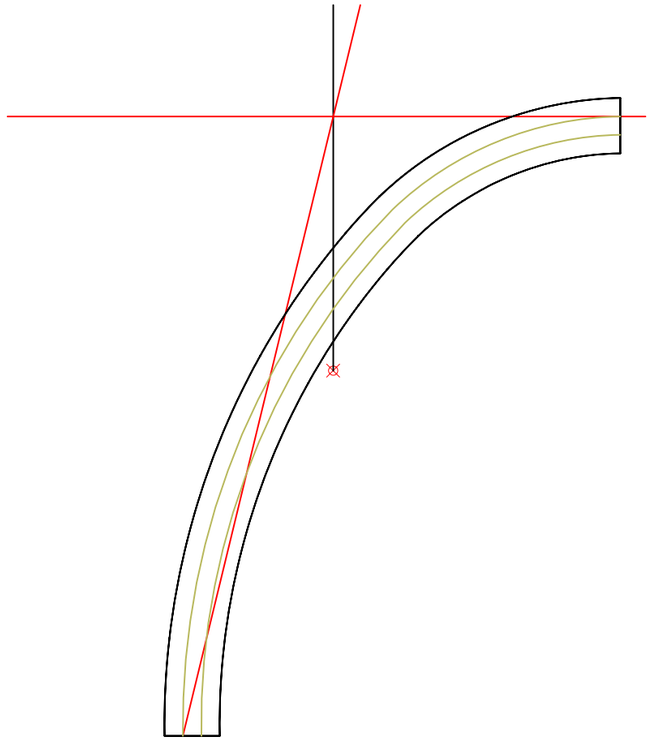


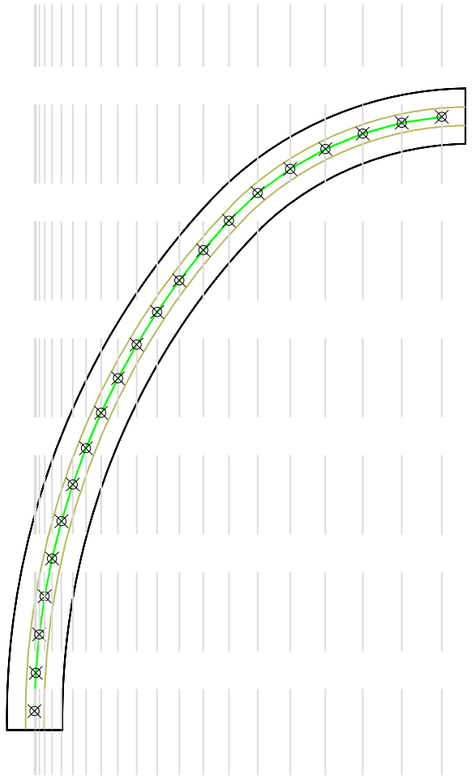


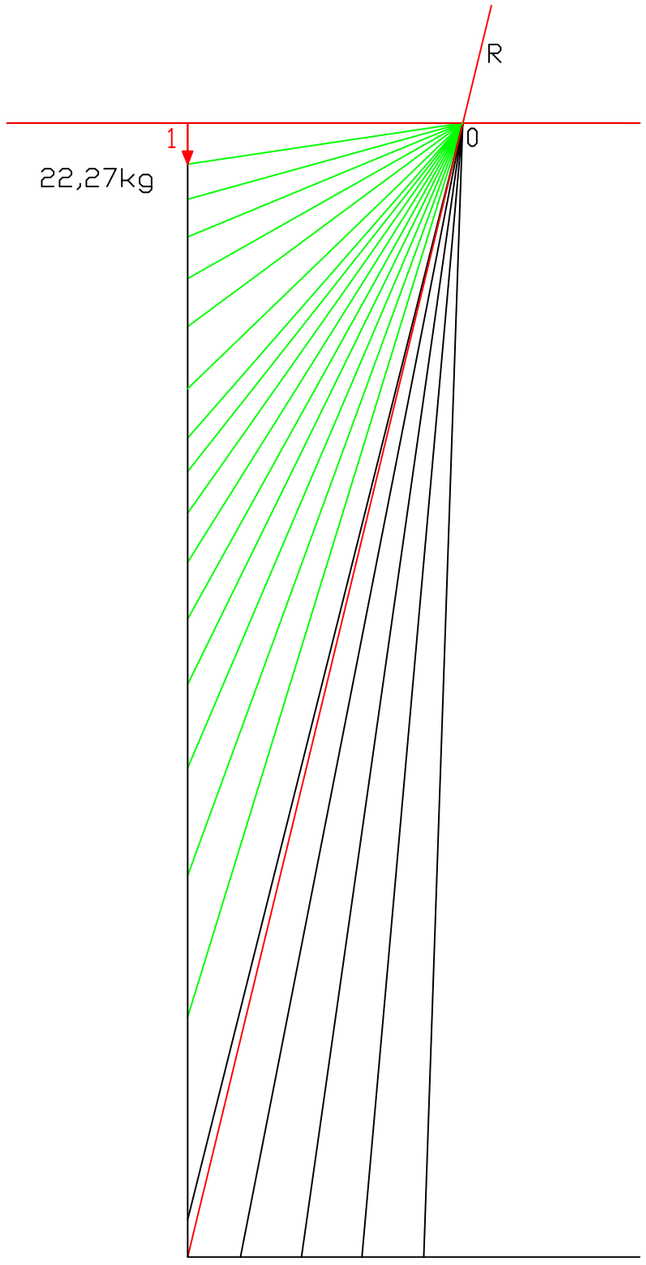


Hipótesis de cálculo de ejecución: Peso propio
Esta hipótesis de vuelta fue realizada con el peso propio y su resultante de presión quedo fuera del núcleo central.
Esto nos genero duda sobre el porque a pesar de colocar solo el peso, en el otro costado quedo su resultante por todo su núcleo de presión.
Para esta hipótesis hemos observado que existe un tramo recto al inicio de la vuelta, zona donde se localiza el zuncho de espera y el arranque de la puerta; siguiendo los principios del arco, la resultante tiende a desaparecer cuando trabajamos con elementos verticales, siendo este método deficiente para este tipo de calculo.

PROYECTO: BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA			
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA 1:50	UBICACION Maçanet De La Selva	
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR		Método Gráfico del Polígono Funicular	13



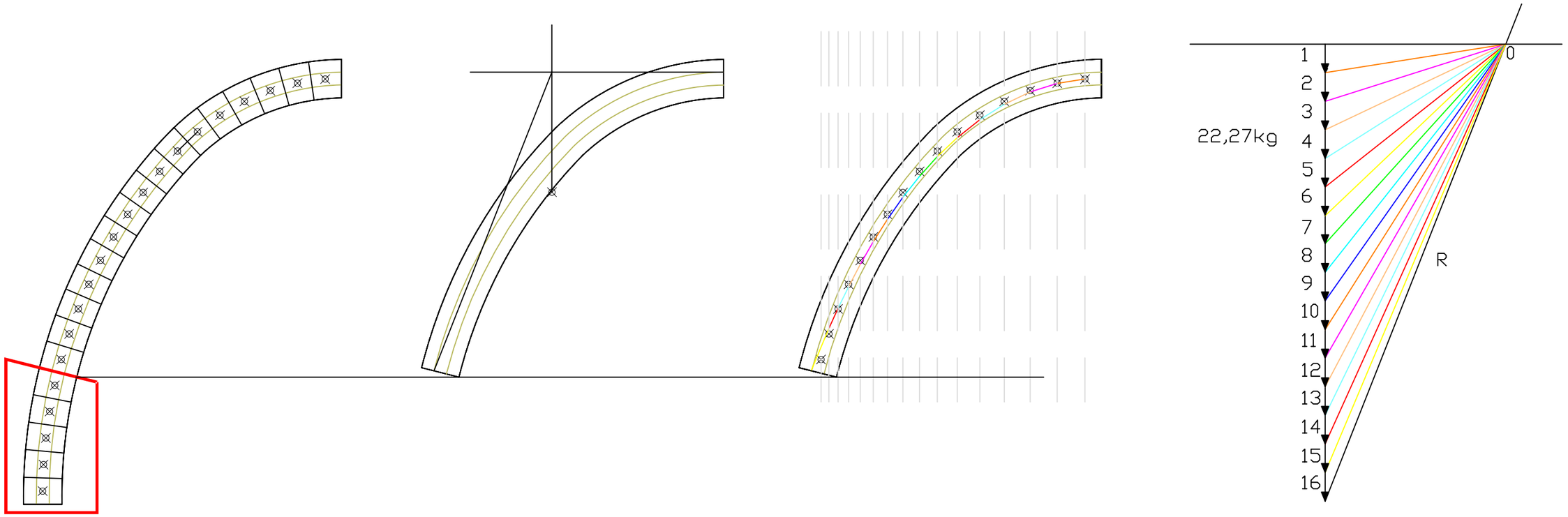


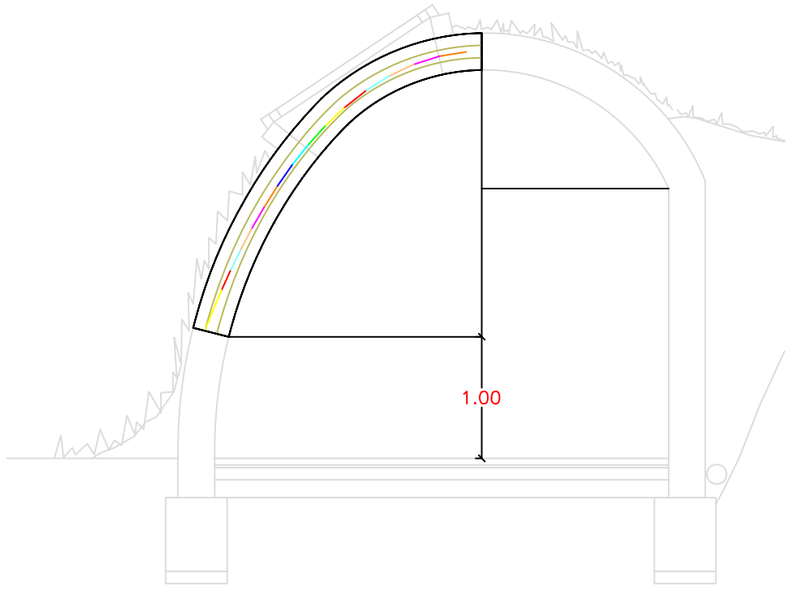


Hipótesis de cálculo del polígono funicular en sentido inverso:
Al verificar el polígono funicular en sentido inverso, hemos teniendo como referencia los mismos pesos y la resultantes individuales que pasan por todo el centro de presión; su punto de salida hacia la vertical parte desde la resultante calculada en la hipótesis anterior.
Cuando las reacciones individuales trataron de buscar la vertical nos generaron resultados esperado, los tramos que tendían a generar cargas verticales se desmarcaron de la resultante total, generaron cargas verticales.

Por tal motivo en la siguiente hipótesis descartaremos estos tramos, ya que en la realidad son las zonas de empotramiento entre la vuelta y el zuncho de amarre perimetral.

PROYECTO: BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA		
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA 1:50	UBICACION Maçanet De La Selva
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR	Método Gráfico del Polígono Funicular	14



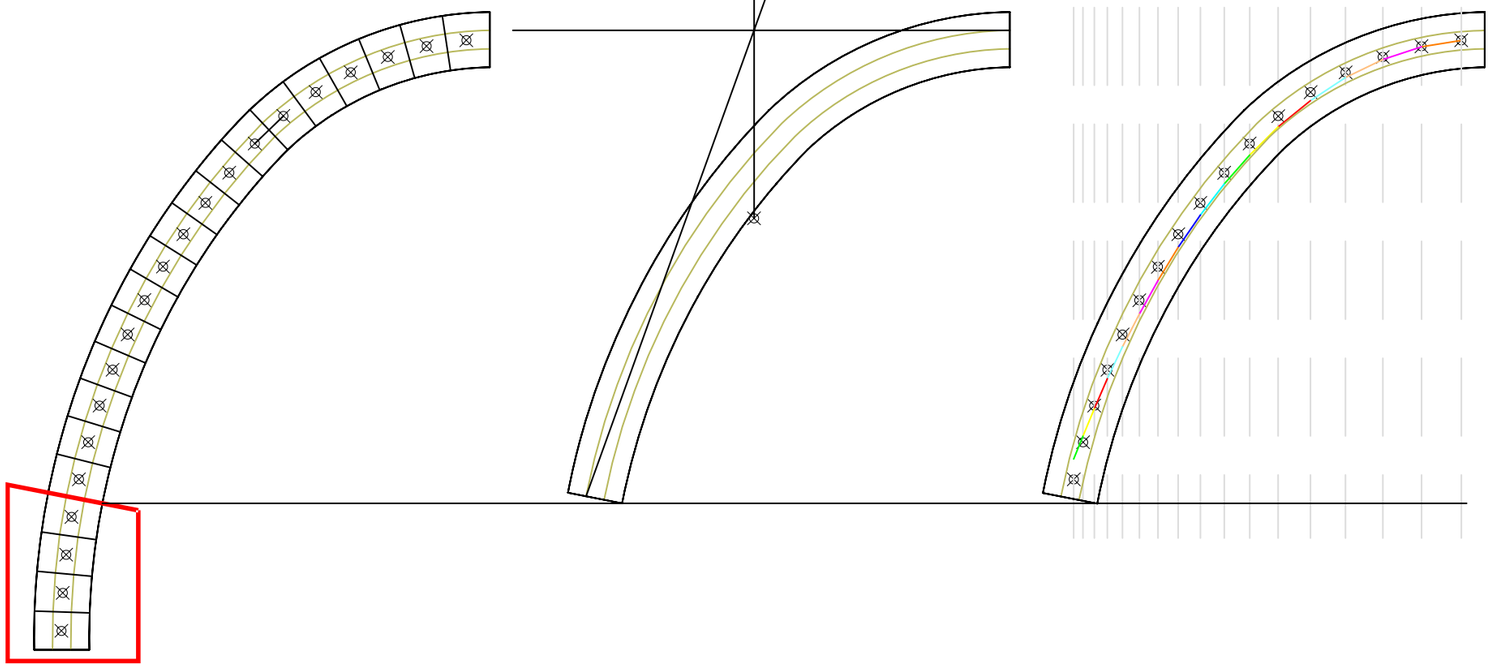


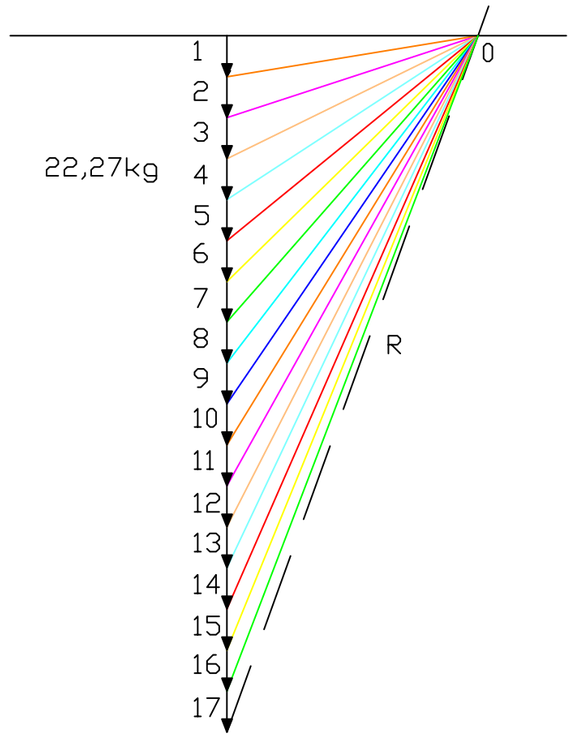
Hipótesis de cálculo del polígono funicular en sentido inverso:
Para esta hipótesis hemos descartado los tramos que no cumplían los requisitos de la continuidad del arco y que sus cargas quedaban en sentido vertical.

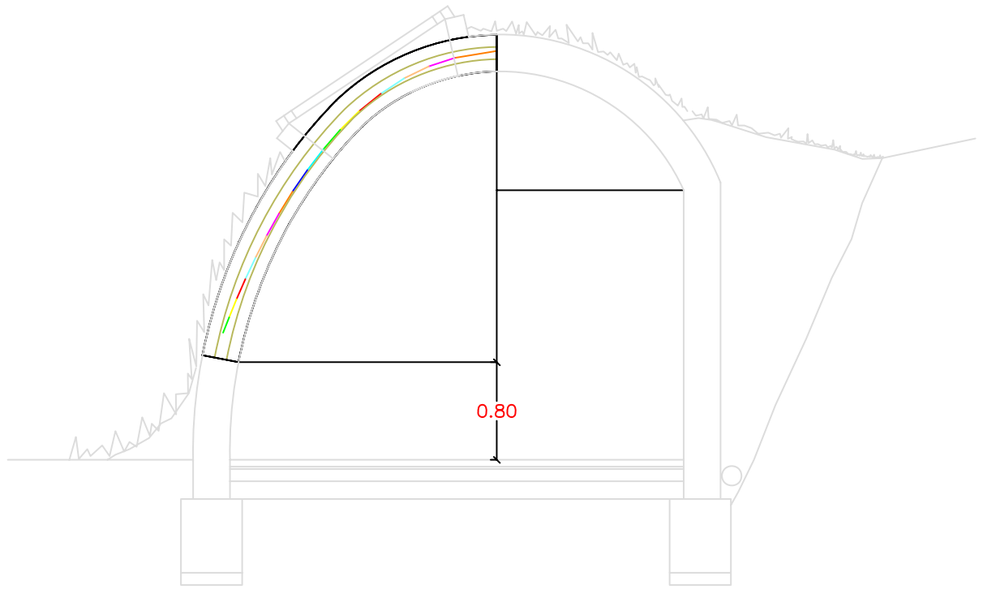
El resultado de este cálculo por método grafico nos dio su línea de presión por el tercio central, igual que el otro costado de la vuelta.
Teniendo en cuenta este procedimiento para futuros cálculos, nos ayudará a calcular resultantes eliminando los tramos verticales.

Describiendo la resultante de presión que nos da en este cálculo, nos resalta la zona donde tiende a trabajar a flexión, esta información la hemos utilizado para reforzar con doble entramado de bambú para soportar estos posibles empujes horizontales.

PROYECTO: BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA		
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA 1:50	UBICACION Maçanet De La Selva
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR	Método Gráfico del Polígono Funicular	15



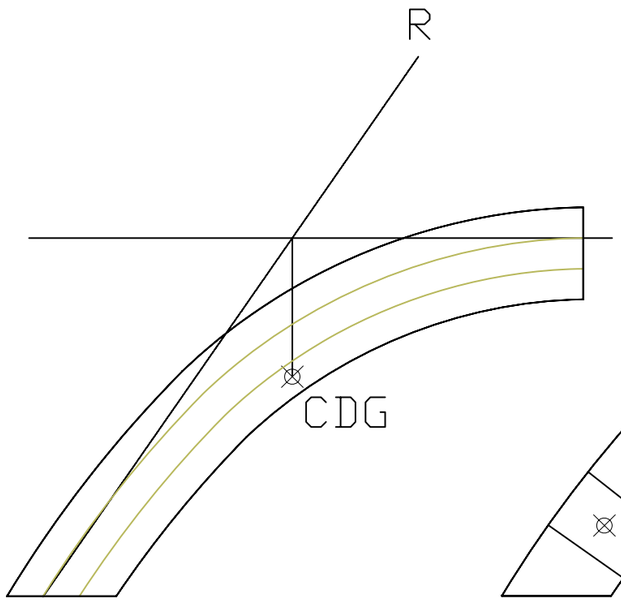


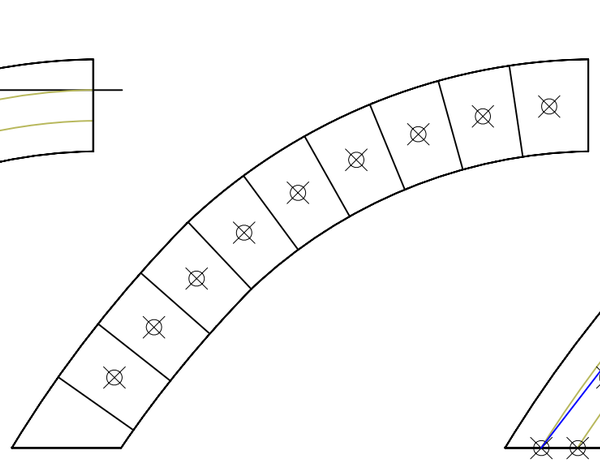


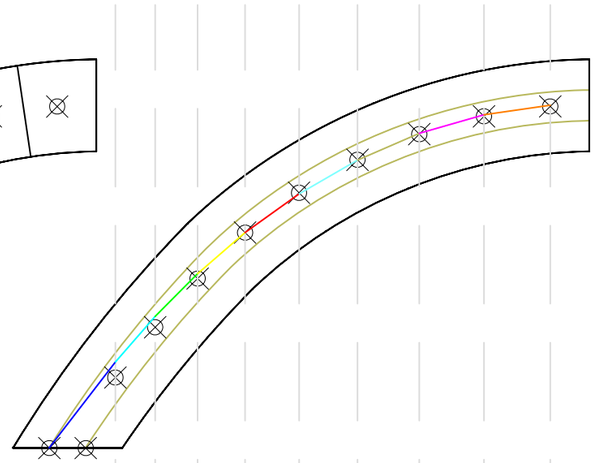
Hipótesis de cálculo del polígono funicular en sentido inverso:
Para esta hipótesis hemos agregado un tramo a la vuelta con el objetivo e ver como se comporta su línea de presión.

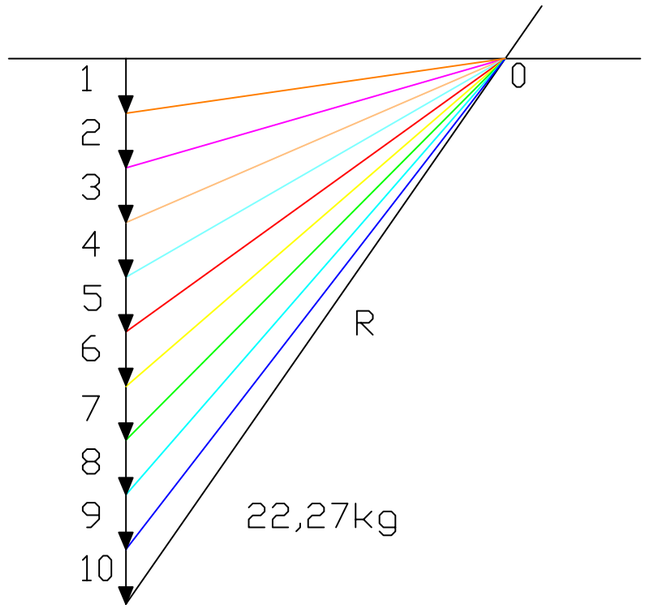
La resultante aunque desciende a flexión mas por la verticalidad del tramo agregado que por las cargas colocada, en la realidad comparado con otros métodos de calculo elástico (Risa 3D), la zona donde se puede generan deformaciones es la misma zona que nos tiende a trabajar a flexión en nuestro calculo.

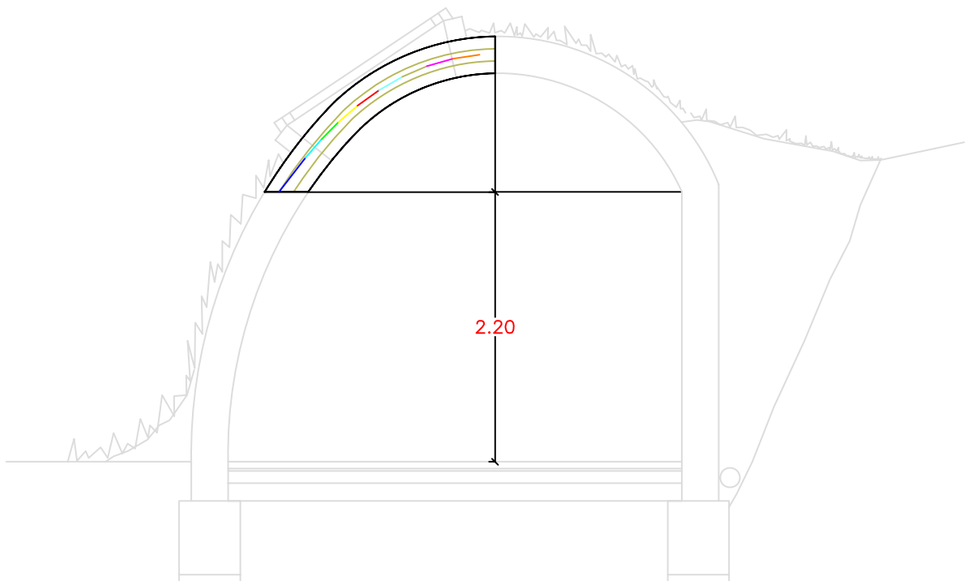
PROYECTO: BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA			
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA 1:50	UBICACION Maçanet De La Selva	
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR		Método Gráfico del Polígono Funicular	16











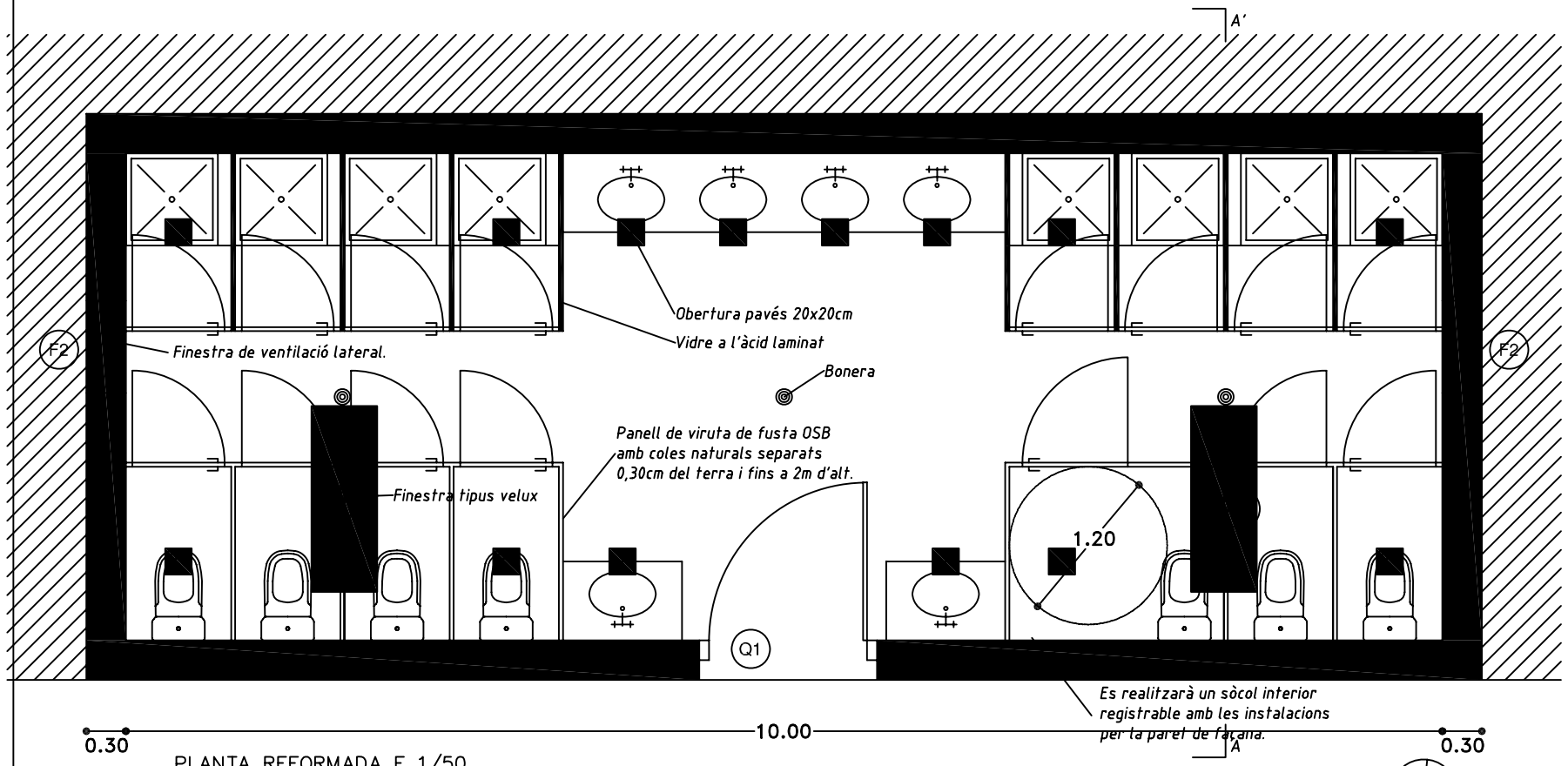
Hipótesis de cálculo de ejecución:

Hemos tomado solo el tramo del coronamiento de la vuelta, sus reacciones tendria que ser igual a el otro costado de la vuelta.

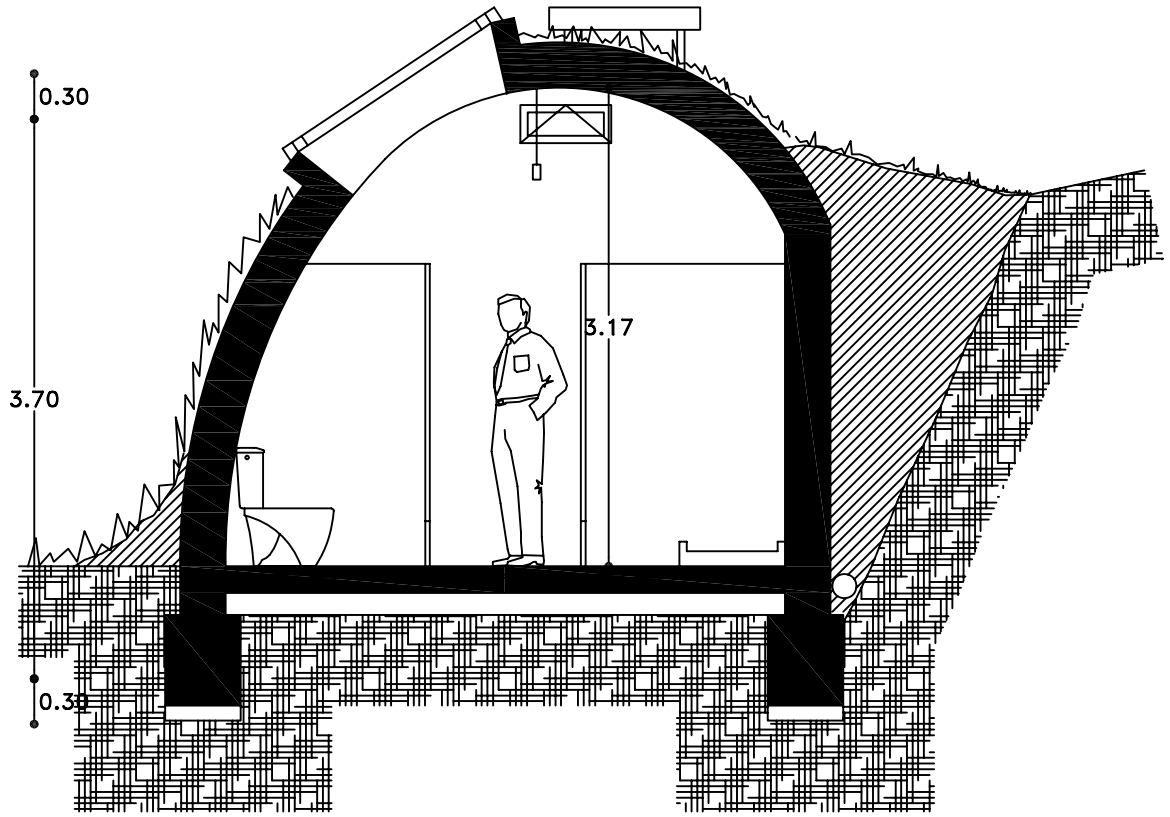
Esta resultante pasa por todo el centro de presión del tramo adoptado.

La teoria dice que el tramo que seleccionemos siendo la hipotesis que tomemos, si, la resultante nos cumple los principios de equilibrio, cualquier material estable cumpliria dicha hipotesis.

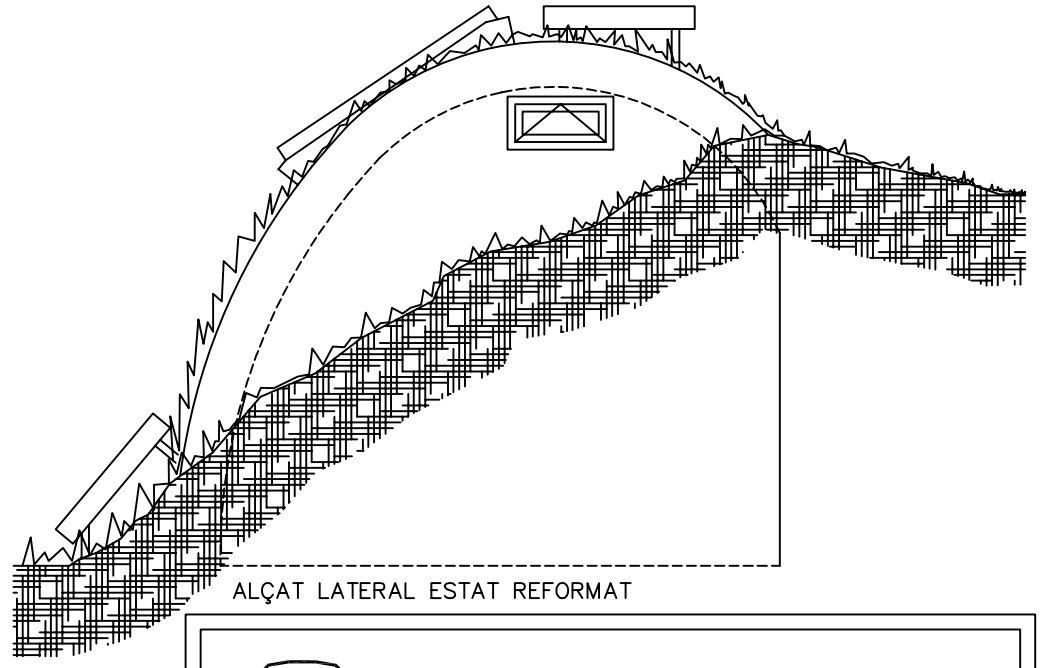
PROYECTO:	BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL ANALISIS DE LA FORMA ADOPTADA		
FECHA 11 Julio 2008	ESCALA 1:50	UBICACION Maçanet De La Selva	
ALUMNOS MORALES DIAZ ESTEFAN RODRIGUEZ ALONSO CESAR		Método Gráfico del Polígono Funicular	17



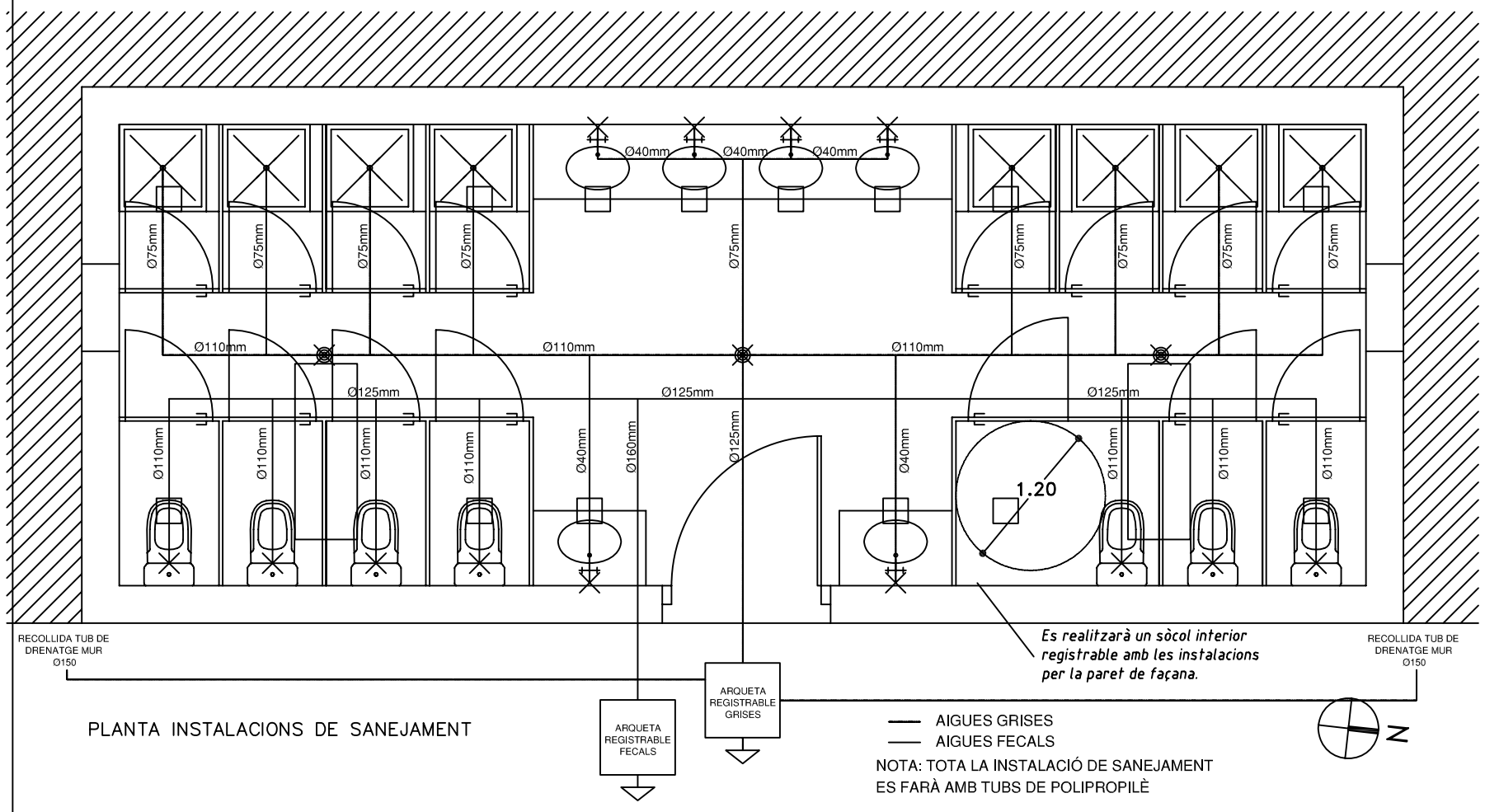
PLANTA REFORMADA E 1/50
SUP. ÚTIL REHABILITACIÓ = 37,00 m2
SUP. CONSTRUÍDA REHABILITACIÓ= 45,58 m2



SECCIO A–A' ESTAT REFORMAT



ALÇAT LATERAL ESTAT REFORMAT



PLANTA INSTALACIONS DE SANEJAMENT

NOTA: TOTA LA INSTALACIÓ DE SANEJAMENT
ES FARÀ AMB TUBS DE POLIPROPILÈ

Ecoarquitectura Gabi Barbeta

Nº EXPEDIENT: 094	PROJECTE DE REHABILITACIÓ PER EXECUCIÓ DE BANYS
PROJECTE BÀSIC I EXECUTIU	

Titol PLANTA REFORMADA, SANEJA– MENT,ALÇAT LATERAL I SECCIO — **nº planol** 03

Data	**Adreça**	**Escala**
21/10/07	Passatge Puig Marí.Can Gregori	1/50

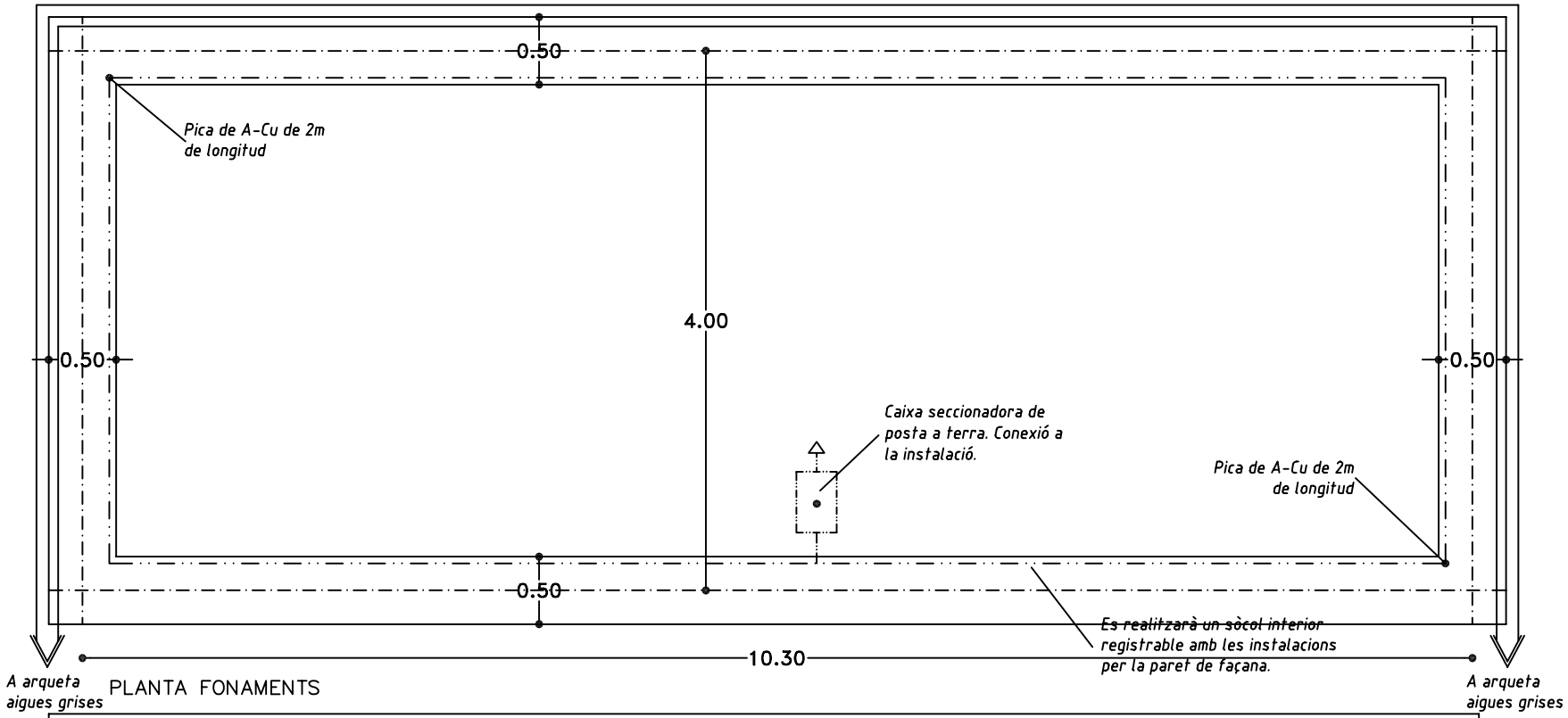
La propietat

Vegeteriana Pla de Carat S.C.C.L
Rep: Ramón Cónsul Berzunces

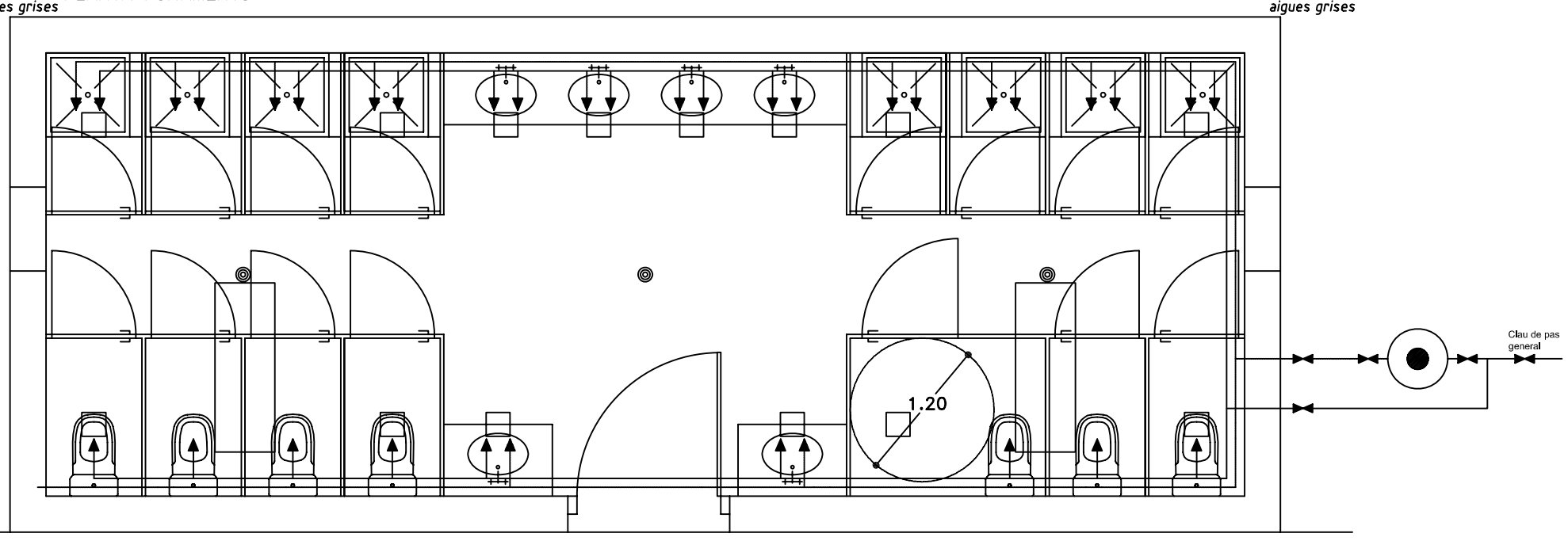
Els arquitectes

Gabriel Barbeta. colg.23529/6 telf.679424190

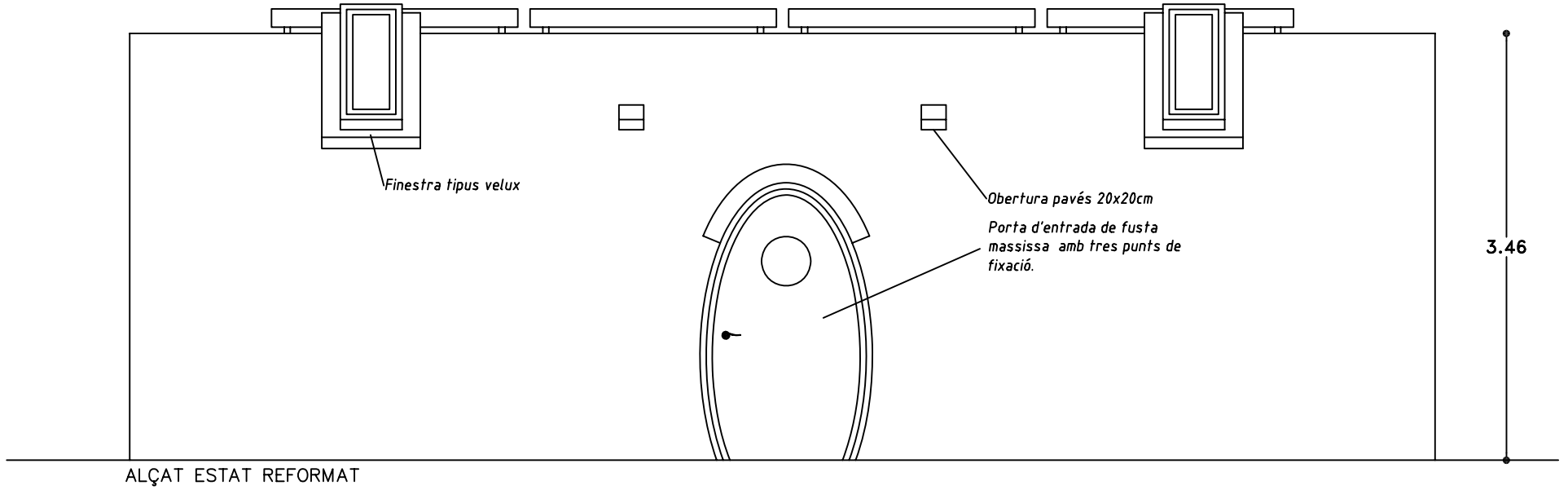
Esteban Navarrete. colg.52971/0 telf.619000277



PLANTA FONAMENTS



PLANTA INSTALACIONS AIGUA



ALÇAT ESTAT REFORMAT

CARACTERISTIQUES FONAMENTS		COEFICIENTS DE SEGURETAT
TENSIO TERRENY	3.5 Kg/cm2. (sabates continues) 4 Kg/cm2. (sabates quadrades)	S= 1.15
		C= 1.50
		F= 1.60
FORMIGÓ	HA-25/B/20/IIa	nivell de control NORMAL
ACER	B 500 S	Con d'Abrams cm.

Llegenda inst.Fontaneria

- Aixeta
- Aigua freda
- Aigua calenta
- Acumulador
- Clau de pas

NOTA
-L'acumulador es situarà a la sala de màquines existent de la piscina situada aprop de l'edifici de banys.
-La instalació d'aigua per façana anirà vista i pintada i la resta anirà ampotrada en l'envà de 4cm adossat als murs de contenció.
-Les plaques solars es situaràn a la coberta ajardinada orientades a sud lés a dir perpendiculars a la directriu de l'edicici) tal i com especifica la secció.

Ecoarquitectura Gabi Barbeta

N° EXPEDIENT: 094

PROJECTE BÀSIC I EXECUTIU

PROJECTE DE REHABILITACIÓ PER EXECUCIÓ DE BANYS

Titol PLANTA FONAMENTS, AIGUA I ALÇAT FRONTAL — **n° planol** 04

Data 21/10/07 — **Adreça** Passatge Puig Marí.Can Gregori — **Escala** 1/50

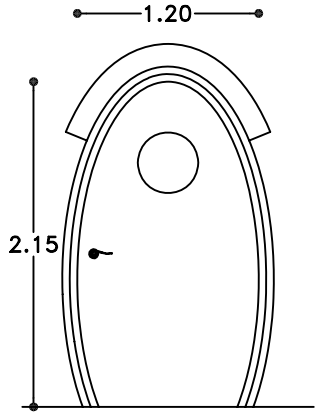
La propietat

Vegeteriana Pla de Carat S.C.C.L
Rep: Ramón Cónsul Berzunces

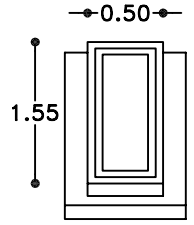
Els arquitectes

Gabriel Barbeta. colg.23529/6 telf.679424190

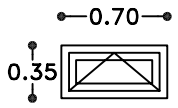
Esteban Navarrete. colg.52971/0 telf.619000277



Q1. Porta d'entrada amb vidrera de fusta massissa encadellat, amb tres punts de fixació i obertura antipalanca.
1 unitat

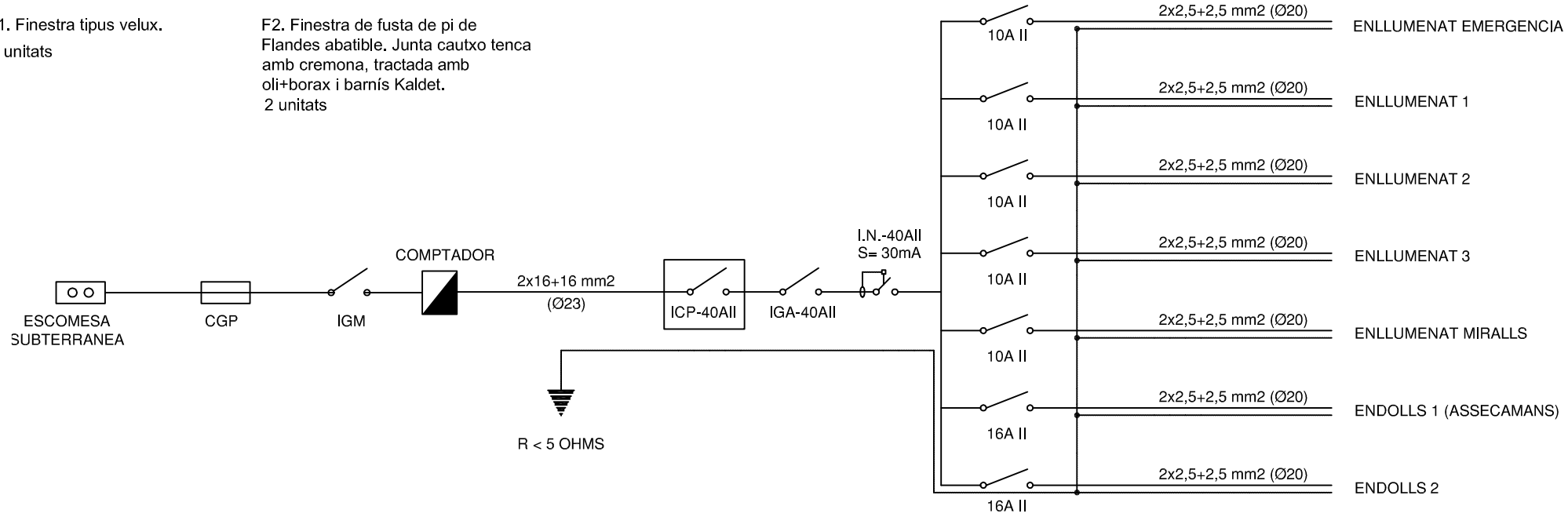


F1. Finestra tipus velux.
2 unitats



F2. Finestra de fusta de pi de Flandes abatible. Junta cautxo tenca amb cremona, tractada amb oli+borax i barnís Kaldet.
2 unitats

FUSTERIA

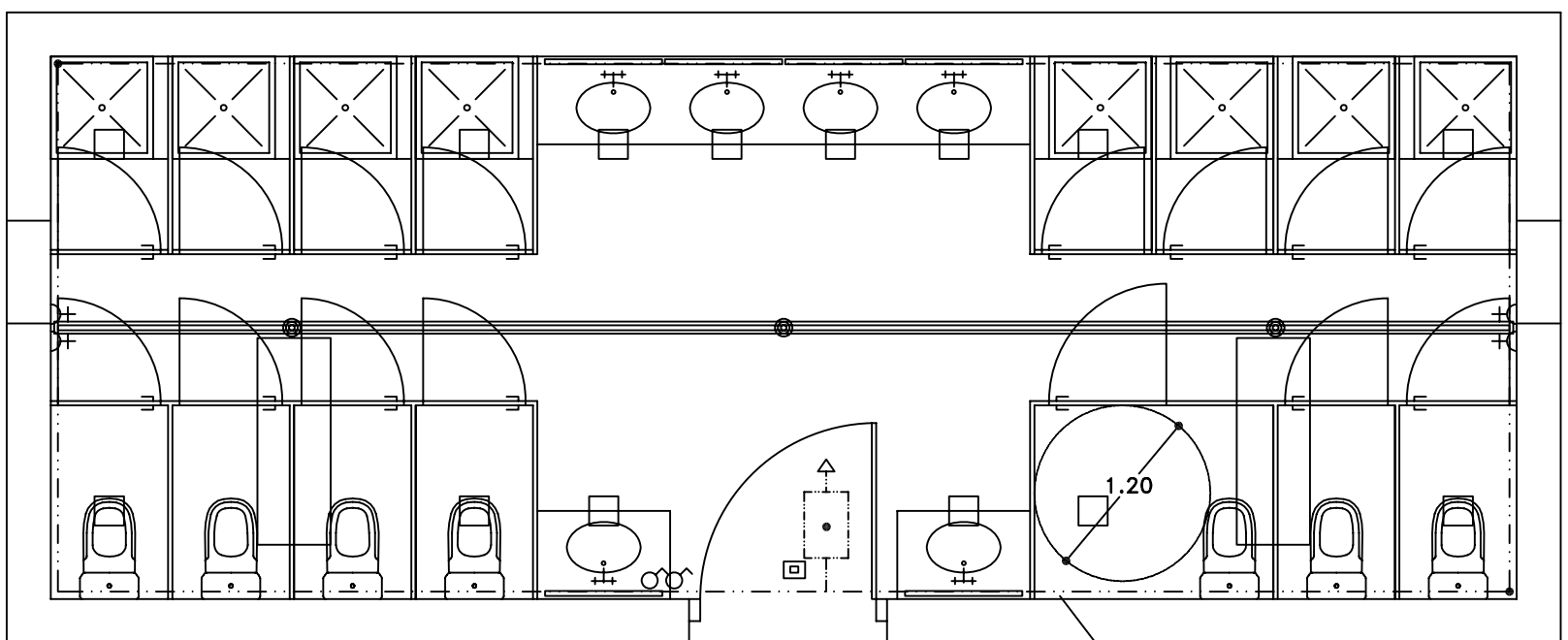


ESQUEMA ELECTRIC UNIFILAR

Llegenda inst. electrica

- llums d'emergencia
- interruptor
- endoll p. de terra
- lluminaria lineal que mitjançant fluorescents donen llum indirecta i directa.
- lluminaria lineal que mitjançant fluorescents dona llum directa.
- caixa de distribució i proteccions

NOTA *-La caixa general de protecció s'ubicarà a la sala de màquines existent de la piscina situada aprop de l'edifici de banys.*
-Queda prohibida qualsevol tipus de regata horitzontal



PLANTA INSTALACIONS ELECTRICITAT

Ecoarquitectura Gabi Barbeta

Nº EXPEDIENT: 094	PROJECTE DE REHABILITACIÓ PER EXECUCIÓ DE BANYS
PROJECTE BÀSIC I EXECUTIU	

Titol FUSTERIA I ELECTRICITAT — **nº planol** 05

Data 21/10/07 — **Adreça** Passatge Puig Marí.Can Gregori — **Escala** 1/50

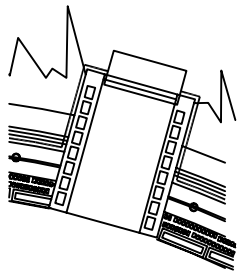
La propietat

Vegeteriana Pla de Carat S.C.C.L
Rep: Ramón Cónsul Berzunces

Els arquitectes

Gabriel Barbeta. colg.23529/6 telf.679424190

Esteban Navarrete. colg.52971/0 telf.619000277



Sobre els rentamans es colocarà utilitzant una peça ceràmica de forat 20x20cm en la coberta (peça utilitzada per les xemeneies) produint una obertura d'iluminació amb pavés

Gero

Finestra tipus velux

Plaques solars colocades horitzontals a 50º orientades a sud

Capa final de 7/10cm de terra vegetal amb vegetació autòctona

Subbase de sorra

Capa de 12 cm de formigó aillant amb una dosificació del 60% de residus de suro o viruta de fusta i adiccions pussolàniques (volcàniques, cendres, totxo triturat,..). El formigó es gunitarà sobre una malla bambusa guadua 15x15 Ø20mm

Volta catalana doblada amb rasilla 2ª amb morter de ciment natural ràpid i calç

Cércol perimetral 20x20cm de formigó armat HA-25/P/IIB amb 4Ø 8mm i e Ø6 cada 15cm

Reforç 2Ø 16 per rebre l'empenta horitzontal de la volta

Junta de segellat

Es colocarà una malla de galliner per retenir les terres quan la coberta tingui una pendent molt pronunciada.

Rajola ceràmica previ arrebossat

Envà amb maó de 4cm. per pas instalacions

Armadura horitzontal 1Ø10 per cada filada de mur

Mur de càrrega de blocs de morter 20x20x40 cms reomplerts amb formigó

Replè de terra estabilitzada al 8% amb cal en estat lleugerament humida i compactada amb martell petit en tongades de 15 cm.

Geotextil de la casa bettor

Membrana impermeable tipus tyveck o de polietilè Structure Geodrain o Geodrain amb geotextil de la casa Bettor o impermeabilitzant amb plaques Geodrain i geotex de Texsa de polietilè. El metre inferior anirà reforçat amb membrana de EPDM cautxú butil Imperlen 120 o Giscolene 120

Replè de grava

Tub de drenatge de polipropilè Ø160mm perforat

Formació de mitja canya

Base de morter per a tub de drenatge

Paviment de gres català natural antilliscant

Morter bastard de calç i ciment (e=4cm)

Terra radiant amb tubs de polietilè

Mur de càrrega de blocs de morter 20x20x40 cms reomplerts amb formigó

Junta de dilatació de suro 3cm.

Ø 10 a 20cm.

Ø 12 a 20cm.

0.60

0.50

Mallazo 15 x 15 Ø 8mm o bambusa guadua o formigó amb fibra de polipropilè (50 kg fibra/m3 formigó)

Solera aillant de formigó alleugerit amb suro o arlita (e=10cm)

Làmina de polietilè. Barrera de vapor.

Grava

Junta de dilatació de suro 3cm.

Sabata massissa de formigó ciclopi HM-25-B-40-i

Ø 10 a 20cm.

Ø 12 a 20cm.

Formigó de neteja

0.60

0.50

Ecoarquitectura Gabi Barbeta

Nº EXPEDIENT: 094	PROJECTE DE REHABILITACIÓ PER EXECUCIÓ DE BANYS
PROJECTE BÀSIC I EXECUTIU	

Títol DETALL CONSTRUCTIU — **nº planol** 06

Data 21/10/07 — **Adreça** Passatge Puig Marí.Can Gregori — **Escala** 1/20

La propietat

Vegeteriana Pla de Carat S.C.C.L
Rep: Ramón Cónsul Berzunces

Els arquitectes

Gabriel Barbeta. colg.23529/6 telf.679424190

Esteban Navarrete. colg.52971/0 telf.619000277