

6.e. UNA PROPUESTA DE DISEÑO DE CIMENTACIONES PROFUNDAS MEDIANTE EL EMPLEO DE MINIPILOTES DE CAÑA GUADÚA.

En este documento se pretende establecer las bases para el diseño y cálculo de lo que he venido a denominar *minipilote de caña guadúa*. La idea surgió en el viaje que un grupo de investigadores de la Universidad de Valladolid hicimos en febrero de 2012 a Ecuador, como consecuencia del Proyecto de la AECID concedido.

Pudimos observar que además de la tradicional construcción de la “quincha” con la caña guadúa, como ésta se utiliza en la ejecución de estructuras, por su excelente comportamiento mecánico, e incluso como se están elaborando tableros y paneles de muy alta calidad bajo la óptica de la sostenibilidad.

No tuvimos constancia de la utilización de la caña guadua en cimentaciones profundas surgiendo la idea de poder utilizarla en terrenos de poca consistencia, como pilotes prefabricados o semi prefabricados.

Continuando con la idea, hemos denominado al pilote *minipilote de caña guadúa* con el propósito de diferenciarlos de los micropilotes de mortero inyectado, ya que como veremos presentan importantes diferencias.

Para la ejecución de los minipilotes se parte de la caña guadua, material que presenta un buen comportamiento tensional tanto a compresión, tracción como a flexión. En nuestro caso su resistencia a la compresión es la que nos va a aportar una contribución importante a nuestro elemento estructural.

Se conciben como minipilotes hincados con la base taponada, con objeto de que actúen como minipilotes de desplazamiento, preservando de este modo el interior de la caña y mejorando el terreno del entorno del minipilote por la compactación producida durante la hincada. El minipilote transmitirá al terreno su carga por rozamiento, ya que su contribución por punta será muy pequeña y en principio se considera despreciable.

Para rellenar el interior de la caña se prevé la colocación de un hormigón en masa que protegerá su interior y aumentará la resistencia estructural a compresión. También se prevé colocar un redondo de acero que permitirá mejorar la unión entre los distintos tramos de los minipilotes dándole continuidad y al mismo tiempo mejorar su comportamiento estructural.

Pedro Olmos, Dr. Arquitecto.
Jorge Morán, Arquitecto.

Universidad de Valladolid. UVA. España.
Universidad Católica de Guayaquil. PUG. Ecuador.

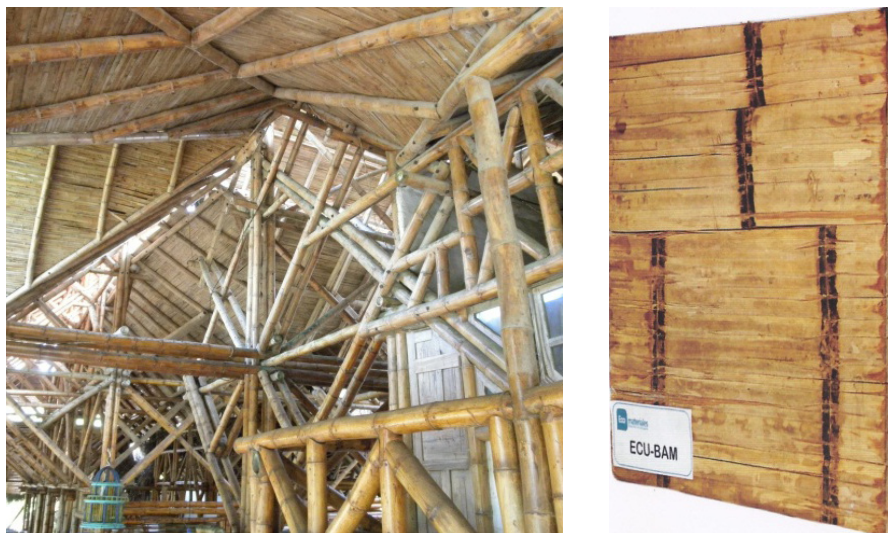


Figura 01. Estructura y panel prefabricado en caña Guadua.

1. DESCRIPCIÓN DEL MINIPOLTE

En un principio se ha limitado el diámetro de los minipilotes entre 100 y 130 mm. El motivo es múltiple, por un lado pensando en las posibilidades de su hincia con medios sencillos, por otro lado para que el hueco interior de la caña permita la incorporación del relleno de hormigón y la varilla de acero, y por otro también de gran importancia es que estos diámetros son utilizados en construcción y se corresponden con una madurez óptima (3 a 4 años).

Para facilitar el manejo del minipilote y su hincia, y dado que su forma de trabajo va a ser a compresión, se ha pensado en trocear la caña en tramos de 2,0 metros, uniendo los tramos precisos hasta alcanzar la resistencia dinámica prevista en su hincia.

Las cañas a utilizar deberán estar tratadas con objeto de preservarlas del ataque de microorganismos y para aumentar su vida útil. El método recomendado es el de inmersión en solución de bórax y ácido bórico, tanto por su eficiencia, coste y seguridad para usuarios y para el ambiente. La conclusión de la preservación por inmersión se realiza mediante el secado bajo plástico, y posteriormente al aire libre.

Según indica el Profesor Arquitecto Jorge Morán Ubidia ¹ el nivel de secado debe estar entre el 12% al 15%, ya que así aumenta la resistencia del material.

Las uniones longitudinales de los tramos de caña se diseñarán teniendo en cuenta el proceso de hincia y su disposición final.



Figura 02. Caña Guadua Angustifolia tierna o verde, madura y seca.

1. Manual de construcción. Construir con caña guadua. INBAR. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (2005).

2. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES A EMPLEAR Y ENSAYOS A REALIZAR A LOS MISMOS

Los materiales a emplear son: caña guadua, hormigón, y acero.

Caña guadúa

Como ya hemos indicado se prevé utilizar cañas maduras (3 a 4 años) tratadas de diámetros nominales (diámetro exterior en mm) DN-100 a DN-130.

Los ensayos que se prevé realizar a las cañas son ensayos de compresión paralela a la fibra, según las normas ISO-TC 165 definidas por INBAR (1999). Su objeto es determinar la resistencia o esfuerzo admisible de la caña guadua utilizada como minipilote.

Las muestras a ensayar deben ser tomadas de las partes alta, media y baja de la caña, y las probetas deben tener una altura igual al doble del diámetro exterior y estar exentas de nudos. No obstante se propone analizar también muestras con nudo, con objeto de ver su comportamiento final una vez incorporado el hormigón.

Se propone analizar tres diámetros DN-100, DN-115 y DN-130

De cada diámetro nominal se seleccionarán dos cañas, tomándose 4 muestras de cada parte (alta, media y baja) y 2 de cada parte con nudo central. La mitad de las muestras se utilizarán para ensayos a compresión de la caña y la otra mitad para ensayos de compresión de la caña con hormigón.

Los ensayos de compresión se obtendrán de la rotura de las probetas: 2 sin nudo y 1 con nudo por tramo, lo que supone para las dos cañas un total de 6 ensayos por tramo, y 18 ensayos por diámetro nominal (ver tablas de ensayos que se proponen a continuación).

El esfuerzo a compresión se determinará mediante la fórmula:

$$\sigma_{ult} = F_{ult}/A$$

siendo

σ_{ult} = Esfuerzo último de compresión en MPa

F_{ult} = Carga máxima en N

A = área promedio transversal en mm²

Para determinar el área media transversal se prevé tomar medidas de los diámetros exterior e interior según dos diámetros en cada extremo de la muestra, obteniéndose de este modo cuatro medidas por probeta. El valor del área vendrá dado por la ecuación:

$$A = \pi/4 \cdot (D_{med,ext}^2 - D_{med,int}^2)$$

siendo Dmed, el diámetro medio obtenido.

Por lo tanto para determinar el esfuerzo promedio de compresión de cada diámetro nominal, realizaremos los siguientes ensayos, que para su mejor descripción lo hacemos en la siguiente tabla:

Caña	1						2					
Ubicación	Basal		Media		Alta		Basal		Media		Alta	
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Diámetro exterior (mm)												
Diámetro interior (mm)												
Área (mm ²)												
Carga máxima (N)												
Esfuerzo (MPa)												
Esfuerzo promedio (MPa)												

Con los valores obtenidos establecemos una curva de distribución y asignamos el valor del percentil 5% como el correspondiente al esfuerzo *último*.

Para determinar el esfuerzo admisible aplicaremos dos coeficientes de minoración:

- FS: Factor de servicio y seguridad, que adoptamos el valor de FS=1,6 que es un valor habitual en el cálculo de hormigón y madera.

- FCD: Factor de duración de carga. En este caso adoptamos el valor propuesto el Manual de diseño para maderas del Grupo Andino, FDC=1,25

Resultados obtenidos por distintos investigadores cifran el esfuerzo admisible en torno a 13 o 14 MPa.

Aunque para la determinación de la resistencia a compresión de la caña se excluyen las probetas con nudo, vamos a realizar ensayos de probetas con nudo con objeto de conocer su comportamiento y poder analizar su repercusión cuando se rellene la caña con hormigón. Por ello se realizarán los siguientes ensayos:

Caña	1						2					
	Basal		Media		Alta		Basal		Media		Alta	
Ubicación	13		14		15		16		17		18	
Muestra												
Diámetro exterior (mm)												
Diámetro interior (mm)												
Área (mm ²)												
Carga máxima (N)												
Esfuerzo (MPa)												
Esfuerzo promedio (MPa)												

Hormigón

Respecto al hormigón hay que tener en cuenta que en nuestro caso su principal característica debe ser que tenga una fluidez adecuada para que pueda ocupar, sin disgregarse, todo el interior de la caña del minipilote, mas que alcanzar un alto valor de resistencia estructural.

El vertido en pilotes y muros pantalla suele hacerse con “tubo tremie” que en el fondo es una tubería telescópica de unos 200/300 mm de diámetro, con un embudo en cabeza, bajando el tubo hasta el fondo de la excavación, extrayéndose poco a poco una vez que el hormigón va rellenando la perforación.

En nuestro caso, la propia caña puede hacer las veces del “tubo tremie” ya que el diámetro interior puede oscilar entre 80-110 mm para los diámetros nominales de caña previstos (DN-100 a DN-130).

Para ello vamos a analizar el tamaño máximo de árido a utilizar en la confección del hormigón.

Si cuando se utiliza un “tubo tremie” (diámetro 200 mm) los tamaños máximos de árido están en torno a 25 mm (árido rodado) y 20 mm (árido machacado), las relaciones tamaño máximo árido/diámetro tubo son respectivamente 1/8 (árido rodado) y 1/10 (árido machacado). Utilizando estas relaciones los tamaños máximos en nuestro caso pueden estar en torno a 12 mm (árido rodado) y 10 mm (árido machacado).

El valor de la consistencia, medida en un cono de Abrams pensamos debe estar entre:

$$140 \text{ mm} \leq H \leq 180 \text{ mm}$$

por lo que un valor aceptable podría estar en $H = 160 \text{ mm}$.

La dosificación del hormigón deberá ser rica en cemento y tendrá al menos un par de tipos de arena, con una relación agua/cemento inferior a 0,6 con objeto de alcanzar los objetivos previstos. Una posible dosificación, por m³ de hormigón, podría ser la siguiente:

- Cemento..... 325 Kg
- Agua / A/C= 0,55)..... 180 Kg
- Arena fina (0,08/0,125 mm)..... 200 Kg
- Arena gruesa (0,125/2,0 mm)..... 750 Kg
- Áridos (2/12 mm)..... 900 Kg

Habrá que hacer una cantidad de hormigón suficiente para:

- Rellenar las probetas de caña que se van a ensayar posteriormente
- Sacar las probetas necesarias para determinar la resistencia característica del hormigón.
- Poder realizar el vertido vertical de 2 cañas para cada uno de los diámetros nominales de estudio (DN-100, DN-115 y DN-130), que deberán

tener una altura de unos 4,0 o 5,0 metros, que puede ser la longitud media de los minipilotes. Para vibrar el hormigón dentro de la caña se puede utilizar un redondo de acero, ya que en la ejecución del minipilote intervendrán redondos de acero y esta es una práctica vibratoria utilizada.

En lo que respecta a la conservación de las probetas de hormigón realizadas para la obtención de la resistencia característica así como de las cañas hormigonadas, se seguirán las normas locales, y en su defecto la normativa española (EHE-08).

Caña rellena de hormigón

En función de los objetivos que planteamos tenemos que distinguir distintos aspectos en la ejecución y control de la caña rellena con hormigón:

- Probetas de caña rellenas con hormigón
- Hormigonado de cañas
- Obtención de probetas de caña hormigonada

Con las probetas de caña obtenidas y no ensayadas (12 sin nudo y 6 con nudo por diámetro nominal), una vez rellenas de hormigón, curadas y transcurridos los 28 días para alcanzar el hormigón su resistencia característica, se procederá a realizar ensayos de compresión de las probetas, de forma análoga a las realizadas a las probetas de caña vacías.

De cada diámetro nominal realizaremos los siguientes ensayos para las probetas sin nudos.

Caña hormigonada	1						2					
Ubicación	Basal		Media		Alta		Basal		Media		Alta	
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Diámetro exterior (mm)												
Diámetro interior (mm)												
Área sección caña (mm ²)												
Área sec. hormigón (mm ²)												
Área sección total (mm ²)												
Carga máxima (N)												
Esfuerzo (MPa)												
Esfuerzo promedio (MPa)												

Y los siguientes ensayos para las probetas con nudo.

Caña	1						2					
Ubicación	Basal		Media		Alta		Basal		Media		Alta	
Muestra	13		14		15		16		17		18	
Diámetro exterior (mm)												
Diámetro interior (mm)												
Área sección caña (mm ²)												
Área sec. hormigón (mm ²)												
Área sección total (mm ²)												
Carga máxima (N)												
Esfuerzo (MPa)												
Esfuerzo promedio (MPa)												

De cada diámetro nominal se elegirán dos cañas de unos 5 metros de longitud, y se procederá a su hormigonado. Para ello se colocarán verticales y mediante el empleo de un embudo (semejante al de los tubos tremie) se verterá el hormigón en el interior de la caña de forma continua. Una vez rellena la caña se procederá a su vibrado empleando para ello una barra de acero (un redondo corrugado de 12 o 16 mm de diámetro), reponiendo en su caso el hormigón necesario hasta que la caña quede completamente llena.

Para su curado la caña se mantendrá en un lugar adecuado que permita preservarla del sol y de la lluvia, siguiendo el mismo protocolo que se utiliza para las probetas de hormigón.

Transcurridos los 28 días, se procederá a obtener mediante corte con radial o sierra, probetas de las mismas zonas y características de las obtenidas de las cañas vacías, con objeto de realizar por cada diámetro nominal los mismos ensayos que hemos realizado para las probetas rellenas (12 sin nudo y 6 con nudo).

El corte de las probetas permitirá observar la continuidad del hormigonado y la textura del hormigón.

Una vez realizados los ensayos se podrán analizar los resultados obtenidos.



Figura 03. Unión en prolongación longitudinal propuesta por el Profesor Arquitecto Jorge Morán Ubidia.

3. DESCRIPCIÓN DE LA HINCA DE LOS MINIPILOTES

Como ya hemos indicado, con objeto de facilitar la operación, se piensa en hincar tramos de caña de 2,0 m de longitud, que en caso necesario posteriormente se unirán en prolongación longitudinal, mediante un sistema semejante al que se propone en la Figura 3.

Este tipo de unión además de sencillo, pienso que va a permitir transmitir bien los esfuerzos de hinka, que es el objetivo de la unión, dado que con posterioridad el hormigón y la armadura interior darán la continuidad estructural definitiva al minipilote.

Tal vez las uniones puedan provocar un problema en la hinka y se pueda optar por colocar varios minipilotes cortos en lugar de menos minipilotes largos, esa es una opción a ensayar y analizar.

El primer trozo de caña a hincar tiene que estar provisto de un tapón o punta que facilite la hinka y que evite que el terreno se introduzca en el interior de la caña. En principio se ha pensado en una punta de madera que se introduzca unos 20 cm. dentro de la caña y que disponga de una punta cónica de ángulo 60° aproximadamente. La punta cónica debe tener un diámetro ligeramente superior al diámetro nominal de la caña ($DN + 20$ mm. aproximadamente) con objeto de garantizar bien el apoyo de la caña en el cono y abrir una perforación que permita mejorar la hinka a pesar de las posibles irregularidades de dimensiones de la caña y de sus nudos. La zona de caña

en la que penetra la punta se puede reforzar con un par de abrazaderas de acero galvanizado que sirvan para evitar la posible apertura de la caña con el golpeo de la hinka.

Para la hinka se ha pensado en un equipo de manejo manual, que permita ejecutar el proceso adecuadamente y controlar la energía utilizada en cada golpe.

Se prevé la posible adaptación de un equipo de hinka de un penetrómetro dinámico ligero. Esto conlleva varias ventajas. En primer lugar el equipo es de fácil manejo y transporte. De otra parte se pueden correlacionar los datos obtenidos en la hinka del minipilote con los del ensayo de penetración dinámica.

El proceso de hinka se basa en dejar caer libremente la masa (M), que tras una serie de tanteos se ha estimado de 25 Kg, desde una altura (H) de 50 cm, para golpear la caña. La altura de caída de la masa deberá ser siempre igual a 50 cm, por lo que dicha altura deberá controlarse antes de cada golpe.

En los primeros ensayos, con objeto de obtener el mayor número de datos se medirá la penetración del minipilote originada por la caída de la masa. Para ello se prevé que el equipo de medida disponga de una escala, tomándose la medida de la cabeza del minipilote en la escala antes y después de cada golpe.

El valor de referencia N será el número de golpes necesario para que el minipilote penetre una cierta cantidad en el terreno, esta penetración de referencia (e) se ha tomado de 10 cm en función de unos análisis energéticos realizados. Evidentemente N será un índice de la resistencia a la compresión del terreno, y nos servirá para establecer el máximo esfuerzo axial a compresión del minipilote a compresión en relación con el terreno en el que se está hincando, y por lo tanto poder dimensionarlo estructuralmente.

El valor de la resistencia a la compresión del terreno es el de su resistencia estática (q_c). Los parámetros derivados de la hinka disponibles nos permitirán calcular la resistencia dinámica (q) a la penetración del minipilote en el

terreno, mediante el empleo de fórmulas energéticas basadas en el principio de conservación de la energía. Una de las más usadas en el cálculo del pilotaje es la conocida como fórmula de los holandeses

$$q_d = \frac{M^2 \cdot H}{e(M + P)A}$$

donde

q_d = Resistencia dinámica (Kg/cm²)

M = Masa de golpeo (Kg)

H = Altura de caída de la masa (cm)

e = penetración unitaria (e_R/N)

P = Peso de la caña (Kg)

A = sección de la punta (cm²)

Si hacemos en paralelo ensayos de penetración dinámica podemos establecer una correlación entre los valores obtenidos del número de golpes de la hincada del penetrómetro N_p y del número de golpe del minipilote N_{mp}, a través de las fórmulas energéticas, mediante la relación:

$$N_{mp} = \frac{M_{mp} \times H_{mp} \cdot A_p \cdot e_p}{M_p \cdot H_p \cdot A_{mp} \cdot e_{mp}}$$

En esta expresión los subíndices “mp” se refieren a los minipilotes y los subíndices “p” al penetrómetro, siendo el significado de las variables el mismo que en la expresión de la resistencia dinámica.

La relación entre las resistencias estática y dinámica es difícil de establecer, pues depende del tipo de terreno, sobre todo de su granulometría, de su humedad, y de otros factores (cohesión, ángulo de rozamiento, densidad....). Será por consiguiente un factor a investigar.

4. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA MINIPILOTE-TERRENO

En este epígrafe se pretende establecer un programa que permita obtener una serie de datos resistentes del terreno así como la viabilidad de la hincada de las cañas, mediante el prototipo de hincada descrito anteriormente, comprobando si los valores de los parámetros prefijados: masa, altura de caída y penetración de referencia, son los adecuados. Se prevén los siguientes ensayos:

- Ensayos de penetración dinámica del terreno
- Hincada del minipilote y obtención de su diagrama de penetración dinámica
- Ensayo de penetración estática del minipilote hincado

El objeto es poder comprobar la viabilidad de la hincada del minipilote, poder validar la fórmula de correlación de los valores de N_p y N_{mp}, y por último establecer una relación entre las resistencias dinámica y estática (q_d/q_c). Para ello se elegirá un terreno de ensayo de poca consistencia. El motivo es doble, por un lado eso facilitará la hincada y por otro será uno de los escenarios habituales de uso de los minipilotes.

En el terreno de ensayo se relazarán calicatas que permitan reconocer el terreno hasta una profundidad de al menos 3,5 o 4,0 metros, así como obtener muestras para su identificación:

- Análisis granulométrico
- Límites líquido y plástico
- Densidad aparente
- Densidad seca
- Humedad
- Resistencia a la compresión simple

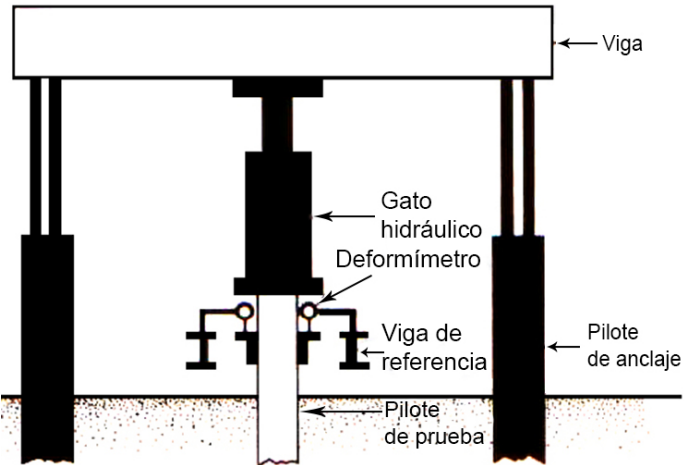


Figura 04. Gato y medidores de desplazamiento

Se procederá a la hinca de tres minipilotes de DN-100. Optamos por el diámetro menor, dentro del rango de estudio, para que sea más fácil su hinca. Los minipilotes estarán alineados y separados unos 35 o 40 cm entre sí. Se realizará en primer lugar la hinca de los pilotes exteriores y por último la del pilote interior.

Los datos de la hinca se reflejarán en una tabla como la siguiente:

Golpe	Penetración unitaria e (cm)	Penetración a origen Z (cm)
1		
2		
3		
4		
5		

En la tabla se indicará para cada golpe la penetración unitaria, obteniéndose posteriormente la penetración acumulada, hasta finalizar el proceso de hinca.

La hinca del minipilote se iniciará con la hinca del primer tramo (2,0 m de longitud) hasta que haya penetrado 1,80 m aproximadamente y se proceda a unir el siguiente tramo para continuar con el proceso. Se abandonará la hinca cuando se hayan alcanzado dos penetraciones unitarias consecutivas inferiores a 0,3 o 0,4 cm.

Con los datos de la tabla se confeccionará un diagrama de penetración.

Con el minipilote central se procederá de igual manera, si bien vamos a aprovechar su posición para establecer medidas de resistencia estática.

Para la medida de la resistencia estática utilizaremos un gato y unos medidores de desplazamiento, tales como los de la figura 4.

El procedimiento será el siguiente. Se hincará mediante el sistema de golpeteo el minipilote hasta alcanzar los primeros 40 cm de penetración.

A continuación se retirará el sistema de hinca y se acoplará el sistema de medida de resistencia estática.

Partiendo de una presión mínima (0,1 o 0,2 Kg/cm²) se procederá a aplicar escalones de carga crecientes (por ejemplo 1,5 o 2 veces la carga aplicada anteriormente), manteniendo la presión hasta que se estabilice la penetración, dejando pasar unos minutos para volver a aplicar un segundo escalón de carga, y así sucesivamente, hasta alcanzar una penetración acumulada de 5 cm.

Los valores de presión del gato y penetración de cada escalón de carga se contabilizarán, con objeto de poder elaborar en diagrama de tensión-deformación del proceso.

El proceso continuará con hinca dinámica hasta alcanzar los 80 cm de penetración a origen del minipilote, momento en que se volverá a aplicar la medición de la resistencia estática, y así sucesivamente.

5. DETERMINACIÓN DEL TOPE ESTRUCTURAL DEL MINIPILOTE

Et tope estructural es la resistencia que el minipilote puede resistir, desde el punto de vista estructural, y dependerá de la resistencia de sus elementos constitutivos: caña, hormigón y barra de acero.

Podemos obtener un valor teórico que podemos comprobar con los resultados de los ensayos de rotura a compresión realizados a las probetas de caña rellenas de hormigón.

Se ha realizado un tanteo, teniendo en cuenta resistencias habituales de los distintos materiales, para un minipilote de DN-100, cuyos resultados se reproducen a continuación:

Datos geométricos

Diámetro exterior	100	mm
Diámetro interior caña	92	mm
Diámetro interior nudo	85	mm

Características resistentes

Hormigón

Resistencia característica	200,0	Kp/cm2
Coef. De minoración	1,5	
Resistencia de cálculo	133,3	Kp/cm2

Acero

Resistencia característica	5.000,0	Kp/cm2
Coef. De minoración	1,15	
Resistencia de cálculo	4.000,0	Kp/cm2

Caña guadua

Resistencia última	260,0	Kp/cm2
Coef. Seg y servicio	1,6	
Coef. Duración carga	1,25	
Resistencia de cálculo	130,0	Kp/cm2

Secciones resistentes

Hormigón	55,6	cm2
Acero		
Armadura (1Φ12,1Φ16,1Φ20)	12	
Sección	1,13	cm2
Caña Guadua	12,1	cm2

Tope estructural

Contribución hormigón	6.299,7	Kp
Contribución acero	4.521,6	Kp
Contribución caña Guadua	1.567,5	Kp

Coefficiente pandeo

* Cohesivo blando	0,75
* Granular flojo/medio y cohesivo medio	0,85
* Granular compacto y cohesivo duro	1

Tope estructural

* Cohesivo blando	7.743,0	Kp
* Granular flojo/medio y cohesivo medio	8.775,4	Kp
* Granular compacto y cohesivo duro	10.324,0	Kp

Axil estructural admisible

Coeficiente mayoración de cargas	1,6	
* Cohesivo blando	4.839,4	Kp
* Granular flojo/medio y cohesivo medio	5.484,6	Kp
* Granular compacto y cohesivo duro	6.452,5	Kp