# DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO DE LA GUADUA ROLLIZA (ANGUSTIFOLIA KUNTH) Y DEL MORTERO COMÚN

**JUAN JOSÉ CARVAJAL CERTUCHE**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**
**FACULTAD DE INGENIERÍA**
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**
**BOGOTÁ D.C.**
**2012**

# DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO DE LA GUADUA ROLLIZA (ANGUSTIFOLIA KUNTH) Y DEL MORTERO COMÚN

**JUAN JOSÉ CARVAJAL CERTUCHE**

**TESIS DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**Director:**

**JUAN FRANCISCO CORREAL DAZA Ph.D.**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**
**FACULTAD DE INGENIERÍA**
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**
**BOGOTÁ D.C.**
**2012**

# CONTENIDO

Lista de Figuras ..... iii

Lista de Tablas ..... vi

RESUMEN ..... 1

1. Introducción ..... 2

1.1. Objetivos ..... 3

1.2. Generalidades de la Guadua ..... 4

1.3. La Guadua como material de construcción ..... 7

2. Marco Teórico ..... 9

2.1. Estudios previos ..... 9

2.2. Esfuerzo de aplastamiento ..... 15

2.3. Aplastamiento en guadua y mortero ..... 16

3. Ensayos ..... 18

3.1. Metodología ..... 18

3.2. Preparación de ensayos ..... 20

3.3. Procedimiento de ensayo ..... 27

3.4. Resultados ..... 28

3.5. Observaciones de los ensayos ..... 42

4. Análisis de Resultados ..... 43

4.1. Análisis de falla ..... 43

4.2. Regresión Lineal Múltiple ..... 52

4.3. Análisis estadístico de los resultados ..... 60

5. Conclusiones ..... 84

6. Bibliografía ..... 86

7. Anexos ..... 89

7.1. Fotografías de los ensayo ..... 89

7.2. Gráficas de esfuerzo-desplazamiento mortero ..... 92

7.3. Curvas esfuerzo-desplazamiento Guadua ..... 100

7.4. Análisis de Weibull ..... 102

# Lista de Figuras

Figura 1.2-1. Guadua Angustifolia Kunth ..... 4

Figura 1.2-2. Sistema radical de la guadua: Rizoma ..... 5

Figura 1.2-3. Partes de una planta de guadua. Fuente: (Suarez, 2011) ..... 6

Figura 1.3-1. Uso de la guadua como zapatas aisladas y corridas (Jayanetti & Follet, 1998) ..... 8

Figura 1.3-2. Puente de Guadua en la ciudad de Bogotá ..... 8

Figura 2.1-1. Comparación Resistencia paralela a la fibra entre distintas maderas ..... 10

Figura 2.1-2. Comparación Resistencia al corte paralelo a la fibra de distintas maderas ..... 12

Figura 2.1-3. Principales tipos de uniones mecánicas. ..... 15

Figura 2.2-1. Ejemplo de esfuerzo de aplastamiento (NSR-10) ..... 16

Figura 2.3-1. Área de contacto aplastamiento mortero ..... 17

Figura 2.3-2. Área de contacto aplastamiento guadua ..... 17

Figura 3.2-1. Corte de probetas de mortero ..... 20

Figura 3.2-2. Copas sierras de distintos diámetros ..... 21

Figura 3.2-3. Preparación final de probetas de mortero ..... 22

Figura 3.2-4. Distancia al nudo. Tomado de (Suárez, 2011) ..... 22

Figura 3.2-5. Corte de probetas de guadua ..... 23

Figura 3.2-6. Prensa universal TriTech 100kN ..... 25

Figura 3.2-7. Montaje del ensayo de aplastamiento de mortero y de compresión sobre cubos de mortero ..... 26

Figura 3.3-1. Probeta de mortero fallada y Probeta de guadua fallada ..... 27

Figura 3.4-1. Curvas esfuerzo-desplazamiento para el primer grupo de datos ..... 29

Figura 3.4-2. Resistencia al aplastamiento del mortero en función del f'c. Perno : 1/2" ..... 35

Figura 3.4-3. Resistencia al aplastamiento del mortero en función del f'c. Perno : 3/8" ..... 36

Figura 3.4-4. Resistencia a la compresión de los cubos a diferentes edades ..... 36

Figura 3.4-5. Curva esfuerzo-desplazamiento para la muestra #1 (1/2" – Dn = 2cm) ..... 37

Figura 3.4-6. Curvas esfuerzo desplazamiento para el grupo de datos 5 ..... 39

Figura 3.4-7. Curvas esfuerzo desplazamiento para el grupo de datos 4 ..... 39

Figura 3.4-8. Valores medios de resistencia para cada diámetro de perno ..... 40

Figura 3.4-9. Comparación de curvas esfuerzo-desplazamiento ..... 41

Figura 3.4-10. Comparación Montajes empleados. ..... 41

Figura 4.1-1. Falla típica ensayos de aplastamiento en mortero ..... 43

Figura 4.1-2. Mortero de refuerzo dividido ..... 44

Figura 4.1-3. Esquema de fuerzas internas presentes en la unión ..... 45

Figura 4.1-4. Falla por aplastamiento en guadua. Perno : 5/8"- Dn=2 cm y Dn = 10 cm respectivamente. ..... 50

Figura 4.2-1 Plano ajustado de regresión ..... 54

Figura 4.2-2. Plano de regresión Mortero unificado con datos del grupo CIMOC (Mortero) ..... 57

Figura 4.2-3. Plano de regresión Guadua ..... 58

Figura 4.2-4. Plano de regresión unificado con los datos del grupo CIMOC (Guadua) ..... 60

Figura 4.3-1. Comparación de distribuciones de probabilidad. Mortero de baja resistencia .....61

Figura 4.3-2. Comparación de distribuciones de probabilidad. Mortero de alta resistencia .....62

Figura 4.3-3. Comparación de distribuciones de probabilidad. Basa .....63

Figura 4.3-4. Comparación de distribuciones de probabilidad. Sobrebasa .....63

Figura 4.3-5. Resumen estadístico Resistencia Baja .....64

Figura 4.3-6. Resumen estadístico Resistencia Alta .....65

Figura 4.3-7. Resumen estadístico Basa .....66

Figura 4.3-8. Resumen estadístico Sobrebasa .....66

Figura 4.3-9. Distribución de probabilidad. Resistencia Baja .....70

Figura 4.3-10. Función de probabilidad acumulada. Resistencia Baja .....70

Figura 4.3-11. Función de probabilidad para guadua. Basa .....72

Figura 4.3-12. Función de probabilidad para guadua. Perno : 1/2" .....72

Figura 4.3-13. Distribuciones solapadas (Probabilidad de falla). Fuente: (Yañez, Perdomo, & Gomez de la Vega) .....73

Figura 4.3-14. Modelo de Carga-Resistencia en función de la confiabilidad deseada. Mortero 76

Figura 4.3-15. Modelo de Carga-Resistencia en función de la confiabilidad deseada. Guadua ..78

Figura 4.3-16. Resumen estadístico resultados simulación Montecarlo. Mortero. .....81

Figura 4.3-17. Resumen estadístico resultados simulación Montecarlo. Guadua. .....81

# Lista de Tablas

Tabla 1. Esfuerzos de Tensión en la Guadua Angustifolia Kunth (Suarez, 2011) ..... 9

Tabla 2. Esfuerzos de Compresión en la Guadua Angustifolia Kunth (Suarez, 2011) ..... 10

Tabla 3. Esfuerzos de Cortante en la Guadua Angustifolia Kunth (Suarez, 2011) ..... 11

Tabla 4. Esfuerzos de Flexión en la Guadua Angustifolia Kunth (Suarez, 2011) ..... 12

Tabla 5. Densidad de acuerdo a la altura y edad de la Guadua A.K. (Correal & Arbeláez, 2010) ..... 13

Tabla 6. Módulo de elasticidad a compresión con un C.H. del 12% (Correal & Arbeláez, 2010) ..... 13

Tabla 7. Esquema de ensayos guadua ..... 19

Tabla 8. Esquema de ensayos Mortero ..... 19

Tabla 9. Resultados Ensayos de Aplastamiento en Mortero ..... 30

Tabla 10. Resultados aplastamiento mortero después de descartado por gráficas ..... 33

Tabla 11. Resultados Aplastamiento de guadua ..... 38

Tabla 12. Comparación Modelo Mander - Ensayos ..... 47

Tabla 13. Regresión lineal múltiple efectuada ..... 53

Tabla 14. Regresión lineal múltiple unificada con datos del grupo CIMOC (Mortero) ..... 56

Tabla 15. Regresión lineal múltiple guadua ..... 57

Tabla 16. Regresión efectuada unificada con los datos del grupo CIMOC (Guadua) ..... 59

Tabla 17. Modelo de distribución basado en el nivel de confiabilidad deseado. Mortero ..... 68

Tabla 18. Modelo de distribución basado en el nivel de confiabilidad deseado. Guadua .....71

Tabla 19. Análisis Carga-Resistencia para distintos valores medios de la carga.....74

Tabla 20. Análisis Carga-Resistencia para distintos valores medios de la carga. Guadua .....77

Tabla 21. Simulación de Montecarlo.....79

Tabla 22. Resistencia al aplastamiento del mortero en función de la confiabilidad deseada.....83

Tabla 23. . Resistencia al aplastamiento de la guadua en función de la confiabilidad deseada. 83

# RESUMEN

Con el objetivo de entender más profundamente el comportamiento del sistema de uniones y conexiones de las estructuras de guadua rolliza (particularmente de la especie Angustifolia Kunth) se adelantó una serie de ensayos experimentales enfocados a conocer con mayor precisión y confiabilidad las propiedades mecánicas del material involucradas en las uniones, más específicamente, la resistencia al aplastamiento tanto de la guadua como tal como del mortero de relleno usado como refuerzo en las conexiones.

La investigación naturalmente se dividió en dos siguiendo este criterio con el objetivo de evaluar individualmente las variables que afectan cada uno de los dos materiales involucrados. En el caso de la guadua se evaluó la influencia del diámetro del perno de conexión y de la ubicación del mismo respecto al nudo de cada cañuto. Los resultados indican que el diámetro del perno no tiene una influencia considerable sobre la resistencia pero la distancia al nudo sí juega un papel muy importante sobre ésta.

Por otra parte, para el análisis de la resistencia al aplastamiento del mortero se definieron como variables incidentes la resistencia a la compresión del mismo y el diámetro del perno pasador. Los resultados indican que la resistencia al aplastamiento del mortero es proporcional a ambas variables y es la capacidad del mortero la que gobierna principalmente el comportamiento de la conexión

Usando el método de regresión múltiple se desarrollaron dos ecuaciones empíricas que describen la resistencia al aplastamiento de cada material en función de las variables antes mencionadas.

Adicionalmente, usando los resultados obtenidos se llevó a cabo una serie de análisis estadísticos que contempló un análisis de aproximación a una distribución, una simulación de Montecarlo, un análisis Weibull entre otros. El anterior proceso se desarrolló con el objetivo de obtener una función de confiabilidad simplificada que tenga en cuenta implícitamente todos los posibles casos de combinación de diámetro de perno con distancia al perno y diámetro de perno con resistencia a la compresión del mortero.

# 1. INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos y la industrialización han conducido a la tecnificación de prácticamente todos los procesos productivos de la sociedad, incluyendo la modernización de procesos, productos y materiales. Sin embargo, el sector de la construcción en Colombia parece haber quedado estancado en paradigmas tradicionales como el uso sistemático y casi obligatorio del concreto y la mampostería estructural.

Las propiedades estructurales de la guadua han sido aprovechadas durante siglos pero sólo en las últimas tres décadas se ha empezado a desarrollar conocimiento científico al respecto. Las primeras investigaciones se llevaron a cabo en China (Au, Ginsbrug, Poon, & Shin, 1978) y hasta el día de hoy se siguen llevando a cabo innumerables investigaciones sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la guadua. A pesar de las enormes bondades estructurales de la guadua comprobadas en repetidas ocasiones por ejemplo, en los trabajos de Khosrow, Ghavami, Albanise & Marinho (2005); Gutierrez (2000) y Gnanaharan & Janssen (1994) la implementación masiva de este material no ha sido posible. Esto se debe, por un lado, a la cultura tradicionalista que impera en el país, y por otro a la falta de estándares de diseño tanto de propiedades mecánicas como de aplicación estructural (Chung & Yu, 2002).

Cabe resaltar que la guadua rolliza tiene la capacidad de desempeñar el papel tanto de viga como de columna y el diseño de su capacidad portante no difiere mucho de la teoría elástica tradicional, sin embargo, su forma cilíndrica limita el uso de elementos de ajuste y empotrado que garantice la unión de dos o más piezas; adicionalmente, el empleo de puntillas, clavos, tornillos, grapas y tensores de atornillar no ofrece suficiente seguridad (Giraldo & Sabogal, 2007). A pesar que el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo-Resistente NSR-10 incluye un título dedicado a la madera estructural y a la guadua, los lineamientos de diseño de conexiones en guadua rolliza no están lo suficientemente desarrollados para que su aplicación pueda ser masiva.

Como complemento al proyecto de investigación desarrollado por el Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles (CIMOC) de la Universidad de los Andes, el presente proyecto de grado pretende determinar la capacidad de aplastamiento de la guadua rolliza colombiana (Angustifolia Kunth) y del mortero común para poder validar el modelo de

la teoría de la fluencia para el diseño de conexiones de guadua rolliza propuesto por el CIMOC y planteado en el proyecto de grado de la Ingeniera Ana María Suarez (Suarez, 2011)

## 1.1. Objetivos

El objetivo principal del proyecto es complementar el conocimiento adquirido sobre el comportamiento de la guadua y del mortero ante solicitaciones de carga impuestas por un elemento puntual como un perno o una varilla roscada. Adicionalmente, el propósito de los ensayos adelantados es determinar con mayor certeza la resistencia al aplastamiento o esfuerzo de contacto de ambos materiales en función de variables de diseño como el diámetro del perno, la distancia del perno al nudo de guadua y la resistencia a la compresión de diseño del mortero de relleno.

Por otra parte, se puede identificar objetivos específicos derivados del propósito original planteado:

- ✓ Determinar la influencia del diámetro del perno y de la resistencia de diseño del mortero en la falla por aplastamiento del material y desarrollar un modelo que calcule la resistencia al aplastamiento del mismo como función de esas dos variables de entrada.
- ✓ Determinar la influencia de la distancia de ubicación del perno respecto al nudo de cada cañuto de guadua y desarrollar un modelo análogo al de mortero en función del diámetro del perno y de la distancia de ubicación del perno respecto al nudo del cañuto.
- ✓ Realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos que permita determinar valores de diseño probabilísticos más cercanos a la realidad en función de la confiabilidad deseada por el diseñador.
- ✓ Revisar el modelo desarrollado por el grupo CIMOC para el cálculo de capacidad de uniones pernadas tipo Simón Vélez para que incluya parámetros de resistencia de tipo probabilístico; y si es necesario, recalibrar las ecuaciones usadas por el programa para el cálculo de la resistencia al aplastamiento de la guadua y el mortero.

## 1.2. Generalidades de la Guadua

"*En la antigüedad el hombre americano se confió en la guadua para sobrevivir: le sirvió como arma, como combustible para calentarse y cocinar sus alimentos; más tarde comprendió el significado de sus múltiples usos y la empleó como elemento imprescindible para construir su vivienda"* (Giraldo & Sabogal, 2007)

**Figura 1.2-1. Guadua Angustifolia Kunth**

La Guadua es una gramínea y se considera y clasifica como un bambú leñoso que se encuentra ampliamente distribuido en América Latina desde la zona central del sur de México hasta la Argentina, desde el nivel del mar hasta los 2000 msnm. La mayoría de las áreas cubiertas con Guadua en Colombia, se encuentran localizadas como relíctos en zonas protectoras (márgenes de quebradas o en áreas protegidas por lineamientos de orden legal). (Held & Manzano, 2003). En el mundo existen alrededor de 1300 especies de bambúes leñosos y herbáceos distribuidos en Asia el 63%, en América el 32% y el 5% restante entre África y Oceanía. (Perea, Villegas, Cerquera, & Cortés, 2003)

La especie Guadua Angustifolia Kunth (A.K.) crece bajo condiciones cuales son típicos para la zona cafetera. El rango óptimo de la temperatura oscila entre los 20° C y los 26° C. En las alturas entre los 1.000 m y los 1.600 msnm se logra el desarrollo de la planta óptimo, sin embargo en alturas entre los 0 m y los 2.000 msnm la Guadua crece aunque en alturas más altas más despacio y menos productiva (Held & Manzano, 2003).

La guadua presenta unas características morfológicas únicas que la hacen destacar sobre otros tipos de cultivos maderables. Como primera medida, genera un sistema radical peculiar denominado rizoma (Figura 1.2-2) que consiste en una red de tallos subterráneos horizontales y cespitosos que cumplen la función de absorción, conducción y almacenamiento de nutrientes, además de originar una malla que permite que el guadual se comporte como un eficiente muro biológico de contención que controla la socavación lateral y amarran fuertemente el suelo. Normalmente los rizomas alcanzan profundidades de anclaje entre 1 y 3 metros.

El tallo de la guadua presenta estructuras muy especiales entre las que se destacan los nudos y entrenudos; el nudo es el área del tallo donde crecen ramas con hojas, producto de una yema nodal que fisiológicamente se activa; el nudo ocupa toda la sección del tallo y se caracteriza por formar una zona más abultada. Un tallo de guadua, en condiciones normales posee entre 70 y 80 entrenudos, con longitud promedio de 26 cm; evaluaciones morfométricas de las partes del tallo indican que no existe correlación entre la longitud de los entrenudos y el diámetro de los mismos. Un tallo de guadua en condiciones ambientales normales alcanza en promedio entre 18 y 20 metros de longitud; por su forma es un tallo con entrenudos cilíndricos que tiene entre 10 y 12 cm. de diámetro y paredes con grosores entre 2 y 5 cm donde se evidencia de manera notoria la presencia de los vasos conductores. (Giraldo & Sabogal, 2007)

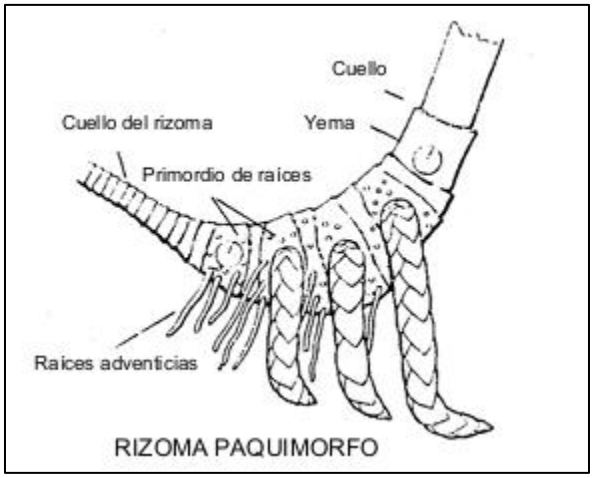



**Figura 1.2-2. Sistema radical de la guadua: Rizoma**

La Figura 1.2-3 presenta las partes que componen una planta de guadua, las cuales presentan propiedades distintas una con otra. Cabe resaltar que todas las probetas fabricadas para este proyecto provinieron de partes de sobrebasa para no incluir más variables en el modelo. Para mayor información de cada parte componente de la guadua, revisar bibliografía relacionada con la morfología de la guadua ( (Giraldo & Sabogal, 2007)

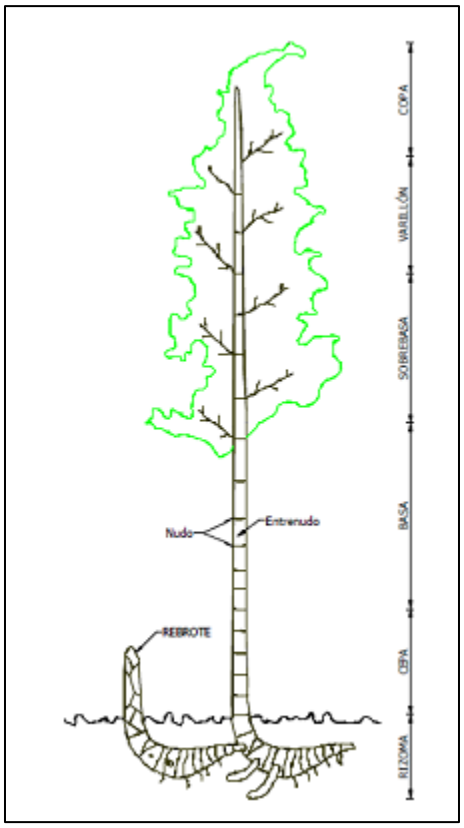



**Figura 1.2-3. Partes de una planta de guadua. Fuente: (Suarez, 2011)**

La importancia de la guadua se evidencia desde distintos ámbitos, especialmente en términos ambientales, culturales y económicos. Desde el punto de vista ambiental, se destaca su enorme aporte de biomasa (30-35 ton/ha/año), su aporte a la regulación de caudales y protección del suelo a la erosión, su alta capacidad de retención y regulación de agua (aproximadamente 30.000 litros /ha). Su importancia cultural se refleja en la identidad que genera en el paisaje de sus zonas características, en la tradición oral generada por su uso ancestral. Adicionalmente, su impacto en la economía se ve reflejado en el elevado número de habitantes que derivan su sustento de forma directa o indirecta del aprovechamiento, manejo

y comercialización de la guadua (alrededor de 100.000 personas) además del importante área del territorio ocupado por guaduales maderables y de conservación (cerca de 30.000 ha).

## 1.3. La Guadua como material de construcción

El bambú es uno de los más antiguos y versátiles materiales con muchas aplicaciones en el campo de la construcción, particularmente en países en vía de desarrollo, se caracteriza por se resistente y ligero y a menudo puede ser usado sin procesamiento o terminado alguno. A pesar de estas claras ventajas, el uso del bambú ha sido ampliamente restringido a estructuras temporales y edificaciones de poca importancia debido a la limitada durabilidad natural, dificultad en las conexiones, una falta de lineamientos de diseño y la exclusión de códigos de diseño (Jayanetti & Follet, 1998). Cabe resaltar que sólo hasta el año 2010 se incluyó el diseño de estructuras de guadua en el código sismo-resistente colombiano a pesar de la antigua tradición de construir con este material.

A pesar de que la mayoría de construcciones con guadua están relacionadas con comunidades rurales en países de desarrollo y su aplicación no suele trascender más allá de las necesidades básicas de vivienda, este material también puede utilizarse en conjunto con materiales tradicionales como el concreto para que adopte funciones estructurales importantes tales como cimentaciones, refuerzo para el concreto, estabilización de suelos, sistemas de entrepiso, paredes y pórticos. La Figura 1.3-1 presenta la interacción de la guadua junto con la cimentación de concreto de una estructura presente en zapatas aisladas y corridas. (Jayanetti & Follet, 1998)

La posibilidad de utilizar secciones de guadua como elementos individuales de armaduras y cerchas otorga una gran versatilidad al material y aumenta enormemente la lista de estructuras de factible construcción con guadua, entre ellas puentes de gran longitud y cubiertas de gran magnitud.

Es importante aclarar que la construcción en guadua también implica un riesgo adicional debido a la variabilidad natural del material por lo que cada elemento de la construcción debe ser sometido a un proceso de selección e inspección siguiendo detalladamente los requisitos establecidos en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo-Resistente NSR-10.

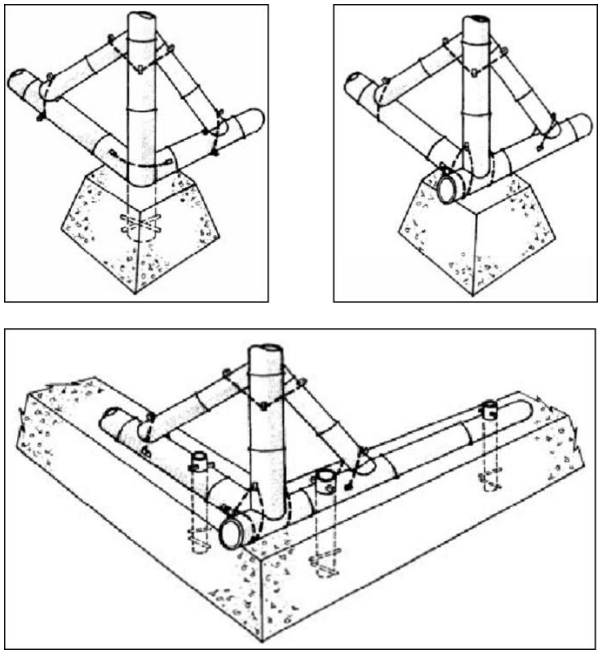


Figura 1.3-1. Uso de la guadua como zapatas aisladas y corridas (Jayanetti & Follet, 1998)

Figura 1.3-2. Puente de Guadua en la ciudad de Bogotá

# 2. MARCO TEÓRICO

## 2.1. Estudios previos

### *2.1.1. Propiedades mecánicas de la guadua*

Durante la ejecución de su proyecto de grado, la ingeniera Ana María Suarez realizó una recopilación de estudios efectuados en los últimos años enfocados a la determinación experimental de las propiedades mecánicas más importantes de la guadua, entre las que se encuentran la resistencia a la tensión paralela a la fibra, compresión paralela a la fibra, corte paralelo a la fibra y flexión. Adicionalmente, se evaluó el módulo de elasticidad del material, el efecto del contenido de humedad, la edad y la altura de la guadua. A continuación se presenta la recopilación elaborada por la ingeniera Suarez:

**Tabla 1. Esfuerzos de Tensión en la Guadua Angustifolia Kunth (Suarez, 2011)**

| TENSION PARALELA A LA FIBRA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Titulo | Autor | Tipo | Universidad | Norma | Fecha | Edad (Años) | n | Media Mpa | Desvacion Estandar | Modulo Media Gpa | Coeficiente de Poisson μ (Compresion) |
| Propiedades Fisicas y Mecanicas del culmo entero de la Gudaua Angustifolia Kunth | Khosrow Ghavami, Albanise B. Marinho | Investigación de Profesores | Catalica de Rio de Janeiro | INBAR (1999) | 2005 | 3 Años prom | 24 (3 con nodo y 3 sin nodo, por cada parte) | 86.96 | 18.86 | 14.59 | 0.26 |

La Tabla 1 muestra que el valor medio de la resistencia a la tensión paralela a la fibra de la guadua rolliza es de casi 87 MPa, lo cual es una cantidad bastante alta en el contexto de las maderas estructurales y, en general, de los materiales de construcción (representa aproximadamente el 20% de la resistencia a la tensión del acero estructural). Sin embargo, no es una medida realmente representativa del material dado que son contadas las aplicaciones en que éste se encuentre sometido a este tipo de solicitación de esfuerzos. Sin embargo, este hecho ha originado varios estudios sobre la aplicación de fibras de guadua como refuerzo de la matriz de materiales compuestos. Por ejemplo: (Estrada, 2009)

**Tabla 2. Esfuerzos de Compresión en la Guadua Angustifolia Kunth (Suarez, 2011)**

| COMPRESION PARALELA A LA FIBRA | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Titulo | Autor | Tipo | Universidad | Norma | Fecha | Edad (Años) | n | Media Mpa | Desvacion Estandar | Coeficiente de variacion | Valor Caracteristico Mpa | Modulo Media Gpa | Coeficiente de Poisson μ (Compresion) |
| Propiedades Fisicas y Mecanicas del culmo entero de la Gudaua Angustifolia Kunth | Khosrow Ghavami, Albanise B. Marinho | Investigación de Profesores | Catalica de Rio de Janeiro | INBAR (1999) | 2005 | Promedio 3 | 24 (3 con nodo y 3 sin nodo, por cada parte) | 29.48 | 2.9 | | 28.36 | 12.58 | 0.34 |
| Resistencia a la compresion paralela a la fibra de la Guadua Angustifolia Kunth y determinación del modulo de elasticida | Caori Patricia Takeuchi, Cesar Emilio Gonzales | Investigación de Profesores | Nacional de Colombia Sede Bogotá | ISO 22157 | 2007 | Mayores a 5 | 809 (4 guaduales, 3 partes) | 56.21 | 10.16 | 0.181 | 40.42 | 17,859 (n=479) | - |
| Estudio de elementos solicitados a compresión armados por tres guaduas | Uribe Vallejo, Maritza. Durán Contreras, Alejandro | Tesis de pregrado dirigida por Takeuchi | Nacional de Colombia, Sede Bogotá | INBAR (1999) | 2002 | mayores a 3 | 20 | 50.437 | 6.678 | 0.132 | | 6.698 | - |

En la Tabla 2 se puede apreciar que hay una discrepancia sobre el valor de la resistencia a la compresión paralela a la fibra entre los distintos estudios, sin embargo, es importante resaltar que los estudios realizados en Colombia concuerdan en un valor aproximado de 50 MPa y el estudio realizado en Brasil arroja un valor muy por debajo del anterior (cerca de 30 MPa). Dado que el proyecto adelantado por la profesora Takeuchi contempla una cantidad de muestras muy alta (809) y es el estudio más reciente de los tres se asumirá que este valor es representativo de dicha propiedad. La Figura 2.1-1 presenta un resumen comparativo de esta propiedad con otras maderas comúnmente usadas (Smith, 2004) donde se puede apreciar claramente que la guadua es, por mucho, la madera más resistente en este tipo de esfuerzos.

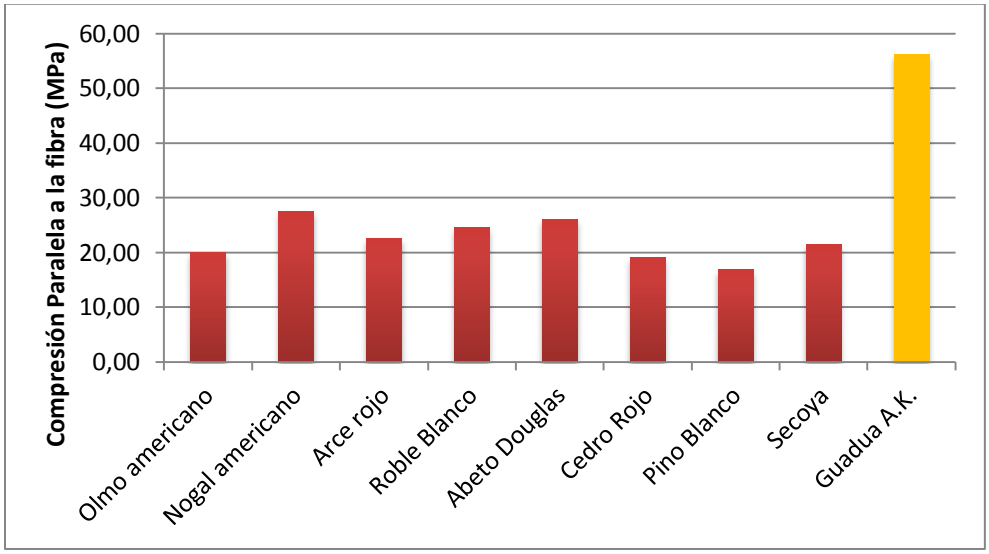



**Figura 2.1-1. Comparación Resistencia paralela a la fibra entre distintas maderas**

**Tabla 3. Esfuerzos de Cortante en la Guadua Angustifolia Kunth (Suarez, 2011)**

| CORTE PARALELO A LA FIBRA | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Titulo | Autor | Tipo | Universidad | Norma | Fecha | Edad (Años) | Luz | n | Media Mpa | Desvacion Estandar | Coeficiente de variacion | Valor Caracteristico Mpa |
| Propiedades Fisicas y Mecanicas del culmo entero de la Gudaua Angustifolia Kunth | Khosrow Ghavami, Albanise B. Marinho | Investigación de Profesores | Catalica de Rio de Janeiro | INBAR (1999) | 2005 | 3 Años prom | | 24 (3 con nodo y 3 sin nodo, por cada parte) | 2.07 | | | |
| Resistencia al corte paralelo a la fibra de la Guadua Angustifolia | Nelson Hernando Patoja, Diego Fernando Acuña | Tesis de Pregrado, dirigida por Caori Takeuch | Nacional de Colombia Sede Bogotá | INBAR (1999) | 2005 | 3 - 6 Años | | 368 (3 regiones) | 7.048 | | | 4.693 |
| Corte paralelo a la fibra | Lopez Trujillo | | Nacional de Colombia Sede Medellin | INBAR (1999) | | | | 30 | 6.87 | 1.7 | 0.247 | |
| Compartamiento a Flexion | Sanchaez y Prieto | Tesis de pregrado | Nacional de Colombia, Sede Bogotá | INBAR (1999) | 2003 | Mayores a 3 | 0.5 | 25 | 8.175 | 2.407 | 0.29 | 4.708 |
| | | | | | | | 1 | 29 | 7.178 | 1.582 | 0.22 | 4.692 |
| | | | | | | | 1.5 | 31 | 4.711 | 1.176 | 0.25 | 3.003 |
| | | | | | | | 2 | 30 | 4.203 | 1.045 | 0.25 | 2.627 |
| | | | | | | | 2.5 | 28 | 3.288 | 0.969 | 0.29 | 1.533 |
| | | | | | | | 3 | 28 | 2.563 | 0.641 | 0.25 | 1.411 |
| | | | | | | | **Luz (m)** | **Número de ensayos** | **Promedio G (MPa)** | **Desviacion estándar** | **Coeficiente de variación** | |
| | | | | | | | 0.5 | 26 | 583.6 | 267.9 | 0.46 | |
| | | | | | | | 1 | 29 | 660.7 | 293.1 | 0.44 | |
| | | | | | | | 1.5 | 31 | 657.2 | 282.2 | 0.43 | |
| | | | | | | | 2 | 30 | 657 | 286 | 0.44 | |
| | | | | | | | 2.5 | 28 | 650.5 | 291.1 | 0.45 | |
| | | | | | | | 3 | 28 | 636 | 289.4 | 0.46 | |

En el caso del corte paralelo a la fibra ocurre una situación similar a la anteriormente descrita, el estudio realizado por Khosrow, Ghavami, Albanise & Marinho en Brasil arroja un resultado muy inferior a los demás estudios. En este caso es claro que se puede descartar dicho resultado dada la similitud de los valores obtenidos en cuatro estudios distintos desarrollados por la Universidad Nacional de Colombia. De nuevo, se considerará que el valor obtenido por la profesora Takeuchi es el más representativo para esta propiedad (aproximadamente 7 MPa). La Figura 2.1-2 presenta un resumen similar al de la Figura 2.1-1 donde se aprecia que a pesar de que la guadua no es el material más resistente, sí se encuentra en un rango superior a todas las maderas blandas y tiene un valor sólo un 30% inferior a la madera más resistente (Nogal americano)

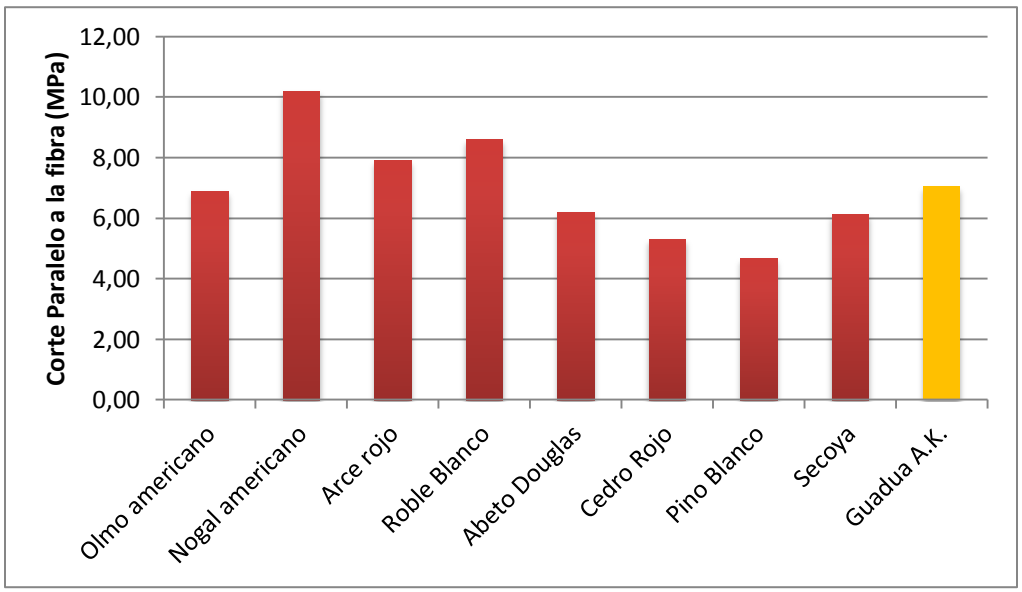



**Figura 2.1-2. Comparación Resistencia al corte paralelo a la fibra de distintas maderas**

**Tabla 4. Esfuerzos de Flexión en la Guadua Angustifolia Kunth (Suarez, 2011)**

| FLEXION | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Título | Autor | Tipo | Universidad | Norma | Fecha | Edad (Años) | Cepa | base | Sobretas a | Luz (m) | n | Media Mpa | Desvacion Estandar | Coeficiente de variacion |
| Comportamiento a Flexion | Sanchaez y Prieto | Tesis de pregrado | Nacional de Colombia, Sede Bogotá | NSR (1999) | 2003 | Mayores a 3 | X | | | 0.5 | 9 | 30.7 | 3.8 | 0.12 |
| | | | | | | | X | | | | 4 | 25.1 | 6.9 | 0.27 |
| | | | | | | | X | | | 1 | 10 | 45.3 | 13.2 | 0.29 |
| | | | | | | | X | | | | 4 | 49.2 | 1.8 | 0.04 |
| | | | | | | | X | | | 1.5 | 10 | 61.8 | 8.2 | 0.13 |
| | | | | | | | X | | | | 6 | 37.6 | 9.3 | 0.25 |
| | | | | | | | X | | | 2 | 10 | 64.6 | 15.1 | 0.23 |
| | | | | | | | X | | | | 6 | 59.7 | 14.4 | 0.24 |
| | | | | | | | X | | | 2.5 | 10 | 60.2 | 21.2 | 0.35 |
| | | | | | | | X | | | | 4 | 60.7 | 18.9 | 0.31 |
| | | | | | | | X | | | 3 | 10 | 58.3 | 7.4 | 0.13 |
| | | | | | | | X | | | | 5 | 58.4 | 12.4 | 0.21 |
| | | | | | | | | X | | 0.5 | 7 | 56.8 | 14.9 | 0.26 |
| | | | | | | | | X | | | 4 | 25.7 | 6.3 | 0.25 |
| | | | | | | | | X | | 1 | 12 | 61 | 9.9 | 0.16 |
| | | | | | | | | X | | | 3 | 56.3 | 288 | 5.12 |
| | | | | | | | | X | | 1.5 | 10 | 62.8 | 17.8 | 0.28 |
| | | | | | | | | X | | | 5 | 51.4 | 3 | 0.06 |
| | | | | | | | | X | | 2 | 10 | 77.6 | 13.9 | 0.18 |
| | | | | | | | | X | | | 4 | 56.1 | 15.7 | 0.28 |
| | | | | | | | | X | | 2.5 | 11 | 64.1 | 16.8 | 0.26 |
| | | | | | | | | X | | | 3 | 70 | 22.3 | 0.32 |
| | | | | | | | | X | | 3 | 10 | 63.4 | 32.3 | 0.51 |
| | | | | | | | | X | | | 3 | 59.3 | 7.7 | 0.13 |
| Comportamiento sismo resistente de estructuras de bareque | Luis Felipe Lopez yVianc Felipe Silva | Tesis de pregrado | Nacional de Colombia, sede Manizales | | 2000 | ND | | | | 0.0 | 34 | 10.9 | 7.65 | 0.48 |
| | | | | | | | | | | 1 | 54 | 43.2 | 19.4 | 0.45 |
| | | | | | | | | | | 1.5 | 58 | 50.9 | 13.6 | 0.27 |
| | | | | | | | | | | Variable (0,7-1,4) | 30 | 21.5 | 7.34 | 0.34 |

La Tabla 4 muestra la resistencia a la flexión del material en función de la luz del elemente estructural y de la sección del tallo usada (Basa o Cepa). Se aprecia que hay una gran diferencia dependiendo de los factores involucrados pero se puede generalizar que la resistencia a la flexión es mejor en la sección de Basa y ésta se incrementa a medida que la luz aumenta. Para la sección de Basa la resistencia toma valores aproximados entre 25 y 65 MPa mientras que para la sección de Cepa ésta propiedad toma valores entre 26 y 77 MPa.

**Tabla 5. Densidad de acuerdo a la altura y edad de la Guadua A.K. (Correal & Arbeláez, 2010)**

| | | Age (year) | 2 | 3 | 4 | 5 | By height position |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Density (Kg/m³) | Bottom | ρ | 674.5 | 681.9 | 617.3 | 676.9 | 663.3 |
| | Middle | ρ | 678.1 | 705.5 | 780.0 | 780.0 | 696.3 |
| | Top | ρ | 703.0 | 828.6 | 774.1 | 735.4 | 764.6 |
| | **By age** | ρ | **687.3** | **748.0** | **725.9** | **686.1** | |

La Tabla 5 presenta la densidad de la guadua en función de su edad y de la posición del material en el tallo. Se puede concluir que la densidad aumenta a medida que se incrementa la altura del tallo y que esta propiedad tiene un pico a la edad de 3 años, tiempo a partir del cual empieza a descender. Adicionalmente se puede concluir que es una densidad muy baja teniendo en cuenta que representa un peso específico de aproximadamente 0,7.

**Tabla 6. Módulo de elasticidad a compresión con un C.H. del 12% (Correal & Arbeláez, 2010)**

| Edad de la Guadua | Módulo de Elasticidad (kg/cm²) |
|---|---|
| 1 – 3 años | 105804 |
| 3 – 5 años | 121528 |
| Mayores a 5 años | 101427 |

En la Tabla 6 se puede ver que al igual que la densidad, el módulo de elasticidad del material empieza su vida con un módulo relativamente bajo con respecto a otras maderas duras (algunas de ellas alcanzan valores de aproximadamente 225000 kg/cm² (Smith, 2004)); eventualmente presenta un pico en su edad de 3 a 5 años y luego sufre un descenso continuo a lo largo de su vida.

Por último cabe resaltar que la investigación de propiedades de la guadua rolliza y laminada sigue vigente en la agenda de universidades y centros de investigación, además de formar parte importante de los planes regionales y nacionales de gobierno como lo demuestra la realización de eventos relacionados con este tema como el Congreso Internacional del Bambú-Guadua cuya segunda edición tuvo lugar en el mes de Noviembre de 2011 y contó con la participación de delegados del gobierno tanto departamental como nacional.

### *2.1.2. Conexiones*

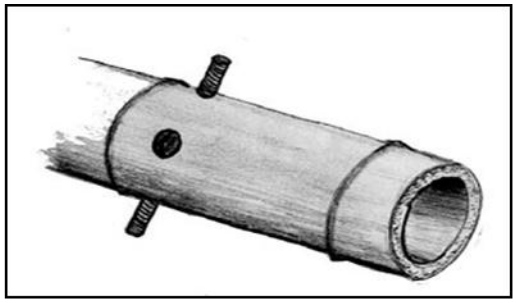
A pesar de las grandes bondades de la guadua expuestas anteriormente, las conexiones son los elementos más complicados de tratar tanto analítica como constructivamente. Las conexiones en guadua rolliza representan un tema que todavía requiere una gran cantidad de investigación para comprender correctamente todos los fenómenos que se suscitan en la conexión con todos los materiales presentes (guadua, mortero y perno)

Uno de los primeros estudios relacionados con el tema de conexiones en guadua fue presentado en el año 1993 por el ingeniero Oscar Antonio Arce-Villalobos titulado *Fundamentals of the Design of Bamboo Structures* (Arce-Villalobos, 1993) donde se concluye que la inserción de pernos y tornillos en los tallos de bambú genera una concentración de esfuerzos en dichos puntos.

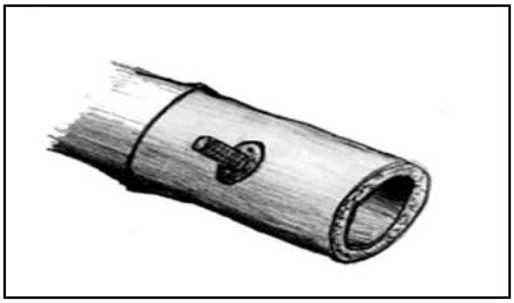
La Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica desarrolló en el año 2000 el *Manual de construcción sismo resistente de viviendas en bahareque encementado* (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2000) que explora ampliamente la correcta utilización y ensamble de los distintos tipos de conexión utilizados en guadua rolliza.

Un estudio adicional adelantado por la profesora Caori Takeuchi de la Universidad Nacional en el año 2004 (Takeuchi, 2004) explora el comportamiento de la guadua en diferentes uniones y el tipo de falla que se presenta en cada uno.

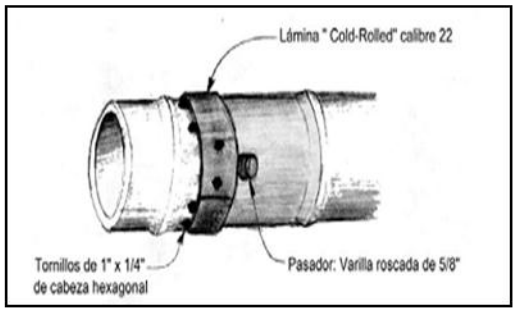
De los anteriores estudios se pueden establecer los principales tipos de conexiones pernadas, cuyos esquemas son presentados por la Figura 2.1-3.



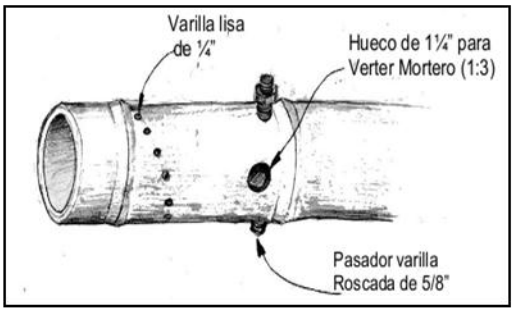
UNIÓN TIPO SIMON VELEZ



UNIÓN TIPO PEÑA - RODRIGUEZ




UNIÓN CON ABRAZADERA




UNIÓN CON MORTERO

**Figura 2.1-3. Principales tipos de uniones mecánicas.**

## 2.2. Esfuerzo de aplastamiento

Un esfuerzo normal producido por la compresión de una superficie contra otra se denomina ***esfuerzo de aplastamiento.*** Si este esfuerzo es demasiado grande, puede aplastar o deformar localmente una o ambas superficies. Por tanto, para impedir una falla es necesario determinar el área apropiada de apoyo para el material, usando un esfuerzo de aplastamiento permisible. En el ejemplo presentado en la Figura 2.2-1, si la carga P/2 soportada por la paredes de la guadua supera la resistencia de este material, ésta empezará a deformarse permitiendo el avance del perno metálico hasta una eventual falla del material.

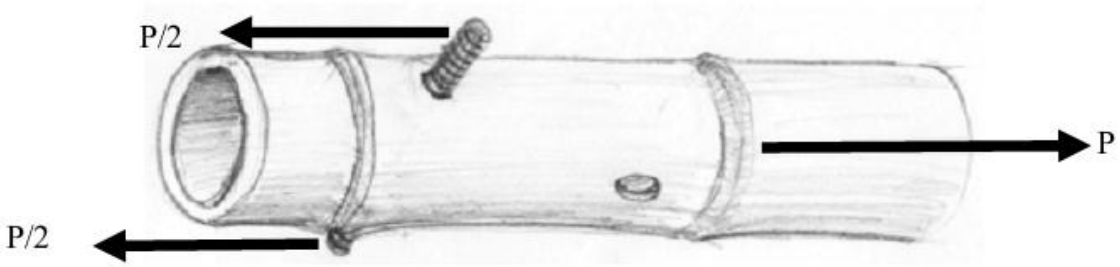



Figura 2.2-1. Ejemplo de esfuerzo de aplastamiento (NSR-10)

## 2.3. Aplastamiento en guadua y mortero

En la actualidad no existe ninguna norma técnica o estándar internacional que defina los lineamientos a seguir para evaluar la resistencia al aplastamiento del mortero ni de la guadua rolliza, sin embargo, para propósitos de este proyecto se adoptaron las recomendaciones especificadas en la norma ASTM D5764-97 que define el procedimiento adecuado para evaluar esta propiedad en miembros de madera maciza. Se siguió el esquema básico de ensayo expuesto en la norma haciendo las modificaciones pertinentes al momento de procesar los datos cuya única diferencia de fondo es el área de contacto del perno en cada caso.

En el caso de la evaluación de la resistencia del mortero, el área de contacto del perno corresponde al diámetro del perno multiplicado por el diámetro interno de la probeta de guadua, área que se resalta en la Figura 2.3-1.

Por otra parte, el área de contacto del perno para los ensayos de aplastamiento en guadua corresponde al diámetro del perno multiplicado por la suma de los espesores de las paredes de la probeta de guadua, área que se resalta en la Figura 2.3-2.

En la sección 3.2.3. se explica más detalladamente el procedimiento de cada uno de los ensayos.

Figura 2.3-1. Área de contacto aplastamiento mortero

Figura 2.3-2. Área de contacto aplastamiento guadua

# 3. ENSAYOS

## 3.1. Metodología

De acuerdo con los lineamientos básicos de experimentación se definió un esquema de ensayos que contemplara la mayor parte de las posibles combinaciones entre diámetro de perno, resistencia a la compresión del mortero y distancia al nudo. Se procuró establecer un esquema de ensayos que aportara la mayor cantidad de información posible por lo que se decidió efectuar cinco (5) repeticiones por cada caso. De lo anterior se concluye que se deben llevar a cabo 80 ensayos sobre mortero y 30 ensayos sobre guadua. Esta cantidad de datos, junto con la cantidad obtenida de los estudios previos mencionados en el numeral anterior, es suficiente para mejorar las regresiones y re-calibrar las ecuaciones propuestas. Es válido resaltar que a pesar de que los valores obtenidos se normalizan en términos de esfuerzos, se procuró que las dimensiones de las muestras fueran lo más uniformes posibles para asegurar el supuesto de que esta variable no participa en el modelo directamente como un término adicional.

Cabe resaltar que no existe hasta el momento una metodología que estandarice y defina los procedimientos correctos para determinar la capacidad al aplastamiento del mortero debido a la carga transmitida por un perno o pasador; por esta razón, se decidió seguir los lineamientos de la norma ASTM D5764-97 que define el método estándar de prueba para evaluar la capacidad al aplastamiento de la madera y de los productos hechos de madera.

Las Tablas 7 y 8 presentan los esquemas de ensayos ejecutados para guadua y mortero, respectivamente. Se puede apreciar que se decidió no efectuar ensayos en mortero con perno de 5/8" debido a que del estudio efectuado por la ingeniera Ana María Suarez (Suárez, 2011) se puede concluir que no hay variaciones significativas entre el perno de 1/2" y el de 5/8". Se elaboraron dos mezclas distintas de mortero con el objetivo de obtener una amplia variedad de resistencias que abarcara un rango de valores significativo (realizando los ensayos en distintos días de maduración). Para este propósito, una de las mezclas se elaboró buscando obtener la mínima resistencia posible y la otra buscando obtener el máximo valor posible. El diseño y preparación de las mezclas se explica más detalladamente en la sección 3.2.2.

Tabla 7. Esquema de ensayos guadua

| ESQUEMA DE ENSAYOS GUADUA | | |
|---|---|---|
| Φ Perno | Dist Nudo (cm) | Repeticiones |
| 1/2" | 2 | 5 |
| | 10 | |
| 3/8" | 2 | |
| | 10 | |
| 5/8" | 2 | |
| | 10 | |

Tabla 8. Esquema de ensayos Mortero

| ESQUEMA DE ENSAYOS EN MORTERO | | | |
|---|---|---|---|
| Φ Perno | Mezcla | Edad (días) | Repeticiones |
| 1/2" | 1 | 2 | 5 |
| | | 7 | |
| | | 14 | |
| | | 28 | |
| 3/8" | | 2 | 5 |
| | | 7 | |
| | | 14 | |
| | | 28 | |
| Φ Perno | Mezcla | Edad (días) | Repeticiones |
| 1/2" | 2 | 2 | 5 |
| | | 7 | |
| | | 14 | |
| | | 28 | |
| 3/8" | | 2 | 5 |
| | | 7 | |
| | | 14 | |
| | | 28 | |

## 3.2. Preparación de ensayos

### *3.2.1. Probetas*

Las probetas ensayadas fueron elaboradas usando guadua Angustifolia Kunth provista por la empresa Colguadua Ltda., una importante compañía de distribución de productos de guadua lo cual asegura que el material probado fue sometido al tratamiento de inmunización y secado adecuado y se utilizaron especímenes de sobrebasa únicamente.

**Probetas de Mortero**

Para elaborar las probetas de mortero se escogieron culmos de guadua que tuvieran tanto un diámetro externo como un espesor lo más homogéneos posibles y por su puesto, que no se encontraran fisuras. Se fabricaron en total 80 probetas de las cuales 40 correspondían a un diámetro de perno de 3/8" y las restantes 40 a un diámetro de perno de 1/2".

La dimensión nominal de las probetas es de aproximadamente 10 cm, y fueron cortadas incluyendo únicamente la sección del entrenudo, es decir, con sección hueca visible por ambas caras (Figura 3.2-1). El corte se realizó con una sierra de disco procurando que el eje de la guadua estuviera posicionado de manera perpendicular a la sierra de manera que los cortes fueran lo más rectos posibles y que la probeta quedara lo más nivelada posible. Adicionalmente, se sometieron a un proceso de lijado mecánico para asegurar una buena nivelación de ambos bordes de las probetas, lo cual se corroboraba con un nivel de precisión.

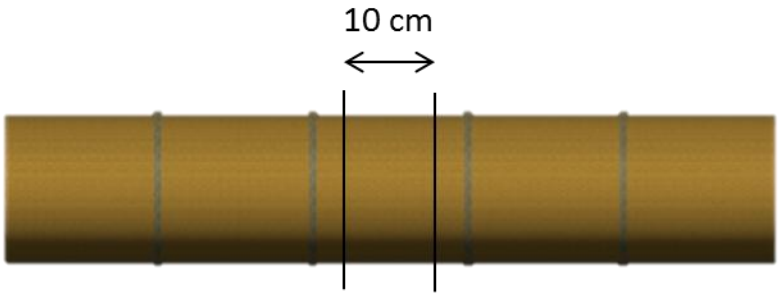



Figura 3.2-1. Corte de probetas de mortero

Posteriormente, se abre un agujero en cada extremo de las probetas donde se apoyará el perno. Dado que se pretende evaluar únicamente la resistencia al aplastamiento del mortero, la profundidad de este agujero corresponde a 1,5 veces el diámetro del perno. Se decidió abrir dicho agujero usando un taladro de árbol equipado con una copa sierra que permite abrir agujeros lateralmente en el borde sobre cada probeta; en los casos en que fue necesario, la forma del agujero se perfeccionó posteriormente usando una sierra sin fin retirando las irregularidades del orificio perforado. También es posible hacer este proceso con una lija.

**Figura 3.2-2. Copas sierras de distintos diámetros**

Una vez se prepara la probeta, se procede a la preparación de la mezcla de mortero, la cual se expondrá más detalladamente en el próximo numeral. Para vaciar la mezcla sobre la probeta, se cubrió la base inferior de la misma con papel aluminio para asegurar que la mezcla permancezca contenida dentro de la probeta y no perdiera la horizontalidad con que fue cortada y preparada. Es importante vaciar rápidamente el mortero en las probetas ya que este pierde manejabilidad muy rápidamente; adicionalmente se debe golpear suavemente la probeta con un martillo de caucho para eliminar los espacios vacios en la mezcla para asegurar que estos no afecten la resistencia de dicho mortero.

Posteriormente se procede a marcar el sitio donde el perno aplicará la carga a la probeta. Para esto, se cortan previamente trozos de perno del diámetro adecuado, de longitud ligeramente superior al diámetro de la probeta, se untan de aceite para evitar la adherencia y se apoyan sobre la superficie del mortero orientados de forma correspondiente a los dos orificios extremos de manera que se marque el espacio donde posteriormente se apoyará el perno con que la máquina aplicará carga a la probeta.

Por último, despúes de 24 horas se retiran con cuidado los pernos ubicados en la superficie del mortero y se evita mover o manipular las probetas hasta el día en que deben ser probadas.

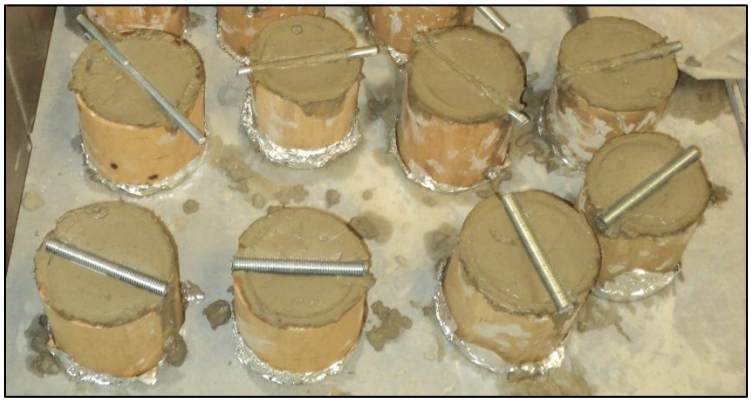


Figura 3.2-3. Preparación final de probetas de mortero

**Probetas de guadua**

Siguiendo los mismos lineamientos de selección antes presentadas, se escogen los culmos a partir de los cuales se fabricarán las probetas. Dado que se evaluará la influencia de la distancia de aplicación de la carga hasta el nudo del cañuto, las dimensiones de las probetas varían dependiendo del caso. Se elaboraron 15 probetas con una distancia al nudo de 2 cm y 15 más con una distancia al nudo de 10 cm. En todos los casos, las probetas poseen una longitud por debajo del nudo de aproximadamente 10 cm. Es importante aclarar que la distancia al nudo establecida ($D_n$) se cuenta hasta la base del orificio de apoyo del perno, por lo que se debe tomar en cuenta este detalle al momento de realizar los cortes. ( Figura 3.2-4)

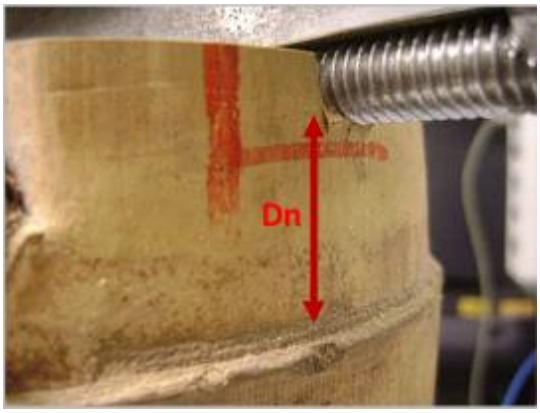



Figura 3.2-4. Distancia al nudo. Tomado de (Suárez, 2011)

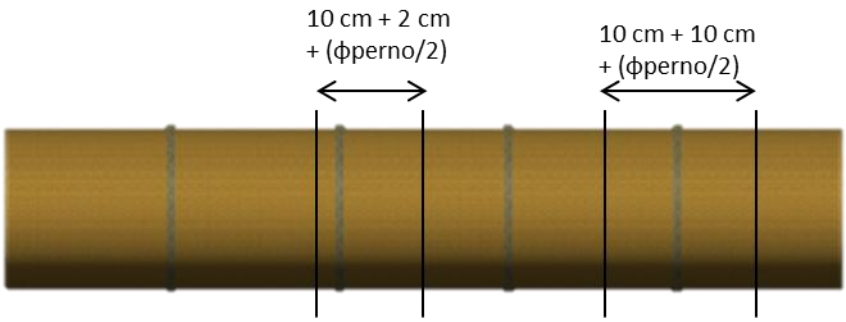



**Figura 3.2-5. Corte de probetas de guadua**

La Figura 3.2-5 presenta un esquema del corte de las probetas de guadua en cada caso. Eventualmente, se procede a perforar los dos orificios extremos donde se apoyará el perno en las paredes de la guadua. Debido a la dificultad de llevar a cabo el procedimiento expuesto en la norma ASTM D5764-97 en una sección hueca, se decidió elaborar estos orificios manualmente mediante una cizalla tallando la forma y el diámetro deseado para cada caso.

### *3.2.2. Mortero*

Uno de los propósitos del esquema de ensayos propuesto era evaluar la resistencia al aplastamiento del mortero con diferentes resistencias a la compresión. Por lo tanto se preparó una mezcla distinta para cada caso a evaluar y se ensayaron las mezclas a diferentes edades. Lo anterior es válido ya que no hay evidencia que demuestre que el secado y la maduración tengan efectos negativos significativos sobre el mortero, aparte de las micro-fisuras generadas por retracción y cambios de temperatura (Skoczylas, Burlion, & Yurtdas, 2007). Teniendo en cuenta lo anterior, se puede establecer que ensayar una misma mezcla con diferentes edades de maduración es equivalente a ensayar varias mezclas con distintas resistencias de diseño a una misma edad.

Se prepararon dos mezclas diferentes buscando obtener un rango de resistencias diferente. El diseño de mezcla utilizado fue propuesto y perfeccionado por el grupo de investigación CIMOC de la Universidad de los Andes en el marco del proyecto *Validación Tecnológica del Comportamiento de Estructuras de Guadua Rolliza seca e inmunizada* y ha demostrado alcanzar una resistencia a la compresión adecuada además de una fluidez y manejabilidad correcta para actividades relacionadas con la guadua como el relleno de cañutos para conexiones pernadas.

El diseño planteado maneja las siguientes relaciones:

$$Arena = 2{,}21 * (Cal + Cemento)$$

$$\frac{Cal}{Cemento} = 0{,}25$$

$$\frac{Agua}{Cemento} = 0{,}45$$

Para determinar la cantidad necesaria de mezcla se calcula el volumen total requerido para rellenar la totalidad de las probetas, se considera que en promedio las probetas tienen un diámetro interno de 13 cm y una altura de 10 cm.

$$Volumen\ probeta = \left(\frac{\pi}{4} \times d^2 \times h\right) = \left(\frac{\pi}{4} \times 13^2\ cm^2 \times 10\ cm\right) = 1327\ cm^3$$

$Volumen\ total = Volumen\ probeta\ \times No. probetas = 1327\ cm^3 \times 40 = 53093\ cm^3$ = 53 L

Teniendo en cuenta la capacidad de la mezcladora y por recomendación de los asistentes de laboratorio para preparar la cantidad requerida se decidió mezclar el equivalente a 40 kg de arena, de lo que se pueden calcular las siguientes cantidades teniendo en cuenta las relaciones antes descritas:

$$Arena = \mathbf{40\ kg}$$

$$40\ kg = 2{,}21 * (Cal + Cemento)$$

$$40\ kg = 2{,}21 * \frac{5}{4} Cemento$$

$$Cemento = \frac{40}{2{,}21} \times \frac{4}{5} = \mathbf{14{,}5\ kg}$$

$$Cal = 0{,}25 * Cemento = \mathbf{3{,}6\ kg}$$

$$Agua = 0{,}45 * Cemento = \mathbf{6{,}5\ kg}$$

El anterior diseño se aplicó sin ninguna modificación para una de las mezclas requeridas, es decir, para el equivalente a 40 probetas. Dado que se buscaba obtener un amplio rango de resistencias al aplastamiento, la segunda mezcla a preparar debería presentar una resistencia a la compresión inferior a la antes mencionada. Para reducir la resistencia de dicho diseño se modificó únicamente la relación agua-cemento aumentando la cantidad de agua progresivamente hasta alcanzar el límite en el que la manejabilidad se vería comprometida de seguir adicionando agua.

Para cada mezcla se elaboraron 12 cubos de muestra (3 cubos por cada edad de mortero probada) para determinar su resistencia a la compresión en cada caso y verificar la evolución de dicha propiedad.

### *3.2.3. Montaje*

Todos los ensayos fueron realizados en el laboratorio de suelos de la Universidad de los Andes usando la máquina TriTech -100 kN la cual aplica carga axial mediante actuadores mecánicos. Para registrar la carga aplicada a las probetas en cada instante de tiempo (se registraron 2 datos por segundo) se utilizó una celda de carga marca Futek con capacidad de 5000 kg. (Figura 3.2-6)

**Figura 3.2-6. Prensa universal TriTech 100kN**

El montaje consistió en ubicar la celda de carga bajo un plato metálico donde se ubicaba de manera centrada y nivelada la probeta a fallar. Se procede a ubicar el perno de diámetro correspondiente en el espacio marcado durante la etapa de preparación de la probeta procurando asegurar un correcta horizontalidad del mismo y posteriormente a bajar el cabezal de la máquina hasta que el perno quede asegurado en su lugar sin ejercer presión sobre la probeta. En ese momento se inicia el ensayo y la correspondiente toma de datos.

El ensayo consiste en aplicar carga vertical sobre la superficie del mortero mediante el perno a una velocidad de deformación de 1,25 mm/min (la norma ASTM D5764 especifica una velocidad de deformación de 1,0 mm/min ± 50% , variación que depende de la duración del ensayo la cual no debe ser inferior a 1 minuto ni superior a 10 minutos).

Por otro lado, se buscaba llevar un registro de la evolución de la resistencia a la compresión de los cubos elaborados, por lo que se llevaba a cabo el ensayo de compresión directa el mismo día que se probaba cada grupo de probetas. El montaje para los cubos es muy similar al anteriormente descrito. La Figura 3.2-7 ilustra más claramente ambos montajes.

**Figura 3.2-7. Montaje del ensayo de aplastamiento de mortero y de compresión sobre cubos de mortero**

## 3.3. Procedimiento de ensayo

Una vez se ha realizado el montaje y se ha verificado la correcta posición del perno, se procede a ejecutar cada ensayo. Con la velocidad de deformación previamente definida, se inicia el proceso de aplicación de carga, la cual consiste en el ascenso progresivo del pistón de base donde se apoya la probeta. Cabe resaltar que en muchos casos el cabezal de la máquina es la parte móvil que deforma la muestra, en este caso, la base de la máquina es la que realiza el movimiento que genera deformación en la muestra.

La celda de carga previamente instalada se conecta a un dispositivo de adquisición de datos que recopila la carga en kilogramos fuerza [kgf] que registra la celda y estos datos se graban en un archivo de texto. Para el caso de aplastamiento en mortero, la prueba se lleva a cabo hasta que la probeta se raje totalmente y su sección transversal deje de estar cerrada. En ese momento, la acción radial generada por el confinamiento del mortero vence la resistencia a la tensión perpendicular a las fibras y el progresivo avance de la grieta generada destruye la pared de la guadua. (Figura 3.3-1).

En el caso de aplastamiento en guadua, el proceso de carga se adelanta hasta que la deformación representa un 50% a 70% del diámetro del perno o cuando la guadua tienda a rajarse, se espera que para estos niveles de deformación la guadua ya haya entrado en fluencia y se encuentre en el rango inelástico de su curva esfuerzo-deformación.

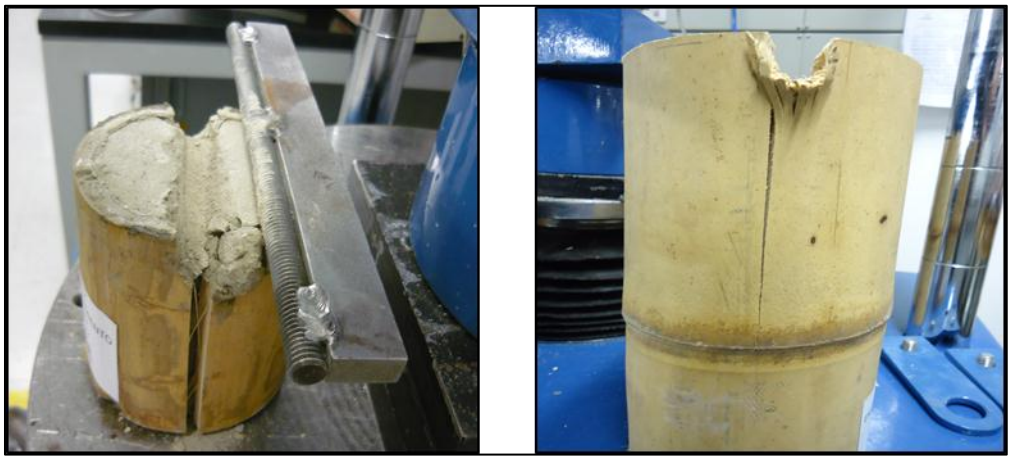


**Figura 3.3-1. Probeta de mortero fallada y Probeta de guadua fallada**

## 3.4. Resultados

### *3.4.1. Resultados Aplastamiento de mortero*

La recopilación de datos arroja un archivo con el tiempo de la prueba y la carga registrada por la celda en ese instante. Dado que se conoce la velocidad de deformación de la máquina, se puede fácilmente calcular la deformación de la probeta en cada instante de tiempo como la multiplicación del tiempo del ensayo por la velocidad de carga; para homogenizar unidades e inicializar el tiempo del ensayo, el cálculo de deformación se efectúa mediante la siguiente ecuación:

$$Def_i = \frac{(t_i - t_0)}{60} \times v_d$$

**Ecuación 3.4-1**

**$Def_i$** = Deformación de la probeta en el instante i [mm],
**$t_i$ =** tiempo en el instante i [s],
**$t_0$ =** tiempo inicial de la prueba [s],
**$v_d$ =** velocidad de deformación de la máquina [mm/min]

Por otra parte, para normalizar la carga soportada por cada muestra en términos de esfuerzos se divide la carga registrada por el área de contacto del perno, es decir, el ancho del perno por el diámetro interno de la probeta, tal como se aprecia en la Figura 2.3-1.

De lo anterior se puede calcular el esfuerzo aplicado al mortero en cada instante de tiempo de la siguiente manera:

$$\sigma_m = \frac{Carga}{Diámetro\ interno\ \times Øperno}$$

**Ecuación 3.4-2**

Con las ecuaciones antes presentadas se pueden elaborar las curvas de esfuerzo-desplazamiento para analizar más detalladamente el comportamiento del mortero ante una solicitación de carga distribuida como la aplicada por el perno. La Figura 3.4-1 presenta un ejemplo de las curvas obtenidas en los ensayos de un grupo de datos específico (Grupo 16)

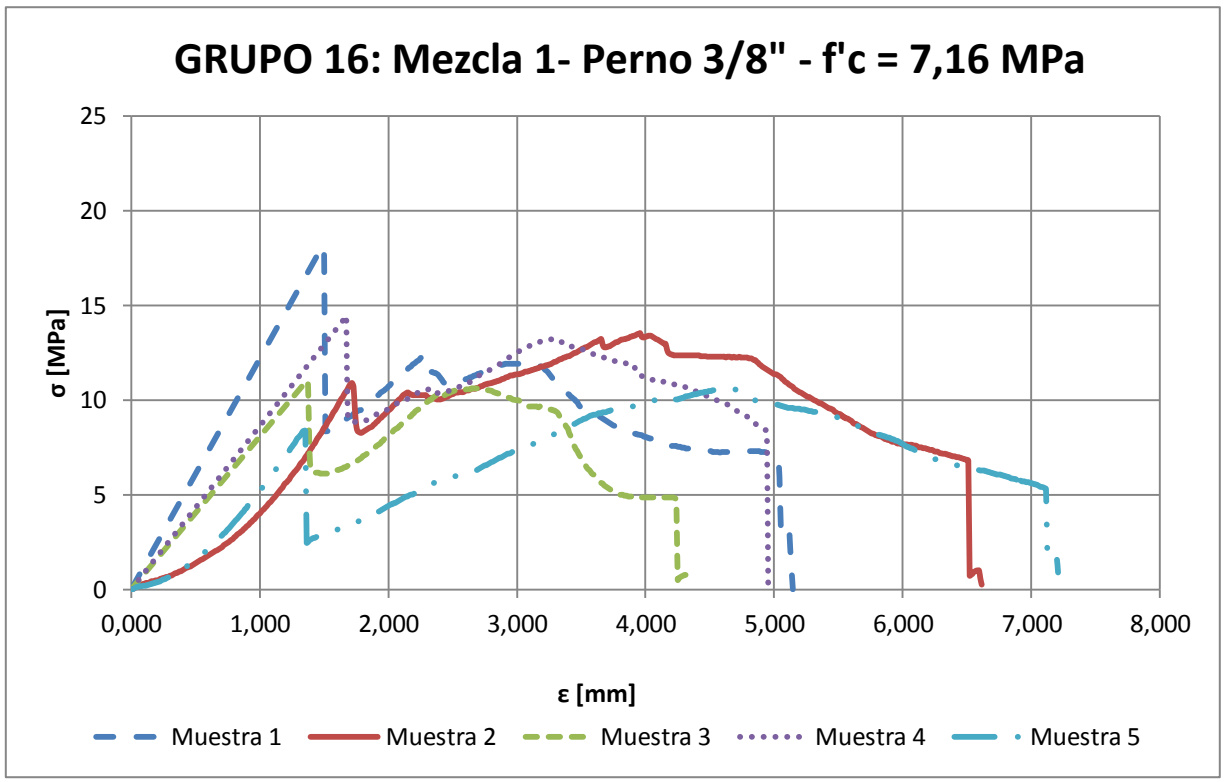



**Figura 3.4-1. Curvas esfuerzo-desplazamiento para el primer grupo de datos**

Se puede apreciar una variabilidad natural en el comportamiento de las distintas muestras pero también se puede apreciar un patrón general de respuesta de la mayoría de las probetas.

Se puede apreciar que las curvas presentan un pico característico donde sufren una caída súbita del esfuerzo soportado, punto a partir del cual retoma el proceso de carga hasta que la probeta de guadua se rompe el final del ensayo. Posteriores análisis llevan a la conclusión de que dicho pico corresponde a la falla a tensión (fisuración) del mortero, mientras que el resto de la curva corresponde al esfuerzo de confinamiento soportado por la guadua (tensión perpendicular a la fibra) que mantiene la probeta unida.

Se procede a la recopilación de los dichos datos teniendo en cuenta las gráficas obtenidas ya que hay muestras que presentan comportamientos atípicos probablemente ocasionados por errores en la etapa de preparación de las probetas o en la misma ejecución del ensayo. En la Tabla 9 se presentan los datos obtenidos de los 80 ensayos realizados en mortero. En la sección de Anexos (7.2.) se presentan todas las curvas de esfuerzo-desplazamiento obtenidas de los ensayos.

Tabla 9. Resultados Ensayos de Aplastamiento en Mortero

| Muestra | Grupo de Datos | Φ Perno | f'c | Resistencia Máxima | Resistencia Media | Desviación Estándar |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | [mm] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | 1 | 12,7 | 2,04 | 8,51 | 4,15 | 2,56 |
| 2 | | | | 3,61 | | |
| 3 | | | | 2,43 | | |
| 4 | | | | 2,14 | | |
| 5 | | | | 4,09 | | |
| 6 | 2 | 12,7 | 7,99 | 7,77 | 8,07 | 1,97 |
| 7 | | | | 7,22 | | |
| 8 | | | | 11,54 | | |
| 9 | | | | 6,73 | | |
| 10 | | | | 7,12 | | |
| 11 | 3 | 12,7 | 9,23 | 9,02 | 8,2 | 3,04 |
| 12 | | | | 10,28 | | |
| 13 | | | | 11,06 | | |
| 14 | | | | 7,18 | | |
| 15 | | | | 3,44 | | |
| 16 | 4 | 12,7 | 9,47 | 12,81 | 14,27 | 3,18 |
| 17 | | | | 10,65 | | |
| 18 | | | | 12,89 | | |
| 19 | | | | 16,39 | | |
| 20 | | | | 18,6 | | |
| 21 | 5 | 9,53 | 2,04 | 4,97 | 4,25 | 0,75 |
| 22 | | | | 3,95 | | |
| 23 | | | | 3,66 | | |
| 24 | | | | 5,14 | | |
| 25 | | | | 3,54 | | |
| 26 | 6 | 9,53 | 7,99 | 10,54 | 7,54 | 1,81 |
| 27 | | | | 6,21 | | |
| 28 | | | | 7,36 | | |
| 29 | | | | 7,55 | | |
| 30 | | | | 6,03 | | |

Tabla 9. Resultados Ensayos de Aplastamiento en Mortero (Continuación)

| Muestra | Grupo de Datos | Φ Perno | f'c | Resistencia Máxima | Resistencia Media | Desviación Estándar |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | [mm] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 31 | 7 | 9,53 | 9,23 | 13,52 | 12,05 | 1,55 |
| 32 | | | | 12,31 | | |
| 33 | | | | 10,54 | | |
| 34 | | | | 10,35 | | |
| 35 | | | | 13,53 | | |
| 36 | 8 | 9,53 | 9,47 | 15,91 | 15,98 | 4,66 |
| 37 | | | | 20,02 | | |
| 38 | | | | 15,58 | | |
| 39 | | | | 8,54 | | |
| 40 | | | | 19,86 | | |
| 41 | 9 | 12,7 | 1,66 | 4,48 | 4,27 | 1,58 |
| 42 | | | | 2,53 | | |
| 43 | | | | 5,64 | | |
| 44 | | | | 5,93 | | |
| 45 | | | | 2,77 | | |
| 46 | 10 | 12,7 | 5,1 | 10,3 | 7,73 | 2,42 |
| 47 | | | | 8,02 | | |
| 48 | | | | 9,82 | | |
| 49 | | | | 5,05 | | |
| 50 | | | | 5,46 | | |
| 51 | 11 | 12,7 | 6,66 | 11,38 | 10,22 | 3,09 |
| 52 | | | | 6,93 | | |
| 53 | | | | 11,77 | | |
| 54 | | | | 13,94 | | |
| 55 | | | | 7,1 | | |
| 56 | 12 | 12,7 | 7,16 | 16,91 | 13,47 | 7,2 |
| 57 | | | | 11,33 | | |
| 58 | | | | 7,72 | | |
| 59 | | | | 7,08 | | |
| 60 | | | | 24,3 | | |

Tabla 9. Resultados Ensayos de Aplastamiento en Mortero (Continuación)

| Muestra | Grupo de Datos | Φ Perno | f'c | Resistencia Máxima | Resistencia Media | Desviación Estándar |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | [mm] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 61 | 13 | 9,53 | 1,66 | 2 | 4,76 | 2,11 |
| 62 | | | | 7,36 | | |
| 63 | | | | 5,75 | | |
| 64 | | | | 5,37 | | |
| 65 | | | | 3,3 | | |
| 66 | 14 | 9,53 | 5,1 | 5,21 | 6,67 | 1,47 |
| 67 | | | | 7,71 | | |
| 68 | | | | 4,98 | | |
| 69 | | | | 8,13 | | |
| 70 | | | | 7,32 | | |
| 71 | 15 | 9,53 | 6,66 | 9,99 | 10,3 | 2,2 |
| 72 | | | | 9,52 | | |
| 73 | | | | 13,8 | | |
| 74 | | | | 7,78 | | |
| 75 | | | | 10,43 | | |
| 76 | 16 | 9,53 | 7,16 | 18,15 | 12,57 | 3,79 |
| 77 | | | | 10,89 | | |
| 78 | | | | 11,01 | | |
| 79 | | | | 14,45 | | |
| 80 | | | | 8,37 | | |

Como se mencionó anteriormente, el primer criterio de selección de datos fue el comportamiento registrado en las curvas esfuerzo-desplazamiento y se conservaron únicamente los datos que presentaron un comportamiento similar y dentro de los rangos de escala aceptables. Con el objetivo de reducir la dispersión de datos obtenida, se implementó un segundo criterio de selección que consistía en eliminar aquellos datos cuya diferencia (positiva o negativa) con el valor medio fuera superior a una desviación estándar. La Tabla 10 presenta los resultados obtenidos después de la eliminación por gráficas y muestra qué datos no se tendrán en cuenta para posteriores análisis.

Tabla 10. Resultados aplastamiento mortero después de descartado por gráficas

| Después de Descartado por gráficas | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Muestra** | **Grupo de Datos** | **Φ Perno** | **f'c** | **Resistencia Máxima** | **Resistencia Media** | **Desviación Estándar** | **Se descarta** |
| | | **[mm]** | **[MPa]** | **[MPa]** | **[MPa]** | **[MPa]** | |
| 1 | 1 | 12,7 | 2,04 | 8,51 | 4,15 | 2,56 | Sí |
| 2 | | | | 3,61 | | | No |
| 3 | | | | 2,43 | | | No |
| 4 | | | | 2,14 | | | No |
| 5 | | | | 4,09 | | | No |
| 6 | 2 | 12,7 | 7,99 | 7,77 | 8,41 | 2,1 | No |
| 7 | | | | 7,22 | | | No |
| 8 | | | | 11,54 | | | Sí |
| 10 | | | | 7,12 | | | No |
| 11 | 3 | 12,7 | 9,23 | 9,02 | 8,45 | 3,45 | No |
| 12 | | | | 10,28 | | | No |
| 13 | | | | 11,06 | | | No |
| 15 | | | | 3,44 | | | Sí |
| 16 | 4 | 12,7 | 9,47 | 12,81 | 14,03 | 2,04 | No |
| 18 | | | | 12,89 | | | No |
| 19 | | | | 16,39 | | | Sí |
| 22 | 5 | 9,53 | 2,04 | 3,95 | 3,72 | 0,21 | Sí |
| 23 | | | | 3,66 | | | No |
| 25 | | | | 3,54 | | | No |
| 27 | 6 | 9,53 | 7,99 | 6,21 | 6,79 | 0,77 | No |
| 28 | | | | 7,36 | | | No |
| 29 | | | | 7,55 | | | No |
| 30 | | | | 6,03 | | | No |
| 31 | 7 | 9,53 | 9,23 | 13,52 | 12,05 | 1,55 | No |
| 32 | | | | 12,31 | | | No |
| 33 | | | | 10,54 | | | No |
| 34 | | | | 10,35 | | | Sí |
| 35 | | | | 13,53 | | | No |

**Tabla 10. Resultados aplastamiento mortero después de descartado por gráficas (Continuación)**

| Muestra | Grupo de Datos | Φ Perno | f'c | Resistencia Máxima | Resistencia Media | Desviación Estándar | Se descarta |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | [mm] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | |
| 36 | 8 | 9,53 | 9,47 | 15,91 | 17,84 | 2,43 | No |
| 37 | | | | 20,02 | | | No |
| 38 | | | | 15,58 | | | No |
| 40 | | | | 19,86 | | | No |
| 41 | 9 | 12,7 | 1,66 | 4,48 | 5,35 | 0,77 | Sí |
| 43 | | | | 5,64 | | | No |
| 44 | | | | 5,93 | | | No |
| 46 | 10 | 12,7 | 5,1 | 10,3 | 9,38 | 1,2 | No |
| 47 | | | | 8,02 | | | Sí |
| 48 | | | | 9,82 | | | No |
| 51 | 11 | 12,7 | 6,66 | 11,38 | 12,36 | 1,38 | No |
| 53 | | | | 11,77 | | | No |
| 54 | | | | 13,94 | | | Sí |
| 57 | 12 | 12,7 | 7,16 | 11,33 | 8,71 | 2,29 | Sí |
| 58 | | | | 7,72 | | | No |
| 59 | | | | 7,08 | | | No |
| 63 | 13 | 9,53 | 1,66 | 5,75 | 5,56 | 0,27 | No |
| 64 | | | | 5,37 | | | No |
| 67 | 14 | 9,53 | 5,1 | 7,71 | 6,94 | 1,71 | No |
| 68 | | | | 4,98 | | | Sí |
| 69 | | | | 8,13 | | | No |
| 71 | 15 | 9,53 | 6,66 | 9,99 | 10,3 | 2,2 | No |
| 72 | | | | 9,52 | | | No |
| 73 | | | | 13,8 | | | Sí |
| 74 | | | | 7,78 | | | Sí |
| 75 | | | | 10,43 | | | No |
| 76 | 16 | 9,53 | 7,16 | 18,15 | 12,57 | 3,79 | Sí |
| 77 | | | | 10,89 | | | No |
| 78 | | | | 11,01 | | | No |
| 79 | | | | 14,45 | | | No |
| 80 | | | | 8,37 | | | Sí |

Las Figura 3.4-2 y 3.4-3 muestran el comportamiento de la resistencia al aplastamiento del mortero en función de la resistencia a la compresión del mortero de relleno, y se presentan los límites establecidos por el segundo criterio de selección de datos, en ambas gráficas se puede apreciar que a pesar de que en algunos casos se presentan variaciones importantes y dispersiones fuera de lo aceptable, en general los resultados se aproximan al valor medio calculado y la desviación estándar se mantiene en rangos aceptables considerando los valores de reducción aplicados al momento de diseñar.

Adicionalmente, a partir de una comparación general de ambas curvas se puede apreciar que los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados con un perno de 3/8" son levemente superiores a los obtenidos con un perno de 1/2", sin embargo, la diferencia no parece ser lo suficientemente significativa como para considerarla un factor importante.

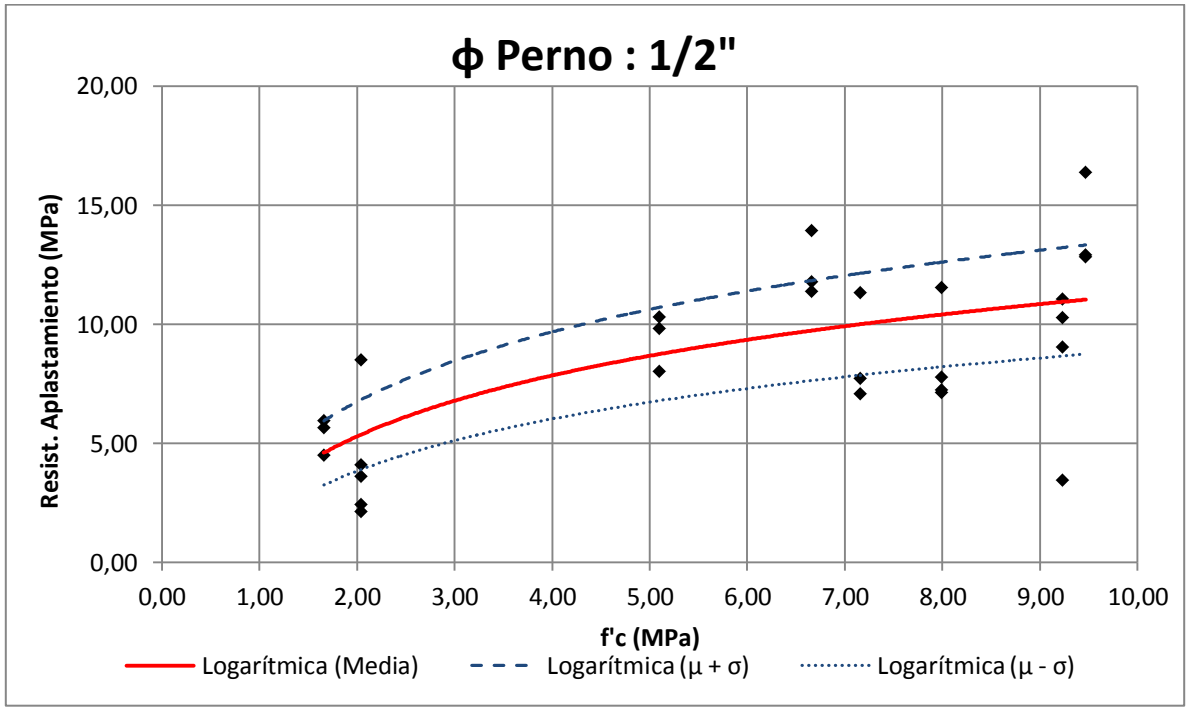



Figura 3.4-2. Resistencia al aplastamiento del mortero en función del f'c. Perno : 1/2"

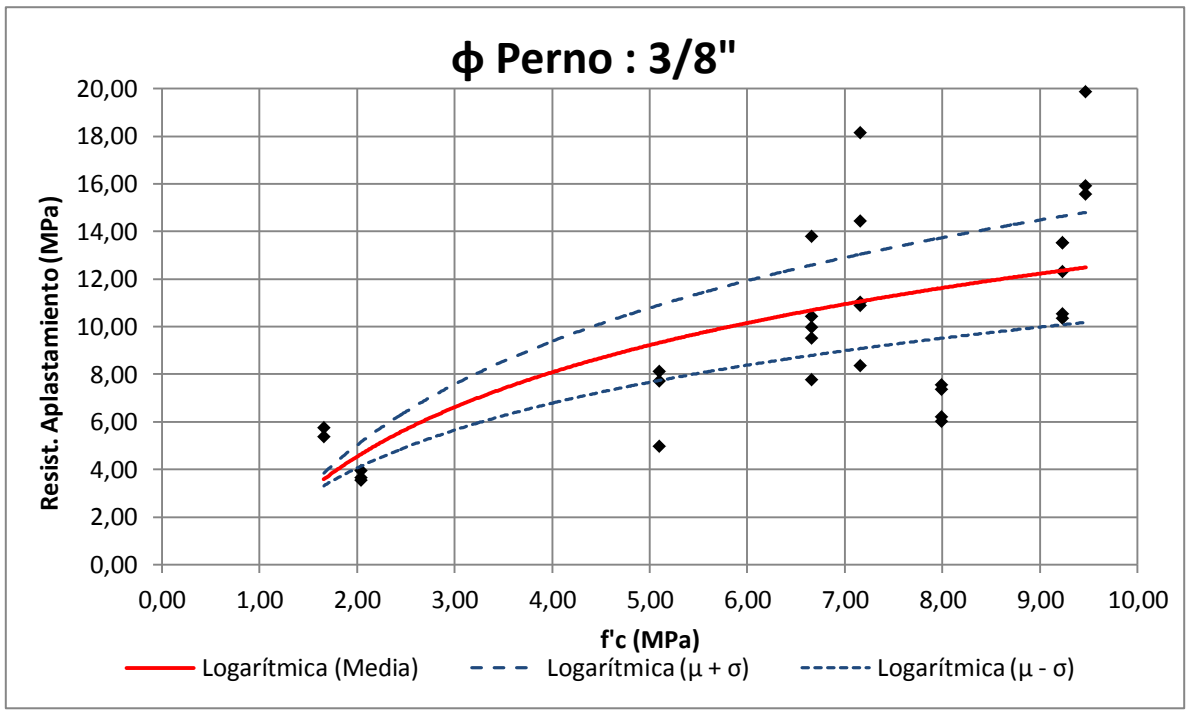



Figura 3.4-3. Resistencia al aplastamiento del mortero en función del f'c. Perno : 3/8"

Por otra parte, se registró la resistencia a la compresión de los cubos de mortero para verificar la correcta evolución de dicha propiedad. La Figura 3.4-4 presenta resumidamente los resultados obtenidos. Como es de esperarse, se puede apreciar que la resistencia al aplastamiento sigue una tendencia similar a la evolución de resistencia del mortero.

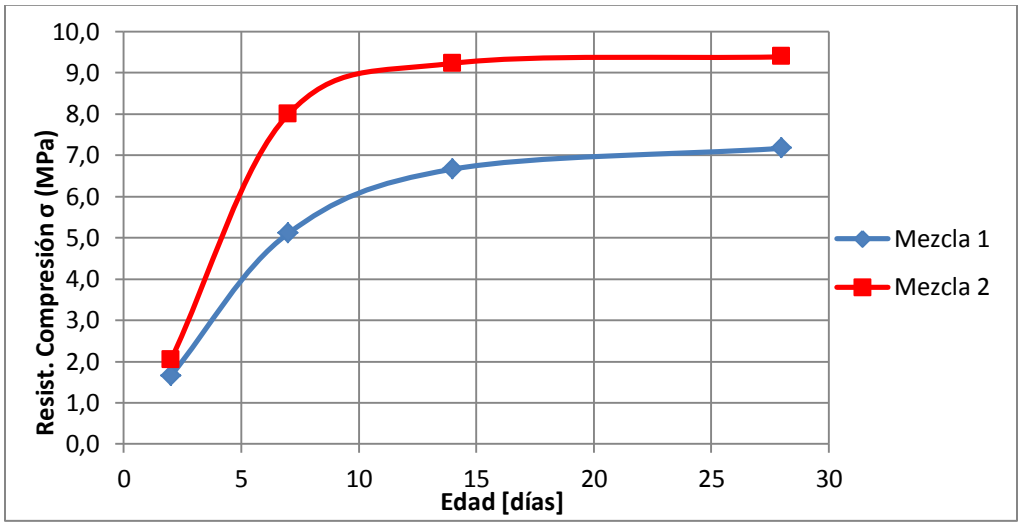



Figura 3.4-4. Resistencia a la compresión de los cubos a diferentes edades

### 3.4.2. Resultado Aplastamiento de Guadua

El procedimiento para elaborar las curvas esfuerzo–desplazamiento para cada muestra ensayada es análogo al presentado en la sección anterior. La primera variación es el área de contacto que en este caso está compuesto por las dos paredes externas de la guadua (Figura 2.3-2). Esta área corresponde al diámetro del perno por el espesor de la suma de los espesores de la guadua. Lo anterior modifica la ecuación del esfuerzo aplicado de la siguiente manera:

$$\sigma_m = \frac{Carga}{\emptyset perno \times (espesor\,1 + espesor2)}$$

Ecuación 3.4-3

Adicionalmente, el criterio del valor máximo obtenido ya no es válido para el caso de aplastamiento en guadua debido a que ésta presenta un comportamiento elasto-plástico el cual difiere del mortero que presenta un comportamiento frágil. Por lo tanto, se adopta el criterio de evaluación de resistencia como la resistencia a la fluencia ($\sigma_y$) que se calcula mediante el método de corrimiento del 5% del diámetro del perno. (ASTM D5764).

A continuación se presenta la curva esfuerzo-desplazamiento para la primera muestra ensayada y su respectiva recta desplazada 5% del diámetro del perno:

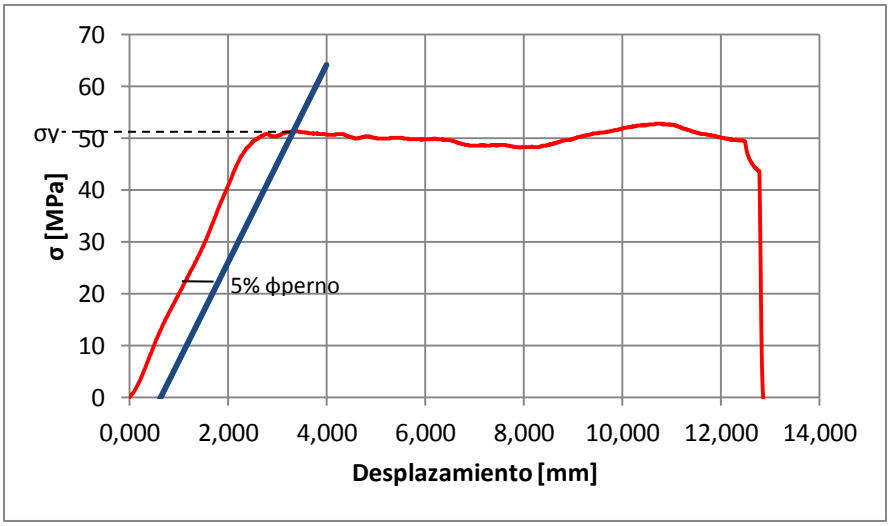



Figura 3.4-5. Curva esfuerzo-desplazamiento para la muestra #1 (1/2" – Dn = 2cm)

Los resultados obtenidos para las 30 muestras ensayadas se presentan en la Tabla 11:

**Tabla 11. Resultados Aplastamiento de guadua**

| Muestra | Grupo Nominal | Grupo de Datos | Φ Perno | dn Medio | Resistencia Fluencia | Distancia Media | Resistencia Media |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | [mm] | [mm] | [MPa] | [mm] | [MPa] |
| 1 | 1/2" - 2 cm | 1 | 12,7 | 29,9 | 51,272 | 31,89 | 50,494 |
| 2 | | | | 33,04 | 48,949 | | |
| 3 | | | | 31,69 | 49,59 | | |
| 4 | | | | 34,19 | 50,345 | | |
| 5 | | | | 30,65 | 52,314 | | |
| 6 | 1/2" - 10 cm | 2 | 12,7 | 105,36 | 61,781 | 105,21 | 61,32 |
| 7 | | | | 103,08 | 61,579 | | |
| 8 | | | | 106,09 | 58,001 | | |
| 9 | | | | 105,4 | | | |
| 10 | | | | 106,15 | 63,921 | | |
| 11 | 3/8" - 2 cm | 3 | 9,525 | 29,66 | 54,664 | 27,47 | 56,426 |
| 12 | | | | 30,89 | 58,223 | | |
| 13 | | | | 25,74 | 53,508 | | |
| 14 | | | | 22,46 | 57,744 | | |
| 15 | | | | 28,61 | 57,992 | | |
| 16 | 3/8" - 10 cm | 4 | 9,525 | 104,05 | 68,599 | 102,37 | 60,034 |
| 17 | | | | 108,49 | 29,224 | | |
| 18 | | | | 100,2 | 69,666 | | |
| 19 | | | | 94,07 | 67,247 | | |
| 20 | | | | 105,06 | 65,435 | | |
| 21 | 5/8" - 2 cm | 5 | 15,875 | 27,18 | 51,487 | 27,33 | 52,223 |
| 22 | | | | 26,37 | 52,484 | | |
| 23 | | | | 28,24 | 52,156 | | |
| 24 | | | | 28,23 | 51,597 | | |
| 25 | | | | 26,62 | 53,393 | | |
| 26 | 5/8" - 10 cm | 6 | 15,875 | 107,85 | 61,585 | 104,59 | 61,379 |
| 27 | | | | 106,62 | 61,272 | | |
| 28 | | | | 104,17 | 59,897 | | |
| 29 | | | | 100,65 | 65,118 | | |
| 30 | | | | 103,66 | 59,023 | | |

Las curvas esfuerzo-desplazamiento elaboradas demuestran un claro comportamiento elasto-plástico y en general se puede afirmar que los grupos de datos con iguales variables demostraron consistencia tanto en la forma de su curva característica como en su valor de resistencia a la fluencia. La Figura 3.4-6 es un ejemplo de la compatibilidad de los resultados obtenidos.

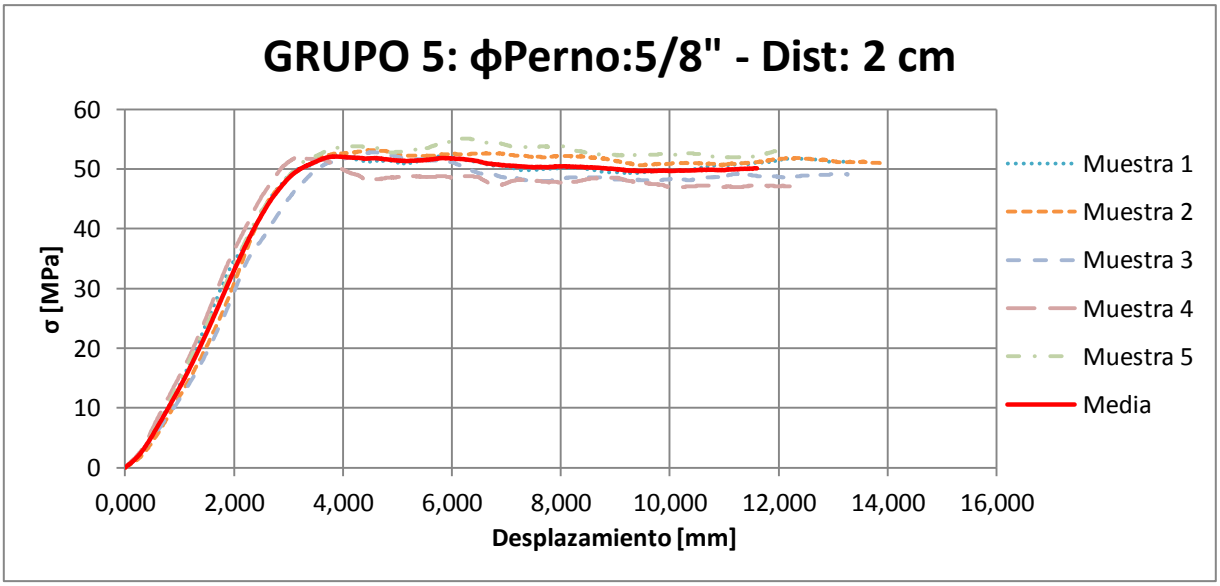



Figura 3.4-6. Curvas esfuerzo desplazamiento para el grupo de datos 5

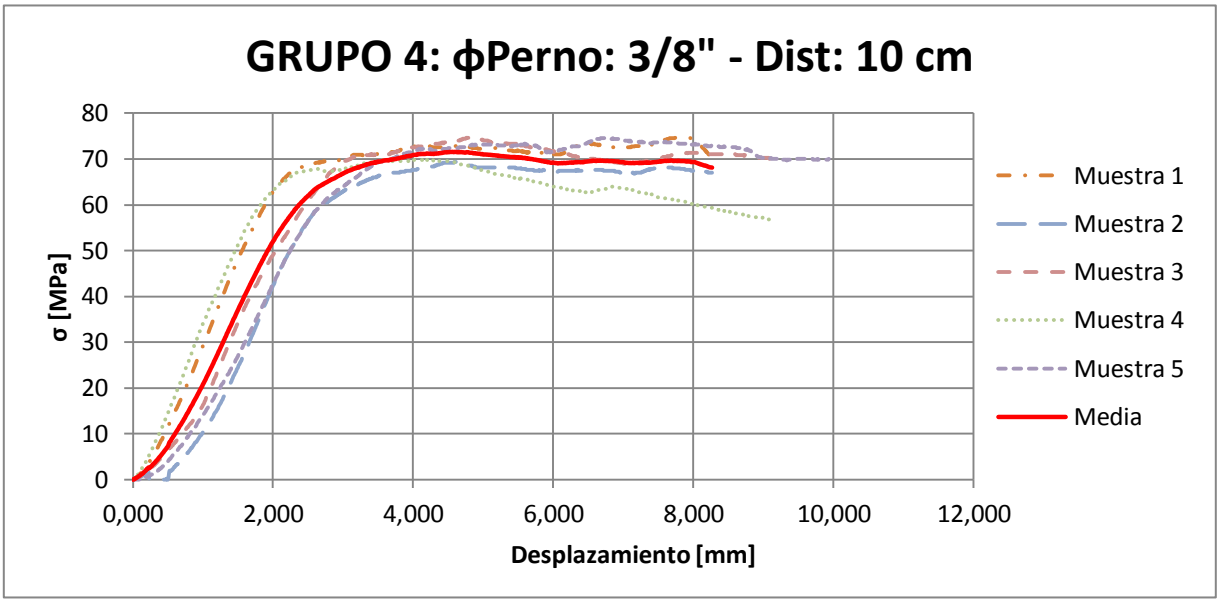



Figura 3.4-7. Curvas esfuerzo desplazamiento para el grupo de datos 4

A pesar de la consistencia y uniformidad de los resultados obtenidos, se encontró que los datos registrados sugieren que la distancia al nudo es proporcional a la resistencia al aplastamiento del material (Figura 3.4-8) lo cual resulta ilógico teniendo en cuenta que el nudo presenta una altísima densidad de fibras y que la cercanía a él implica una rigidez adicional del material. Adicionalmente, estudios previos realizados por el CIMOC (Correal & Arbeláez, 2010) demuestran que como se espera, a menor distancia al nudo, la guadua presenta mayor resistencia.

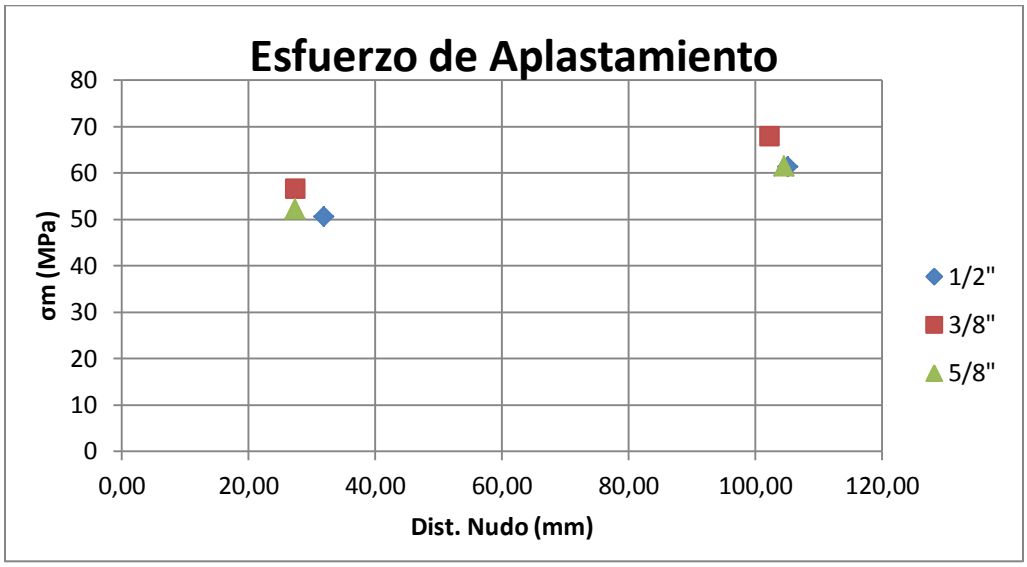



**Figura 3.4-8. Valores medios de resistencia para cada diámetro de perno**

Lo anterior pone en tela de juicio la veracidad de los datos obtenidos y obliga a efectuar un análisis de las posibles causas de error. En principio, se podría afirmar que no parecen haber errores en la preparación de las probetas o en la ejecución de los ensayos ya que los datos muestran consistencia y uniformidad además de un marcado comportamiento elastoplástico.

También se descarta un error en la instrumentación usada debido a que ésta fue calibrada recientemente. Sin embargo, si se toma como marco de referencia los ensayos ejecutados por el CIMOC (Correal & Arbeláez, 2010) se puede afirmar que a pesar de usar la misma instrumentación el montaje del ensayo difería en la ubicación de la celda de carga, lo cual pudo haber ocasionado una incorrecta adquisición de datos que no reflejaba con precisión la carga efectiva ejercida sobre las paredes de la guadua. A continuación se presenta una comparación entre las curvas esfuerzo-desplazamiento obtenidas y los montajes empleados.

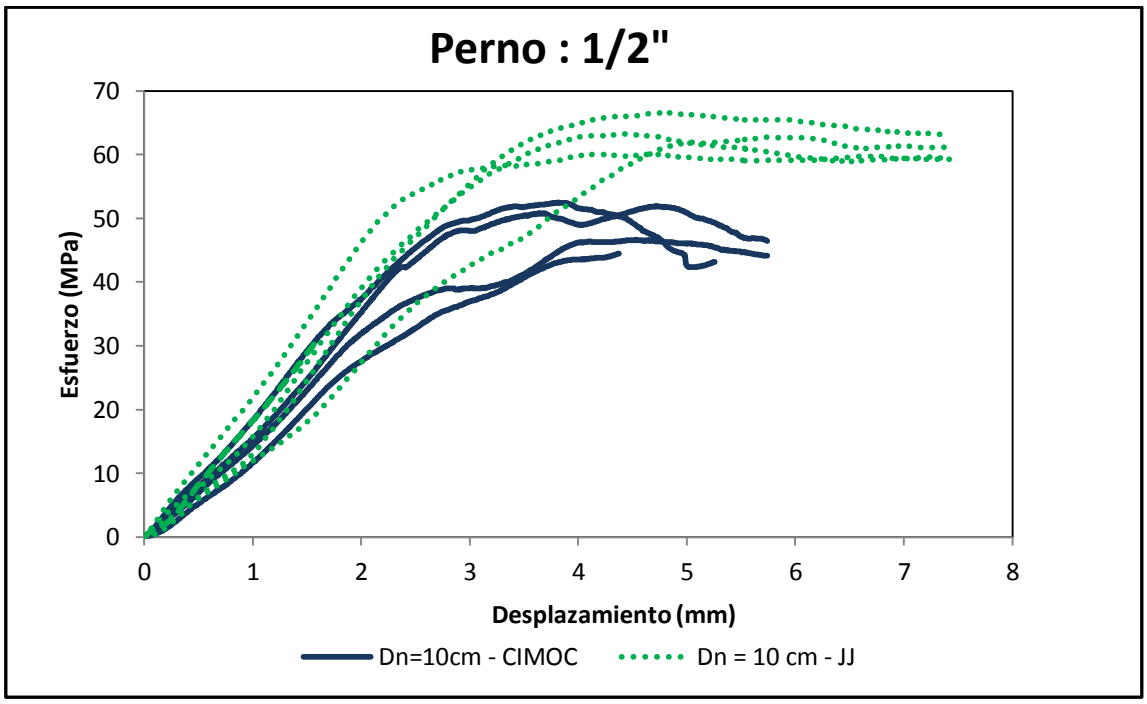



Figura 3.4-9. Comparación de curvas esfuerzo-desplazamiento

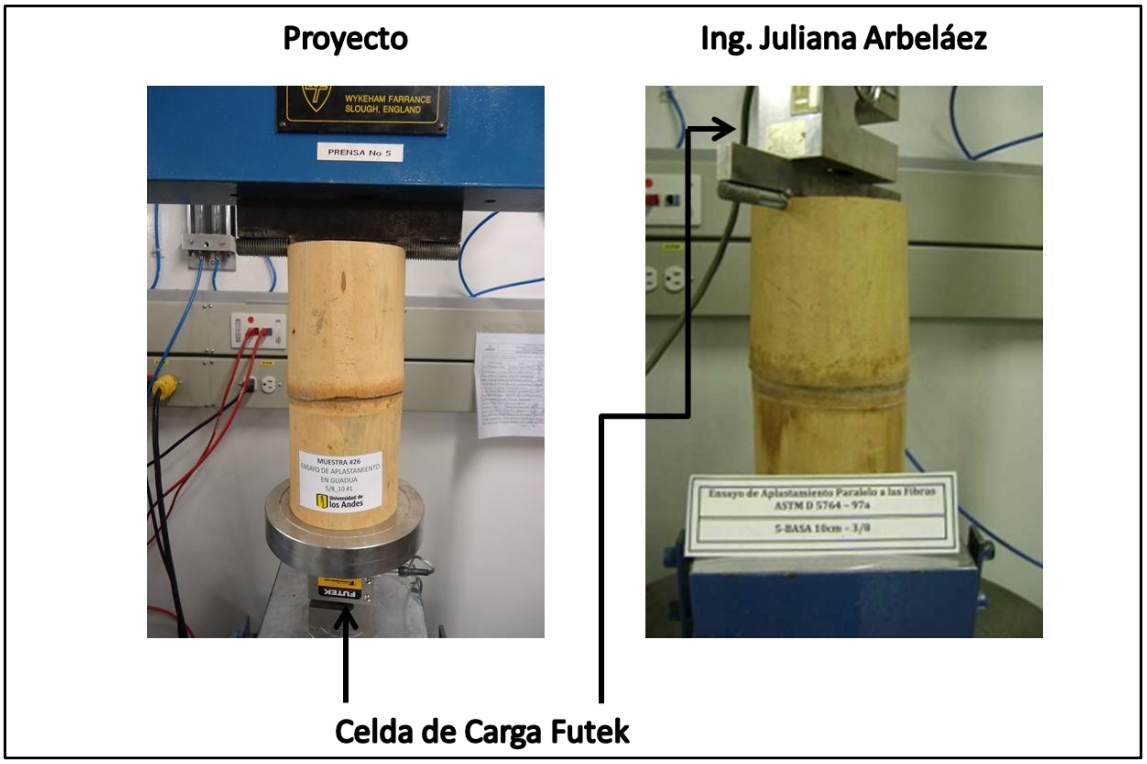



Figura 3.4-10. Comparación Montajes empleados.

## 3.5. Observaciones de los ensayos

A partir de la experiencia de preparar y llevar a cabo los ensayos de laboratorio mencionados se pueden enunciar las siguientes observaciones generales:

- Asegurar la correcta horizontalidad de la probeta resulta complicado incluso desde la fase de elaboración de la misma ya que por la irregularidad de la superficie de la guadua (especialmente en el nudo) realizar un corte perfectamente perpendicular al eje de la misma es muy difícil. Adicionalmente, en algunos contados casos, el sellamiento con papel aluminio resultó ineficaz y la mezcla se deslizó por la base de la probeta generando un apoyo inclinado de la misma.
- Los ensayos en mortero presentaron un comportamiento generalizado interesante en el cual, la carga soportada aumenta hasta un punto y sufre un abrupto descenso formando un claro pico (Figura 3.4-1). A partir de ese momento, de los extremos de la probeta empieza a desprenderse mortero pulverizado y el perno muestra un ligero reacomodamiento; después de este evento la probeta vuelve a recuperar la capacidad de carga progresivamente. Posteriormente, en el extremo superior de la pared de guadua aparece una grieta que se propaga lentamente hacia la base de la probeta, proceso que toma aproximadamente 5 minutos. En la mayoría de los casos se presenta una grieta en cada lado de la muestra pero su aparición no suele ser simultánea. En el momento en que la grieta alcanza la base de la probeta ésta se abre de forma abrupta.
- De forma contraria, los ensayos de aplastamiento en guadua mostraron un comportamiento dúctil en el cual el avance del perno es sostenido hasta el límite de fluencia del material. La aparición de grietas no ocurre en todos los casos y sólo se presenta después de que el material ha sobrepasado su límite de fluencia.
- En algunos casos se obtuvo una dispersión de datos basta alta (desviaciones estándar de aproximadamente 20%) y varias ocasiones fue necesario descartar datos inmediatamente por presentar comportamientos de esfuerzo-desplazamiento fuera de lo común. A pesar de la variabilidad natural esperada del material, en algunos casos, la dispersión de datos obtenida supera la expectativa lo cual genera dudas sobre su confiabilidad.

# 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

## 4.1. Análisis de falla

### *4.1.1. Falla de mortero*

Como se mencionó en la sección 3.5 el ensayo de aplastamiento en mortero mostraba dos fases distintas marcadas por un descenso abrupto de la carga soportada y por un reacomodamiento del perno. Los criterios generales de experimentación indican que un descenso en la carga soportada superior al 80% de la misma se considera una falla. De lo anterior se puede concluir que el valor de resistencia al aplastamiento del mortero no corresponde al máximo valor obtenido en la curva esfuerzo-desplazamiento sino al pico registrado en etapas tempranas del ensayo (Figura 3.4-1).

Un análisis de la probeta fallada indica que el pico corresponde a una fractura frágil del material que genera una grieta por el plano de máximos esfuerzos del material, induciendo esfuerzos de tensión internos en el mismo. A continuación se ilustra una falla típica presentada por una de las probetas ensayadas. En la Figura 4.1-1 se aprecia que la guadua se abre y pierde su capacidad de confinamiento mientras que el mortero presenta una grieta que atraviesa toda su sección transversal, es decir, ha perdido su integridad pero se mantiene unida por la acción restrictiva de la guadua de confinamiento.

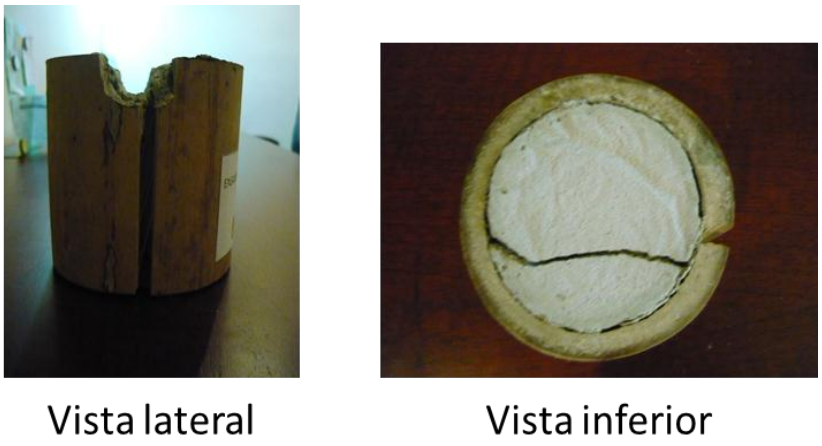



**Figura 4.1-1. Falla típica ensayos de aplastamiento en mortero**

**Figura 4.1-2. Mortero de refuerzo dividido**

Después de que el mortero falla de forma frágil, la grieta generada divide la sección transversal en dos de forma casi simétrica (Figura 4.1-2) debido a que la acción puntual del perno produce un efecto concentrador de esfuerzos que induce a que la falla se presente debajo de éste.

El anterior efecto establece la necesidad de realizar un análisis más profundo relacionado con el papel que juega la guadua después de la falla del mortero, especialmente, por la enorme diferencia que existe entre el esfuerzo de aplastamiento del mortero y el valor máximo obtenido en los ensayos. En principio, parece ilógico que un mortero que presenta una capacidad muy baja alcance un esfuerzo máximo de hasta 800% su resistencia a la compresión, sin embargo, dada la condición de confinamiento del mismo, es necesario evaluar más detenidamente los fenómenos e interacciones presentes.

La primera hipótesis planteada para explicar la enorme diferencia entre la resistencia del material y la resistencia última obtenida fue que la guadua era la responsable de mantener unida la sección a través de sus paredes. Una vez se ha dividido la sección de mortero, la subsecuente aplicación de carga vertical induce a la separación de ambas partes, movimiento que se ve restringido por la acción cohesiva de la guadua que genera esfuerzos de

confinamiento en el material. La Figura 4.1-3 muestra un esquema básico de las fuerzas interactuando en la unión.

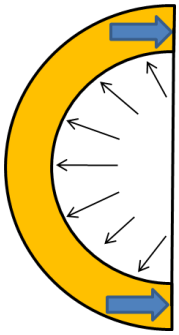


**Figura 4.1-3. Esquema de fuerzas internas presentes en la unión**

Para estimar el esfuerzo soportado por la guadua se recurre a la teoría de concreto confinado que permite estimar la influencia del acero de refuerzo sobre la capacidad a la compresión del concreto. Mediante la siguiente ecuación se puede estimar el aumento de capacidad experimentado por el mortero a causa del confinamiento de la guadua:

$$\sigma_{conf} = \frac{A_{pared} \times \sigma_{tensión\ perp}}{D \times L} = \frac{L \times (e1 + e2) \times \sigma_{tensión\ perp}}{D \times L}$$

$$\sigma_{conf} = \frac{(e1 + e2) \times \sigma_{tensión\ perp}}{D_i}$$

**Ecuación 4.1-1**

Donde,

A = Área de paredes de la guadua
σ tensión perp. = Resistencia a la tensión perpendicular a la fibra de la guadua
e1, e2 = espesores del culmo de guadua
$D_i$ = Diámetro interno del culmo de guadua

El dato usado como resistencia a la tensión perpendicular a la fibra es resultado de ensayos efectuados por la ingeniera Luisa Rubio en Julio de 2010 en el marco del proyecto "*Validación tecnológica del comportamiento de estructuras de guadua rolliza*". El valor promedio para muestras de sobrebasa es de 1,74 MPa.

Usando los datos geométricos (en mm) de la muestra #1 se obtiene:

$$\sigma_{conf} = \frac{(9{,}01 + 7{,}62) \times 1{,}74}{87{,}80} = 0{,}33\ MPa$$

El resultado indica que la guadua aporta una mínima resistencia adicional al sistema pero evidentemente no es responsable de la diferencia de resistencias analizadas.

La segunda hipótesis planteada consiste en suponer un aumento de la resistencia del mortero debido a la condición de confinamiento en que se encuentra. Para evaluar esta suposición se recurrió al modelo de Mander de concreto confinado (Mander, 1988) que plantea una ecuación empírica para calcular la resistencia a la compresión confinada (f'cc) del concreto en función de la resistencia a la compresión inconfinada (f'c) y la presión de confinamiento (f'l).

$$f'cc = f'c\left(-1.254 + 2.254\sqrt{1 + \frac{7.94f'l}{f'c}} - 2\frac{f'l}{f'c}\right)$$

**Ecuación 4.1-2**

En este caso se remplazará el término de presión de confinamiento (f'l) por la resistencia a la tensión perpendicular a la fibra antes mencionada. Cabe aclarar de antemano que ésta es una ecuación empírica calibrada para **concreto y acero** y que la presión de confinamiento es función de la relación de volúmenes de los materiales y de la forma del refuerzo de acero por lo que no se espera exactitud en los valores calculados; sin embargo, permite establecer un estimativo general de la diferencia de resistencias que permita dar una explicación a los resultados obtenidos.

A continuación se presenta una comparación de los resultados obtenidos durante los ensayos y el valor teórico calculado del modelo de Mander:

Tabla 12. Comparación Modelo Mander - Ensayos

| Grupo de Datos | f'c | f'cc | Resistencia Máxima | Diferencia | Diferencia Relativa |
|---|---|---|---|---|---|
| | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | % |
| 1 | 2,04 | 6,78 | 6,3 | 0,48 | 7,61% |
| | | | 11,34 | 4,55 | 40,18% |
| | | | 13,95 | 7,17 | 51,38% |
| | | | 12,5 | 5,72 | 45,74% |
| | | | 13,23 | 6,45 | 48,74% |
| 2 | 7,99 | 16,25 | 9,9 | 6,35 | 64,15% |
| | | | 10,59 | 5,66 | 53,49% |
| | | | 12,89 | 3,36 | 26,07% |
| | | | 8,14 | 8,11 | 99,54% |
| | | | 13,97 | 2,28 | 16,32% |
| 3 | 9,23 | 17,82 | 16,32 | 1,5 | 9,18% |
| | | | 11,78 | 6,04 | 51,31% |
| | | | 11,06 | 6,76 | 61,16% |
| | | | 12,16 | 5,66 | 46,56% |
| | | | 13,03 | 4,79 | 36,80% |
| 4 | 9,47 | 18,12 | 12,81 | 5,3 | 41,40% |
| | | | 10,65 | 7,46 | 70,06% |
| | | | 14,83 | 3,28 | 22,14% |
| | | | 16,39 | 1,73 | 10,55% |
| | | | 18,6 | 0,49 | 2,61% |
| 5 | 2,04 | 6,78 | 17,12 | 10,34 | 60,40% |
| | | | 11,15 | 4,37 | 39,20% |
| | | | 11,7 | 4,92 | 42,05% |
| | | | 4,19 | 2,59 | 61,83% |
| | | | 13,55 | 6,76 | 49,94% |
| 6 | 7,99 | 16,25 | 11,95 | 4,31 | 36,04% |
| | | | 10,94 | 5,31 | 48,57% |
| | | | 10,29 | 5,97 | 58,01% |
| | | | 11,48 | 4,78 | 41,62% |
| | | | 11,82 | 4,43 | 37,45% |
| 7 | 9,23 | 17,82 | 19,5 | 1,68 | 8,61% |
| | | | 14,75 | 3,07 | 20,80% |
| | | | 18,18 | 0,36 | 2,00% |
| | | | 10,35 | 7,47 | 72,23% |
| | | | 13,53 | 4,29 | 31,68% |

Tabla 12. Comparación Modelo Mander - Ensayos (Continuación)

| Grupo de Datos | f'c | f'cc | Resistencia Máxima | Diferencia | Diferencia Relativa |
|---|---|---|---|---|---|
| | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | % |
| 8 | 9,47 | 18,12 | 15,91 | 2,2 | 13,83% |
| | | | 20,02 | 1,91 | 9,52% |
| | | | 15,58 | 2,54 | 16,30% |
| | | | 14,72 | 3,4 | 23,10% |
| | | | 19,81 | 1,69 | 8,55% |
| 9 | 1,66 | 5,86 | 8,68 | 2,82 | 32,48% |
| | | | 6,09 | 0,23 | 3,74% |
| | | | 11,75 | 5,88 | 50,09% |
| | | | 12,09 | 6,23 | 51,52% |
| | | | 10,57 | 4,7 | 44,51% |
| 10 | 5,1 | 12,26 | 11,04 | 1,23 | 11,11% |
| | | | 8,02 | 4,24 | 52,90% |
| | | | 10,28 | 1,99 | 19,32% |
| | | | 10,4 | 1,86 | 17,93% |
| | | | 9,23 | 3,03 | 32,79% |
| 11 | 6,66 | 14,49 | 12,46 | 2,03 | 16,31% |
| | | | 10,2 | 4,29 | 42,04% |
| | | | 16,68 | 2,19 | 13,14% |
| | | | 15,41 | 0,92 | 5,98% |
| | | | 11,21 | 3,28 | 29,22% |
| 12 | 7,16 | 15,16 | 16,91 | 1,75 | 10,35% |
| | | | 12,59 | 2,57 | 20,42% |
| | | | 11,96 | 3,2 | 26,77% |
| | | | 9,42 | 5,75 | 61,04% |
| | | | 24,3 | 9,13 | 37,59% |
| 13 | 1,66 | 5,86 | 17,47 | 11,61 | 66,45% |
| | | | 19,14 | 13,28 | 69,37% |
| | | | 13,42 | 7,56 | 56,31% |
| | | | 11,97 | 6,1 | 51,01% |
| | | | 21,83 | 15,97 | 73,15% |
| 14 | 5,1 | 12,26 | 8,35 | 3,91 | 46,84% |
| | | | 7,71 | 4,55 | 59,09% |
| | | | 8,61 | 3,65 | 42,42% |
| | | | 9,33 | 2,94 | 31,49% |
| | | | 23,92 | 11,65 | 48,72% |

Tabla 12 . Comparación Modelo Mander - Ensayos (Continuación)

| Grupo de Datos | f'c | f'cc | Resistencia Máxima | Diferencia | Diferencia Relativa |
|---|---|---|---|---|---|
| | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | % |
| 15 | 6,66 | 14,49 | 9,99 | 4,5 | 45,11% |
| | | | 9,52 | 4,97 | 52,21% |
| | | | 13,8 | 0,69 | 4,97% |
| | | | 11,25 | 3,24 | 28,85% |
| | | | 11,27 | 3,22 | 28,57% |
| 16 | 7,16 | 15,16 | 18,15 | 2,99 | 16,46% |
| | | | 13,53 | 1,64 | 12,10% |
| | | | 11,01 | 4,15 | 37,71% |
| | | | 14,57 | 0,59 | 4,06% |
| | | | 10,64 | 4,52 | 42,52% |

Se calculó la diferencia relativa entre el valor de resistencia confinada (f'cc) y el valor de resistencia obtenido en los ensayos como parámetro de comparación con el objetivo de comprobar la hipótesis antes planteada sobre el efecto del confinamiento proporcionado por la guadua. A pesar de que las diferencias relativas halladas en cada caso varían dentro de un rango bastante amplio lo que no permite establecer un patrón de relación claro, el hecho de que ninguna de estas diferencias haya registrado un valor superior al 100% indica que los valores calculados se encuentran dentro del rango y orden de magnitud esperado. Esto quiere decir que el valor de resistencia a la compresión confinada se encuentra entre límites comparativos aceptables; es natural que las diferencias hayan sido muy amplias dado que estos valores provienen de una ecuación calibrada exclusivamente para el concreto confinado con acero, sin embargo, la concordancia de órdenes de magnitud permite concluir que el efecto de confinamiento explica el gran aumento en la resistencia del mortero y confirmar la hipótesis planteada anteriormente.

### 4.1.2. *Falla de guadua*

El comportamiento de falla observado para la guadua variaba dependiendo del perno utilizado para realizar el ensayo, sin embargo, se puede afirmar que en general presenta una falla dúctil con grandes niveles de deformación. Se puede considerar que un elemento ya ha fallado cuando la deformación sufrida por éste evita que cumpla la función para la que fue diseñado a pesar de que esto no implique una destrucción del elemento. La Figura 4.1-4 presenta una falla por deformación excesiva y una falla por agrietamiento bajo la acción del mismo diámetro de perno (5/8").

**Figura 4.1-4. Falla por aplastamiento en guadua. Perno : 5/8"- Dn=2 cm y Dn = 10 cm respectivamente.**

En la medida en que se aumenta el diámetro del perno se propicia la aparición de grietas verticales paralelas a la fibra bajo el sitio de aplicación de carga. Dichas grietas se generan en puntos de defectos puntuales de la microestructura del material que actúan como concentradores de esfuerzos y se propagan lentamente (alrededor de un 1 cm/min) en la misma dirección de la aplicación de la carga. Un aspecto interesante del comportamiento de dicha grieta es que se esperaba que su propagación se detuviera o dificultara al momento de alcanzar el nudo del cañuto, pero por el contrario lo atraviesa con facilidad y prosigue su avance.

Se puede afirmar que el tipo de falla presentado por la guadua es el menos catastrófico posible, ya que, después del fallo de la junta, esta puede seguir soportando una carga importante y la estructura afectada puede mantener su integridad hasta el momento de su eventual reparación.

Adicionalmente, el modo de propagación de la grieta indica que los especímenes con espesores normales (alrededor de 2 cm) cumplen el criterio de fractura conocido como "Leak Before Break" (Arana & González, 2001) que significa que una grieta generada en el interior de la pared de guadua alcanza la superficie de la misma antes de alcanzar una longitud de grieta crítica que ocasiona una falla violenta o explosiva.

Todo lo anterior lleva a concluir que la guadua presenta un comportamiento dúctil en caso de ingresar al rango inelástico y sufrir deformaciones permanentes. Esto implica que tiene una alta capacidad de absorción y disipación de energía por lo que se espera que ante un incremento importante en la solicitación de carga vertical en una conexión (ej: una súbita aceleración vertical del terreno durante un evento sísmico) la estructura mantenga su integridad y no colapse de manera violenta.

## 4.2. Regresión Lineal Múltiple

### *4.2.1. Mortero*

A partir de los datos experimentales obtenidos se planteó un modelo lineal que permita calcular la capacidad al aplastamiento tanto del mortero como de la guadua a partir de sus dos variables más importantes. En el caso del mortero, su resistencia se encuentra en función del diámetro del perno de conexión y de la resistencia a la compresión del mortero de relleno.

Se ingresan los datos obtenidos en un modelo de regresión lineal múltiple que resumidamente consiste en resolver el siguiente sistema matricial para determinar los valores de $a_0$, $a_1$ y $a_2$.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| n | Σ x1i | Σ x2i | × | a0 | = | Σ yi |
| Σ x1i | Σ x1^2i | Σ x1ix2i | | a1 | | Σ x1iyi |
| Σ x2i | Σ x1ix2i | Σ x2^2i | | a2 | | Σ x2iyi |

Donde,

n = número de datos
x1, x2 = variables
y = respuesta

A continuación se presenta la regresión para los datos de mortero, de la cual se puede concluir que el diámetro del perno ejerce una influencia negativa sobre la resistencia del mortero, es decir, a medida que se incremente el diámetro del perno, la resistencia al aplastamiento del mortero se reducirá. También se puede concluir que la variable más importante es la resistencia a la compresión del mortero y naturalmente tiene un efecto positivo. Es importante aclarar que sólo se tiene en cuenta un valor representativo de cada grupo de datos. Para ese efecto, se adelantó un proceso de descarte siguiendo el criterio de eliminar aquellos valores que estuvieran alejados por más de una desviación estándar de la media y se seleccionó como dato representativo el valor medio de los datos restantes.

Tabla 13. Regresión lineal múltiple efectuada

| Grupo de Datos | Φ Perno (x1) | f'c (x2) | σb (y) | x1^2 | x2^2 | x1*x2 | x1*y | x2*y |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | [mm] | [MPa] | [MPa] | | | | | |
| 1 | 12,70 | 2,04 | 3,07 | 161,29 | 4,16 | 25,91 | 38,94 | 6,26 |
| 2 | 12,70 | 7,99 | 7,37 | 161,29 | 63,84 | 101,47 | 93,60 | 58,89 |
| 3 | 12,70 | 9,23 | 10,12 | 161,29 | 85,19 | 117,22 | 128,54 | 93,42 |
| 4 | 12,70 | 9,47 | 12,85 | 161,29 | 89,68 | 120,27 | 163,23 | 121,72 |
| 5 | 9,53 | 2,04 | 3,60 | 90,82 | 4,16 | 19,44 | 34,30 | 7,34 |
| 6 | 9,53 | 7,99 | 6,79 | 90,82 | 63,84 | 76,14 | 64,68 | 54,23 |
| 7 | 9,53 | 9,23 | 12,48 | 90,82 | 85,19 | 87,96 | 118,91 | 115,16 |
| 8 | 9,53 | 9,47 | 17,84 | 90,82 | 89,68 | 90,25 | 170,05 | 168,98 |
| 9 | 12,70 | 1,66 | 5,79 | 161,29 | 2,76 | 21,08 | 73,51 | 9,61 |
| 10 | 12,70 | 5,10 | 10,06 | 161,29 | 26,01 | 64,77 | 127,73 | 51,29 |
| 11 | 12,70 | 6,66 | 11,57 | 161,29 | 44,36 | 84,58 | 146,99 | 77,08 |
| 12 | 12,70 | 7,16 | 7,40 | 161,29 | 51,27 | 90,93 | 93,97 | 52,98 |
| 13 | 9,53 | 1,66 | 5,56 | 90,73 | 2,76 | 15,81 | 52,96 | 9,23 |
| 14 | 9,53 | 5,10 | 5,56 | 90,73 | 26,01 | 48,58 | 52,96 | 28,36 |
| 15 | 9,53 | 6,66 | 9,98 | 90,73 | 44,36 | 63,44 | 95,05 | 66,46 |
| 16 | 9,53 | 7,16 | 12,12 | 90,73 | 51,27 | 68,20 | 115,41 | 86,75 |
| **Σ Total** | 177,82 | 98,62 | 142,15 | 2016,51 | 734,52 | 1096,06 | 1570,84 | 1007,76 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16 | 177,82 | 98,62 | × | a0 | = | 142,15 |
| 177,82 | 2016,51 | 1096,06 | | a1 | | 1570,84 |
| 98,62 | 1096,06 | 734,52 | | a2 | | 1007,76 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3,430 | -0,276 | -0,049 | × | 142,153 | = | 4,975 |
| -0,276 | 0,025 | 0,000 | | 1570,841 | | -0,224 |
| -0,049 | 0,000 | 0,008 | | 1007,764 | | 1,039 |

Por lo tanto, el modelo de regresión lineal se resume mediante la Ecuación 4.2-1

$$\sigma_m = 4{,}98 - 0{,}22 * \Phi perno + 1{,}04 * f'c$$

Ecuación 4.2-1

La Figura 4.2-1 presenta una representación visual de la ecuación calculada:

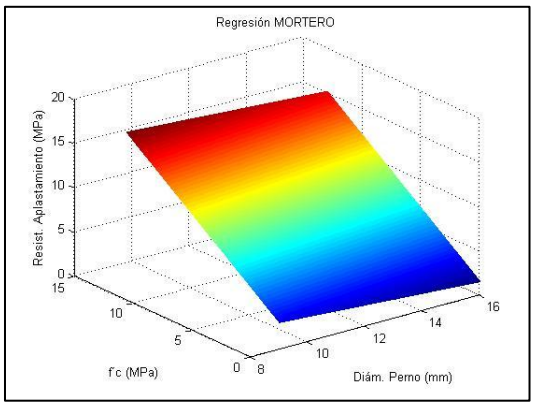



**Figura 4.2-1 Plano ajustado de regresión**

**Unificación de datos anteriores:**

La ecuación obtenida tiene como objetivo recalibrar el programa desarrollado por el grupo de investigación CIMOC de la Universidad de los Andes que calcula la capacidad de carga de las conexiones tipo Simón Vélez dadas sus características geométricas. Adicionalmente es un referente para caracterizar el material y estimar su capacidad.

El programa calcula la capacidad al aplastamiento del mortero a partir de la ecuación de regresión calculada en el proyecto ejecutado por la Ingeniera Ana María Suarez:

$$\sigma_m = -2{,}17 + 0{,}02 * \Phi perno + 1{,}3 * f'c$$

**Ecuación 4.2-2**

Se puede apreciar que ambas ecuaciones coinciden con la proporcionalidad de la resistencia a la compresión del mortero con la resistencia final al aplastamiento de la conexión, sin embargo, difieren en el efecto del diámetro del perno dada la disparidad de signos en dicho coeficiente. Asumiendo la validez y confiabilidad de ambas series de ensayos, es necesario verificar las causas de dicha diferencia, la cual se encontró al verificar el desarrollo del proceso adelantado en dicho proyecto. La disparidad se presenta debido a que se eligieron distintos criterios de selección del valor representativo de cada grupo de datos; mientras que

en este proyecto se escoge el valor medio de los datos restantes luego del descarte, en el proyecto de la Ingeniera Suarez se escoge el valor mínimo de dichos valores. Una verificación de la regresión cambiando el criterio de selección de datos arroja el siguiente resultado:

$$\sigma_m = 0{,}94 - 0{,}14 * \Phi perno + 1{,}3 * f'c$$

**Ecuación 4.2-3**

Se puede apreciar que las Ecuaciones 4.2-2 y 4.2-3 son similares tanto en signos como en valores, de lo que se puede concluir que la diferencia obtenida efectivamente se debía a una divergencia de los criterios usados.

Debido a que el propósito de este proyecto es la determinación del valor nominal de resistencia al aplastamiento del mortero, usar el criterio del valor mínimo sería incorrecto ya que no es un valor representativo de la verdadera capacidad del material de resistir este tipo de esfuerzos sino una aproximación conservadora para propósitos de diseño.

Una vez modificados los datos de la Ingeniera Suarez se procede a unificarlos y a reprocesar la regresión lineal. La Tabla 14 presenta el proceso de regresión lineal con la inclusión de los nuevos valores (resaltados en color azul). Por otra parte, se volvió a generar la gráfica que representa la nueva ecuación obtenida, la cual se presenta en la Figura 4.2-2.

**Tabla 14. Regresión lineal múltiple unificada con datos del grupo CIMOC (Mortero)**

| Grupo de Datos | Φ Perno (x1) | f'c (x2) | Resistencia (y) | x1^2 | x2^2 | x1*x2 | x1*y | x2*y |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | [mm] | [MPa] | [MPa] | | | | | |
| 1 | 12,70 | 2,04 | 3,07 | 161,290 | 4,162 | 25,908 | 38,942 | 6,255 |
| 2 | 12,70 | 7,99 | 7,37 | 161,290 | 63,840 | 101,473 | 93,597 | 58,885 |
| 3 | 12,70 | 9,23 | 10,12 | 161,290 | 85,193 | 117,221 | 128,543 | 93,422 |
| 4 | 12,70 | 9,47 | 12,85 | 161,290 | 89,681 | 120,269 | 163,235 | 121,719 |
| 5 | 9,53 | 2,04 | 3,60 | 90,821 | 4,162 | 19,441 | 34,299 | 7,342 |
| 6 | 9,53 | 7,99 | 6,79 | 90,821 | 63,840 | 76,145 | 64,684 | 54,231 |
| 7 | 9,53 | 9,23 | 12,48 | 90,821 | 85,193 | 87,962 | 118,908 | 115,164 |
| 8 | 9,53 | 9,47 | 17,84 | 90,821 | 89,681 | 90,249 | 170,054 | 168,983 |
| 9 | 12,70 | 1,66 | 5,79 | 161,290 | 2,756 | 21,082 | 73,512 | 9,609 |
| 10 | 12,70 | 5,10 | 10,06 | 161,290 | 26,010 | 64,770 | 127,731 | 51,293 |
| 11 | 12,70 | 6,66 | 11,57 | 161,290 | 44,356 | 84,582 | 146,990 | 77,083 |
| 12 | 12,70 | 7,16 | 7,40 | 161,290 | 51,266 | 90,932 | 93,969 | 52,978 |
| 13 | 9,53 | 1,66 | 5,56 | 90,726 | 2,756 | 15,812 | 52,960 | 9,230 |
| 14 | 9,53 | 5,10 | 5,56 | 90,726 | 26,010 | 48,578 | 52,960 | 28,356 |
| 15 | 9,53 | 6,66 | 9,98 | 90,726 | 44,356 | 63,437 | 95,051 | 66,461 |
| 16 | 9,53 | 7,16 | 12,12 | 90,726 | 51,266 | 68,199 | 115,408 | 86,753 |
| 17 | 15,88 | 7,83 | 7,58 | 252,02 | 61,24 | 124,23 | 120,27 | 59,29 |
| 18 | 12,70 | 7,83 | 9,12 | 161,29 | 61,24 | 99,38 | 115,77 | 71,33 |
| 19 | 9,53 | 7,83 | 6,28 | 90,73 | 61,24 | 74,54 | 59,81 | 49,14 |
| 20 | 15,88 | 10,86 | 12,81 | 252,02 | 118,03 | 172,47 | 203,42 | 139,22 |
| 21 | 12,70 | 10,86 | 14,11 | 161,29 | 118,03 | 137,98 | 179,19 | 153,29 |
| 22 | 9,53 | 10,86 | 15,19 | 90,73 | 118,03 | 103,48 | 144,68 | 165,02 |
| 23 | 15,88 | 11,43 | 14,08 | 252,02 | 130,56 | 181,39 | 223,53 | 160,89 |
| 24 | 12,70 | 11,43 | 13,92 | 161,29 | 130,56 | 145,11 | 176,73 | 159,00 |
| 25 | 9,53 | 11,43 | 11,84 | 90,73 | 130,56 | 108,84 | 112,77 | 135,27 |
| **Σ Total** | 292,12 | 188,97 | 247,07 | 3528,60 | 1664,01 | 2243,47 | 2907,01 | 2100,21 |

$$\begin{bmatrix} 25 & 292,12 & 188,97 \\ 292,12 & 3528,60 & 2243,47 \\ 188,97 & 2243,47 & 1664,01 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a0 \\ a1 \\ a2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 247,07 \\ 2907,01 \\ 2100,21 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1,295 & -0,096 & -0,018 \\ -0,096 & 0,009 & -0,001 \\ -0,018 & -0,001 & 0,004 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 247,072 \\ 2907,006 \\ 2100,212 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,855 \\ -0,136 \\ 1,008 \end{bmatrix}$$

La ecuación obtenida es:

$$\sigma_m = 3{,}86 - 0{,}14 * \Phi perno + 1{,}01 * f'c$$

Ecuación 4.2-4

Por último se grafican los puntos en plano tridimensional para obtener un plano de regresión:

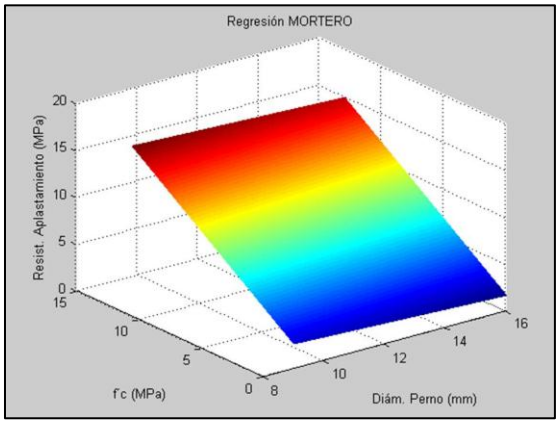



Figura 4.2-2. Plano de regresión Mortero unificado con datos del grupo CIMOC (Mortero)

### 4.2.2. *Guadua*

Se realizó un proceso análogo para la guadua, teniendo en cuenta que las variables de las que depende la capacidad al aplastamiento de la guadua son el diámetro del perno y la distancia del mismo al nudo del cañuto.

Tabla 15. Regresión lineal múltiple guadua

| Grupo de Datos | Φ Perno (x1) | dn (x2) | Resistencia (y) | x1^2 | x2^2 | x1*x2 | x1*y | x2*y |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | [mm] | [mm] | [Mpa] | | | | | |
| 1 | 12,700 | 31,923 | 50,402 | 161,290 | 1019,099 | 405,426 | 640,110 | 1609,012 |
| 2 | 12,700 | 105,103 | 61,167 | 161,290 | 11046,711 | 1334,812 | 776,821 | 6428,852 |
| 3 | 9,525 | 29,717 | 56,960 | 90,726 | 883,080 | 283,051 | 542,540 | 1692,648 |
| 4 | 9,525 | 104,580 | 54,775 | 90,726 | 10936,976 | 996,125 | 521,731 | 5728,363 |
| 5 | 15,875 | 27,262 | 52,042 | 252,016 | 743,198 | 432,779 | 826,171 | 1418,758 |
| 6 | 15,875 | 104,220 | 62,200 | 252,016 | 10861,808 | 1654,493 | 987,426 | 6482,491 |
| **Σ Total** | **76,200** | **402,805** | **337,546** | **1008,063** | **35490,873** | **5106,686** | **4294,799** | **23360,125** |

Tabla 15. Regresión lineal múltiple guadua (Continuación)

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 76,20 | 402,81 | × | a0 | = | 337,55 |
| 76,20 | 1008,06 | 5106,69 | | a1 | | 4294,80 |
| 402,81 | 5106,69 | 35490,87 | | a2 | | 23360,13 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4,746 | -0,317 | -0,008 | × | 337,546 | = | 47,945 |
| -0,317 | 0,025 | 0,000 | | 4294,799 | | 0,216 |
| -0,008 | 0,000 | 0,000 | | 23360,125 | | 0,083 |

Por lo tanto, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\sigma_b = 47{,}94 + 0{,}22 * \Phi perno + 0{,}08 * dn$$

Ecuación 4.2-5

En este caso el efecto del perno es contrario al ejercido sobre el mortero, ya que la resistencia de la guadua aumenta en la medida que se aumenta el diámetro del perno. También se puede concluir que la distancia al nudo parece tener una influencia muy pequeña sobre la resistencia, sin embargo, es importante aclarar que estos datos muestran tendencias ilógicas y que su validez queda en duda. La Figura 4.2-3 muestra una representación visual de la ecuación obtenida:

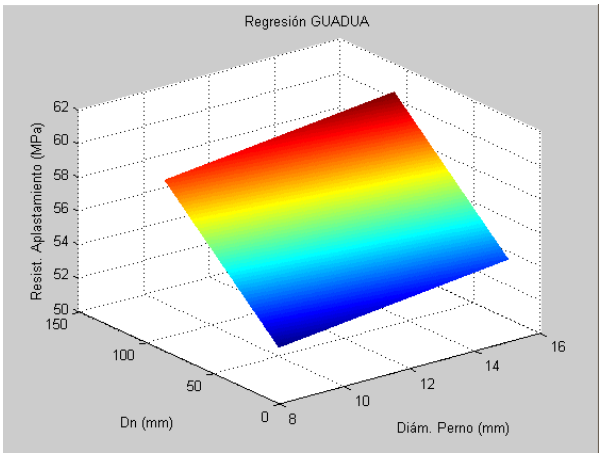



Figura 4.2-3. Plano de regresión Guadua

**Unificación de datos anteriores:**

Como se explicó en la sección 3.4.2 los resultados obtenidos en los ensayos sobre guadua no tienen una alta confiabilidad dado que son ilógicos y sería incorrecto utilizarlos indiscriminadamente para desarrollar el modelo de regresión. Por consiguiente, se decidió utilizar únicamente los valores de los ensayos con el perno ubicado a 2 cm del nudo e ignorar los resultados de los ensayos a 10 cm. La Tabla 16 muestra los datos ingresados a la regresión junto a los obtenidos por la Ingeniera Juliana Arbeláez y el desarrollo de la misma.

**Tabla 16. Regresión efectuada unificada con los datos del grupo CIMOC (Guadua)**

| Grupo de Datos | Φ Perno (x1) | dn (x2) | Resistencia (y) | x1^2 | x2^2 | x1*x2 | x1*y | x2*y |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | [mm] | [mm] | [Mpa] | | | | | |
| 1 | 12,700 | 31,923 | 50,402 | 161,290 | 1019,099 | 405,426 | 640,110 | 1609,012 |
| 2 | 9,525 | 29,717 | 56,960 | 90,726 | 883,080 | 283,051 | 542,540 | 1692,648 |
| 3 | 15,875 | 27,262 | 52,042 | 252,016 | 743,198 | 432,779 | 826,171 | 1418,758 |
| 4 | 11,325 | 97,26 | 43,00 | 128,256 | 9459,508 | 1101,470 | 486,975 | 4182,180 |
| 5 | 11,325 | 44,31 | 48,00 | 128,256 | 1963,376 | 501,811 | 543,600 | 2126,880 |
| 6 | 11,325 | 27,11 | 58,00 | 128,256 | 734,952 | 307,021 | 656,850 | 1572,380 |
| 7 | 8,420 | 96,96 | 48,00 | 70,896 | 9401,242 | 816,403 | 404,160 | 4654,080 |
| 8 | 8,420 | 50,19 | 44,00 | 70,896 | 2519,036 | 422,600 | 370,480 | 2208,360 |
| 9 | 8,420 | 32,62 | 62,00 | 70,896 | 1064,064 | 274,660 | 522,040 | 2022,440 |
| 10 | 14,260 | 94,92 | 53,00 | 203,348 | 9009,806 | 1353,559 | 755,780 | 5030,760 |
| 11 | 14,260 | 47,24 | 54,00 | 203,348 | 2231,618 | 673,642 | 770,040 | 2550,960 |
| 12 | 14,260 | 27,97 | 52,00 | 203,348 | 782,321 | 398,852 | 741,520 | 1454,440 |
| **Σ Total** | **140,115** | **607,482** | **621,404** | **1711,530** | **39811,301** | **6971,275** | **7260,266** | **30522,899** |

$$\begin{bmatrix} 12 & 140,12 & 607,48 \\ 140,12 & 1711,53 & 6971,27 \\ 607,48 & 6971,27 & 39811,30 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a0 \\ a1 \\ a2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 621,40 \\ 7260,27 \\ 30522,90 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 2,433 & -0,167 & -0,008 \\ -0,167 & 0,014 & 0,000 \\ -0,008 & 0,000 & 0,000 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 621,404 \\ 7260,266 \\ 30522,899 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 58,342 \\ -0,108 \\ -0,105 \end{bmatrix}$$

Se obtiene la siguiente ecuación:

$$\sigma_b = 58{,}34 - 0{,}11 * \Phi perno - 0{,}11 * dn$$

Ecuación 4.2-6

La Figura 4.2-4 muestra la representación gráfica de la Ecuación 4.2-6:

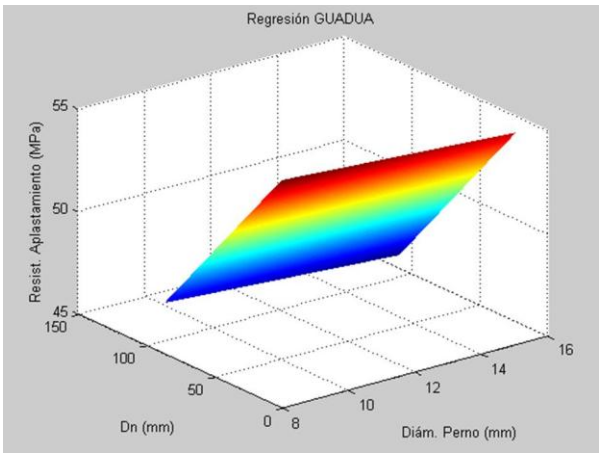



Figura 4.2-4. Plano de regresión unificado con los datos del grupo CIMOC (Guadua)

## 4.3. Análisis estadístico de los resultados

### *4.3.1. Distribución*

**Mortero:**

Un criterio adicional de selección de un valor de resistencia de diseño puede ser obtenido a partir de la distribución de probabilidad de los datos, cuyos parámetros de entrada serían únicamente el nivel de confiabilidad deseado y la resistencia a la compresión del mortero de diseño. Dadas las consideraciones antes presentadas no se consideró la influencia del diámetro del perno ya que no es muy relevante y considerando dicha simplificación se aumenta la cantidad de datos a analizar lo cual mejora la confiabilidad de la distribución encontrada. Cabe resaltar que se complementaron los datos obtenidos en el presente proyecto con los obtenidos por la ingeniera Ana María Suarez en su proyecto de grado.

Usando el software "MiniTab 16" se efectuó una prueba de identificación de distribución individual para determinar qué tendencia seguían los datos. Por último, es importante recalcar que para que esta prueba tenga validez se deben agrupar los datos de modo que hayan datos suficientes para determinar la distribución que mejor se ajuste; en este caso se ignoró la influencia del perno y se establecieron dos grupos de datos: aquellos correspondientes a una resistencia menor a 8 MPa (de resistencia baja) y otro correspondiente a valores mayores a 8 MPa (de resistencia alta)

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la comparación de las distribuciones más comunes. Usando el criterio del mayor "P-value" se puede concluir que tanto para resistencias de mortero bajas (Figura 4.3-1) como altas (Figura 4.3-2), la distribución que mejor se ajusta a los datos de resistencia al aplastamiento es la distribución **Normal.**

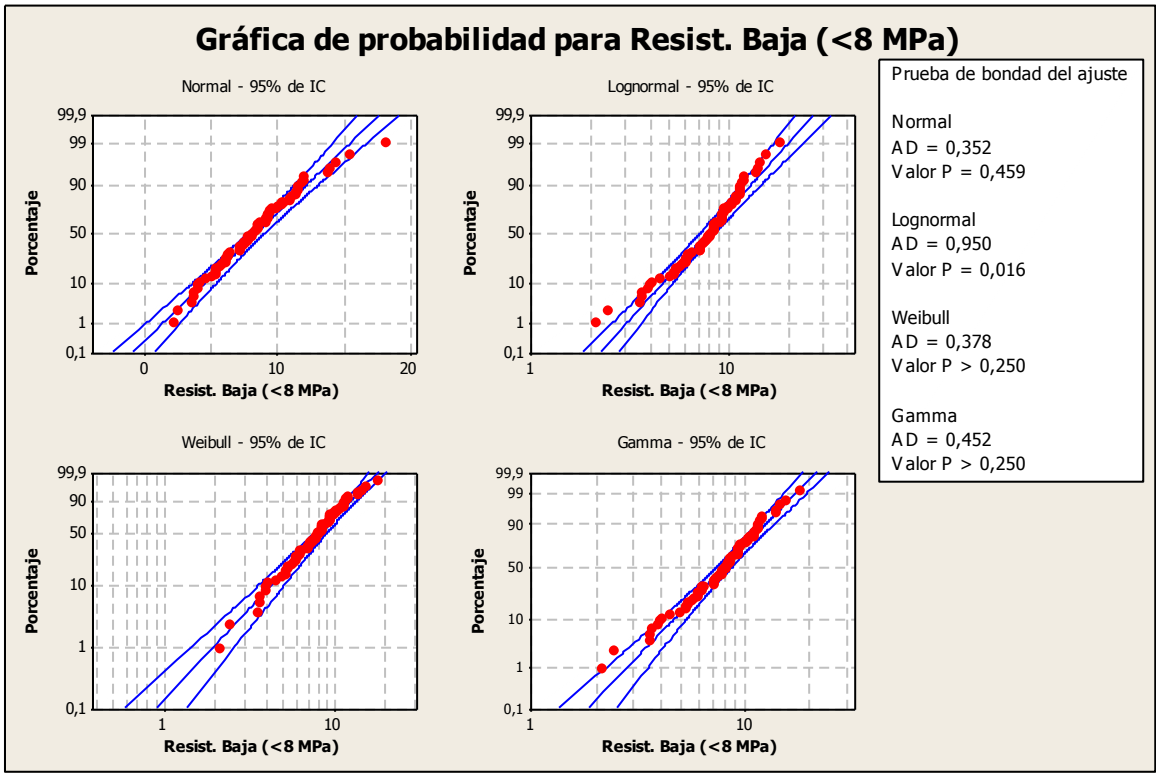



Figura 4.3-1. Comparación de distribuciones de probabilidad. Mortero de baja resistencia

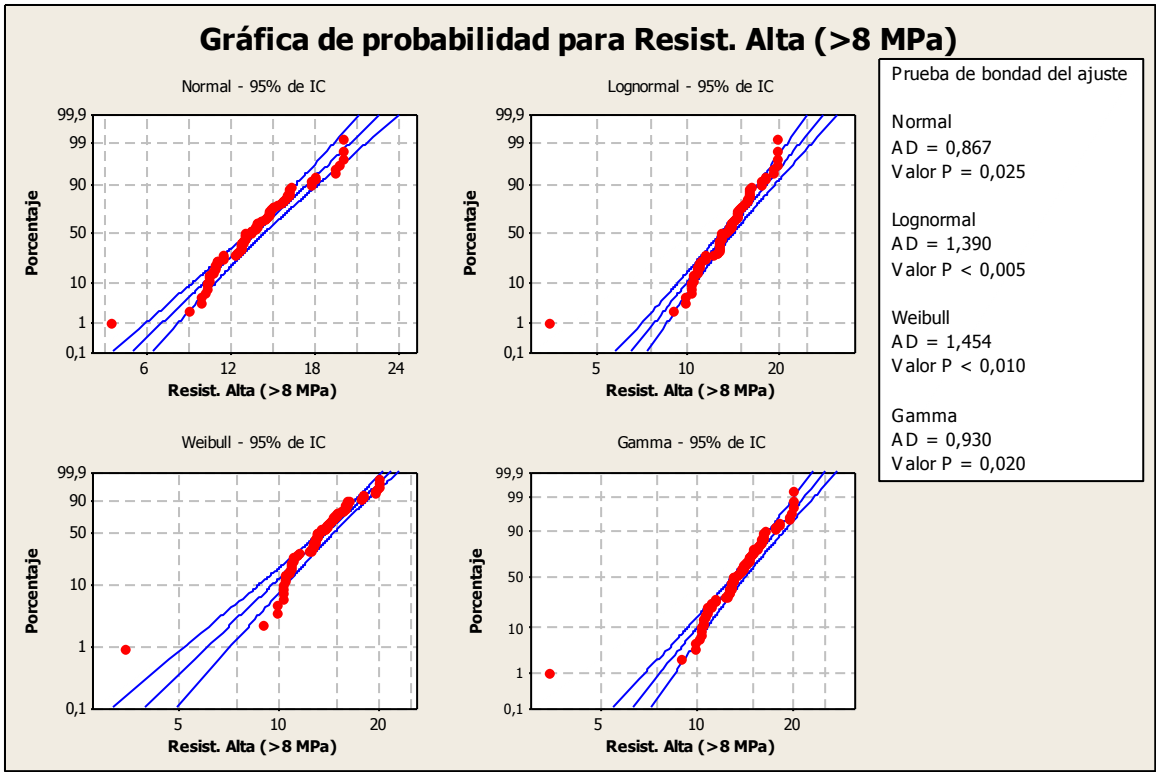



**Figura 4.3-2. Comparación de distribuciones de probabilidad. Mortero de alta resistencia**

**Guadua:**

Se procede a repetir el procedimiento para los datos de aplastamiento en guadua, para este caso se descartaron los resultados obtenidos de los ensayos efectuados con distancia al nudo de 10 cm ya que se consideran ilógicos. Se procedió a unificar los datos obtenidos junto con los del CIMOC y ejecutar la prueba de identificación de distribución. Cabe resaltar que para poder obtener una cantidad de datos suficiente para que el presente análisis tenga validez, se deben generalizar los grupos de datos y asumir que las variaciones originadas por la influencia de los parámetros de entrada corresponden a la variabilidad natural del material. Por lo tanto, se adoptó la agrupación de datos más general posible que en este es según la sección del tallo de donde provienen las muestras (Basa ó sobrebasa). Adicionalmente análisis preliminares demostraron que la agrupación de datos según el diámetro del perno o la distancia al nudo arrojan resultados incoherentes. Las Figura 4.3-3 y 4.3-4 muestran el proceso de identificación realizado. En este caso los resultados de muestras correspondientes a basa siguen una distribución **Lognormal** y los correspondientes a sobrebasa a una **Normal.**

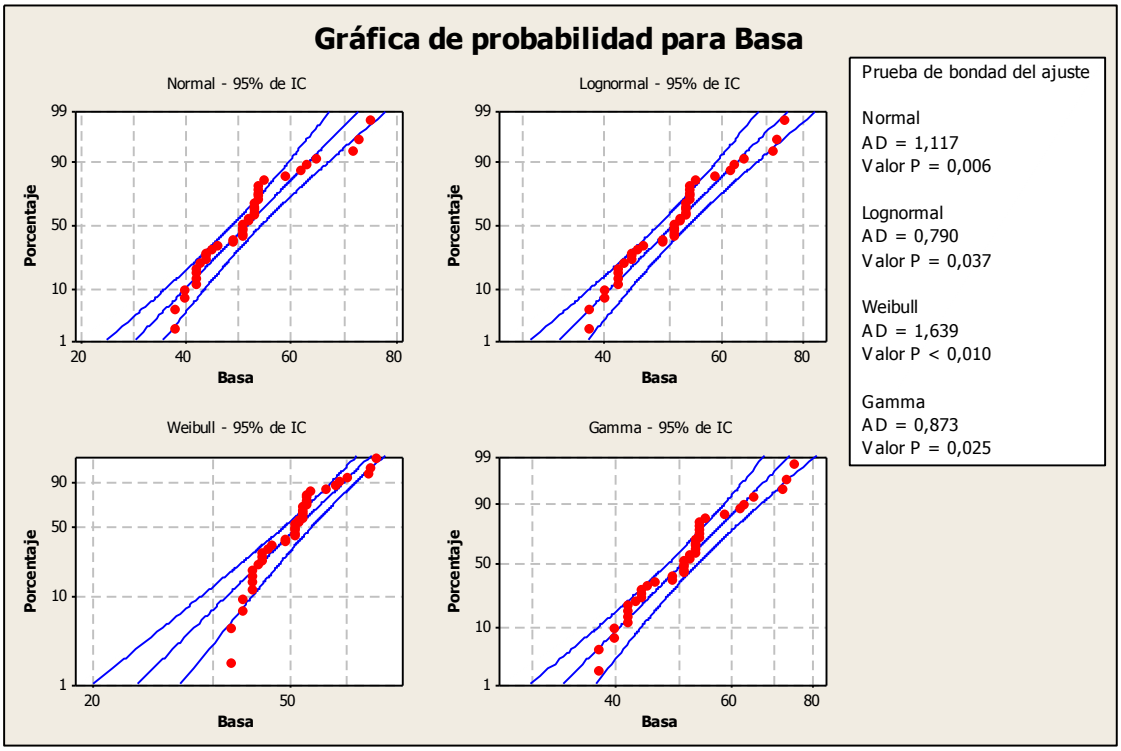



Figura 4.3-3. Comparación de distribuciones de probabilidad. Basa

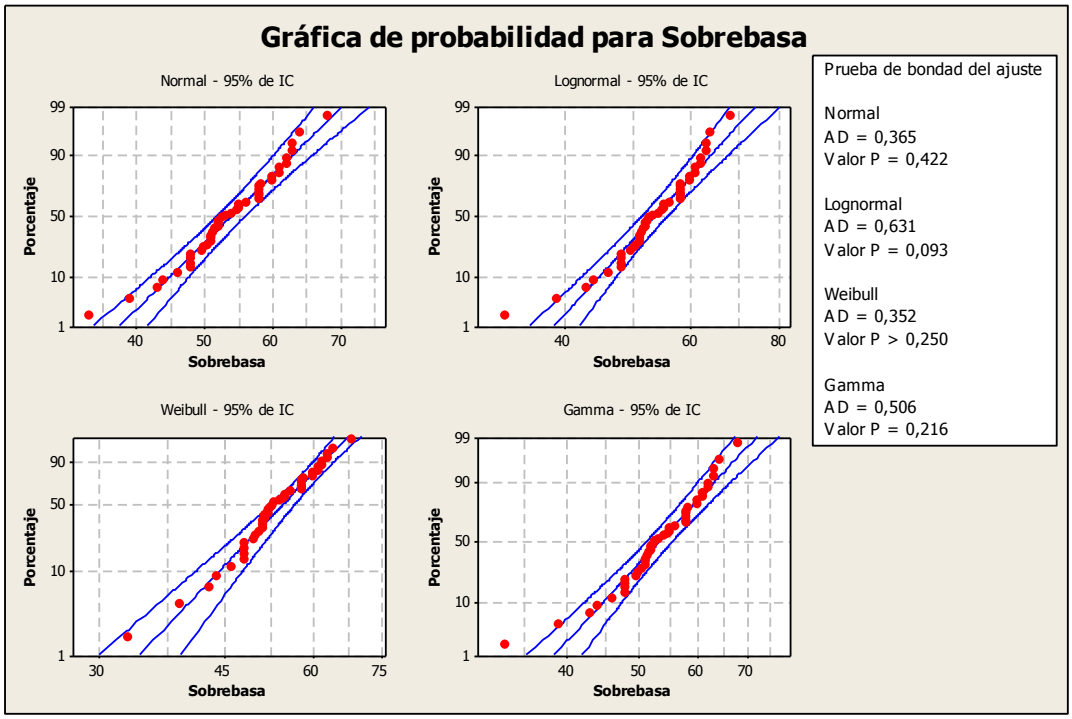



Figura 4.3-4. Comparación de distribuciones de probabilidad. Sobrebasa

### 4.3.2. *Estadísticos Básicos*

**Mortero:**

Una vez se recopilados los datos obtenidos en este proyecto con los anteriormente obtenidos por el CIMOC, se procedió a ejecutar el cálculo de estadísticos básicos como media, desviación, estándar, varianza e intervalos de confianza. Para este propósito se utilizó el software "MiniTab 16" que genera un resumen de los estadísticos antes mencionados, adicionalmente, realiza una prueba de normalidad para verificar si esta serie de datos se comporta según dicha distribución. Las Figura 4.3-5 y 4.3-6 muestran el resumen estadístico para morteros de resistencia baja y alta respectivamente.

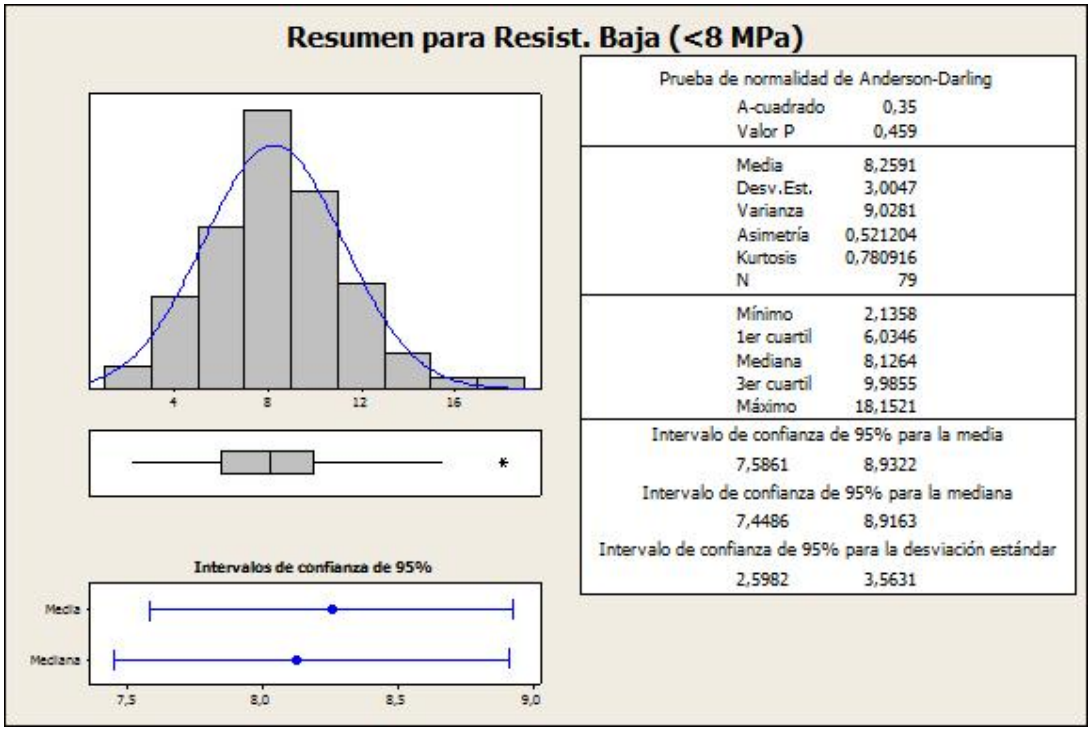



**Figura 4.3-5. Resumen estadístico Resistencia Baja**

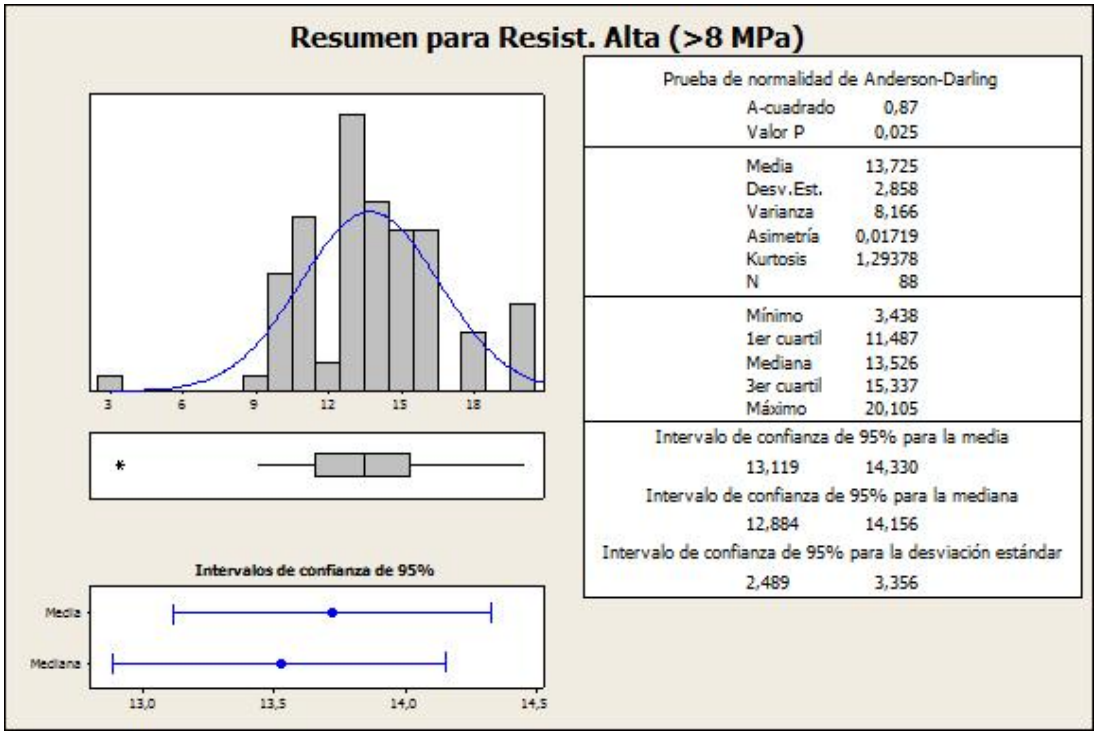



Figura 4.3-6. Resumen estadístico Resistencia Alta

El anterior análisis representa un buen parámetro de caracterización para de la resistencia al aplastamiento del mortero ya que presenta los intervalos de confianza para la media. Una conclusión preliminar que se puede formular es que con un 95% de confiabilidad, los morteros de baja resistencia (<8 MPa) presentan una resistencia al aplastamiento entre 7,6 y 8,9 MPa y que los morteros de alta resistencia presentan una resistencia al aplastamiento entre 13,1 y 14,3 MPa.

**Guadua:**

Se ejecutó un proceso análogo para los datos obtenidos de los ensayos de aplastamiento sobre guadua, cuyos resultados se presentan en las Figura 4.3-7 y 4.3-8 respectivamente.

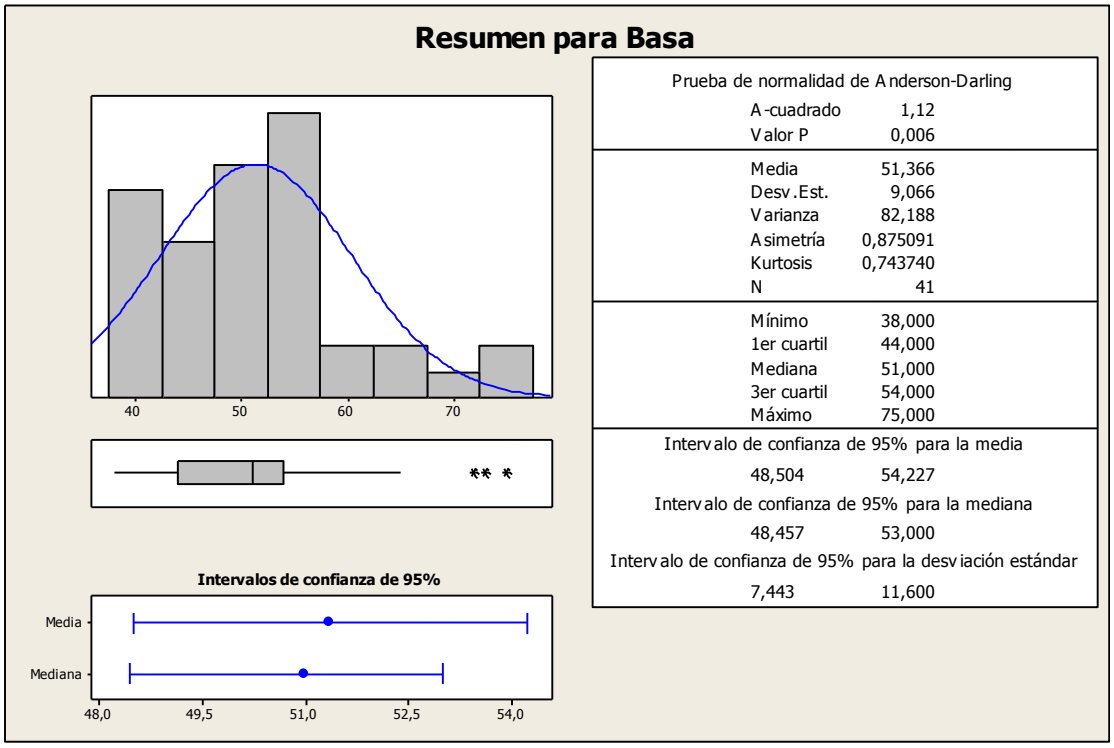



Figura 4.3-7. Resumen estadístico Basa

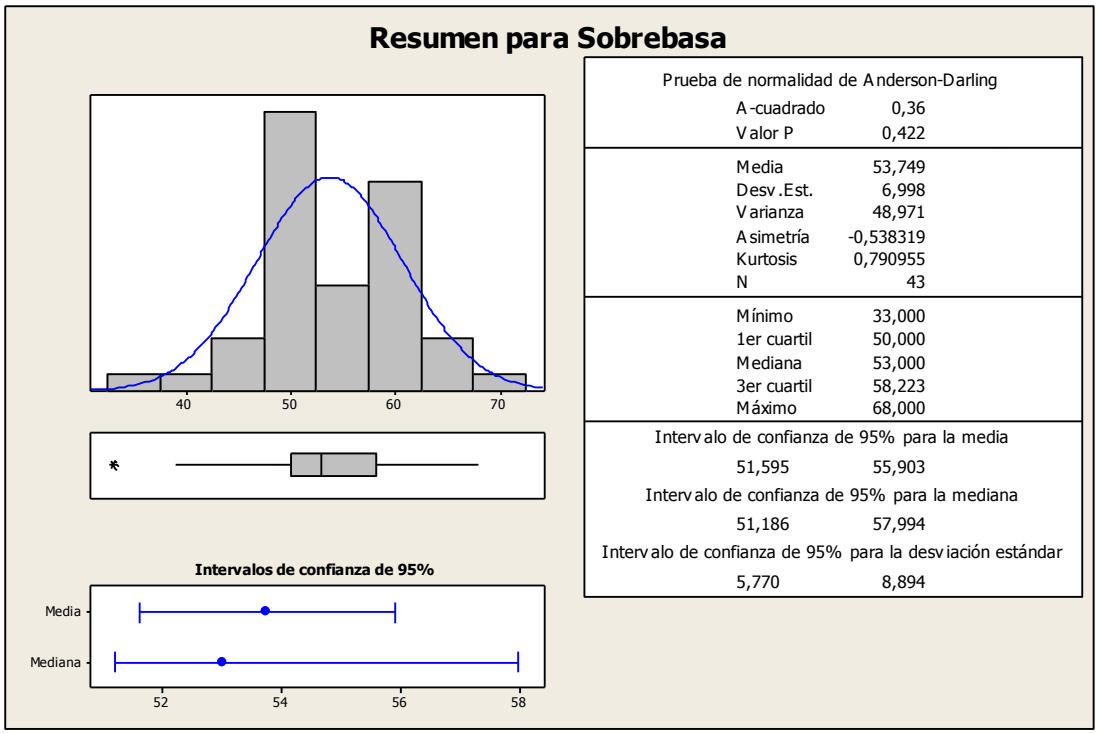



Figura 4.3-8. Resumen estadístico Sobrebasa

Una de las observaciones más relevantes que puede hacerse es que la cantidad de datos con la que se cuenta es inferior al caso del mortero (aproximadamente la mitad) por lo que el ajuste en este caso puede no llegar a ser tan preciso como en el caso del mortero. Adicionalmente, es importante resaltar que en el caso de las muestras de basa los datos no siguen una tendencia normal como es habitual sino que se comportan más similarmente a una distribución lognormal.

### *4.3.3. Modelo de mejor ajuste de distribución*

**Mortero:**

Una vez se ha comprobado que los datos siguen una distribución normal, se efectúa una prueba de normalidad usando el software MiniTab, el cual arroja los valores característicos de la función: valor medio y desviación estándar.

Con dichos valores se puede calcular la probabilidad de cada resistencia requerida y su correspondiente función de probabilidad acumulada que permite determinar la resistencia en función del nivel de confiabilidad deseado. El modelo planteado consiste en asumir la aproximación a los valores de resistencia de acuerdo a la función de probabilidad encontrada y calcular a partir de estos la confiabilidad asociada a cada valor de resistencia elegido en función de la confiabilidad requerida. En la Tabla 17 se presenta el modelo desarrollado.

Adicionalmente, las Figura 4.3-9 y 4.3-10 muestran una representación gráfica del modelo desarrollado. El proceso de aplicación consiste en determinar la resistencia general del mortero de relleno (Resistencia alta o baja) y escoger el nivel de confianza deseado, con dicho valor, verificar en la Figura 4.3-10 cual es la valor de resistencia al aplastamiento asociado. Cabe resaltar que normalmente se utilizan niveles de confiabilidad superiores al 95% por lo que se puede afirmar que este método es conservador desde el punto de vista del material.

Este método destaca por la sencillez de su aplicación en diseños estructurales además de permitir una rápida estimación del valor de esta propiedad.

**Tabla 17. Modelo de distribución basado en el nivel de confiabilidad deseado. Mortero**

| Resistencia Baja μ = 8,259, σ = 3,005 | | | | Resistencia Alta μ = 13, 72, σ = 2,858 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Resist. (Mpa) | Prob. | Prob. Acumulada | Confiabilidad | Resist. (Mpa) | Prob. | Prob. Acumulada | Confiabilidad |
| 0,0 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,0 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 0,5 | 0,01 | 0,00 | 1,00 | 0,5 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 1,0 | 0,01 | 0,01 | 0,99 | 1,0 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 1,5 | 0,02 | 0,01 | 0,99 | 1,5 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 2,0 | 0,02 | 0,02 | 0,98 | 2,0 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 2,5 | 0,03 | 0,03 | 0,97 | 2,5 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 3,0 | 0,04 | 0,04 | 0,96 | 3,0 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 3,5 | 0,05 | 0,06 | 0,94 | 3,5 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 4,0 | 0,06 | 0,08 | 0,92 | 4,0 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 4,5 | 0,07 | 0,11 | 0,89 | 4,5 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 5,0 | 0,09 | 0,14 | 0,86 | 5,0 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 5,5 | 0,10 | 0,18 | 0,82 | 5,5 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 6,0 | 0,11 | 0,23 | 0,77 | 6,0 | 0,01 | 0,00 | 1,00 |
| 6,5 | 0,12 | 0,28 | 0,72 | 6,5 | 0,01 | 0,01 | 0,99 |
| 7,0 | 0,13 | 0,34 | 0,66 | 7,0 | 0,01 | 0,01 | 0,99 |
| 7,5 | 0,13 | 0,40 | 0,60 | 7,5 | 0,02 | 0,01 | 0,99 |
| 8,0 | 0,13 | 0,47 | 0,53 | 8,0 | 0,03 | 0,02 | 0,98 |
| 8,5 | 0,13 | 0,53 | 0,47 | 8,5 | 0,04 | 0,03 | 0,97 |
| 9,0 | 0,12 | 0,60 | 0,40 | 9,0 | 0,05 | 0,05 | 0,95 |
| 9,5 | 0,11 | 0,66 | 0,34 | 9,5 | 0,06 | 0,07 | 0,93 |
| 10,0 | 0,10 | 0,72 | 0,28 | 10,0 | 0,07 | 0,10 | 0,90 |
| 10,5 | 0,09 | 0,77 | 0,23 | 10,5 | 0,09 | 0,13 | 0,87 |
| 11,0 | 0,07 | 0,82 | 0,18 | 11,0 | 0,10 | 0,17 | 0,83 |
| 11,5 | 0,06 | 0,86 | 0,14 | 11,5 | 0,12 | 0,22 | 0,78 |
| 12,0 | 0,05 | 0,89 | 0,11 | 12,0 | 0,13 | 0,27 | 0,73 |
| 12,5 | 0,04 | 0,92 | 0,08 | 12,5 | 0,14 | 0,33 | 0,67 |
| 13,0 | 0,03 | 0,94 | 0,06 | 13,0 | 0,14 | 0,40 | 0,60 |
| 13,5 | 0,02 | 0,96 | 0,04 | 13,5 | 0,14 | 0,47 | 0,53 |
| 14,0 | 0,02 | 0,97 | 0,03 | 14,0 | 0,13 | 0,54 | 0,46 |
| 14,5 | 0,01 | 0,98 | 0,02 | 14,5 | 0,13 | 0,61 | 0,39 |
| 15,0 | 0,00 | 0,99 | 0,01 | 15,0 | 0,11 | 0,67 | 0,33 |

**Tabla 17. Modelo de distribución basado en el nivel de confiabilidad deseado. Mortero (Continuación)**

| Resistencia Alta μ = 13, 72, σ = 2,858 | | | |
|---|---|---|---|
| **Resistencia (Mpa)** | **Probabilidad** | **Prob. Acumulada** | **Confiabilidad** |
| 15,5 | 0,10 | 0,73 | 0,27 |
| 16,0 | 0,09 | 0,79 | 0,21 |
| 16,5 | 0,07 | 0,83 | 0,17 |
| 17,0 | 0,06 | 0,87 | 0,13 |
| 17,5 | 0,05 | 0,91 | 0,09 |
| 18,0 | 0,03 | 0,93 | 0,07 |
| 18,5 | 0,03 | 0,95 | 0,05 |
| 19,0 | 0,02 | 0,97 | 0,03 |
| 19,5 | 0,01 | 0,98 | 0,02 |
| 20,0 | 0,01 | 0,99 | 0,01 |
| 20,5 | 0,01 | 0,99 | 0,01 |
| 21,0 | 0,00 | 0,99 | 0,01 |
| 21,5 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 22,0 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 22,5 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 23,0 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 23,5 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 24,0 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 24,5 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 25,0 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |

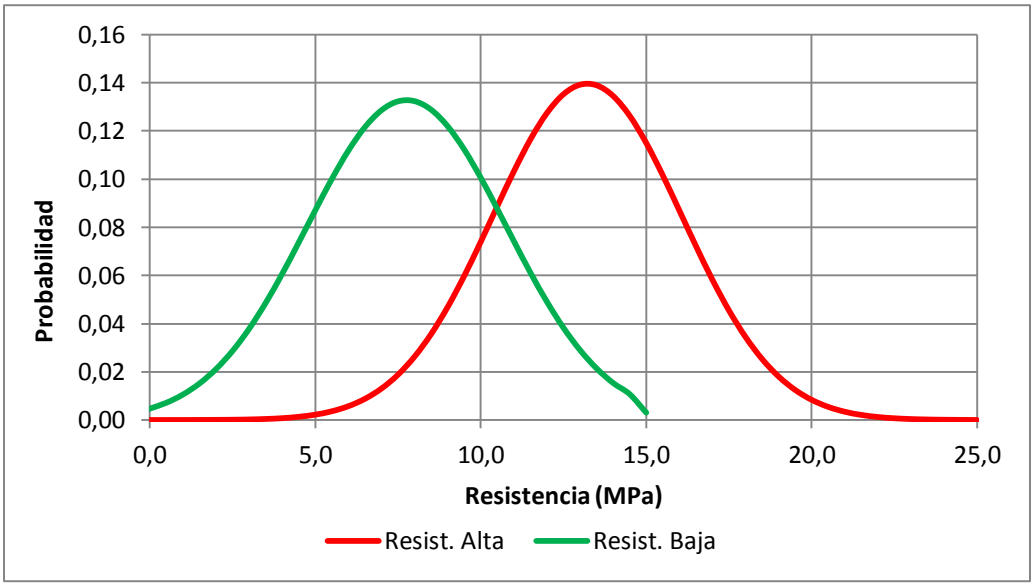



Figura 4.3-9. Distribución de probabilidad. Resistencia Baja

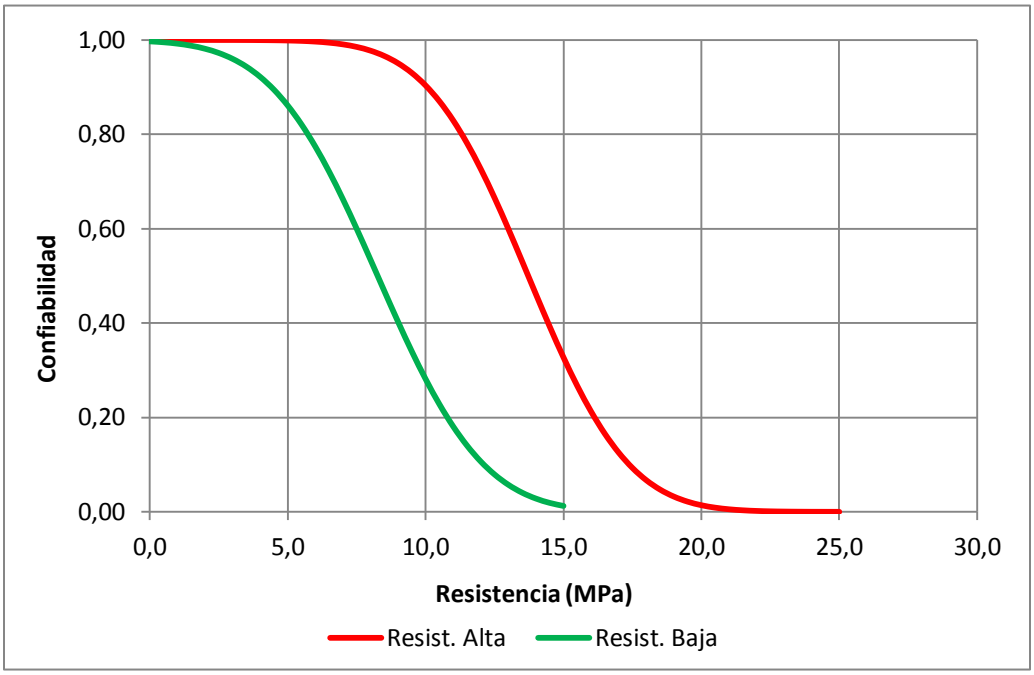



Figura 4.3-10. Función de probabilidad acumulada. Resistencia Baja

Se realiza el proceso análogo con los resultados de los ensayos en guadua teniendo en cuenta que la distribución hallada para la sección de tallo de basa es lognormal. La Tabla 18 presenta el resultado numérico del modelo desarrollado. Por otra parte, en las Figura 4.3-11 y 4.3-12 se muestra una representación gráfica del modelo. En este caso, los parámetros de entrada son la sección de tallo de la muestra y la confiabilidad requerida.

**Tabla 18. Modelo de distribución basado en el nivel de confiabilidad deseado. Guadua**

| Basa. Ubicación = 3,924 , Escala = 0,169 | | | | Sobrebasa μ = 53,75, σ = 6,998 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Resist. (Mpa) | Prob. | Prob. Acumulada | Confiabilidad | Resist. (Mpa) | Prob. | Prob. Acumulada | Confiabilidad |
| 1,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 5,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 5,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 10,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 15,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 15,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 20,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 20,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 25,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 25,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 30,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 30,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 35,00 | 0,01 | 0,01 | 0,99 | 35,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 40,00 | 0,02 | 0,08 | 0,92 | 40,00 | 0,01 | 0,02 | 0,98 |
| 45,00 | 0,04 | 0,24 | 0,76 | 45,00 | 0,03 | 0,11 | 0,89 |
| 50,00 | 0,05 | 0,47 | 0,53 | 50,00 | 0,05 | 0,30 | 0,70 |
| 55,00 | 0,04 | 0,69 | 0,31 | 55,00 | 0,06 | 0,57 | 0,43 |
| 60,00 | 0,02 | 0,84 | 0,16 | 60,00 | 0,04 | 0,81 | 0,19 |
| 65,00 | 0,01 | 0,93 | 0,07 | 65,00 | 0,02 | 0,95 | 0,05 |
| 70,00 | 0,01 | 0,97 | 0,03 | 70,00 | 0,00 | 0,99 | 0,01 |
| 75,00 | 0,00 | 0,99 | 0,01 | 75,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 80,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 80,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 85,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 85,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 90,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 90,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 95,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 95,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 100,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |

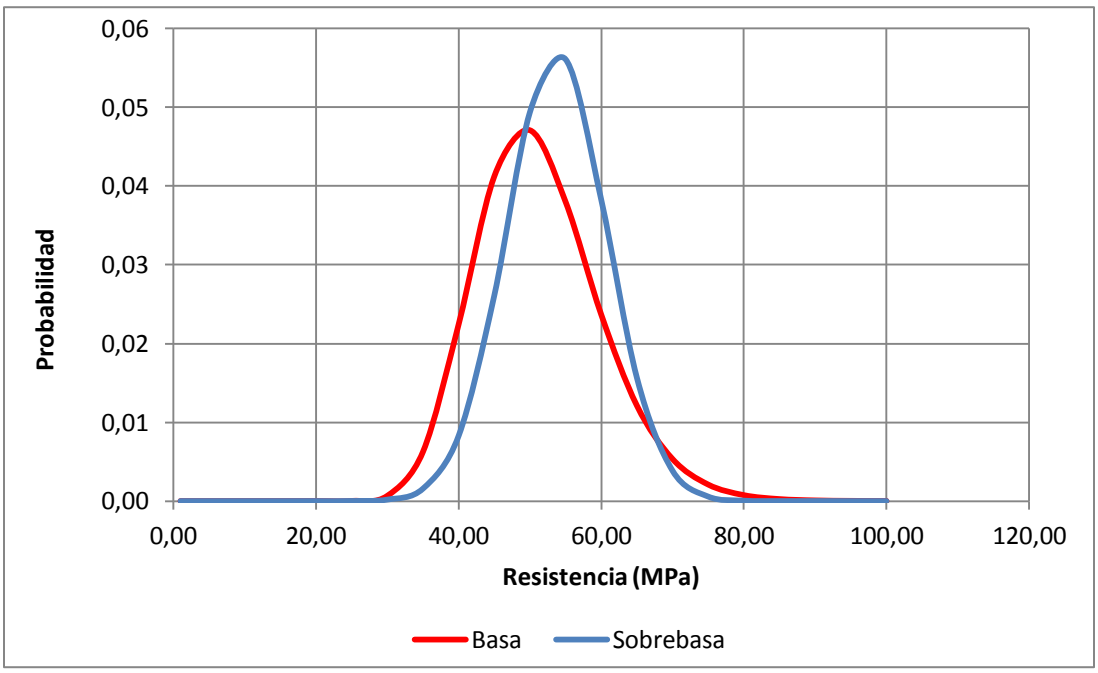



Figura 4.3-11. Función de probabilidad para guadua. Basa

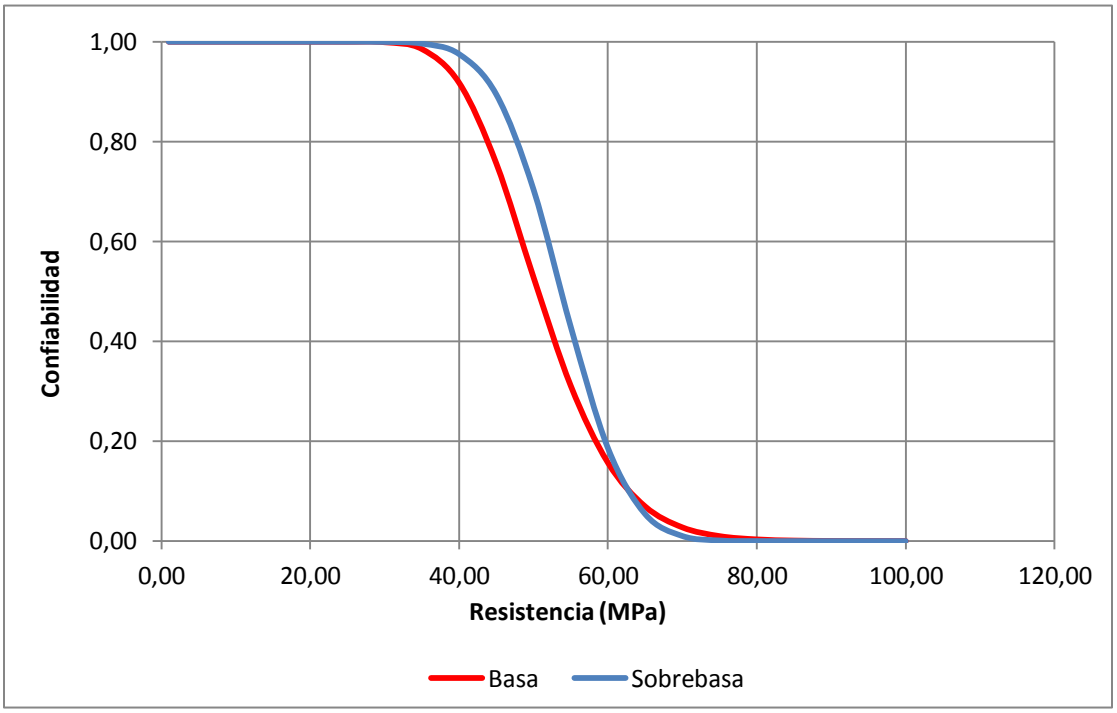



Figura 4.3-12. Función de probabilidad para guadua. Perno : 1/2"

De las anteriores figuras se puede concluir que los grupos de datos no presentan diferencias significativas entre sí por lo que se podría obviar este parámetro de entrada y determinar directamente la resistencia al aplastamiento a partir del nivel de confianza deseado. Por otra parte, es válido afirmar que en el caso de la guadua este modelo probabilístico no parece tener tanta validez como en el caso del mortero debido a la gran cantidad de variables que presenta el material y que no se tienen en cuenta (humedad, densidad de fibras, edad, etc.). El efecto acumulado de todas esas variables afecta significativamente cada dato obtenido y no se cumple el supuesto de aleatoriedad de la muestra.

### *4.3.4. Análisis Carga-Resistencia*

Contrario a la creencia general, en la mayoría de los casos ni la carga ni la resistencia son valores fijos, por el contrario, sus valores son estadísticamente distribuidos. Cada distribución tiene su valor medio, denota por $\mu_y$ para la carga y $\mu_x$ para la resistencia y sus desviaciones estándar $\sigma_y$ y $\sigma_x$ respectivamente (Yañez, Perdomo, & Gomez de la Vega). La Figura 4.3-13 ilustra la situación en que se presenta una probabilidad de falla ya que hay un traslapo en las distribuciones de esfuerzo y resistencia lo que implica que el primero puede superar al segundo.

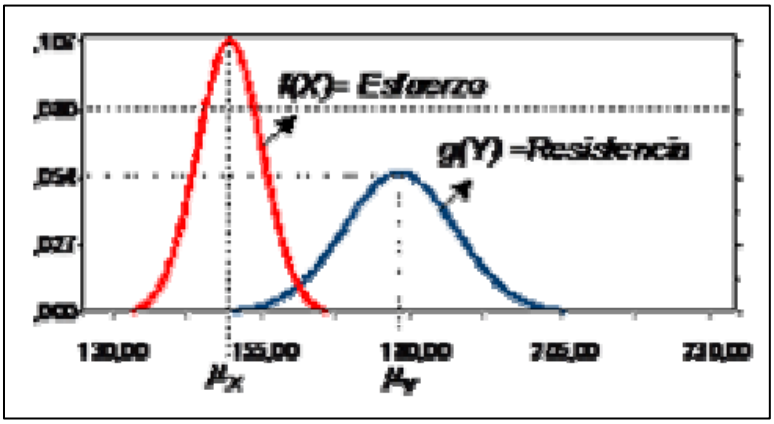



**Figura 4.3-13. Distribuciones solapadas (Probabilidad de falla). Fuente: (Yañez, Perdomo, & Gomez de la Vega)**

La confiabilidad del elemento resistente puede calcularse mediante la Ecuación 4.3-1

$$Confiabilidad = \Phi\left(\frac{\mu_y - \mu_x}{\sqrt{{\sigma_y}^2 + {\sigma_x}^2}}\right)$$

**Ecuación 4.3-1**

El análisis describe muy acertadamente la situación analizada ya que se cuenta con información sobre la distribución de la resistencia del material. Dado que se desconoce la posible distribución de probabilidad de la carga aplicada ya que depende del criterio y necesidad del diseñador, ésta se variará en intervalos discretos para poder elaborar una curva de confiabilidad; también se asumirá que en todos los casos la desviación estándar corresponde al 10% de la media de la carga aplicada. La Tabla 19 muestra el análisis realizado

**Tabla 19. Análisis Carga-Resistencia para distintos valores medios de la carga**

| Carga | | Confiabilidad Resist. Baja (< 8 Mpa) | Confiabilidad Resist. Alta (> 8 Mpa) |
|---|---|---|---|
| μ (MPa) | σ (MPa) | | |
| 0,0 | 0 | 1,000 | 0,997 |
| 0,5 | 0,05 | 1,000 | 0,995 |
| 1,0 | 0,1 | 1,000 | 0,992 |
| 1,5 | 0,15 | 1,000 | 0,988 |
| 2,0 | 0,2 | 1,000 | 0,981 |
| 2,5 | 0,25 | 1,000 | 0,972 |
| 3,0 | 0,3 | 1,000 | 0,959 |
| 3,5 | 0,35 | 1,000 | 0,942 |
| 4,0 | 0,4 | 1,000 | 0,920 |
| 4,5 | 0,45 | 0,999 | 0,892 |
| 5,0 | 0,5 | 0,999 | 0,858 |
| 5,5 | 0,55 | 0,998 | 0,817 |
| 6,0 | 0,6 | 0,996 | 0,769 |
| 6,5 | 0,65 | 0,993 | 0,716 |
| 7,0 | 0,7 | 0,989 | 0,658 |
| 7,5 | 0,75 | 0,982 | 0,597 |
| 8,0 | 0,8 | 0,973 | 0,533 |
| 8,5 | 0,85 | 0,960 | 0,469 |
| 9,0 | 0,9 | 0,942 | 0,407 |
| 9,5 | 0,95 | 0,919 | 0,347 |
| 10,0 | 1 | 0,890 | 0,291 |

**Tabla 19. Análisis Carga-Resistencia para distintos valores medios de la carga (Continuación)**

| Carga | | Confiabilidad Resist. Baja (< 8 Mpa) | Confiabilidad Resist. Alta (> 8 Mpa) |
|---|---|---|---|
| μ (MPa) | σ (MPa) | | |
| 10,5 | 1,05 | 0,855 | 0,241 |
| 11,0 | 1,1 | 0,813 | 0,196 |
| 11,5 | 1,15 | 0,764 | 0,157 |
| 12,0 | 1,2 | 0,711 | 0,124 |
| 12,5 | 1,25 | 0,652 | 0,096 |
| 13,0 | 1,3 | 0,591 | 0,074 |
| 13,5 | 1,35 | 0,528 | 0,056 |
| 14,0 | 1,4 | 0,465 | 0,042 |
| 14,5 | 1,45 | 0,404 | 0,031 |
| 15,0 | 1,5 | 0,346 | 0,022 |
| 15,5 | 1,55 | 0,292 | 0,016 |
| 16,0 | 1,6 | 0,243 | 0,011 |
| 16,5 | 1,65 | 0,200 | 0,008 |
| 17,0 | 1,7 | 0,162 | 0,006 |
| 17,5 | 1,75 | 0,130 | 0,004 |
| 18,0 | 1,8 | 0,103 | 0,003 |
| 18,5 | 1,85 | 0,080 | 0,002 |
| 19,0 | 1,9 | 0,062 | 0,001 |
| 19,5 | 1,95 | 0,047 | 0,001 |
| 20,0 | 2 | 0,036 | 0,001 |

Al igual que en el modelo desarrollado en la sección 4.3.3, se obtienen valores de resistencia al aplastamiento del material en función de la confiabilidad deseada. Cabe resaltar que la suposición hecha sobre la desviación estándar (siempre igual al 10% de la media) es una simplificación que no tiene mucha repercusión sobre los resultados finales. De nuevo se realiza una representación gráfica de este modelo, la cual se presenta en la Figura 4.3-14.

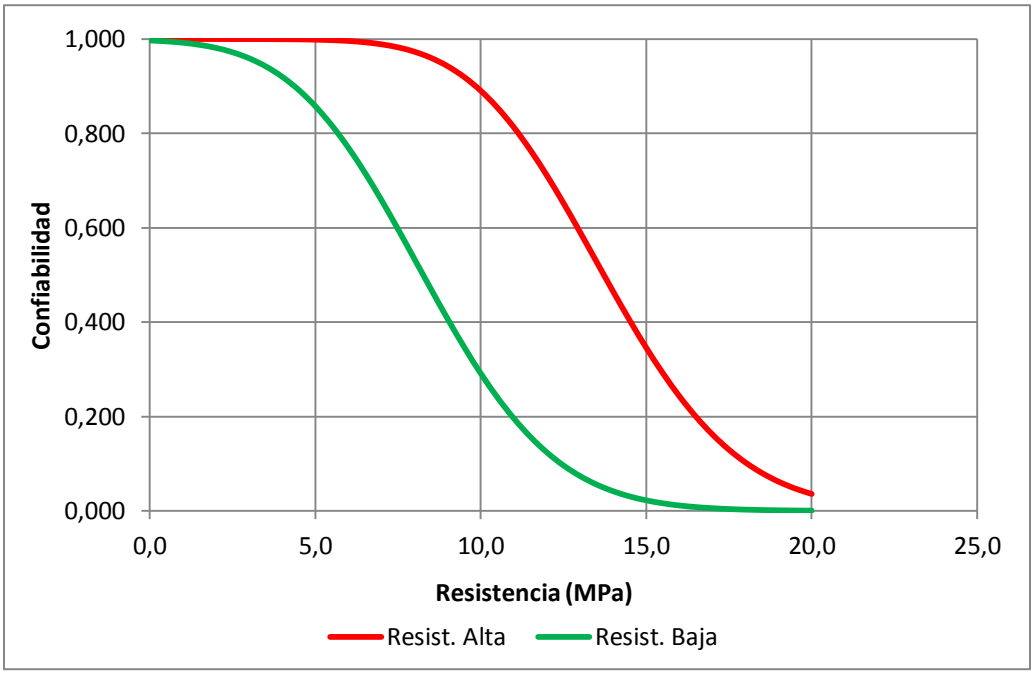



**Figura 4.3-14. Modelo de Carga-Resistencia en función de la confiabilidad deseada. Mortero**

Si se comparan las Figura 4.3-14 y 4.3-10 se puede apreciar que los resultados obtenidos son muy similares lo cual confirma la validez de los modelos planteados.

Se procede a adelantar el mismo proceso para los datos de aplastamiento en guadua. La Tabla 20 muestra los resultados numéricos y la Figura 4.3-15 muestra la representación gráfica de dichos resultados.

**Tabla 20. Análisis Carga-Resistencia para distintos valores medios de la carga. Guadua**

| Carga | | Confiabilidad Basa | Confiabilidad Sobrebasa |
|---|---|---|---|
| μ (MPa) | σ (MPa) | | |
| 1 | 0,1 | 1,000 | 1,000 |
| 5 | 0,5 | 1,000 | 1,000 |
| 10 | 1 | 1,000 | 1,000 |
| 15 | 1,5 | 1,000 | 1,000 |
| 20 | 2 | 1,000 | 1,000 |
| 25 | 2,5 | 0,997 | 1,000 |
| 30 | 3 | 0,987 | 0,999 |
| 35 | 3,5 | 0,954 | 0,992 |
| 40 | 4 | 0,874 | 0,956 |
| 45 | 4,5 | 0,735 | 0,854 |
| 50 | 5 | 0,552 | 0,669 |
| 55 | 5,5 | 0,366 | 0,444 |
| 60 | 6 | 0,213 | 0,249 |
| 65 | 6,5 | 0,111 | 0,119 |
| 70 | 7 | 0,052 | 0,050 |
| 75 | 7,5 | 0,022 | 0,019 |
| 80 | 8 | 0,009 | 0,007 |
| 85 | 8,5 | 0,003 | 0,002 |
| 90 | 9 | 0,001 | 0,001 |
| 95 | 9,5 | 0,000 | 0,000 |
| 100 | 10 | 0,000 | 0,000 |

La Figura 4.3-15 confirma que no hay una diferencia considerable entre los grupos de datos representativos de la resistencia al aplastamiento de la guadua y que se puede generalizar el valor representativo de esta propiedad.

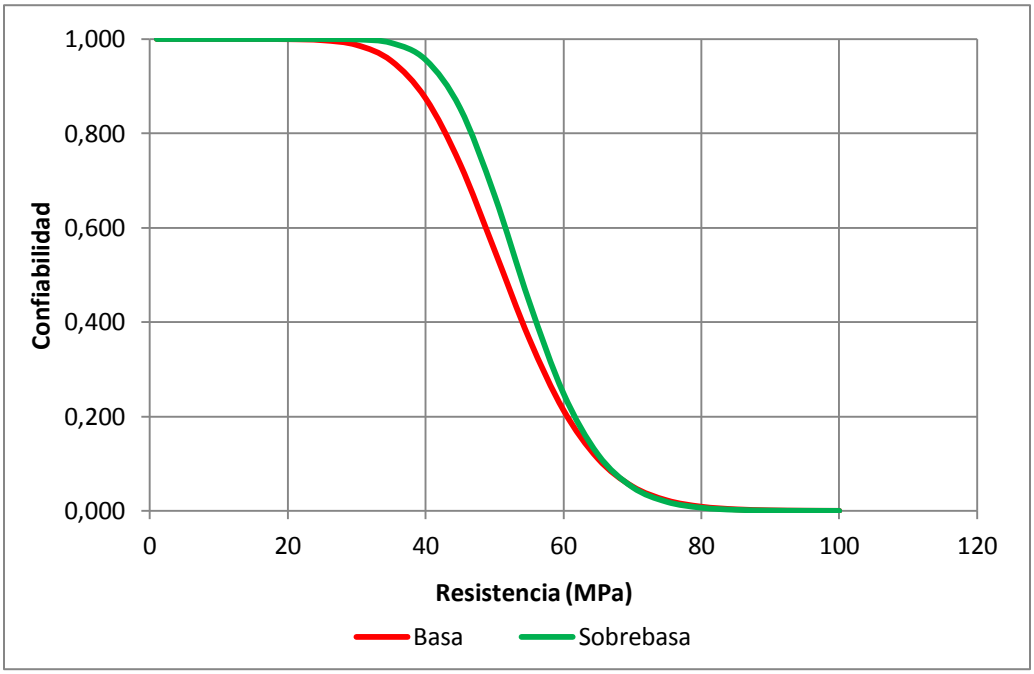



**Figura 4.3-15. Modelo de Carga-Resistencia en función de la confiabilidad deseada. Guadua**

### *4.3.5. Simulación de Montecarlo*

El método de Simulación de Montecarlo (MSMC) es un método numérico utilizado para resolver problemas mediante la simulación de variables aleatorias (Marinilli, 2009). El método consiste en la generación aleatoria de variables de entrada para un modelo determinístico y su posterior análisis estadístico.

En este caso, se utilizó el modelo de regresión lineal múltiple propuesto en la sección 4.2. Como primer paso, se generaron aleatoriamente 50 datos de entrada correspondientes a distintos diámetros de perno, distintas resistencias a la compresión del mortero y distintas distancias al nudo. En todos los casos se generaron los datos usando distribuciones de probabilidad uniformes. Con dichas variables de entrada aleatorias se calculó la resistencia al aplastamiento del mortero y de la guadua usando las Ecuación 4.2-1 y 4.2-4. La Tabla 21 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 21. Simulación de Montecarlo.

| Dato | Mortero | | | Guadua | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Φ Perno (x1) | f'c (x2) | σb (y) | Φ Perno | Dn | Resistencia Fluencia |
| | [mm] | [MPa] | [MPa] | [mm] | [mm] | [MPa] |
| 1 | 15,88 | 6,76 | 8,46 | 9,53 | 5,35 | 56,76 |
| 2 | 9,53 | 7,70 | 10,30 | 9,53 | 3,56 | 56,94 |
| 3 | 12,70 | 9,92 | 12,10 | 15,88 | 11,88 | 55,41 |
| 4 | 15,88 | 11,20 | 12,95 | 12,70 | 11,35 | 55,81 |
| 5 | 12,70 | 7,88 | 10,04 | 9,53 | 10,18 | 56,27 |
| 6 | 12,70 | 3,69 | 5,81 | 15,88 | 2,88 | 56,31 |
| 7 | 12,70 | 2,94 | 5,05 | 12,70 | 10,18 | 55,92 |
| 8 | 12,70 | 8,99 | 11,16 | 15,88 | 2,69 | 56,32 |
| 9 | 12,70 | 5,43 | 7,57 | 12,70 | 9,40 | 56,00 |
| 10 | 12,70 | 9,85 | 12,03 | 9,53 | 3,60 | 56,93 |
| 11 | 15,88 | 7,24 | 8,95 | 15,88 | 5,48 | 56,05 |
| 12 | 15,88 | 1,90 | 3,56 | 12,70 | 2,54 | 56,69 |
| 13 | 9,53 | 6,68 | 9,27 | 15,88 | 8,34 | 55,76 |
| 14 | 12,70 | 7,83 | 9,99 | 9,53 | 1,28 | 57,16 |
| 15 | 9,53 | 7,19 | 9,79 | 12,70 | 4,03 | 56,54 |
| 16 | 9,53 | 1,43 | 3,97 | 15,88 | 7,81 | 55,81 |
| 17 | 12,70 | 11,87 | 14,07 | 15,88 | 7,71 | 55,82 |
| 18 | 9,53 | 8,21 | 10,82 | 12,70 | 2,97 | 56,65 |
| 19 | 15,88 | 8,34 | 10,06 | 12,70 | 6,60 | 56,28 |
| 20 | 9,53 | 5,47 | 8,05 | 15,88 | 10,97 | 55,50 |
| 21 | 12,70 | 11,21 | 13,40 | 9,53 | 7,14 | 56,58 |
| 22 | 12,70 | 6,20 | 8,35 | 12,70 | 7,08 | 56,23 |
| 23 | 12,70 | 1,30 | 3,40 | 15,88 | 9,67 | 55,63 |
| 24 | 15,88 | 8,98 | 10,71 | 15,88 | 8,95 | 55,70 |
| 25 | 9,53 | 3,80 | 6,37 | 9,53 | 7,50 | 56,54 |
| 26 | 15,88 | 2,94 | 4,60 | 12,70 | 8,61 | 56,08 |
| 27 | 12,70 | 3,68 | 5,79 | 12,70 | 7,71 | 56,17 |
| 28 | 15,88 | 11,70 | 13,45 | 12,70 | 8,45 | 56,10 |
| 29 | 12,70 | 3,44 | 5,55 | 12,70 | 1,65 | 56,78 |
| 30 | 15,88 | 11,71 | 13,46 | 9,53 | 6,54 | 56,64 |

Tabla 21. Simulación de Montecarlo (Continuación)

| Dato | Mortero | | | Guadua | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Φ Perno (x1) | f'c (x2) | σb (y) | Φ Perno | Dn | Resistencia Fluencia |
| | [mm] | [MPa] | [MPa] | [mm] | [mm] | [MPa] |
| 31 | 15,88 | 7,69 | 9,40 | 9,53 | 10,78 | 56,21 |
| 32 | 12,70 | 8,03 | 10,19 | 9,53 | 7,74 | 56,52 |
| 33 | 15,88 | 7,54 | 9,26 | 9,53 | 3,08 | 56,98 |
| 34 | 9,53 | 9,53 | 12,15 | 15,88 | 7,04 | 55,89 |
| 35 | 9,53 | 1,13 | 3,67 | 9,53 | 8,87 | 56,41 |
| 36 | 15,88 | 8,76 | 10,49 | 9,53 | 5,85 | 56,71 |
| 37 | 9,53 | 8,76 | 11,38 | 15,88 | 3,13 | 56,28 |
| 38 | 9,53 | 1,91 | 4,45 | 9,53 | 10,31 | 56,26 |
| 39 | 15,88 | 5,96 | 7,66 | 12,70 | 7,23 | 56,22 |
| 40 | 15,88 | 5,98 | 7,68 | 9,53 | 8,04 | 56,49 |
| 41 | 12,70 | 9,98 | 12,16 | 12,70 | 5,44 | 56,40 |
| 42 | 12,70 | 1,51 | 3,60 | 15,88 | 7,58 | 55,84 |
| 43 | 15,88 | 7,77 | 9,49 | 9,53 | 9,17 | 56,38 |
| 44 | 9,53 | 11,75 | 14,39 | 12,70 | 1,77 | 56,77 |
| 45 | 12,70 | 8,09 | 10,26 | 12,70 | 6,01 | 56,34 |
| 46 | 15,88 | 11,90 | 13,66 | 15,88 | 9,31 | 55,66 |
| 47 | 15,88 | 7,43 | 9,14 | 15,88 | 4,50 | 56,14 |
| 48 | 12,70 | 5,07 | 7,20 | 9,53 | 3,76 | 56,92 |
| 49 | 15,88 | 5,75 | 7,45 | 9,53 | 1,77 | 57,12 |
| 50 | 12,70 | 2,68 | 4,79 | 15,88 | 9,87 | 55,61 |

En las Figura 4.3-16 y 4.3-17 se presenta el resumen estadístico de los valores de resistencia obtenidos, el valor medio, desviación estándar e intervalos de confianza son buenos representantes de la capacidad al aplastamiento de este material. Adicionalmente, se puede apreciar que en ambos casos, los datos se ajustan bien a una distribución normal y que este análisis también concuerda con los resultados hallados en la sección 4.3.2.

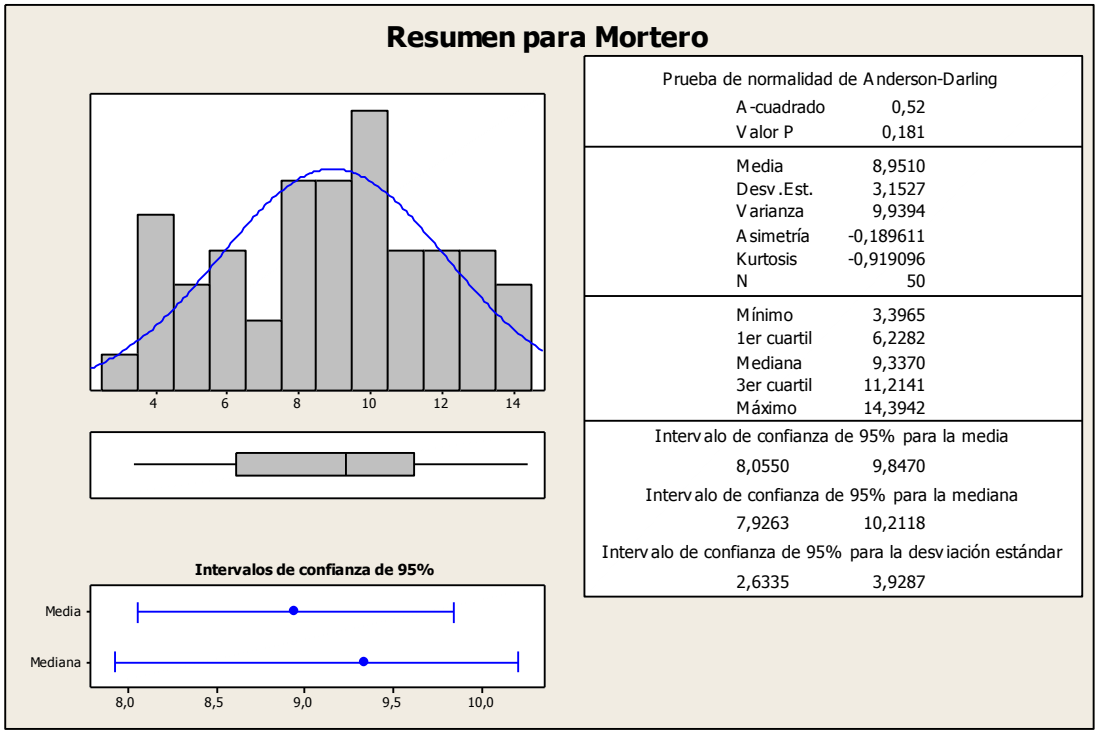



Figura 4.3-16. Resumen estadístico resultados simulación Montecarlo. Mortero.

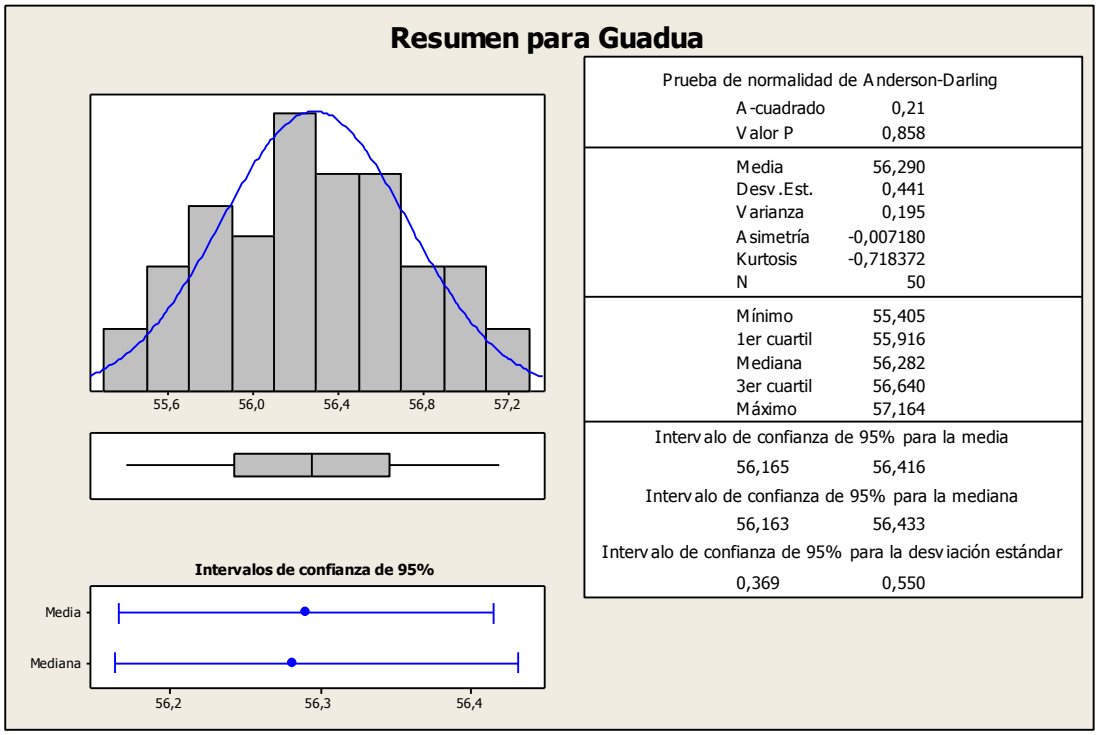



Figura 4.3-17. Resumen estadístico resultados simulación Montecarlo. Guadua.

### 4.3.6. *Análisis Weibull*

El análisis de Weibull es la técnica mayormente elegida para estimar una probabilidad basada en datos medidos o asumidos. La distribución de Weibull descubierta por el sueco Walodi Weibull, fue anunciada por primera vez en un artículo en 1951. La distribución de Weibull es útil por su habilidad para simular un amplio rango de distribuciones como la Normal, la Exponencial, etc. (Abernethy)

Este modelo analiza todas las posibles combinaciones de variables y sus respectivas respuestas y arroja un resultado global de resistencia basado únicamente en el nivel de confiabilidad deseado. Este modelo ha sido calibrado con todos los datos obtenidos en este proyecto por lo que contempla la resistencia obtenida con un mortero de muy baja resistencia con un perno de mayor diámetro hasta un mortero de alta resistencia con un perno más pequeño. El resultado de este análisis es una curva de confiabilidad similar a la presentada en la Figura 4.3-10. A pesar de no tener mucha precisión por su característica de ser un modelo global independiente de las variables de diseño, también es un modelo muy sencillo que permite hacer una estimación general del rango de valores en que se puede encontrar la resistencia al aplastamiento de la guadua y del mortero sin tener en cuenta las variables que influyen en el resultado. A continuación se presentan los resultados finales de este análisis, para revisar el proceso de los mismos, remitirse a la sección se anexos.

Tabla 22. Resistencia al aplastamiento del mortero en función de la confiabilidad deseada.

| Confiabilidad | σ [MPa] |
|---|---|
| 0,01 | 19,283 |
| 0,1 | 14,371 |
| 0,25 | 11,588 |
| 0,5 | 8,636 |
| 0,75 | 5,948 |
| 0,9 | 3,884 |
| 0,925 | 3,418 |
| 0,95 | 2,862 |
| 0,96 | 2,598 |
| 0,97 | 2,295 |
| 0,98 | 1,928 |
| 0,99 | 1,434 |

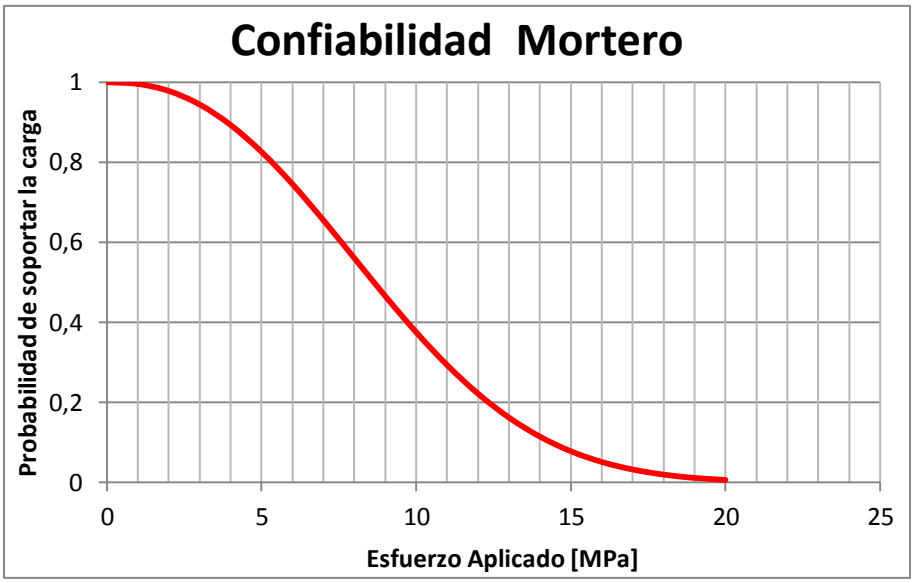
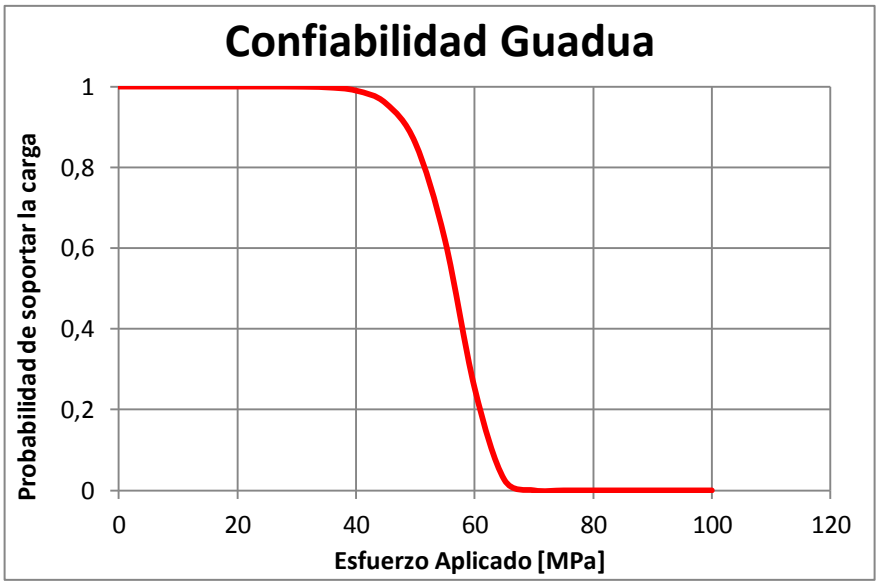



Tabla 23. . Resistencia al aplastamiento de la guadua en función de la confiabilidad deseada.

| Confiabilidad | σ [MPa] |
|---|---|
| 0,01 | 66,299 |
| 0,1 | 62,615 |
| 0,25 | 60,049 |
| 0,5 | 56,713 |
| 0,75 | 52,745 |
| 0,9 | 48,552 |
| 0,925 | 47,361 |
| 0,95 | 45,753 |
| 0,96 | 44,900 |
| 0,97 | 43,829 |
| 0,98 | 42,369 |
| 0,99 | 39,999 |



# 5. CONCLUSIONES

El desarrollo de todas las etapas de este proyecto ha permitido generar conocimiento concerniente a una de las propiedades básicas de la guadua la cual juega un papel muy importante al momento de diseñar una estructura usando este material. Se consolidó la información obtenida en proyectos anteriores relacionados con el tema, especialmente aquellos adelantados por el grupo de investigación CIMOC enmarcados en el contexto del proyecto global *Validación Tecnológica del Comportamiento de Estructuras de Guadua Rolliza seca e inmunizada*.

De la experiencia de ejecutar los ensayos, procesar los datos y analizar los mismos se pueden formular las siguientes conclusiones:

- Se identificó que las variables más importantes que influyen sobre la resistencia al aplastamiento del mortero son el diámetro del perno de conexión y la resistencia a la compresión del material. La primera no tiene una influencia tan importante como la segunda y muestra un comportamiento inversamente proporcional.
- En el caso de la guadua se comprobó que el diámetro del perno, a pesar de tener cierta influencia sobre la resistencia, no es el factor decisivo sobre el cual se debe hacer control minucioso, sino que la mayor influencia depende de la distancia de éste al nudo del cañuto
- Se realizó un análisis probabilístico de los resultados desde distintos puntos de vista diferentes: la determinación de la mejor distribución que se ajuste a los datos, un análisis de carga-resistencia, una simulación de Montecarlo y un análisis Weibull. En todos los casos se planteó un modelo basado en la confiabilidad con que el usuario desee realizar su diseño. Se comprobó que la resistencia al aplastamiento del mortero sigue una distribución Normal. Por otra parte, la resistencia al aplastamiento de la guadua sigue una distribución lognormal, sin embargo, esta aseveración puede requerir confirmación dado que la cantidad de datos manejados era relativamente pequeña. A partir de los análisis antes mencionados se logró obtener una serie de valores de resistencia que le otorgan al diseñador la libertad de escoger uno u otro

dependiendo del grado de confiabilidad que requiera para una estructura o para una conexión específica.

- Adicional a los dos modelos probabilísticos, se planteó un tercer modelo con mayor precisión (pero igual de sencillo) que tiene en cuenta las variables influyentes antes mencionadas. Este modelo se planteó aplicando una regresión lineal múltiple que arroja una ecuación lineal muy sencilla con dos variables independientes.
- Todos los modelos de análisis estadísticos realizados arrojaron resultados compatibles entre sí con valores similares, por lo que se puede concluir que el diseñador tiene un punto de partida confiable a partir del cual definir que tan conservador va a ser su diseño.
- Se realizó un análisis de falla de cada material que indica que el a pesar de que la capacidad al aplastamiento del mortero es relativamente baja (proporcional a su resistencia a la compresión), éste puede desarrollar resistencias muy superiores debido a la condición de confinamiento impuesta por la acción restrictiva de la guadua. Respecto a la guadua se puede apreciar que presenta una falla dúctil lo cual implica que es tiene una buena capacidad de absorción y disipación de energía y que por lo tanto se comportaría de manera segura al ingresar en el rango inelástico en un evento sísmico. Además se comprobó que cumple el criterio de falla "Leak Before Break".

# 6. BIBLIOGRAFÍA

Abernethy, R. (s.f.). *Fundamentos del Análisis de Weibull.* Recuperado el 12 de Septiembre de 2011, de sitio web de mantenimientoplanificado.com: http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos_rcm_archivos/Fundamentos%20analisis%20Weibull.pdf

American Society for Testing and Materials. (2007). *Norma Técnica ASTM D5764 - 97.* West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.

Arana, J. L., & González, J. J. (2001). *Mecánica de fractura.* Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.

Arce-Villalobos, O. (1993). *Fundamental of the design of bamboo structures.* Eindhoven: Eindhoven University of Technology.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2000). *Manual de construcción sismo resisitente de viviendas en bahareque encementado.*

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.* Bogotá, D.C.

Au, F., Ginsbrug, K., Poon, Y., & Shin, F. (1978). *Report on study of bamboo as a construction material.* Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic.

Chung, K., & Yu, W. (2002). Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffoldings. *Engineering Structures*, 429-442.

Correal, J. F., & Arbeláez, J. (2010). Influence of age and height position on colombian guadua angustifolia bamboo mechanical properties. *Maderas. Ciencia y tecnología vol. 12, núm. 2*, 105-113.

Estrada, M. (2009). *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para el refuerzo de materiales compuestos.* Bogotá, D.C.: Universidad de los Andes.

Giraldo, E., & Sabogal, A. (2007). *Una alternativa sostenible: La Guadua.* Armenia, Quindío: Corporación Autónoma Regional del Quindío C.R.Q.

Held, C., & Manzano, I. (2003). *El sector productivo y el mercado regional de la guadua en el eje cafetero colombiano.* Pereira, Risaralda: Red Internacional del Bambú y el Ratán INBAR.

Jayanetti, D., & Follet, P. (1998). *Bamboo in construction: An Introduction.* Red Internacional del Bambú y Ratán INBAR.

Khosrow, Ghavami, Albanise, B., & Marinho. (2005). Propiedades Físicas y Mecánicas del culmo entero de la Guadua Angustifolia Kunth. *Revista Brasileña de Ingeniería Agrícola y Ambiental vol.9 No. 1*, 107-114.

Mander, J. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering New York, N.Y., v 114, n 8*, 1804-1826.

Marinilli, A. (2009). ANÁLISIS PROBABILÍSTICO SIMPLIFICADO DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO ANTE ACCIONES SÍSMICAS. *BOLETÍN TÉCNICO IMME V OLUMEN 47 N º 2*, 27-36.

Perea, J., Villegas, J., Cerquera, Y., & Cortés, M. (2003). *Evauación y documentación de prácticas sobresalientes sobre el manejo de la cosecha y maduración de la guadua en el departamento del Huila.* Neiva, Huila: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

Skoczylas, F., Burlion, N., & Yurtdas, I. (2007). About drying effects and poro-mechanical behaviour of mortars. *Cement & Concrete Composites 29*, 383-390.

Smith, W. F. (2004). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales.* México D.F.: McGraw Hill.

Suarez, A. M. (2011). *Propuesta de la teoría de la fluencia para el diseño de conexiones de guadua rolliza.* Bogotá: Universidad de los Andes.

Takeuchi, C. (2004). Comportamiento estructural de la Guadua Angustifolia. Uniones en Guadua. *Ingeniería e Investigación*, 3-7.

Yañez, M., Perdomo, J., & Gomez de la Vega, H. (s.f.). *Ingeniería de confiabilidad; Pilar fundamental del mantenimiento.* Reliability and Risk Management S.A .

# 7. ANEXOS

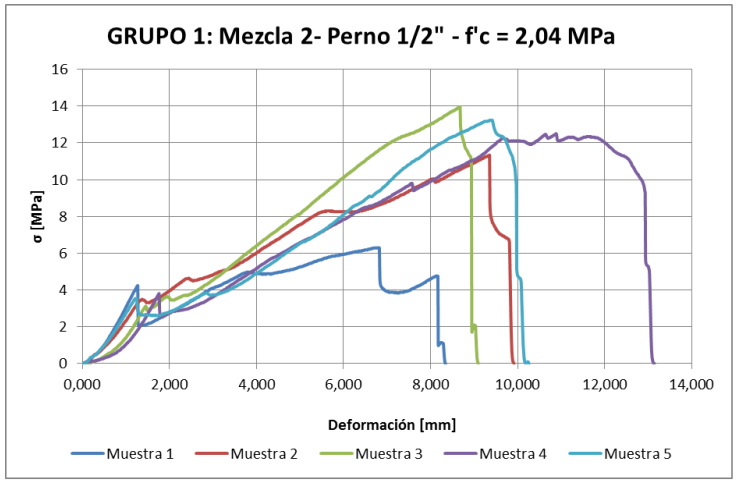
## 7.1. Fotografías de los ensayo

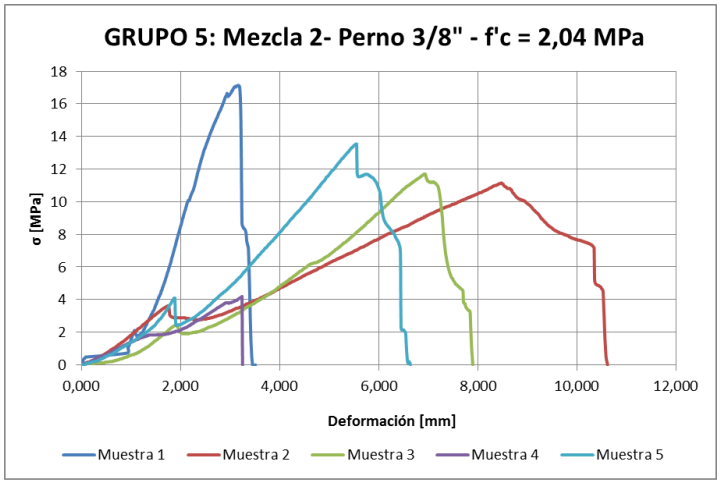
A continuación se presentan algunas fotografías que ilustran la fase de experimentación de este proyecto.

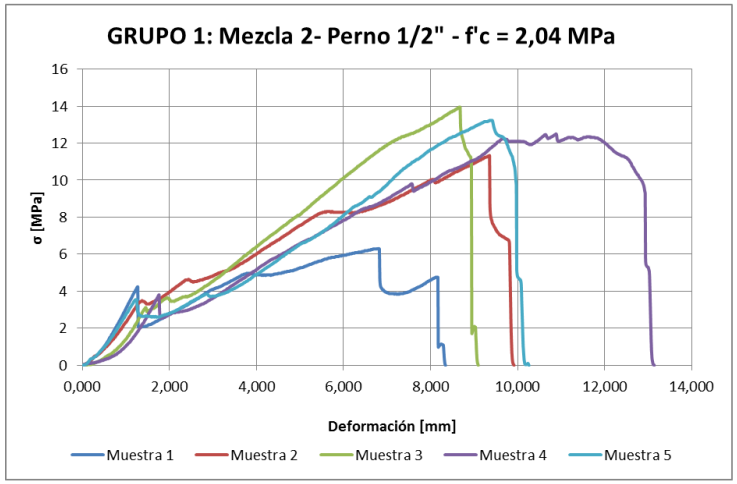
PRENSA No 5
C2
FUTEK

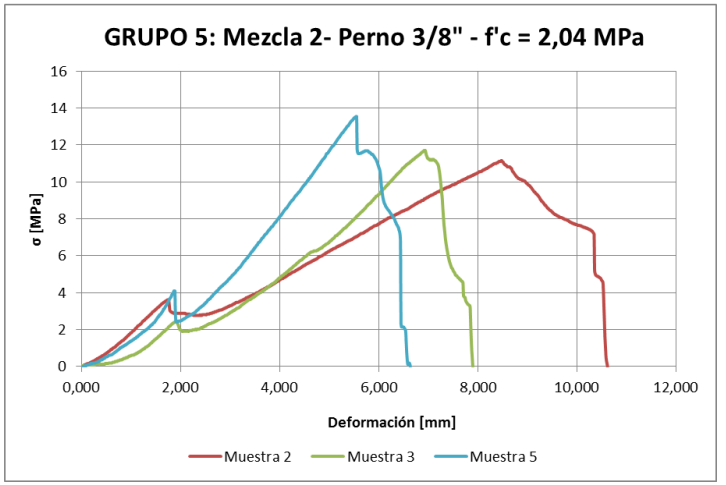
WYKEHAM FARRANCE
SLOUGH, ENGLAND
PRENSA No 5
MUESTRA #26
ENSAYO DE APLASTAMIENTO
EN GUADIJA
Universidad de
los Andes
FUTEK

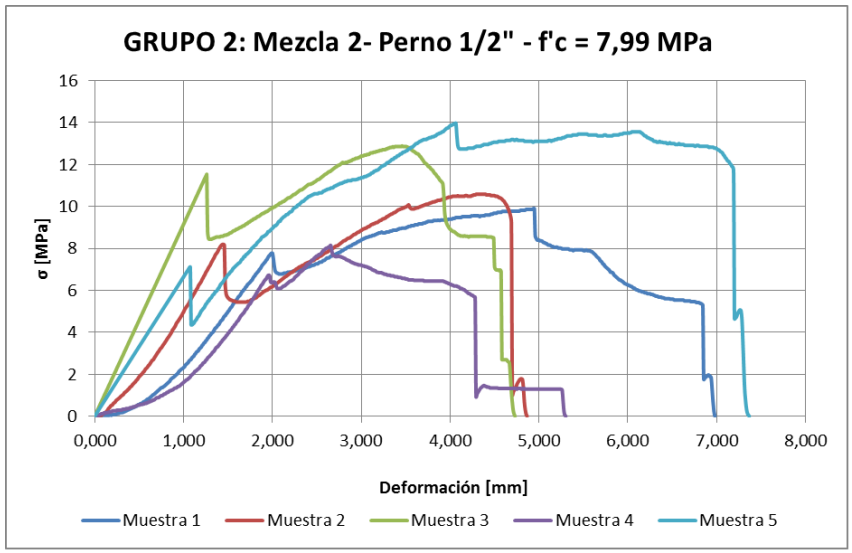
## 7.2. Gráficas de esfuerzo-desplazamiento mortero

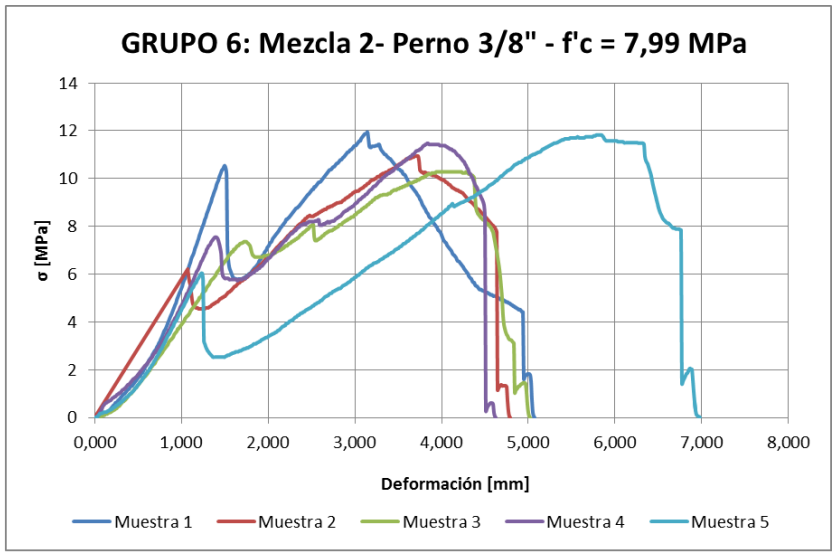


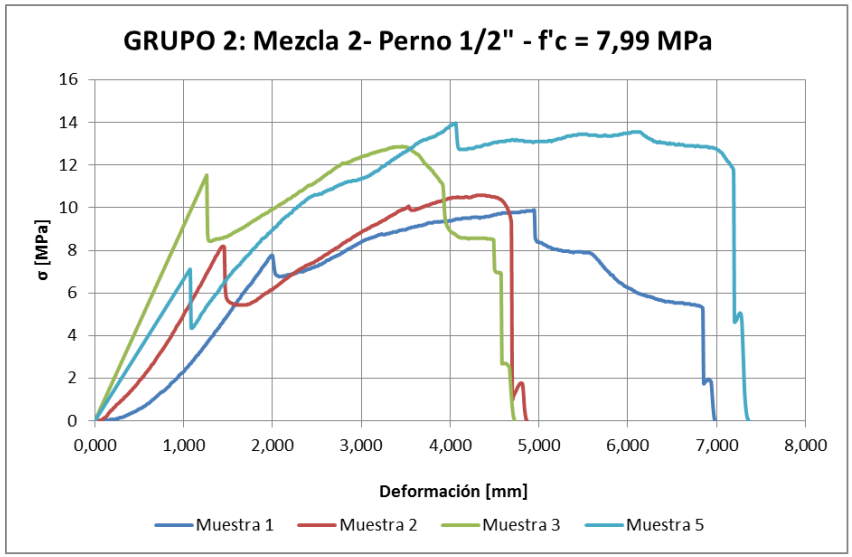



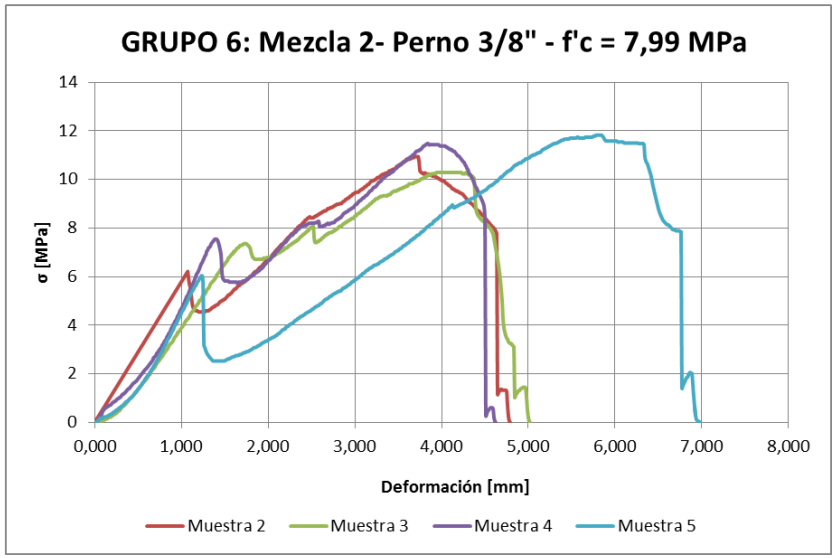



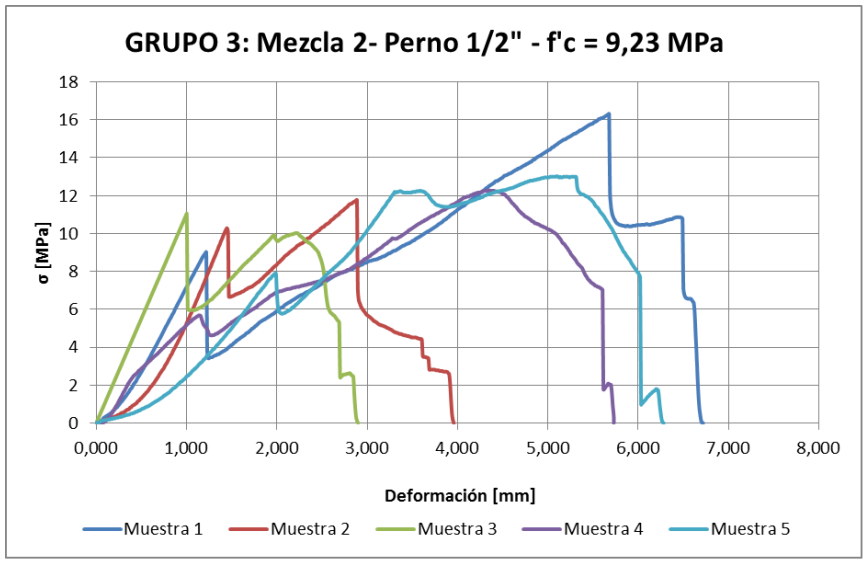



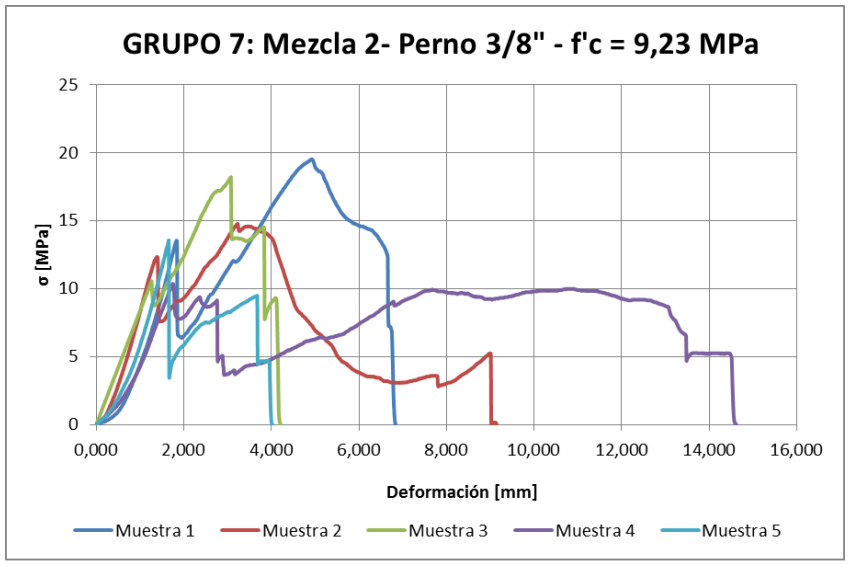

GRUPO 2: Mezcla 2- Perno 1/2" - f'c = 7,99 MPa
σ [MPa]
Deformación [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

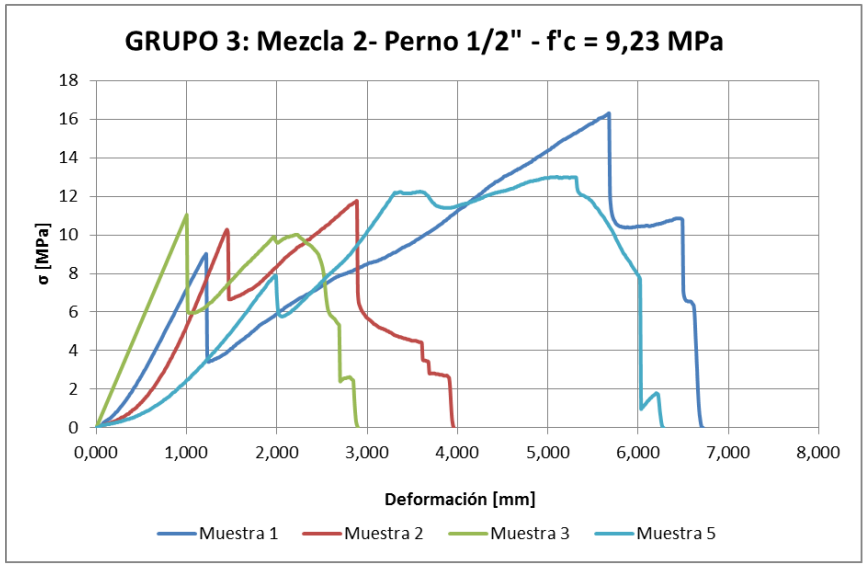

GRUPO 6: Mezcla 2- Perno 3/8" - f'c = 7,99 MPa
σ [MPa]
Deformación [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

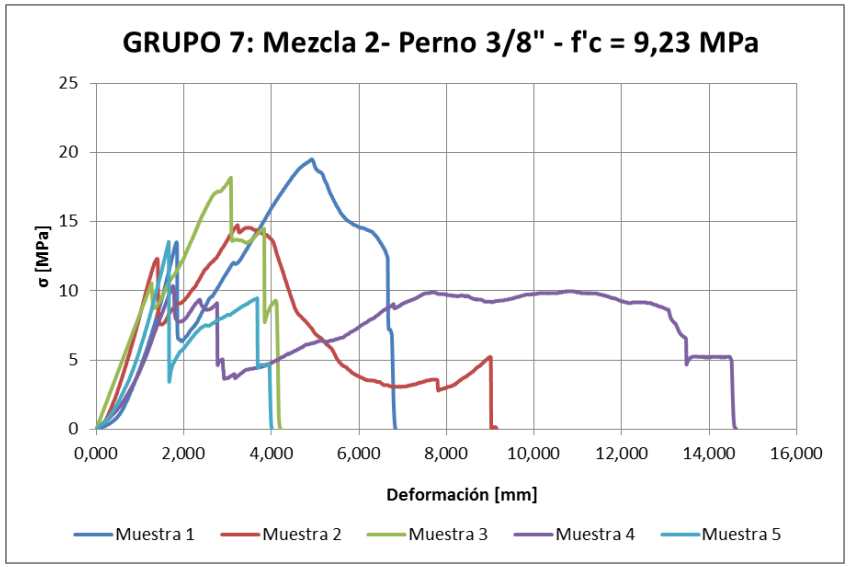

GRUPO 2: Mezcla 2- Perno 1/2" - f'c = 7,99 MPa
σ [MPa]
Deformación [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 5

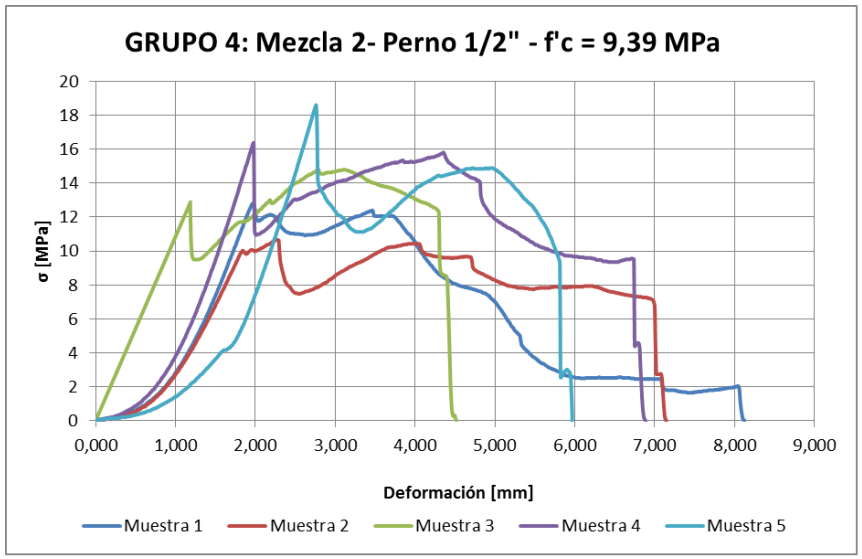

GRUPO 6: Mezcla 2- Perno 3/8" - f'c = 7,99 MPa
σ [MPa]
Deformación [mm]
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

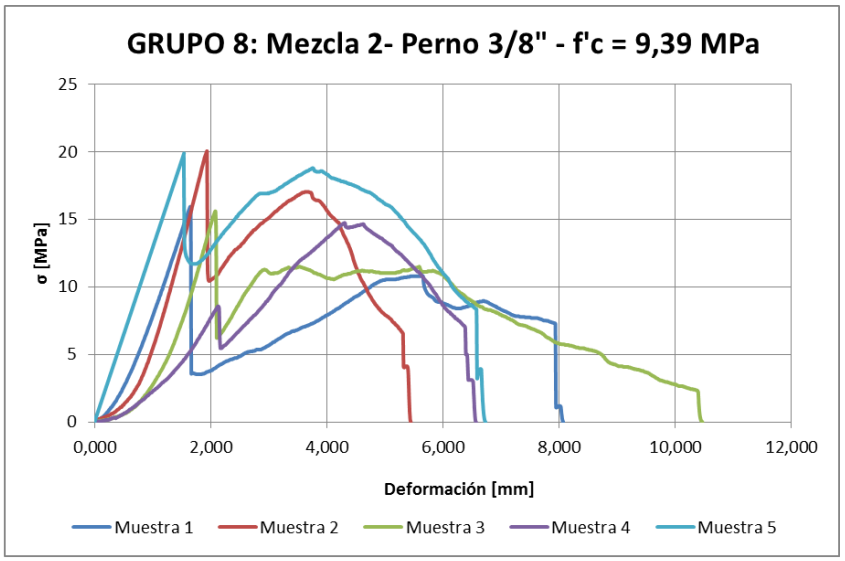

GRUPO 3: Mezcla 2- Perno 1/2" - f'c = 9,23 MPa
σ [MPa]
Deformación [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

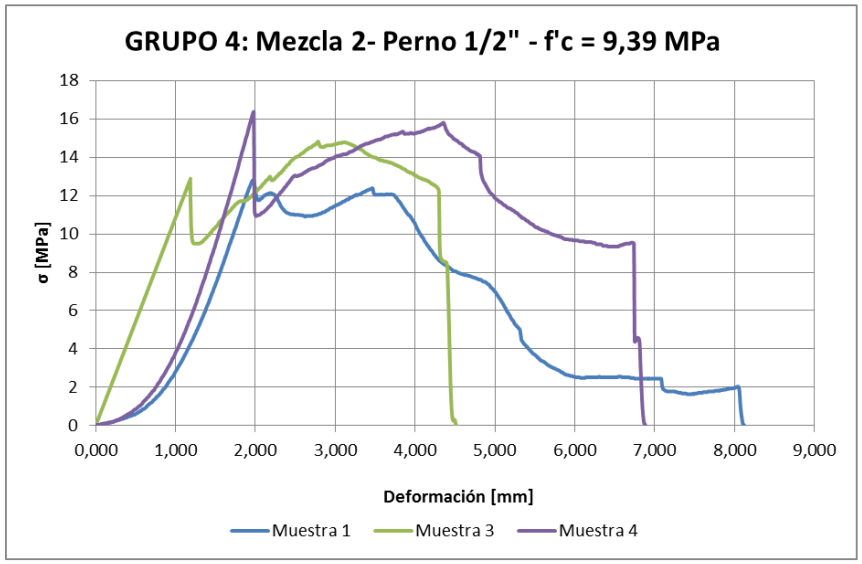

GRUPO 7: Mezcla 2- Perno 3/8" - f'c = 9,23 MPa
σ [MPa]
Deformación [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

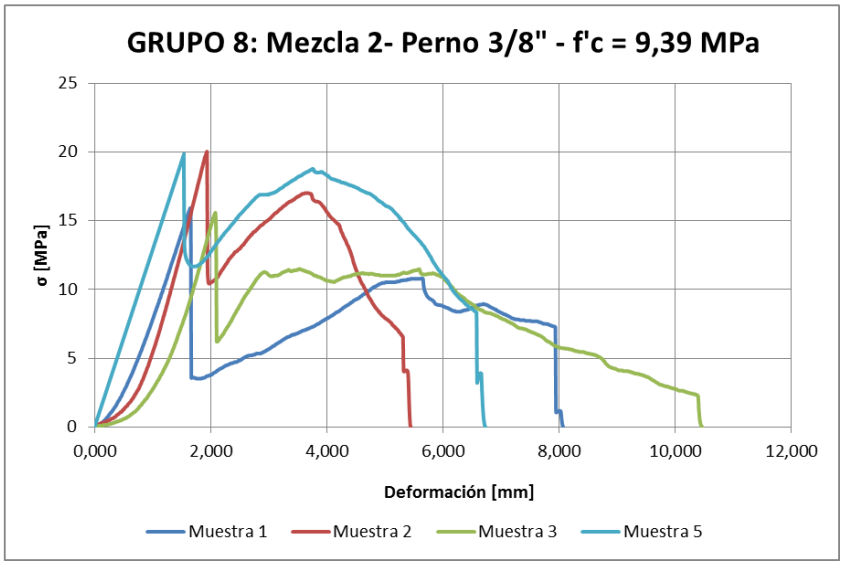

GRUPO 3: Mezcla 2- Perno 1/2" - f'c = 9,23 MPa
σ [MPa]
Deformación [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 5

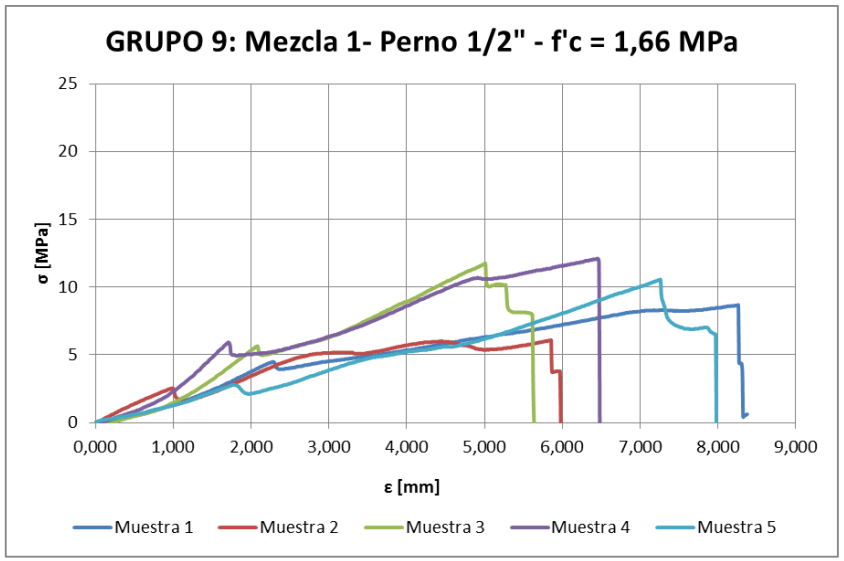

GRUPO 7: Mezcla 2- Perno 3/8" - f'c = 9,23 MPa
σ [MPa]
Deformación [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

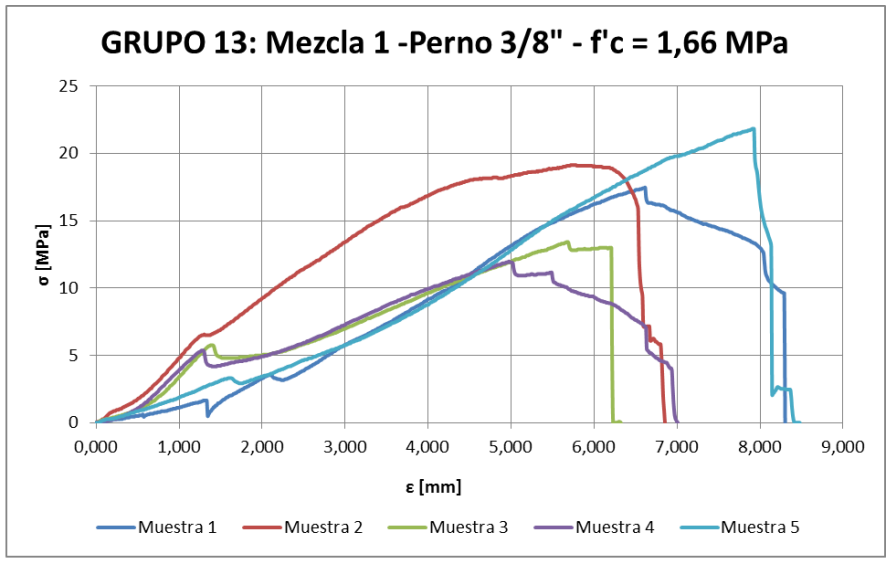

GRUPO 4: Mezcla 2- Perno 1/2" - f'c = 9,39 MPa
σ [MPa]
Deformación [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

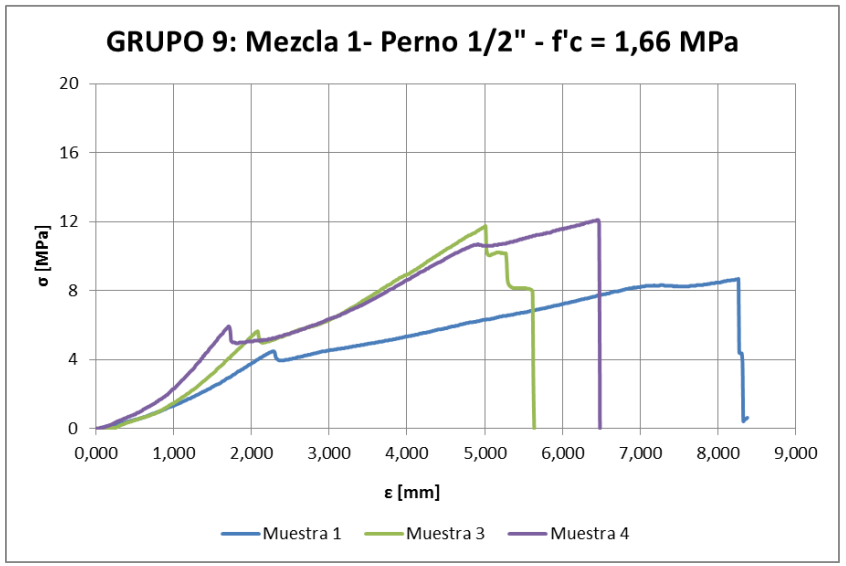

GRUPO 8: Mezcla 2- Perno 3/8" - f'c = 9,39 MPa
σ [MPa]
Deformación [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

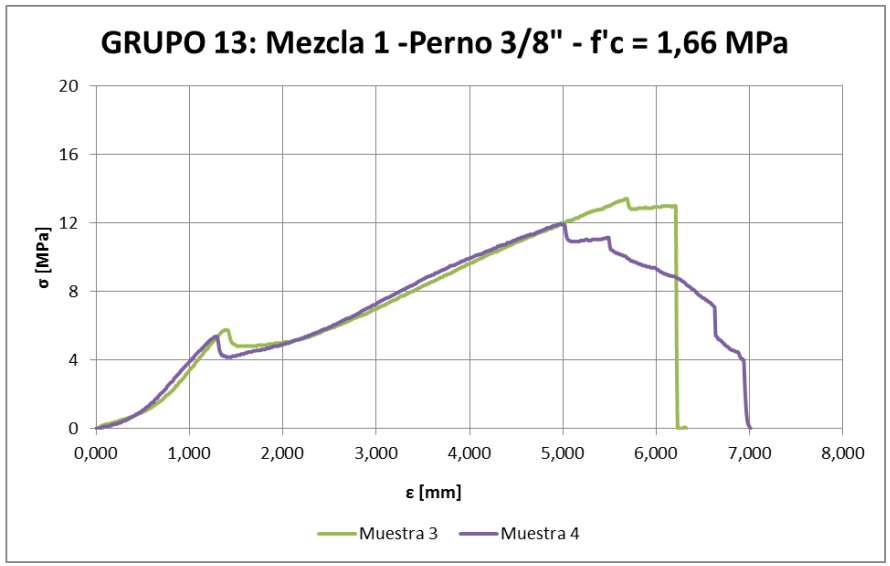

GRUPO 4: Mezcla 2- Perno 1/2" - f'c = 9,39 MPa
σ [MPa]
Deformación [mm]
Muestra 1
Muestra 3
Muestra 4

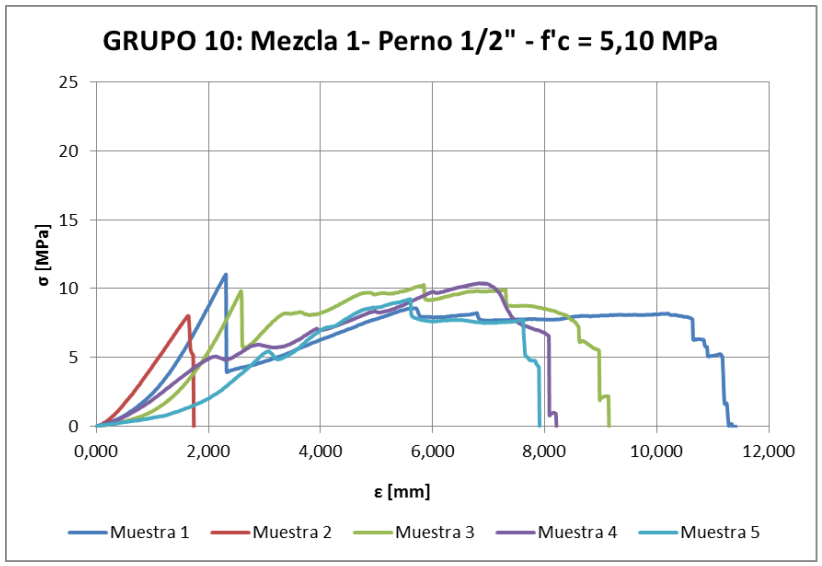

GRUPO 8: Mezcla 2- Perno 3/8" - f'c = 9,39 MPa
σ [MPa]
Deformación [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 5

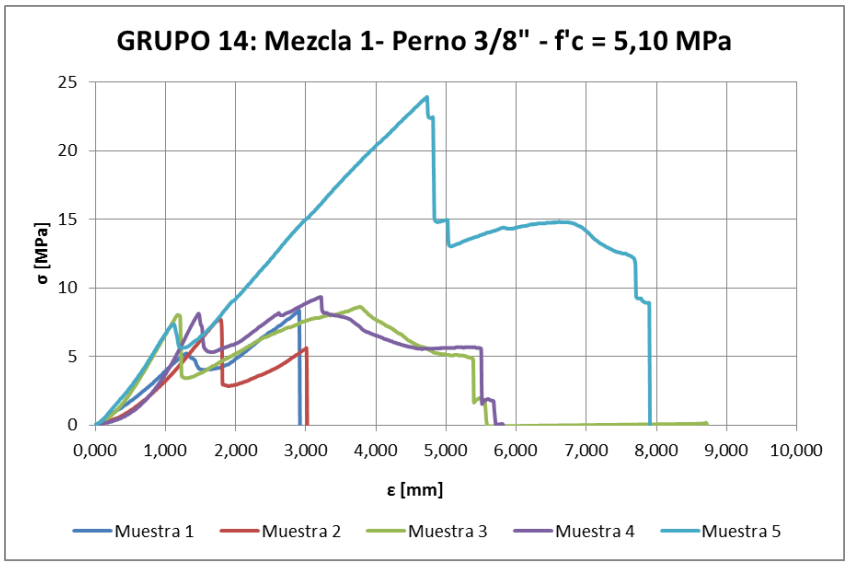

GRUPO 9: Mezcla 1- Perno 1/2" - f'c = 1,66 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

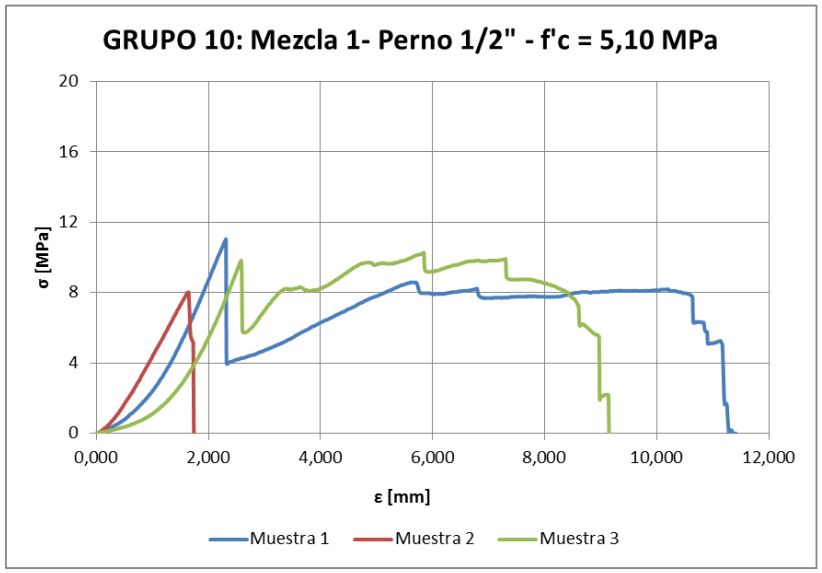

GRUPO 13: Mezcla 1 -Perno 3/8" - f'c = 1,66 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

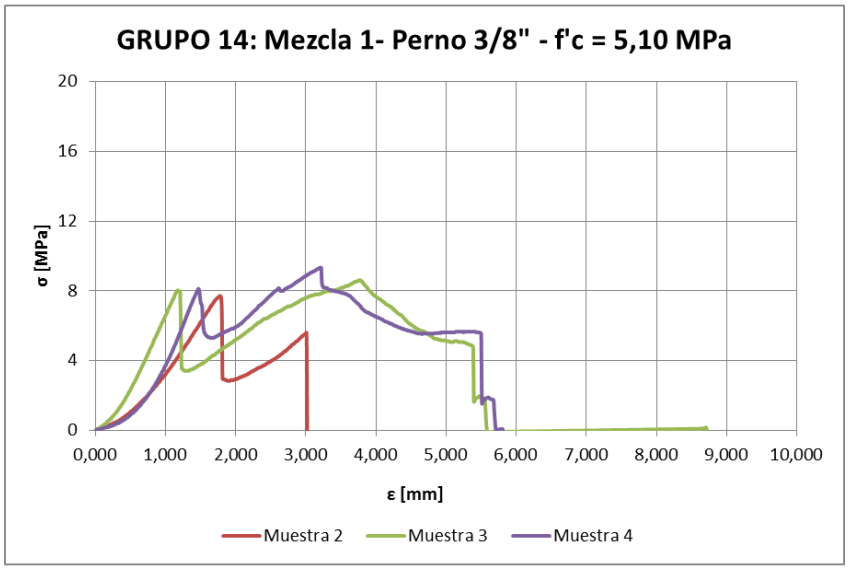

GRUPO 9: Mezcla 1- Perno 1/2" - f'c = 1,66 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 1
Muestra 3
Muestra 4

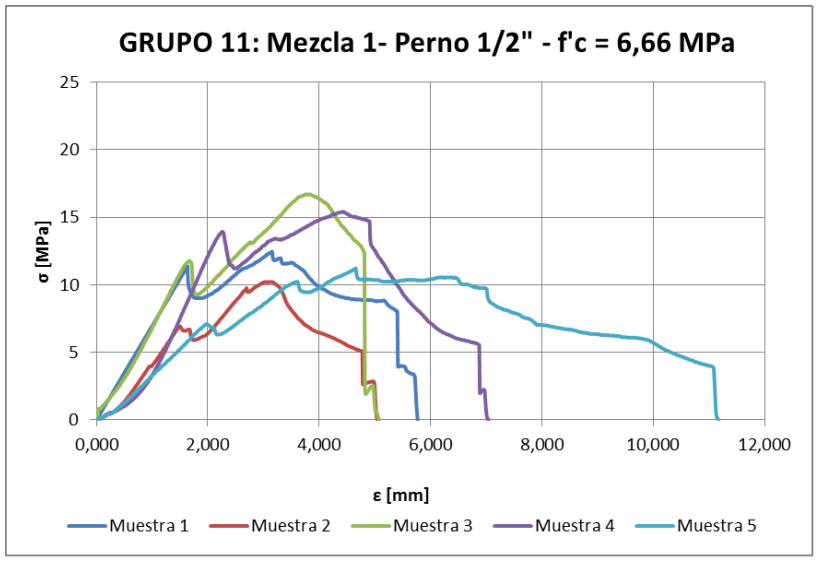

GRUPO 13: Mezcla 1 -Perno 3/8" - f'c = 1,66 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 3
Muestra 4

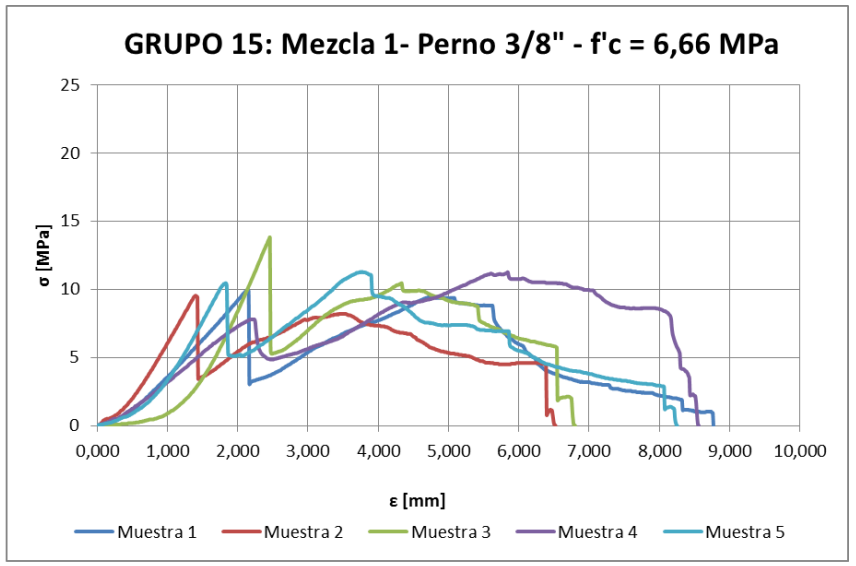

GRUPO 10: Mezcla 1- Perno 1/2" - f'c = 5,10 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

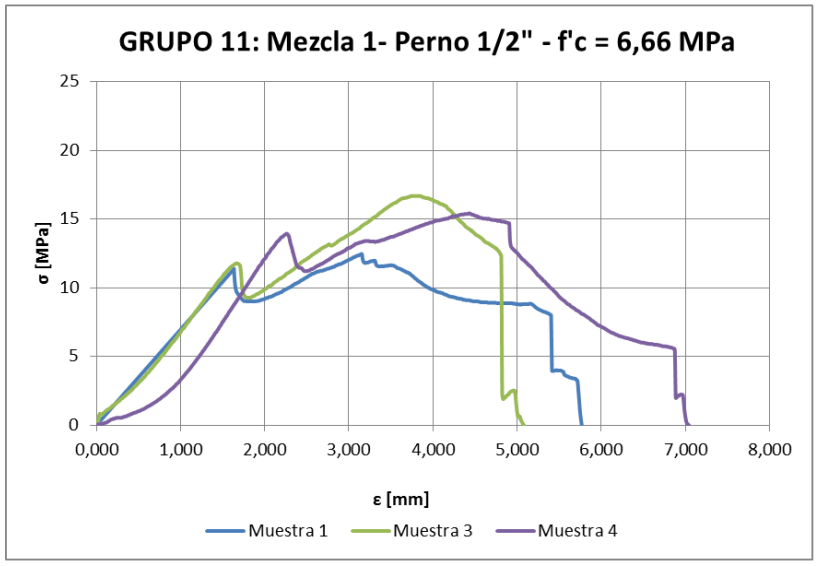

GRUPO 14: Mezcla 1- Perno 3/8" - f'c = 5,10 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

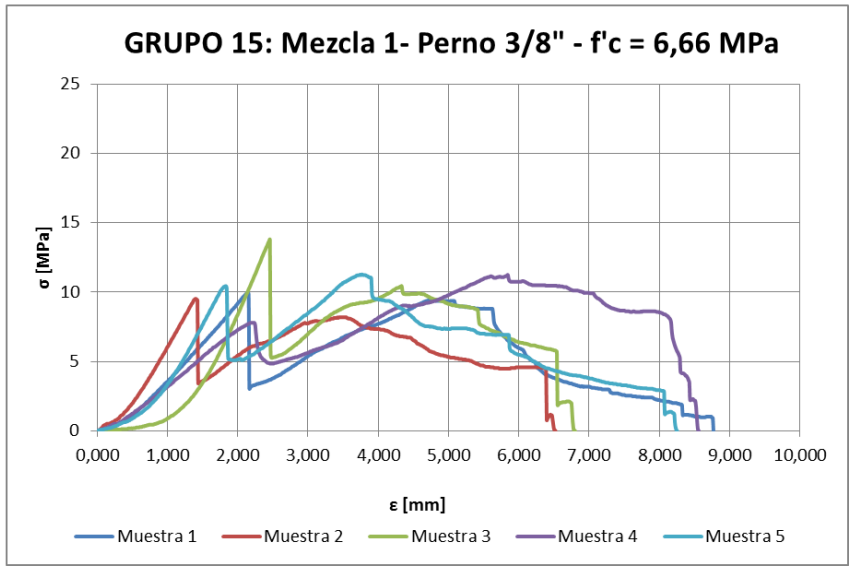

GRUPO 10: Mezcla 1- Perno 1/2" - f'c = 5,10 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3

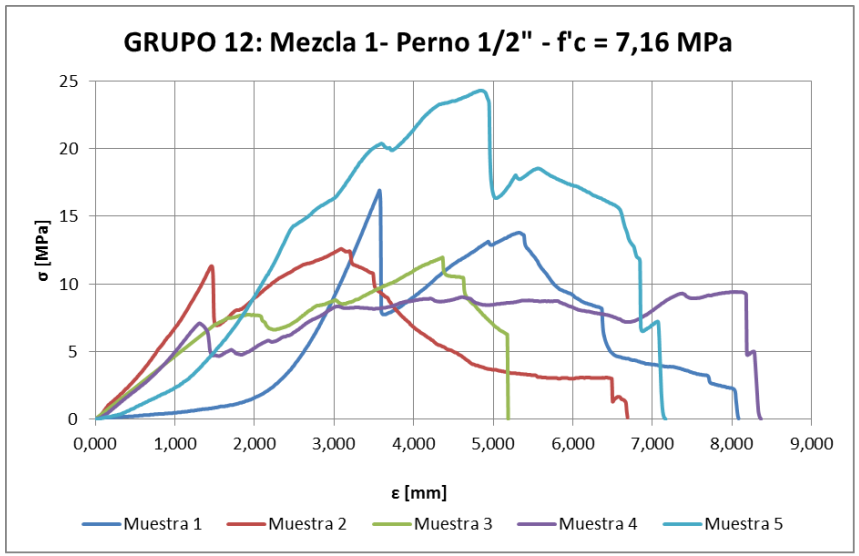

GRUPO 14: Mezcla 1- Perno 3/8" - f'c = 5,10 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4

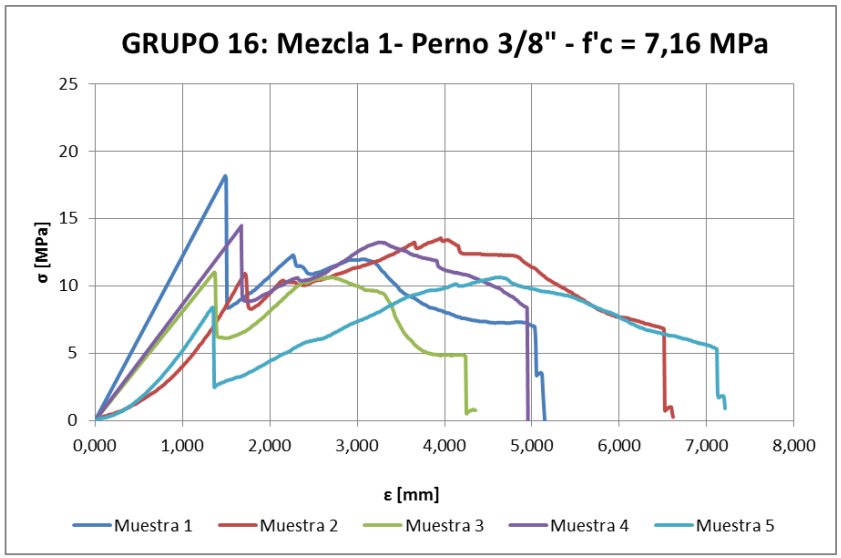

GRUPO 11: Mezcla 1- Perno 1/2" - f'c = 6,66 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

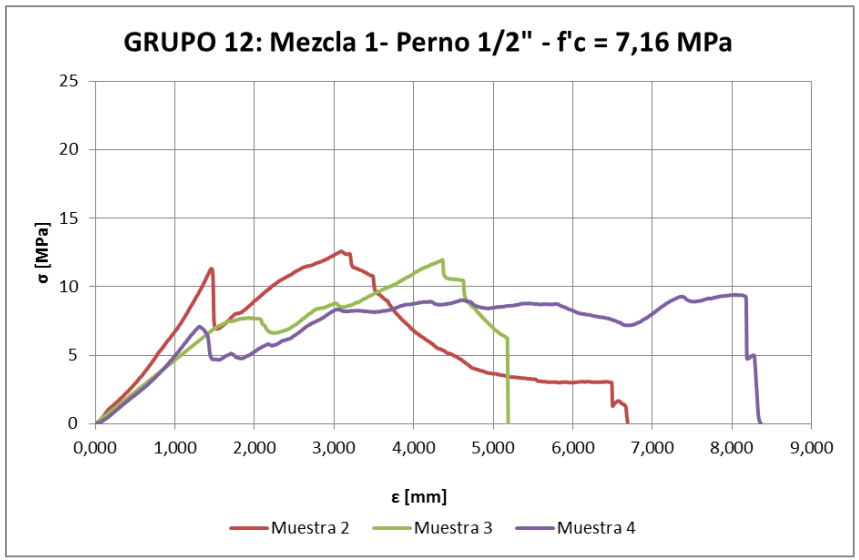

GRUPO 15: Mezcla 1- Perno 3/8" - f'c = 6,66 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

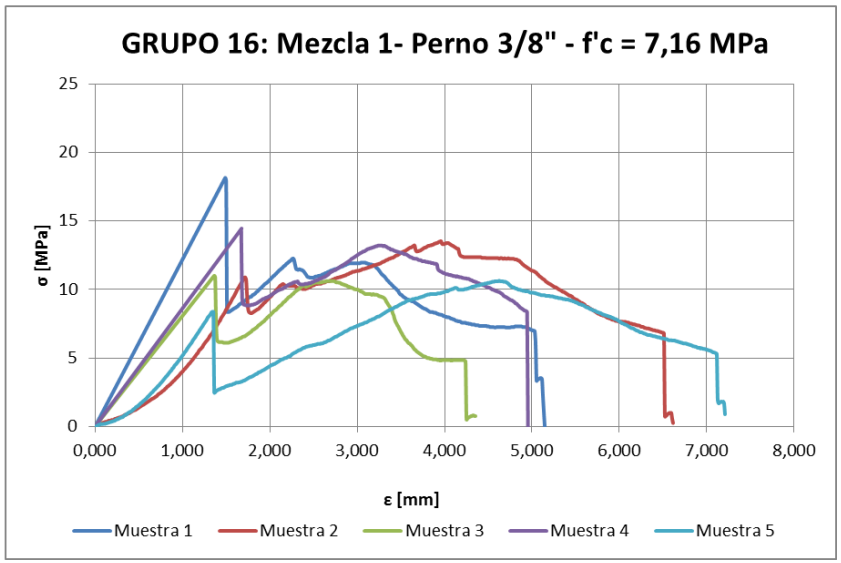

GRUPO 11: Mezcla 1- Perno 1/2" - f'c = 6,66 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 1
Muestra 3
Muestra 4


GRUPO 15: Mezcla 1- Perno 3/8" - f'c = 6,66 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

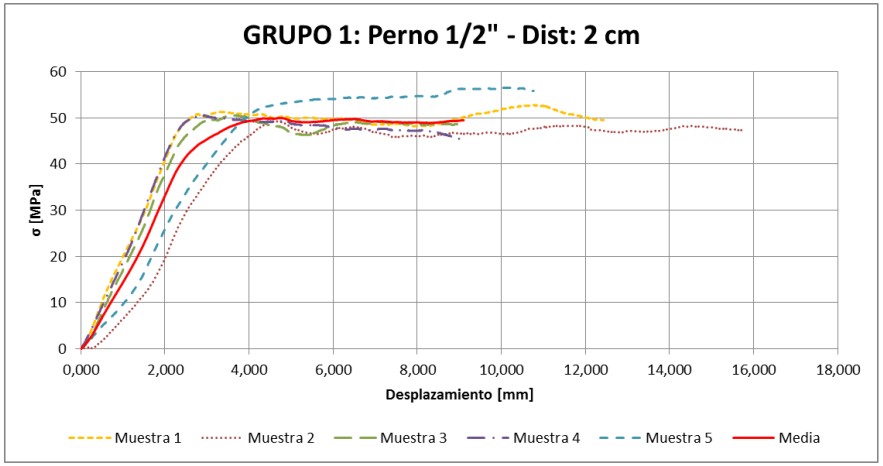

GRUPO 12: Mezcla 1- Perno 1/2" - f'c = 7,16 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

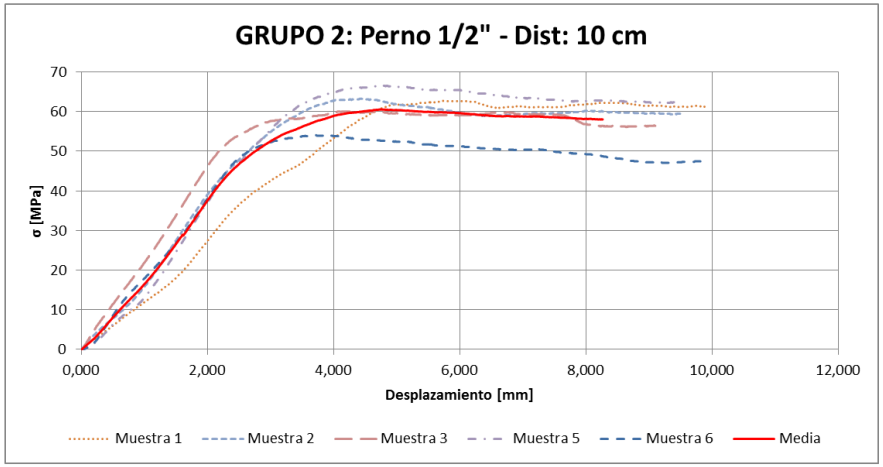

GRUPO 16: Mezcla 1- Perno 3/8" - f'c = 7,16 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

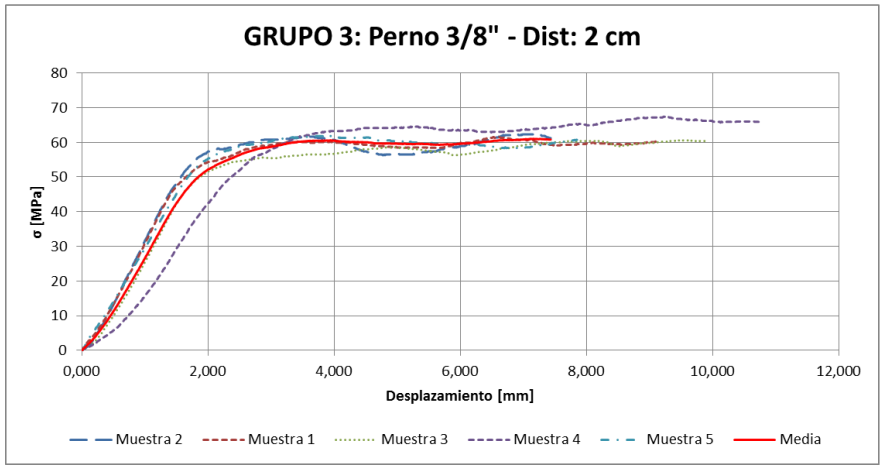

GRUPO 12: Mezcla 1- Perno 1/2" - f'c = 7,16 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4

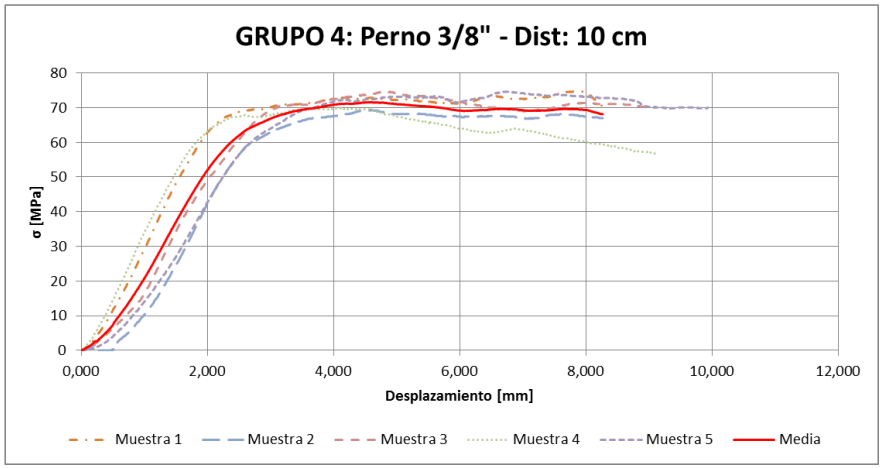

GRUPO 16: Mezcla 1- Perno 3/8" - f'c = 7,16 MPa
σ [MPa]
ε [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5

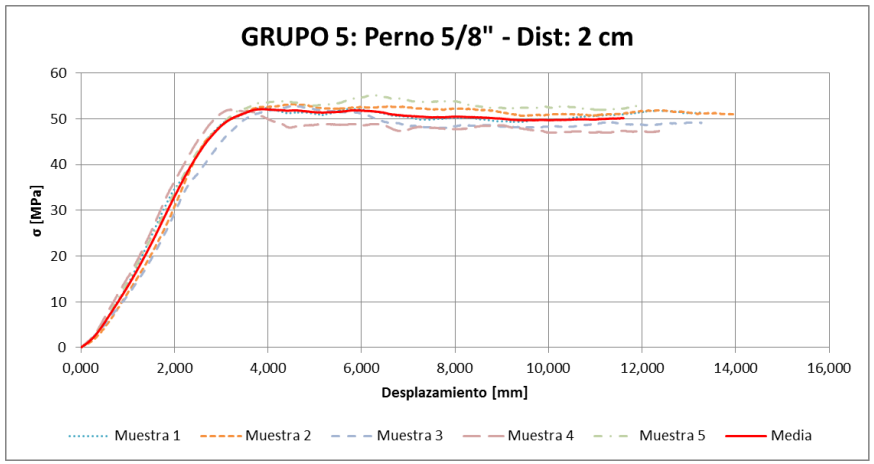
## 7.3. Curvas esfuerzo-desplazamiento Guadua

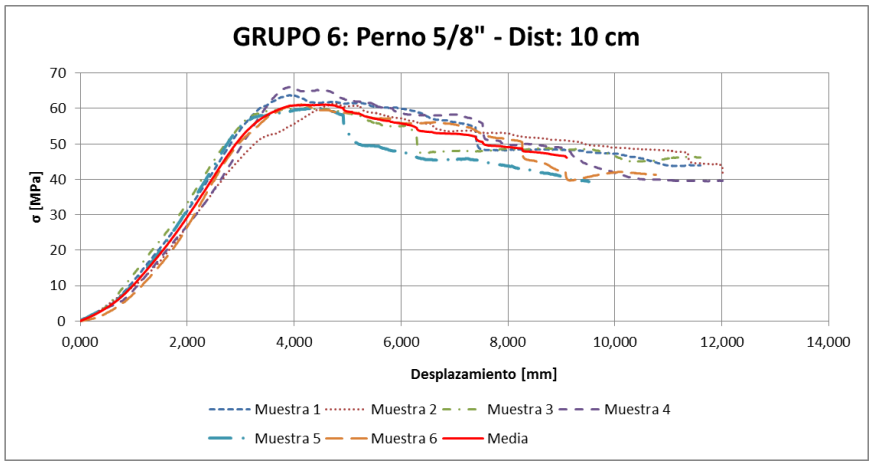


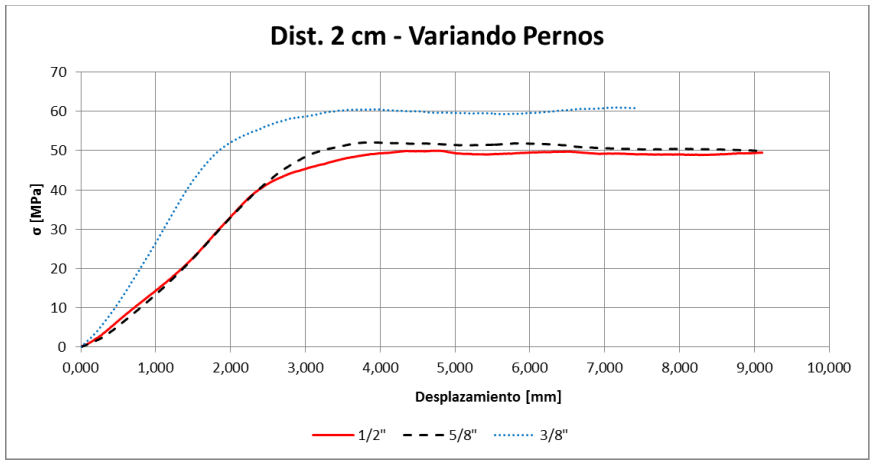



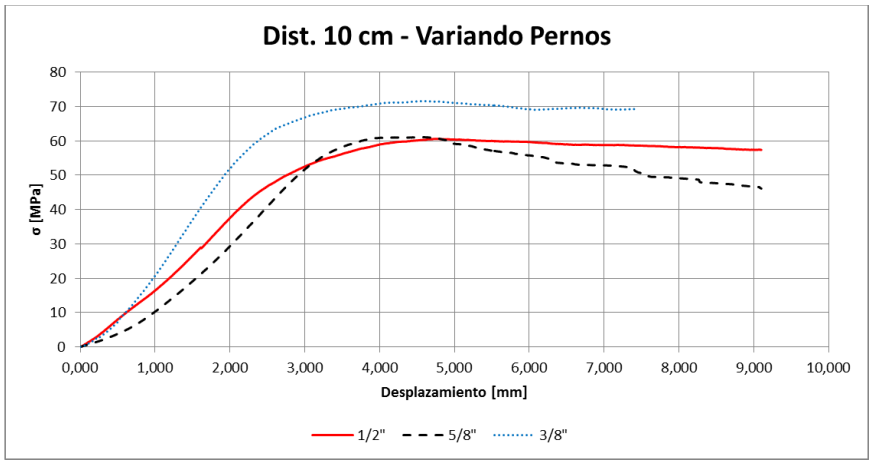




GRUPO 5: Perno 5/8" - Dist: 2 cm
σ [MPa]
Desplazamiento [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5
Media


GRUPO 6: Perno 5/8" - Dist: 10 cm
σ [MPa]
Desplazamiento [mm]
Muestra 1
Muestra 2
Muestra 3
Muestra 4
Muestra 5
Muestra 6
Media


Dist. 2 cm - Variando Pernos
σ [MPa]
Desplazamiento [mm]
1/2"
5/8"
3/8"


Dist. 10 cm - Variando Pernos
σ [MPa]
Desplazamiento [mm]
1/2"
5/8"
3/8"

## 7.4. Análisis de Weibull

A continuación se presenta el proceso para efectuar un análisis Weibull de dos parámetros. El proceso consiste en organizar de forma ascendente todos los datos obtenidos, se procede a la calcular el estadístico "Rango Medio" mediante la fórmula de Bernard:

$$Rango\ Medio = \frac{Rango_i - 0{,}3}{Total\ de\ datos + 0{,}4}$$

Posteriormente se calcula el doble logaritmo natural de los rangos medios y se grafican contra el logaritmo natural de los valores de resistencia obtenidos.

A partir de la gráfica generada determina la pendiente y el intercepto de la recta de tendencia que mejor se ajuste a los datos.

El parámetro de forma β corresponde a la pendiente de la recta mientras que la vida característica (parámetro α) se calcula de la siguiente forma:

$$\alpha = e^{-\frac{intercepto}{pendiente}}$$

Una vez definida la función de Weibull mediante sus dos parámetros característicos, se calcula la resistencia en función de la confiabilidad mediante la siguiente ecuación:

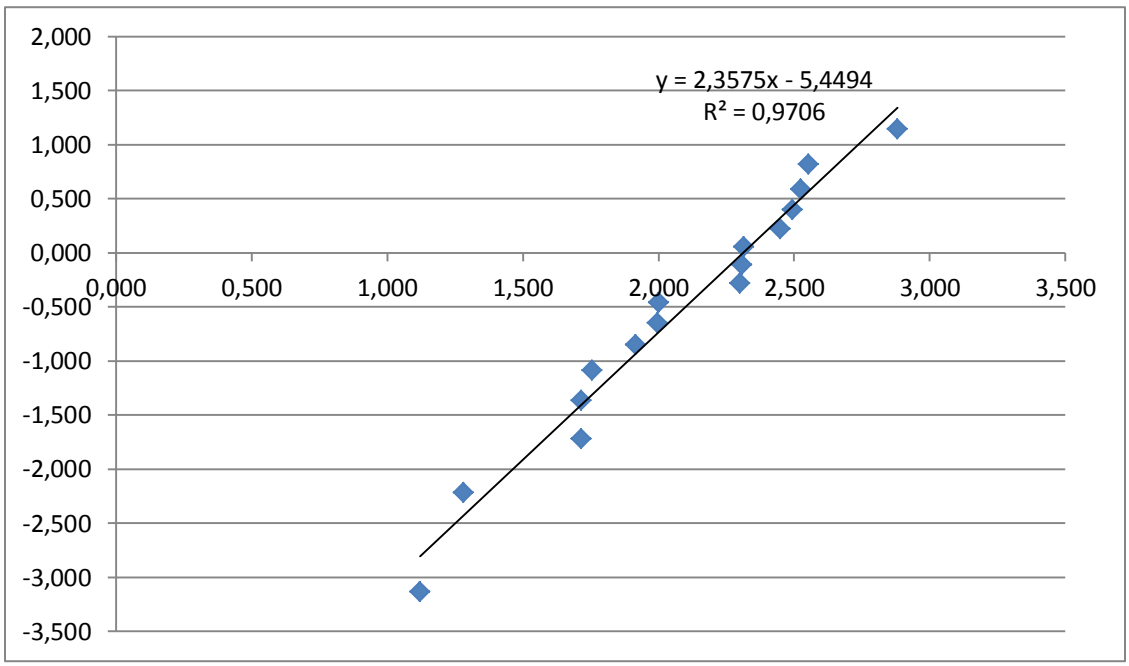
$$Resistencia = \alpha \times (-\ln(confiabilidad)^{\frac{1}{\beta}})$$

A continuación se presentan los resultados obtenidos para mortero y para guadua:

### 7.4.1. Análisis de Weibull Mortero

| Grupo de Datos | σ medio [Mpa] | Orden | σ medio [Mpa] | Rango Medio | 1/(1-RM) → A | ln(ln(A)) | ln(σ) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3,066 | 1 | 3,066 | 0,043 | 1,045 | -3,132 | 1,120 |
| 2 | 7,370 | 2 | 3,599 | 0,104 | 1,116 | -2,212 | 1,281 |
| 3 | 10,122 | 3 | 5,560 | 0,165 | 1,197 | -1,715 | 1,716 |
| 4 | 12,853 | 4 | 5,560 | 0,226 | 1,291 | -1,364 | 1,716 |
| 5 | 3,599 | 5 | 5,788 | 0,287 | 1,402 | -1,086 | 1,756 |
| 6 | 6,787 | 6 | 6,787 | 0,348 | 1,533 | -0,851 | 1,915 |
| 7 | 12,477 | 7 | 7,370 | 0,409 | 1,691 | -0,644 | 1,997 |
| 8 | 17,844 | 8 | 7,399 | 0,470 | 1,885 | -0,456 | 2,001 |
| 9 | 5,788 | 9 | 9,979 | 0,530 | 2,130 | -0,280 | 2,300 |
| 10 | 10,058 | 10 | 10,058 | 0,591 | 2,448 | -0,111 | 2,308 |
| 11 | 11,574 | 11 | 10,122 | 0,652 | 2,877 | 0,055 | 2,315 |
| 12 | 7,399 | 12 | 11,574 | 0,713 | 3,489 | 0,223 | 2,449 |
| 13 | 5,560 | 13 | 12,116 | 0,774 | 4,432 | 0,398 | 2,495 |
| 14 | 5,560 | 14 | 12,477 | 0,835 | 6,074 | 0,590 | 2,524 |
| 15 | 9,979 | 15 | 12,853 | 0,896 | 9,647 | 0,818 | 2,554 |
| 16 | 12,116 | 16 | 17,844 | 0,957 | 23,429 | 1,149 | 2,882 |

| Estimación Lineal | |
|---|---|
| **Pendiente** | **2,3575453** |
| **Intercepto** | **-5,449353** |
| **β (Parámetro de Forma)** | **2,3575453** |
| **α (Vida característica)** | **10,089064** |
| **r2** | **0,9705802** |

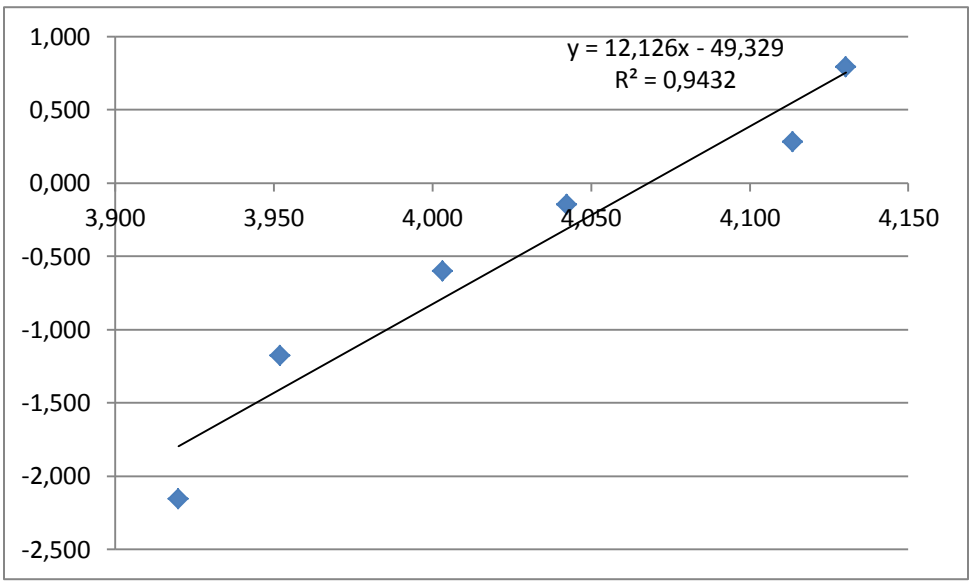



| Confiabilidad | σ [MPa] |
|---|---|
| 0,01 | 19,283 |
| 0,1 | 14,371 |
| 0,25 | 11,588 |
| 0,5 | 8,636 |
| 0,75 | 5,948 |
| 0,9 | 3,884 |
| 0,925 | 3,418 |
| 0,95 | 2,862 |
| 0,96 | 2,598 |
| 0,97 | 2,295 |
| 0,98 | 1,928 |
| 0,99 | 1,434 |

### 7.4.2. *Análisis de Weibull Guadua*

| Grupo de Datos | σ medio [Mpa] | Orden | σ medio [Mpa] | Rango Medio | 1/(1-RM) → A | ln(ln(A)) | ln(σ) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 50,402 | 1 | 50,402 | 0,109 | 1,123 | -2,156 | 3,920 |
| 2 | 61,167 | 2 | 52,042 | 0,266 | 1,362 | -1,175 | 3,952 |
| 3 | 56,960 | 3 | 54,775 | 0,422 | 1,730 | -0,602 | 4,003 |
| 4 | 54,775 | 4 | 56,960 | 0,578 | 2,370 | -0,147 | 4,042 |
| 5 | 52,042 | 5 | 61,167 | 0,734 | 3,765 | 0,282 | 4,114 |
| 6 | 62,200 | 6 | 62,200 | 0,891 | 9,143 | 0,794 | 4,130 |

| Estimación Lineal | |
|---|---|
| **Pendiente** | **12,125558** |
| **Intercepto** | **-49,32945** |
| **β (Parámetro de Forma)** | **12,125558** |
| **α (Vida característica)** | **58,45291** |
| **r2** | **0,9431516** |




| Confiabilidad | σ [MPa] |
|---|---|
| 0,01 | 66,299 |
| 0,1 | 62,615 |
| 0,25 | 60,049 |
| 0,5 | 56,713 |
| 0,75 | 52,745 |
| 0,9 | 48,552 |
| 0,925 | 47,361 |
| 0,95 | 45,753 |
| 0,96 | 44,900 |
| 0,97 | 43,829 |
| 0,98 | 42,369 |
| 0,99 | 39,999 |

Universidad de los Andes

NIT: 860.007.386-1

# SISTEMA DE BIBLIOTECAS
# IDENTIFICACIÓN TRABAJO DE GRADO

FECHA DE ELABORACIÓN

| DD | MM | AAAA |
|---|---|---|
| 14 | 01 | 2012 |

## 1. IDENTIFICACIÓN AUTOR(ES) DEL TRABAJO DE GRADO

| CÓDIGO | DOCUMENTO DE IDENTIDAD TIPO | DOCUMENTO DE IDENTIDAD NÚMERO | APELLIDOS | NOMBRES | CORREO ELECTRÓNICO |
|---|---|---|---|---|---|
| 200814927 | CC | 1019047648 | CARVAJAL CERTUCHE | JUAN JOSÉ | jj.carvajal911@uniandes. |
| | CC | | | | |
| | CC | | | | |
| | CC | | | | |
| | CC | | | | |
| | CC | | | | |

PROGRAMA: Pregrado

FACULTAD: Facultad de Ingeniería

DEPARTAMENTO: Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

ENTREGÓ FORMATO:

SB-10: [x] SB-10 "Entrega trabajo de grado y autorización de uso a favor de la Universidad de los Andes". Documento con el cual, el autor permite que su trabajo sea utilizado por la Universidad, para fines de consulta y de mención en sus catálogos bibliográficos, tanto físicos como en línea.

## 1.1 IDENTIFICACION DE TRABAJO DE GRADO PARA DOBLE TITULACIÓN

PROGRAMA: No Aplica

FACULTAD: No Aplica

DEPARTAMENTO: No Aplica

TESIS PARA DOBLE TITULACIÓN:

[ ] Si el trabajo de grado presentado aplica para obtener dos (2) titulaciones, por favor marque esta casilla y diligencie la información de esta sección.

## 2. INFORMACIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO:

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO DE LA GUADUA ROLLIZA (ANGUSTIFOLIA KUNTH) Y DEL MORTERO COMÚN

DESCRIPCIÓN FÍSICA

Número de páginas: 115

Ilustraciones: 54

MATERIAL ACOMPAÑANTE (Cantidad):

Casetes Audio: Discos compactos:

Casetes Video: Diapositivas:

Disquetes: Otros: ¿Cuáles?

FECHA DE ELABORACIÓN

| DD | MM | AAAA |
|---|---|---|
| 12 | 01 | 2012 |

*RESUMEN DEL TRABAJO DE GRADO:

Con el objetivo de entender más profundamente el comportamiento del sistema de uniones y conexiones de las estructuras de guadua rolliza (particularmente de la especie Angustifolia Kunth) se adelantó una serie de ensayos experimentales enfocados a conocer con mayor precisión y confiabilidad las propiedades mecánicas del material involucradas en las uniones, más específicamente, la resistencia al aplastamiento tanto de la guadua como tal como del mortero de relleno usado como refuerzo en las conexiones.
La investigación naturalmente se dividió en dos siguiendo este criterio con el objetivo de evaluar individualmente las variables que afectan cada uno de los dos materiales involucrados. En el caso de la guadua se evaluó la influencia del diámetro del perno de conexión y de la ubicación del mismo respecto al nudo de cada cañuto. Los resultados indican que el diámetro del perno no tiene una influencia considerable sobre la resistencia pero la distancia al nudo sí juega un papel muy importante sobre ésta.
Por otra parte, para el análisis de la resistencia al aplastamiento del mortero se definieron como variables incidentes la resistencia a la compresión del mismo y el diámetro del perno pasador. Los resultados indican que la resistencia al aplastamiento del mortero es proporcional a ambas variables y es la capacidad del mortero la que gobierna principalmente el comportamiento de la conexión
Usando el método de regresión múltiple se desarrollaron dos ecuaciones empíricas que describen la resistencia al aplastamiento de cada material en función de las variables antes mencionadas. Adicionalmente, usando los resultados obtenidos se llevó a cabo una serie de análisis estadísticos que contempló un análisis de aproximación a una distribución, una simulación de Montecarlo, un análisis Weibull entre otros. El anterior proceso se desarrolló con el objetivo de obtener una

OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO:

El objetivo principal del proyecto es complementar el conocimiento adquirido sobre el comportamiento de la guadua y del mortero ante solicitaciones de carga impuestas por un elemento puntual como un perno o una varilla roscada. Adicionalmente, el propósito de los ensayos adelantados es determinar con mayor certeza la resistencia al aplastamiento o esfuerzo de contacto de ambos materiales en función de variables de diseño como el diámetro del perno, la distancia del perno al nudo de guadua y la resistencia a la compresión de diseño del mortero de relleno.
Por otra parte, se puede identificar objetivos específicos derivados del propósito original planteado:

Determinar la influencia del diámetro del perno y de la resistencia de diseño del mortero en la falla por aplastamiento del material y desarrollar un modelo que calcule la resistencia al aplastamiento del mismo como función de esas dos variables de entrada.

Determinar la influencia de la distancia de ubicación del perno respecto al nudo de cada cañuto de guadua y desarrollar un modelo análogo al de mortero en función del diámetro del perno y de la distancia de ubicación del perno respecto al nudo del cañuto.

Realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos que permita determinar valores de diseño probabilísticos más cercanos a la realidad en función de la confiabilidad deseada por el diseñador.

Revisar el modelo desarrollado por el grupo CIMOC para el cálculo de capacidad de uniones pernadas tipo Simón Vélez para que incluya parámetros de resistencia de tipo probabilístico; y si es necesario, recalibrar las ecuaciones usadas por el programa para el cálculo de la resistencia al aplastamiento de la guadua y el mortero.

METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE GRADO:

Se realizaron 80 ensayos de aplastamiento en mortero en el laboratorio de modelos estructurales, se variaba la resistencia a la compresión del mortero y el diámetro del perno actuador.

Además se realizaron 30 ensayos de aplastamiento en guadua variando el diámetro del perno y la distancia al nudo del cañuto

Por último se procesaban los datos con ayuda de software estadístico.

CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE GRADO:

El desarrollo de todas las etapas de este proyecto ha permitido generar conocimiento concerniente a una de las propiedades básicas de la guadua la cual juega un papel muy importante al momento de diseñar una estructura usando este material. Se consolidó la información obtenida en proyectos anteriores relacionados con el tema, especialmente aquellos adelantados por el grupo de investigación CIMOC enmarcados en el contexto del proyecto global Validación Tecnológica del Comportamiento de Estructuras de Guadua Rolliza seca e inmunizada.
De la experiencia de ejecutar los ensayos, procesar los datos y analizar los mismos se pueden formular las siguientes conclusiones:

Se identificó que las variables más importantes que influyen sobre la resistencia al aplastamiento del mortero son el diámetro del perno de conexión y la resistencia a la compresión del material. La primera no tiene una influencia tan importante como la segunda y muestra un comportamiento inversamente proporcional.

En el caso de la guadua se comprobó que el diámetro del perno, a pesar de tener cierta influencia sobre la resistencia, no es el factor decisivo sobre el cual se debe hacer control minucioso, sino que la mayor influencia depende de la distancia de éste al nudo del cañuto

Se realizó un análisis probabilístico de los resultados desde dos puntos de vista diferentes: la determinación de la mejor distribución que se ajuste a los datos y un análisis Weibull. En ambos casos se planteó un modelo basado en la confiabilidad con que el usuario desee realizar su diseño. Se comprobó que la resistencia al aplastamiento del mortero sigue una distribución Normal. En el caso de la guadua no hubo éxito en esta labor debido a que los resultados obtenidos no se podían asociar de forma precisa a ninguna distribución típica; por el contrario, la guadua presenta valores de resistencia en un amplio rango de valores sin una concentración de densidad específica por lo que se puede afirmar que su comportamiento se asemeja al de una distribución uniforme.

Adicional a los dos modelos probabilísticos, se planteó un tercer modelo con mayor precisión (pero igual de sencillo) que tiene en cuenta las variables influyentes antes mencionadas. Este modelo se planteó aplicando una regresión lineal múltiple que arroja una ecuación lineal muy sencilla con dos variables independientes.

Todos los modelos de análisis estadísticos realizados arrojaron resultados compatibles entre sí con valores similares, por lo que se puede concluir que el diseñador tiene un punto de partida confiable a partir del cual definir que tan conservador va a ser su diseño.

Se realizó un análisis de falla de cada material que indica que el a pesar de que la capacidad al aplastamiento del mortero es relativamente baja (proporcional a su resistencia a la compresión), éste puede desarrollar resistencias muy superiores debido a la condición de confinamiento impuesta por la acción restrictiva de la guadua. Respecto a la guadua se puede apreciar que presenta una falla dúctil lo cual implica que es tiene una buena capacidad de absorción y disipación de energía y que por lo tanto se comportaría de manera segura al ingresar en el rango inelástico en un evento sísmico. Además se comprobó que cumple el criterio de falla "Leak Before Break".

*PALABRAS CLAVES (TEMAS) DEL TRABAJO DE GRADO:

Resistencia al aplastamiento
Guadua
Mortero
Distribución de probabilidad
Análisis Estadístico
Weibull
Montecarlo

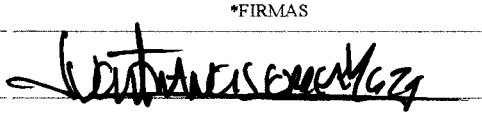
ACUERDOS DE CONFIDENCIALIDAD: • NO TIENE ACUERDO(S) TIENE ACUERDO(S)

Si selecciona tener acuerdo de confidencialidad, por favor diligencie el siguiente cuadro:

| Persona natural o jurídica | Desde | | | Hasta | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | DD | MM | AAAA | DD | MM | AAAA |

**3. FIRMAS**

| AUTORES (Nombre completo) | *FIRMAS |
|---|---|
| Juan José Corvajal Certuche | |

| DIRECTORES / ASESORES (Nombre completo) | *FIRMAS |
|---|---|
| JUAN FRANCISCO J. CORGAL RAZA |  |

| JURADO / LECTOR (Nombre completo) | *FIRMAS |
|---|---|
| UNIVERSIDAD DE LOS ANDES<br>Facultad de Ingeniería<br>Departamento de Ingeniería Civil<br>y Ambiental | UNIVERSIDAD DE LOS ANDES<br>Facultad de Ingeniería<br>Departamento de Ingeniería Civil<br>Ambiental |

Las firmas de Autor y Director/Asesor son obligatorias. Si tiene inconvenientes con el registro de la firma del Jurado/Lector, deberá tramitar ante la respectiva Facultad la autorización para registrar las firmas de pares o un sello que justifique la ausencia de la firma faltante.

SB-09

Verificar Información Imprimir

Universidad de los Andes

# ENTREGA EJEMPLAR TRABAJO DE GRADO Y AUTORIZACIÓN DE SU USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Yo Juan José Carvajal Certuche , mayor de edad, vecino de Bogotá D.C., identificado con la Cédula de Ciudadanía N° 1019047648 de Bogotá , actuando en nombre propio, en mi calidad de autor del trabajo de tesis, monografía o trabajo de grado denominado: DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO DE LA GUADUA ROLLIZA (ANGUSTIFOLIA KUNTH) Y DEL MORTERO COMÚN

, hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos del ser el caso, en formato digital o electrónico (CD-ROM) y autorizo a LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento. PARÁGRAFO: La presente autorización se hace extensiva no sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material, sino también para formato virtual, electrónico, digital, óptico, usos en red, internet, extranet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

EL AUTOR - ESTUDIANTES, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y tiene la titularidad sobre la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL ESTUDIANTE - AUTOR, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Bogotá D.C., a los Catorce 14 días del mes de Enero de Dos Mil Doce 20 12 .

**EL AUTOR - ESTUDIANTE.**

(Firma) .....

Nombre Juan José Carvajal Certuche

C.C. N° 1019047648 de Bogotá

SB-10

**Página 1 de 1 [Vertical]** Borrar Datos