

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 1

Neiva, Huila

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad: Neiva

El (Los) suscrito(s):

Juan Pablo Ceballos Laiseca, con C.C. No. 1075307409,

Víctor Andrés Rojas Ramos, con C.C. No. 1004083304,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado Determinación de la adherencia del concreto reforzado con guadua angustifolia aplicando análisis de elementos finitos presentado y aprobado en el año 2024 como requisito para optar al título de Ingeniero Civil;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

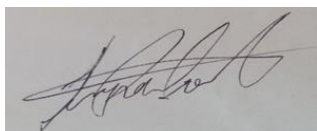
- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de 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.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____



Firma: _____



Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS				   	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO					
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA 1 de 3

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Determinación de la adherencia del concreto reforzado con guadua angustifolia aplicando análisis de elementos finitos

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Ceballos Laiseca	Juan Pablo
Rojas Ramos	Víctor Andrés

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Duarte Toro	Mauricio
Martínez Palmeth	Luis Humberto

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería Civil

CIUDAD: **AÑO DE PRESENTACIÓN:** **NÚMERO DE PÁGINAS:**

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general_x___ Grabados___
 Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas
 o Cuadros_x_

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS					   	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO					ISO 9001 ISO 14001 ISO 45001 INCOPEC	
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*): MERITORIO

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Adherencia	Adherence
2. Guadua	Bamboo
3. Concreto	Concrete
4. Resina	Resine
5. Fricción	Friction
6. Elementos Finitos	Finite Elements

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Este estudio determinó la adherencia entre el concreto y la Guadua angustifolia mediante ensayos adaptados de la norma ASTM-C234, permitiendo obtener resultados concretos sobre el esfuerzo de adherencia y coeficiente de fricción entre ambos materiales por medio del desarrollo de un diseño experimental que considera dos factores en el tratamiento de tablillas rectangulares de guadua fabricadas. Se diseñaron cuatro tratamientos combinando el factor configuración, que considera tablillas lisas (L) o acanaladas (A), y el factor rugosidad con y sin la aplicación de resina epóxica (R, S) y se realizaron ensayos de tracción en probetas de concreto a 7, 14 y 28 días de curado. Se fabricaron 36 probetas, ensayadas con una máquina universal Shimadzu para medir esfuerzos y desplazamientos.

El análisis mostró diferencias significativas en la adherencia según los tratamientos y tiempos de curado. La aplicación de resina resultó ser un factor crucial a los 28 días. El tratamiento AR (acanalada con resina) mostró los mejores resultados, con un esfuerzo de adherencia 3.92 veces superior al tratamiento LS (lisa sin resina) y un coeficiente de fricción 7% mayor. Las grietas por falla se presentaron mayormente en el desplazamiento crítico, el cual fue mayor con tratamientos AR, sugiriendo su posible uso en refuerzos estructurales con guadua.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS						
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 3

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This study determined the adhesion between concrete and Guadua angustifolia through tests adapted from the ASTM-C234 standard, allowing concrete results to be obtained on the adhesion effort and friction coefficient between both materials through the development of an experimental design that considers two factors. in the treatment of manufactured guadua slats. Four treatments were designed combining the configuration factor, which considers smooth (L) or grooved (A) slats, and the roughness factor with and without the application of epoxy resin (R, S) and tensile tests were carried out on concrete specimens at 7, 14 and 28 days of curing. 36 specimens were manufactured, tested with a Shimadzu universal machine to measure forces and displacements.

The analysis showed significant differences in adhesion depending on the treatments and curing times. The resin application turned out to be a crucial factor at 28 days. The AR treatment (ribbed with resin) showed the best results, with an adhesion effort 3.92 times higher than the LS treatment (smooth without resin) and a friction coefficient 7% higher. Failure cracks occurred mostly at the critical displacement, which was greater with AR treatments, suggesting its possible use in structural reinforcements with guadua.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Jackson Andrés Gil Hernández

Firma:



Nombre Jurado:

Jaime Izquierdo Bautista

Firma:



Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



Determinación de la adherencia del concreto reforzado con guadua angustifolia aplicando análisis de elementos finitos

Juan Pablo Ceballos Laiseca

Víctor Andrés Rojas Ramos

Universidad Surcolombiana de Colombia

Facultad de ingeniería

Neiva, Colombia

2024

Determinación de la adherencia del concreto reforzado con guadua angustifolia aplicando análisis de elementos finitos

Juan Pablo Ceballos Laiseca

Víctor Andrés Rojas Ramos

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniería Civil

Director (a):

MSc. Mauricio Duarte Toro

Codirector (a):

Ph.D. Luis Humberto Martinez Palmeth

Línea de Investigación:

Materiales de construcción no convencionales

Universidad Surcolombiana de Colombia

Facultad de ingeniería

Neiva, Colombia

2024

A mis padres y abuela, Luz Dary, Héctor y Adelaida, por su inmenso apoyo, esfuerzo y respaldo, a Karen Eliana por siempre motivarme y apoyarme -J

A mis queridos abuelos maternos Ricardo y Griselda, y paternos Miguel y Mercedes, a mis amigos Juan Bahena, Juan Ceballos, Cristian y Adonis con quienes supere momentos difíciles y especialmente a mi hermana y mis padres, Flor Roció y Víctor Rojas, quienes son y seguirán siendo el motor de mi vida. -V

La ciencia se corrompe con facilidad si dejamos que se estanque. - Edmund Burke

El deseo por conocer... es la motivación que fundamenta la ciencia. - Ishigami Senkuu

Resumen

El presente estudio aborda la determinación de la adherencia entre el concreto y la *Guadua angustifolia*, centrándose en la ejecución de ensayos de adherencia mediante una adaptación de la norma ASTM-C234 (American Society for Testing and Materials. 1991). Estos permiten obtener resultados concretos sobre el esfuerzo de adherencia y coeficiente de fricción entre ambos materiales por medio del desarrollo de un diseño experimental que considera dos factores en el tratamiento de las tablillas de guadua fabricadas. El primer factor es la configuración que va directamente relacionada con la morfología de la tablilla, presentando dos niveles: Lisa (L) o Acanalada (A), el segundo factor es la rugosidad que considera la aplicación de una resina epóxica (Topex-Dur 1-1) la cual también presenta dos niveles: Aplicación de resina (R) y omisión de resina en las tablillas (S); resultando un total de 4 tratamientos tras su combinación, además se considera la incidencia del tiempo de curado del concreto para 7, 14 y 28 días. Se fabricaron 3 muestras por cada tratamiento, para un total de 36 probetas de concreto con una tablilla de guadua empotrada a 10 centímetros en el interior del cilindro de concreto, el cual por su diseño de mezcla tiene una capacidad de carga a compresión de 21 MPa. Estas probetas fueron ensayadas bajo la prueba de tracción en la máquina universal Shimadzu, en la Universidad Surcolombiana-Laboratorio de estructuras- Facultad de Ingeniería, mediante adaptaciones propuestas con el fin de garantizar la óptima realización del experimento y toma de los datos necesarios (Fuerza y Desplazamiento), con el fin de determinar el valor del esfuerzo y el coeficiente de fricción en los tratamientos.

La comparación entre los resultados experimentales y teóricos permite una comprensión más profunda de la adherencia entre el concreto y la guadua, el análisis estadístico confirmó que hay una diferencia significativa en los resultados con diferentes tratamientos para los 7 y 14 días de curado, sin embargo, a los 28 días el factor que más influye en estos es la aplicación de un aditivo epóxico entre ambos materiales. Además, los datos obtenidos por el modelo matemático confirman que el acanalamiento y el uso de resina (AR), en la guadua permite mejorar el esfuerzo de adherencia, estos especímenes demostraron tener los mejores resultados, siendo 3.92 veces superior al obtenido con guadua lisa sin resina (LS), de igual forma se encontró que el coeficiente de fricción del tratamiento AR era un 7% mayor que respecto a LS ; las grietas por falla, se presentaron mayormente en el desplazamiento crítico de la probeta, obteniendo mayores valores para tratamientos AR, convirtiéndose en un factor indispensable para considerar la guadua como parte del refuerzo en estructuras de ocupación normal y especial.

Palabras clave: Adherencia, Guadua, Concreto, Resina, Fricción, Elementos finitos

Abstract

The present study addresses the determination of adherence between concrete and *Guadua angustifolia*, focusing on the execution of adherence tests through an adaptation of ASTM-C234 standard (American Society for Testing and Materials, 1991). These tests allow obtaining concrete results on the adherence strength and coefficient of friction between both materials through the development of an experimental design considering two factors in the treatment of manufactured *Guadua* slats. The first factor is the configuration directly related to the slat's morphology, presenting two levels: Smooth (L) or Grooved (A), the second factor is the roughness which considers the application of an epoxy resin (Topex-Dur 1-1) which also presents two levels: Application of resin (R) and omission of resin in the slats (S); resulting in a total of 4 treatments after their combination, also considering the incidence of concrete curing time for 7, 14, and 28 days. Three samples were manufactured for each treatment, for a total of 36 concrete specimens with a *Guadua* slat embedded at 10 centimeters inside the concrete cylinder, which due to its mix design has a compression load capacity of 21 MPa. These specimens were tested under tensile strength using the Shimadzu universal machine, at the Universidad Surcolombiana-Structures Laboratory-Faculty of Engineering, through proposed adaptations to ensure the optimal execution of the experiment and data collection (Force and Displacement), in order to determine the value of the stress and coefficient of friction in the treatments.

Comparing the experimental and theoretical results allows for a deeper understanding of the adherence between concrete and *Guadua*. Statistical analysis confirmed a significant difference in results with different treatments for the 7 and 14 days of curing; however, at 28 days, the factor that most influences these results is the application of an epoxy additive between both materials. Additionally, the data obtained from the mathematical model confirm that grooving and the use of resin (GR) in *Guadua* improve the adherence strength. These specimens demonstrated the best results, being 3.92 times superior to those obtained with smooth *Guadua* without resin (SR). Similarly, it was found that the friction coefficient of the GR treatment was 7% higher compared to SR; failure cracks were mostly observed at the critical displacement of the specimen, obtaining higher values for GR treatments, becoming an indispensable factor to consider *Guadua* as part of reinforcement in structures for normal and special occupancy.

Keywords: Adherence, Bamboo, Concrete, Resin, Friction, Finite Elements

Contenido

1. Introducción.....	16
1.1 Antecedentes	17
1.2 Justificación	19
1.3 Objetivos	20
1.3.1 Objetivo general	20
1.3.2 Objetivos específicos	20
1.4 Estructura del documento.....	21
2. Marco teórico.....	22
2.1 Guadua angustifolia kunth. (Guadua)	22
2.2 Propiedades mecánicas la guadua (Especie Guadua Angustifolia Kunth)	22
2.3 Propiedades elásticas de la guadua (Especie Guadua Angustifolia Kunth)	22
2.3.1 Morfología del bambú	23
2.4 Adherencia	23
2.5 Ley de Hooke	24
2.5.1 Ley de Hooke en sólidos elásticos.....	25
2.5.1.1 Materiales elásticos isótropos	25
2.5.1.2 Materiales elásticos ortótropos.....	26
2.6 Propiedades mecánicas y aditivas del concreto reforzado.....	26
2.7 Ensayos a los materiales.	27
2.8 Resina epóxica	27
2.9 Almacenamiento de materiales.....	27
2.10 Análisis de varianza (ANOVA).....	28
2.11 Test HSD de Tukey.	28
2.12 FreeCAD	28
2.13 PrePoMax.....	28
2.13.1 Región maestra y esclava.....	29
2.13.2 Parámetros de mallado (Meshing)	29
2.13.3 Modelos de interacción (Surface interactions).....	29
2.13.3.1 Comportamiento superficial.....	29
2.13.3.2 Coeficiente de fricción (Friction coefficient)	29
2.13.3.3 Pendiente de la curva de adherencia (Stick slope)	30
3. Metodología.....	31
3.1 Primera fase-Revisión Bibliográfica	31
3.2 Segunda fase-Diseño de Mezcla y Ensayos de Adherencia.....	31
3.2.1 Adaptación de la maquina universal.....	32
3.2.2 Procedencia de los materiales.	32

3.2.3	Agregado fino y grueso.....	33
3.2.4	Guadua.....	33
3.2.5	Diseño de mezcla.....	33
3.3	Tercera fase.....	34
3.3.1	Pretratamiento al refuerzo de Guadua.....	34
3.3.2	Dimensiones y corte de probetas.....	35
3.3.3	Aplicación de resina.....	36
3.3.4	Preparación y curado de las probetas.....	37
3.4	Cuarta fase.....	38
3.4.1	Prueba de ensayo de adherencia.....	38
3.4.1.1	Pieza metálica.....	38
3.4.2	Montaje y Adquisición de datos.....	39
3.5	Quinta fase. Descripción los métodos estadísticos usados.....	40
3.6	Sexta fase: Modelado 3D de probetas con FreeCAD.....	41
3.6.1	Espécimen de concreto configuración-Lisa.....	41
3.6.2	Espécimen de concreto configuración-Acanalada.....	42
3.7	Elaboración del modelo matemático con PrePoMax.....	43
3.7.1	Análisis de los tratamientos de configuración-Lisa (L) con rugosidad (R)-con resina y sin resina (S).	43
3.7.1	Análisis de los tratamientos de configuración-acanalada (A) con rugosidad (R)-con resina y sin resina (S).	45
3.8	Séptima fase: Comparativa entre los resultados teóricos y experimentales.....	46
4.	Resultados y análisis de resultados.....	47
4.1	Diseño de mezcla.....	47
4.1.1	Caracterización de los materiales.....	47
4.2	Sección promedio y área de contacto por tratamiento.....	48
4.2.1	Tablillas de configuración lisa.....	48
4.2.2	Tablillas de configuración acanalada.....	49
4.3	Esfuerzo de adherencia por tratamiento.....	51
4.3.1	Esfuerzos presentados en tablillas lisas (L).....	51
4.3.2	Esfuerzos presentados en tablillas acanaladas (A).....	52
4.4	Coeficiente de fricción por tratamiento.....	53
4.5	Ajuste del modelo para los esfuerzos por tratamiento.....	56
4.5.1	Comparativa de esfuerzos teóricos y experimentales.....	59
4.6	Análisis estadístico para esfuerzo de adherencia.....	60
4.6.1	Estadística descriptiva.....	60
4.6.2	Gráficos de cajas y bigotes por esfuerzo y coeficiente.....	65
4.6.3	ANOVA Multifactorial.....	67
4.6.3.1	Análisis ANOVA multifactorial – Esfuerzo a 28D.....	68
4.6.3.2	Análisis ANOVA multifactorial – Coeficiente a 28D.....	69
4.6.4	Prueba de Tukey.....	69
4.6.5	Gráficos de interacción.....	71

4.6.5.1	Esfuerzos	71
4.6.5.2	Coeficiente	71
4.6.6	Discusión de resultados	72
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	75
5.1	Conclusiones.....	75
5.2	Recomendaciones.....	76
6.	Bibliografía.....	77

Lista de Figuras

Figura 2-1: La tacuara (Bambú) como material de construcción es utilizada en diferentes aplicaciones a través del aprovechamiento de sus diámetros y longitudes. Tomado de Tecnología del bambú (p. 72), por (Gómez Castro & Acha Daza, 2010).....	23
Figura 2-2: Valores de cálculo de tensión de adherencia F_{bd} [Mpa], según UNE-ENV-1992, para buenas condiciones de adherencia.	26
Figura 2-3: Norma UNE-EN 12812. Coeficiente de rozamiento para varias combinaciones de materiales	30
Figura 2-4: Adherencia por fuerza cortante vs desplazamiento tangencial	30
Figura 3-1: Plano para la elaboración de la pieza	32
Figura 3-2: Apilamiento de bolsas, vaciado y mezclado de (a) agregado fino (arena) y (b) agregado grueso (grava).....	33
Figura 3-3: Perforación para tratamiento de culmos de guadua	35
Figura 3-4: Culmos de bambú con Lorsban liquido más ACPM.	35
Figura 3-5: Detalle de sección y corte de los culmos de guadua.....	36
Figura 3-6: Dimensiones para la tablilla lisa y acanalada.....	36
Figura 3-7: Topex Dur 1-1 para aplicación de las tablillas de guadua.....	37
Figura 3-8: Tanque utilizado para el proceso de curado.....	38
Figura 3-9: Vista frontal y lateral de la pieza metálica	39
Figura 3-10: Pieza metálica ensamblada en la maquina universal preparada para realizar el ensayo a tracción.....	39
Figura 3-11: Guadua saliendo del cilindro de concreto.....	40
Figura 3-12: Resultado final A.	42
Figura 3-13: Resultado final B.	43
Figura 3-14: Propiedades utilizadas y resultado de análisis preliminar.	45
Figura 3-15: Condición fija interna para caso acanalado.....	45
Figura 4-1: Ejemplo de registro de sección de tablillas. S: superior; I: inferior; Iz: izquierda; D: derecha.....	48
Figura 4-2: Comparación de áreas de contacto para tablillas Lisas y Acanaladas	50
Figura 4-3: Fuerzas para el cálculo para el coeficiente de fricción de las probetas	54
Figura 4-4: Grietas por esfuerzo máximo y localización según Prepomax	60

Lista de Gráficos

Grafica 4-1: Comparativa del análisis de sensibilidad de malla de los resultados calculados por Prepomax para los tratamientos promedio LR28, LS28, AR28 y AS28	57
Grafica 4-2: Pendientes de adherencia para tratamientos con tablilla lisa (L).....	58
Grafica 4-3: Pendientes de adherencia para tratamientos con tablilla acanalada (A)	58
Grafica 4-4: Comportamiento en el tiempo del esfuerzo de tracción promedio por tipo de tratamiento.	63
Grafica 4-5: Comportamiento en el tiempo del coeficiente de fricción promedio por tipo de tratamiento.	64
Grafica 4-6: Comparación de comportamiento en el tiempo del esfuerzo y coeficiente de fricción promedio por tipo de tratamiento.	65
Grafica 4-7: Diagrama de caja del factor configuración (Acanalado vs Lisos) para los esfuerzos	66
Grafica 4-8: Diagrama de caja del factor rugosidad (Con resina vs Sin resina) para los esfuerzos.....	66
Grafica 4-9: Diagrama de caja del factor configuración (Acanalado vs Lisos) para el coeficiente.....	67
Grafica 4-10: Diagrama de caja del factor rugosidad (Con resina vs Sin resina) para el coeficiente.	67
Grafica 4-11: Grupos y Rangos de test HSD de Tukey de los factores configuración y rugosidad para los esfuerzos.	70
Grafica 4-12: Grupos y Rangos de test HSD de Tukey de los factores configuración y rugosidad para el coeficiente.....	70
Grafica 4-13: Promedio de los esfuerzos según los factores de configuración y rugosidad en relación a su dependencia	71
Grafica 4-14: Promedio del coeficiente de fricción según los factores de configuración y rugosidad en relación a su dependencia	72

Lista de Tablas

Tabla 3-1: Ensayos para los agregados.	34
Tabla 3-2: nomenclatura de cilindros para prueba de adherencia concreto-guadua.	37
Tabla 3-3: Recopilación de propiedades elásticas y mecánicas del concreto y la guadua.	44
Tabla 4-1: Caracterización de los materiales.	47
Tabla 4-2: Áreas de contacto para tablillas lisas	49
Tabla 4-3: Áreas de contacto para tablillas acanaladas.....	51
Tabla 4-4: Resultados de pruebas de extracción para tablillas lisas.....	52
Tabla 4-5: Resultados de pruebas de extracción para tablillas acanaladas	53
Tabla 4-6: Coeficiente de fricción para las probetas ensayadas	56
Tabla 4-7: Ajustes del modelo por tratamiento para configuración L y A	59
Tabla 4-8: Comparativa de esfuerzos máximos obtenidos mediante ensayo experimental y análisis del software Prepomax	60
Tabla 4-9: Recopilación de resultados de muestras distinguidas por configuración y rugosidad para tratamiento estadístico	61
Tabla 4-10: Estadística descriptiva del esfuerzo y coeficiente resultante por tipo de tratamiento.	62
Tabla 4-11: Tabla de ANOVA multifactorial para los esfuerzos a 28 días.....	68
Tabla 4-12: Tabla de ANOVA multifactorial para los coeficientes a 28 días.	68
Tabla 4-13: Medias por Mínimos Cuadrados para ESFUERZOS con intervalos de confianza del 95%	68
Tabla 4-14: Medias por Mínimos Cuadrados para COEFICIENTES con intervalos de confianza del 95%...69	
Tabla 4-15: Comparativa de esfuerzos de adherencia y coeficiente de fricción promedio por tratamiento (28D).....	72
Tabla 4-16: Comparación con otros autores de la capacidad de adherencia (kg/cm ²) entre el concreto y la guadua.....	73
Tabla 4-17: Comparativa de resultados de tracción para probetas con acero corrugado y tablillas de tratamiento AR28.....	74
Tabla 4-18: Comparativa de límites para coeficientes de fricción entre guadua y concreto	74

Lista de anexos

	Pág.
Anexo A. Diseño de mezcla por el método ACI	81
Anexo B. Caracterización de los materiales	95
Anexo C. Caracterización dimensional de las tablillas	101
Anexo D. Verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)	103

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
E	Módulo de elasticidad	Gpa	Ecuación 2.3
F_{bd}	Tensión de adherencia	Mpa	p. 26
Q	Estadístico de prueba de Tukey	Adim.	p. 28
f'_c	Resistencia especificada a la compresión del concreto	MPa	p. 37
K	Constante de comportamiento superficial	Adim.	p. 48
F_R	Fuerza resultante	N	p. 57
F_{Tr}	Fuerza máxima del ensayo	N	p. 57
F_p	fuerza normal del peso del cilindro	N	p.57
a	aceleración	m/s ²	p. 58
F_F	Fuerza de fricción	N	Ecuación 2.1
F_N	Fuerza normal	N	Ecuación 2.1
n	Coeficiente de fricción	Adim.	Ecuación 2.1
P	Fuerza aplicada	N	Ecuación 2.2
A_s	Área de sección de las tablillas	cm ²	Ecuación 4.1
Gr	Grosor de tablilla de guadua	cm	Ecuación 4.1
An	Ancho de tablilla de guadua	cm	Ecuación 4.1
Em	Empotramiento de guadua en concreto	cm	Ecuación 4.2
F_p	Fuerza que ejerce la probeta	N	Ecuación 4.5
m_{PROM}	Masa del promedio de las probetas	Kg	Ecuación 4.5
V_{Ens}	Velocidad del ensayo	m/s	Ecuación 4.6.2
t_{Ens}	Tiempo de duración del ensayo	s	Ecuación 4.6.2
$D_{S\text{ aparente}}$	Densidad Aparente	Kg/m ³	NTC 237-176
D_{SSS}	Densidad Aparente Saturada y seca	Kg/m ³	NTC 237
$D_{S\text{ nominal}}$	Densidad Nominal	Kg/m ³	NTC 237

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
σ	Esfuerzo	Kg/cm ²	Fuerza/Área
σ_t	Esfuerzo máximo de tracción	Kg/cm ²	Fuerza/Área
ν	Coeficiente de Poisson	Adim.	p. 25
τ	Esfuerzo cortante	Pa	p. 30
δ	Desplazamiento	mm	Ecuación 2.2
ϵ	Deformación lineal	mm	Ecuación 2.3
K	Constante de proporcionalidad	Adim.	Ecuación 2.2

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>HSD</i>	Test Honestly-Significant-Difference de Tukey
<i>FAO</i>	Food and Agriculture Organization
<i>ACI</i>	American Concrete Institute
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>NSR-10</i>	Norma Sismo Resistente 2010
<i>AASHTO</i>	American Association of State Highway and Transportation
<i>ICONTEC</i>	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
<i>NTC</i>	Norma Técnica Colombiana
<i>ANOVA</i>	Análisis de varianza
<i>TMN</i>	Tamaño Máximo Nominal
<i>PCA</i>	Portland Cement Association
<i>ACPM</i>	Aceite Combustible Para Motores
<i>FEM</i>	Análisis y procesamiento de elementos finitos
<i>EP</i>	Resina epóxica
<i>BCs</i>	Condiciones de contorno - Prepomax
<i>CV</i>	Coeficientes de variación
<i>L</i>	Tablilla de guadua Lisa
<i>A</i>	Tablilla de guadua Acanalada
<i>R</i>	Con resina
<i>S</i>	Sin resina
<i>Cr</i>	Agregado de canto rodado
<i>Tr</i>	Agregado triturado
<i>Mix</i>	Agregado mixto

H_0	Hipótesis nula
H_1	Hipótesis alterna
$P. U$	Peso Unitario o Masa Unitaria
Abs	Absorción
Lb	Libra – sistema ingles
plg	Pulgada – sistema ingles
Psi	Pounds-force per square inch
Pa	Pascal – Sistema internacional
Mpa	Megapascal – Sistema internacional
Gpa	Gigapascal – Sistema internacional
Kg	Kilogramo – Sistema internacional
m	Metros – Sistema internacional
cm	Centímetros - Sistema internacional
mm	Milímetros - Sistema internacional
min	Minutos - Tiempo

Capítulo 1

1. Introducción

Durante las últimas décadas la población ha aumentado de forma exponencial, aumentando la demanda de bienes y servicios que utilizan energía para ser producidos como indica la (FAO, 2008) “Los incrementos mayores en la demanda de energía se registrarán en los países en desarrollo, donde se pronostica que la producción mundial del consumo de energía habrá de aumentar del 46% al 58% entre 2004 y 2030”.

La industria ha sido el consumidor predominante de energía en las sociedades a nivel histórico, de acuerdo con (Petrecca, 2014) siendo equivalente al 30% de consumo de energía en un país industrializado. Para lograr minimizar los impactos de las actividades antrópicas en el medio ambiente y poder preservar los lugares que habitamos de forma óptima, es necesario, así como lo expresa (Mishra, Kumar, & Maity, 2019) “El uso de materiales alternativos respetuosos con el medio ambiente, como el bambú, se ha incrementado en las últimas décadas para construir infraestructuras civiles sostenibles con un impacto medioambiental mínimo”.

La construcción es una de las actividades que consume gran parte del porcentaje de energía que se produce en la industria, uno de los materiales de mayor demanda es el concreto, pero este material por sí solo presenta fallas frágiles, por ende, se crearon materiales compuestos para proporcionarle la ductilidad necesaria y de esta forma las estructuras puedan disipar energía de forma idónea en situaciones críticas como un evento sísmico. (Mali & Datta, 2020)

Las investigaciones en el uso de la guadua como material de refuerzo para el concreto han revalidado su implementación no solo por su ventaja ecológica y económica, sino por su buena capacidad de carga última, así lo da a conocer la investigación de (Ghavami, 1995) donde se demostró que un elemento estructural como lo es una viga de concreto reforzado con bambú puede resistir cuatro veces más que una viga de concreto simple; el mayor desafío del concreto reforzado con guadua radica en los cambios en el volumen del refuerzo cuando este absorbe el agua de la mezcla de concreto en su estado húmedo (Ghavami 2005), en esta etapa, el refuerzo se expande inicialmente y luego experimenta una reducción de su tamaño, esto ocurre debido a que las partículas de cemento reaccionan con el agua presente en las fibras de guadua, esto resulta en la pérdida de la adherencia entre la guadua y el concreto. Poveda, W. (2011) por su parte, encontró que los esfuerzos que se presentan en la interacción de la guadua con el concreto son en promedio de 7.25kg/cm^2 con un área de contacto promedio de 231 cm^2 .

Esta investigación está enfocada en determinar la adherencia entre el concreto y la Guadua angustifolia partiendo de un diseño experimental multifactorial que considera 2 factores en el tratamiento de las tablillas de guadua fabricadas. El primer factor es la configuración que va directamente relacionada con la morfología de la tablilla, presentando dos niveles: Lisa (L) o Acanalada (A), el segundo factor es la rugosidad que considera la aplicación de una resina epóxica (Topex-Dur 1-1) la cual también presenta dos niveles: Aplicación de resina (R) y omisión de resina en las tablillas (S); resultando un total de 4 tratamientos tras su combinación, además se considera la incidencia del tiempo de curado del concreto para 7, 14 y 28 días. Se fabricaron 3 muestras por cada tratamiento, para un total de 36 probetas de concreto con una tablilla de guadua empotrada a 10 centímetros en el interior del cilindro. Estas probetas fueron ensayadas bajo la prueba de tracción en la máquina universal Shimadzu, en la Universidad Surcolombiana- Laboratorio de estructuras- Facultad de Ingeniería, mediante adaptaciones propuestas con el fin de garantizar la óptima realización del experimento y toma de los datos necesarios (Fuerza y Desplazamiento), con el fin de determinar el valor del esfuerzo y el coeficiente de fricción en los tratamientos; concluyendo con un análisis estadístico de relevancia que comparó los resultados obtenidos, permitiendo identificar el mejor tratamiento propuesto a la hora de introducir a la guadua como elemento de refuerzo. Además, se utilizó un software de modelación computacional (FreeCAD), y de análisis de elementos finitos (Prepomax) que fue ajustado hasta obtener esfuerzos de adherencia similares a los experimentales, permitiendo identificar las zonas de mayor esfuerzo durante la interacción concreto-guadua en sus superficies.

1.1 Antecedentes

Con la llegada de nuevas herramientas y avances tecnológicos en el área de la ingeniería, es cada vez más evidente su impacto en campos tan importantes como la construcción y el diseño, hoy en día los procesos que requieren cálculos grandes y complejos pueden simplificarse haciendo uso de software especializado en el cálculo y análisis del comportamiento estructural, produciendo así resultados rápidos y confiables. Herramientas tan impresionantes como esta abren la posibilidad a un estudio aún más amplio que antes, debido a que con los datos e información correcta se da cabida al análisis de estructuras construidas con materiales no convencionales (guadua).

A nivel internacional Poveda, W. (2011), investigó también sobre la adherencia entre la guadua y el concreto, utilizando probetas empotradas en cilindros de concreto (150mm x 300mm) a diferentes profundidades, con secciones de diferente tamaño, siendo T1 (0,9 cm x 0,9cm), T2 (1,9cm x 0,7cm), T3 (2,5cm x 0,6cm) y T4 (Probetas T3 con canalizaciones), T1, T2, y T4 tuvieron un tratamiento químico que mejora la adherencia, como resultado entre los primeros tres tipos la mejor fue T2 obteniendo una carga de extracción máxima igual a 1355 kg con un empotramiento de 30cm a los 28 días de fraguado, seguida de la probeta T3 con una carga de

extracción máxima de 530 kg y la probeta T1 con una de 520 kg, ambas a iguales condiciones que T2. Por su parte la probeta con canalizaciones fue la que mejor rendimiento obtuvo, presentando cargas de extracción de entre 935 kg (empotrada 10cm) y 1675 kg (empotrada 30cm) a los 28 días de fraguado, con un área de contacto de 231cm² o lo que sería igual, un $\sigma = 7.25\text{kg/cm}^2$, siendo esta última una falla por rotura, lo cual indica una excelente adherencia de este tipo de probetas.

Cuando observamos investigaciones de aditivos para mejorar la adherencia en la guadua, Vargas, W., Cerna, A., & Cuéllar, J. (2020), estudiaron el efecto del asfalto líquido de curado rápido RC-250 como agente impermeabilizante para bambú y su comportamiento cuando se adiciona arena media como elemento para mejorar la adherencia. El RC-250 se aplicó en frío. La función del asfalto sobre las tablillas de bambú era evitar la absorción de humedad del hormigón, reduciendo así la expansión del mismo que ocasiona una mala adherencia. Se utilizaron tablillas (2.5cm x 0.8cm) de guadua lisa y acanalada a las que se les aplicó el asfalto, luego se prepararon 48 especímenes cilíndricos de concreto de 4"x8" con tablillas de bambú que se incrustaron en longitudes de 15 cm y 20 cm. Las pruebas de adherencia se realizaron adaptando la norma (ASTM C234-71) a una velocidad de extracción de aproximadamente 0,61 mm/min y una frecuencia de 4 Hz, con cilindros de 14 y 28 días. Se realizó también una muestra de probetas con acero de 3/8". Se encontró que las tablas acanaladas con asfalto y arena obtuvieron el mejor comportamiento con un esfuerzo de 6,66 kg/cm², un 13,2% en comparación a la adherencia presentada entre el acero y el concreto de 50,55 kg/cm².

Boakye, Emmanuel. Osei, Jack. & Asamoah, Mark. (2018). Realizaron un modelo donde el comportamiento carga-deflexión de vigas de concreto reforzado por acero de 5/16" fue el principal punto de referencia para la validación de resultados. La precisión de la carga última del modelo osciló entre el 93,52 % y el 104,69 %, mientras que la precisión de la deflexión central final osciló entre el 94,26% y 102,37%. Se encontró entonces que el modelo de elementos finitos era ligeramente más rígido que la viga de prueba durante las primeras etapas de la carga. Sin embargo, la respuesta carga-deformación general del modelo se compara bien con las respuestas de los estudios experimentales. Esto garantiza la seguridad al trabajar con software como Abaqus y los modelos desarrollados.

A nivel nacional el concreto es conocido como un material con buena resistencia a la compresión, pero ofrece escasa resistencia a la tracción, por lo que resulta inadecuado para elementos estructurales que vayan a trabajar a tracción y flexión; por ende, es reforzado en masa disponiendo de materiales que trabajen de forma óptima las zonas de tracción, el elemento resultante llamado concreto "reforzado" comúnmente equipado por barras de acero, funciona cumpliendo las diferentes condiciones de los estados de carga y desplazamiento presente en la construcción. Cedeño, A. O., & González, M. J. (2016). He aquí donde nace la importancia de determinar la adherencia entre el material que trabajara con el concreto (guadua).

En la Universidad Javeriana de Colombia, Osorio, A. T. (2014), determinó el esfuerzo y deformación por adherencia entre el concreto y el acero siguiendo el método establecido en la norma (ASTM C234-91), se fabricaron moldes de 150 X 150 X 150 mm de acero y un espesor de 6 mm, se realizó un diseño de mezcla con varios agregados triturados (Tr), de canto rodado (Cr) y de tipo mixto (Mix), se hicieron 12 cubos por cada tipo de mezcla incrustando tamaños nominales de aceros diferentes (#3, #4, #5, #6) y 18 cilindros para fallar a compresión, los especímenes se curaron para pruebas a los 7 y 28 días, para esta última se obtuvo una resistencia máxima de 24.76 GPa (Cr), 24.23GPa (Mix) y 25,76GPa (Tr). Siguiendo la metodología de la norma, se ensayaron los cubos con ayuda de la máquina universal encontrando que las muestras con barra #3 fallaron por fluencia, obteniendo el mejor esfuerzo de adherencia (σ) igual a 89.51kg/cm², las muestras con barras #4, #5 y #6 fallaron por fractura del concreto con una adherencia máxima de 100.53kg/cm², 80.42kg/cm² y 80.76kg/cm² respectivamente con grava triturada.

1.2 Justificación

Gracias a lo establecido previamente, nace el interés de investigar la adherencia de la guadua colombiana para su uso en procesos constructivos, debido a la importancia ambiental que representa el uso de materiales orgánicos; si bien el acero es un material convencional que funciona adecuadamente a tracción y compresión junto al concreto, es importante avanzar en la investigación de materiales no convencionales como el bambú, como indican (Javadian, Wielopolski, Smith, & Hebel, 2016) el cual disminuye la contaminación asociada por la construcción y beneficia el aspecto económico en territorios subdesarrollados, fortaleciendo la industria, disminuyendo el desempleo y satisfaciendo la demanda de materiales de construcción a nivel local.

Este enfoque se respalda en investigaciones previas que han demostrado la similitud en resistencia entre elementos estructurales de concreto reforzado con acero y bambú, lo que valida la viabilidad de este método no convencional (Mishra, Kumar y Maity (2019)). Además, estudios de fuerza de adherencia han revelado que la aplicación de una resina epóxica, como Sikadur 32 Gel, Topex-Dur 1-1, (Ghavami, K. (2005)), aumenta significativamente la resistencia de la unión entre la guadua y el concreto, lo que fortalece aún más su capacidad de carga.

Para respaldar esta propuesta, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de datos experimentales y teóricos mediante el uso de herramientas tecnológicas especializadas. La recopilación de datos experimentales implica la realización de pruebas específicas en muestras de concreto reforzadas con guadua, lo que proporciona evidencia empírica sobre el rendimiento y la factibilidad de este material como refuerzo. Además, se emplean modelos teóricos que permiten realizar predicciones y análisis más allá de los límites del experimento, brindando una

comprensión completa de las capacidades y limitaciones de la guadua como refuerzo del concreto.

Para llevar a cabo este análisis de datos, se utilizan herramientas tecnológicas avanzadas como el software FreeCAD y Prepomax. FreeCAD permite la creación de modelos 3D de estructuras reforzadas con guadua, lo que facilita la visualización y comprensión de la interacción entre este material y el concreto. Por otro lado, Prepomax es un software especializado en la simulación de interacción de superficies, que proporciona cálculos detallados de la fuerza, resistencia y comportamiento de los elementos basados en los modelos. (Satinder, Hardeep & Jagbir Singh (2020)). Estas herramientas tecnológicas permiten evaluar de manera precisa y detallada la viabilidad del uso de la guadua como refuerzo de concreto, proporcionando resultados cuantitativos que respaldan la efectividad del sistema propuesto.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar la adherencia experimental y teórico de la guadua angustifolia en el concreto mediante la norma ASTM C234 y los softwares FreeCAD y Prepomax.

1.3.2 Objetivos específicos

- Elaborar el diseño de la mezcla de concreto según el informe ACI-211, tomando en cuenta parámetros estudiados previamente que permitan un resultado óptimo en su utilización junto con la guadua.
- Identificar la viabilidad en el uso de la guadua como refuerzo del concreto según su adherencia al medir y comparar los esfuerzos experimentales de los ensayos de adherencia para probetas simples y acanaladas, con o sin resina (registrados mediante la máquina universal), con los resultados teóricos que se obtengan mediante el uso de software especializado en el análisis de modelos de elementos finitos.
- Calibrar un modelo numérico a través de los ensayos a tracción realizados en laboratorio mediante el software Prepomax.
- Realizar un análisis estadístico para determinar si hay diferencias significativas en ensayos con distintos tratamientos, lo que permitirá corroborar cual es el mejor tratamiento de adherencia entre la guadua angustifolia y el concreto, de acuerdo con el análisis de los ensayos y del software Prepomax.

1.4 Estructura del documento

El primer capítulo inicia con la introducción, la cual brinda una visión preliminar del propósito de esta investigación, que se enfoca en el tema de la adherencia del concreto reforzado con guadua. Los antecedentes se presentan con el fin de respaldar el desarrollo de esta investigación y se consideraron las variables en función de los análisis y resultados previos de otros investigadores. Además, se detallan los objetivos de este estudio.

El segundo capítulo presenta el contexto teórico, abordando de manera concisa las características mecánicas y elásticas de la guadua, específicamente la especie *Guadua angustifolia kunth*. Además, se discute la estructura física de la guadua, la adherencia en los materiales, y las propiedades mecánicas y aditivas del concreto reforzado. También se introducen ciertos enfoques estadísticos que se aplicaron en la investigación.

El tercer capítulo presenta la metodología de la investigación, que se divide en cuatro fases, correspondientes a revisión bibliográfica, diseño de mezcla, ensayos de adherencia, creación y configuración del modelo del ensayo, análisis estadístico y ajuste del modelo con datos obtenidos.

El cuarto capítulo expone los resultados y su respectivo análisis, el cual contiene las consideraciones del tratamiento aplicado a las tablillas de guadua (Configuración: L-A; Rugosidad: R-S), preparación de las probetas, diseño de mezcla del concreto, resultados de las variables (Esfuerzo de adherencia y coeficiente de fricción) a 7, 14 y 28 días por tratamiento, diseño experimental multifactorial, estadística descriptiva para variables de respuesta, análisis de varianza para determinar si existe diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos del diseño experimental y verificación de los mejores tratamientos mediante el test HSD de Tukey.

En el quinto capítulo, se exponen las conclusiones y sugerencias derivadas de los hallazgos de la investigación, así como las recomendaciones más significativas en cuanto a la adherencia y utilización de la guadua como refuerzo del concreto, sus ventajas, desventajas y limitantes, al igual que recomendaciones para posteriores investigaciones relacionadas con esta temática.

Capítulo 2

2. Marco teórico

2.1 *Guadua angustifolia* kunth. (Guadua)

Acorde con (Hidalgo Lopez, 1974) “estructuralmente la guadua está constituida por un sistema de ejes vegetativos segmentados, que forman alternamente nudos y entrenudos, que varían en su morfología según que correspondan al rizoma, al tallo o a las ramas” (p. 27). Siendo “Una planta auto-sostenible, de rápido crecimiento que trabaja en red. Con la guadua se pueden solucionar los problemas ambientales, sociales y económicos que afectan, a un lugar, un país o una región”. (Londoño, 2011).

2.2 Propiedades mecánicas la guadua (Especie *Guadua Angustifolia Kunth*)

La guadua presenta cambios en sus propiedades mecánicas dependiendo de la especie y zona geográfica. (Takeushi Tam & González, 2007) evidencia que la resistencia a la compresión promedio paralela a la fibra y su módulo de elasticidad de la *Guadua Angustifolia Kunth* fue de 56 MPa y 17859 MPa respectivamente, además, se maneja un valor de esfuerzo admisible de 11 MPa para cargas gravitacionales y de 13 MPa por cargas de viento en el análisis. De igual forma (Ciro Velásquez, Osorio Saraz, & Vélez Restrepo, 2005) determinaron los valores últimos de los esfuerzos a tensión y cizalladura con valores promedio de 190,70 MPa y 5,57 MPa respectivamente, comprobando la alta resistencia en dirección paralela a la orientación de las fibras.

2.3 Propiedades elásticas de la guadua (Especie *Guadua Angustifolia Kunth*)

(Sapuyes, Osorio, Takeushi, Duarte, & Erazo, 2018) cuantificaron el módulo de elasticidad promedio en análisis a flexión y mínimo de la *Guadua Angustifolia Kunth* proveniente del municipio de Pitalito igual a 15483 MPa y 10526 MPa. (Duarte Toro, López Rodríguez, & Salcedo Rojas, 2021) realizaron un análisis de resistencia a compresión perpendicular a las fibras y determinaron el módulo de elasticidad circunferencial de la especie *Guadua Angustifolia Kunth*

del municipio de Pitalito - Huila donde el resultado fue 2,16 MPa para el primer lote y 3.81 MPa para el segundo.

2.3.1 Morfología del bambú

El bambú es un miembro de la familia de las gramíneas, a diferencia de los árboles, el marco básico de una planta de bambú no tiene un tronco central. (Lal Banik, Liese, & Köhl, 2015). La morfología de la planta de bambú consiste en ramas, vainas, culmos, flores, hojas, rizomas y raíces (Titilayo Akinlabi, Anane-Fenin, & Akwada, 2017). El culmo es la parte más notable y visible de la planta de bambú que se desarrolla a partir de los brotes que emergen de las yemas (Titilayo Akinlabi, Anane-Fenin, & Akwada, 2017). Aparecen como un tallo cilíndrico alargado con articulaciones intermitentes conocidas como nudos y en la Figura 2-1 se muestra la morfología del bambú y su uso según el diámetro del culmo.

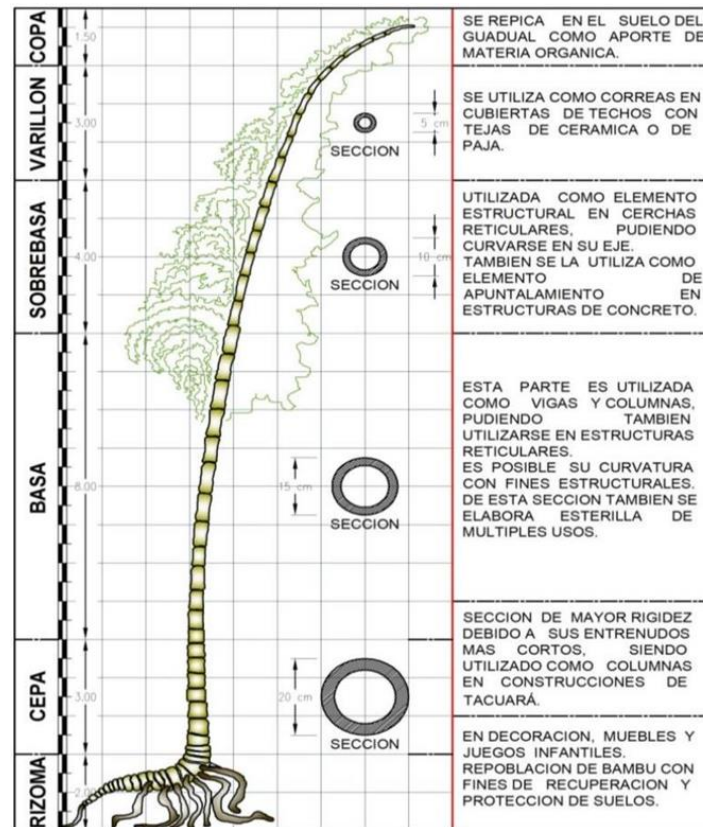


Figura 2-1: La tacuara (Bambú) como material de construcción es utilizada en diferentes aplicaciones a través del aprovechamiento de sus diámetros y longitudes. Tomado de Tecnología del bambú (p. 72), por (Gómez Castro & Acha Daza, 2010).

2.4 Adherencia

La adherencia es un concepto fundamental en ingeniería estructural que se refiere a la

capacidad de dos materiales diferentes para sostenerse mutuamente cuando están en contacto directo.

$$Fa = n * Fn \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Fa = Fuerza de fricción; n = Coeficiente de adherencia; Fn = Fuerza Normal

En el contexto de la investigación sobre la adherencia de la guadua en estructuras de concreto, esta se refiere a la capacidad de la guadua para unirse al concreto y contribuir a la resistencia y estabilidad de la estructura. (Da Silva, F. J., & Fiorelli, J. (2013)); la adherencia es crucial en la construcción de estructuras de concreto reforzado con guadua, ya que determina en gran medida la eficacia de la guadua como material de refuerzo. Una buena adherencia asegura que la guadua y el concreto trabajen juntos de manera efectiva, distribuyendo las cargas y resistiendo las fuerzas externas.

En cuanto a cómo se calcula la adherencia en una estructura de guadua y concreto, generalmente se realizan pruebas de laboratorio para medir la resistencia a la adherencia entre la guadua y el concreto. (Monteiro, S. N., & Barcellos, A. A. (2009)) Estas pruebas pueden incluir ensayos de tracción, donde se aplica una fuerza gradual para determinar la cantidad de fuerza requerida para separar la guadua del concreto. Los resultados de estas pruebas ayudan a los ingenieros a comprender mejor cómo el bambú se une al concreto y cómo puede utilizarse de manera efectiva en aplicaciones estructurales.

Además, es importante considerar factores como la rugosidad de la superficie de la guadua y del concreto, así como la presencia de humedad y otros agentes que podrían afectar la adherencia (Feitosa, R. Q., & Lahr, F. A. R. (2005)). Estos factores pueden influir en los cálculos y en el diseño de la estructura para garantizar una adherencia óptima y una performance estructural adecuada.

2.5 Ley de Hooke

(Cervera Ruiz & Blanco Díaz, 2015) Los cuerpos sólidos experimentan deformación cuando se les aplican fuerzas, y una vez que cesan estas fuerzas, el cuerpo tiende a volver a su forma original. Esta propiedad común de los sólidos se conoce como elasticidad. La ley de Hooke está expresada matemáticamente en la Ecuación 2.2, donde K representa la constante de proporcionalidad entre la fuerza aplicada P y el desplazamiento δ ($L - L_0$) resultante.

$$P = K \cdot \delta \quad \text{Ecuación 2.2}$$

En términos generales, existen dos tipos de deformación. Una es la **deformación elástica**,

donde el material recupera su forma original una vez que se elimina el esfuerzo aplicado. Esta deformación es reversible y no permanente. El segundo tipo es la **deformación plástica**, que ocurre cuando se aplica un esfuerzo tan grande al material que no vuelve a su forma original al retirar dicho esfuerzo. En este caso, se produce una deformación permanente e irreversible. El valor mínimo de esfuerzo requerido para generar una deformación plástica se conoce como límite elástico del material. (Estacio Castañeda, 2013)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \qquad \text{Ecuación 2.3}$$

(Estacio Castañeda, 2013) El módulo de elasticidad se define como la pendiente del gráfico de esfuerzo-deformación en la región elástica lineal. Dado que la deformación es adimensional, las unidades del módulo de elasticidad son las mismas que las unidades del esfuerzo (según la Ecuación 2.3). Sin embargo, cuando la carga supera el límite elástico, la pieza continúa deformándose hasta que finalmente colapsa, alcanzando un punto conocido como esfuerzo último.

2.5.1 Ley de Hooke en sólidos elásticos

En la mecánica de sólidos deformables elásticos, la distribución de tensiones es más compleja que en un resorte o una barra estirada en una dirección específica. Para describir la deformación en casos más generales, se utiliza un tensor de deformaciones, mientras que los esfuerzos internos en el material se representan mediante un tensor de tensiones. Estos tensores están relacionados por las ecuaciones de Hooke generalizadas o de Lamé-Hooke, que son ecuaciones lineales que caracterizan el comportamiento de un sólido elástico lineal. En algunos materiales, no se puede definir fácilmente un límite de proporcionalidad, ya que es difícil determinar con precisión el valor del esfuerzo (σ) en el cual la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación (ε) deja de ser válida. Por lo tanto, se utilizan ecuaciones en las que la deformación (ε) es una cantidad adimensional, y el módulo de elasticidad (E) se expresa en las mismas unidades que el esfuerzo (σ) (Pa, psi o ksi).

2.5.1.1 Materiales elásticos isótropos

(Giraldo Apolinar, 2011). Los materiales elásticos homogéneos e isotrópicos son aquellos que exhiben el mismo comportamiento mecánico sin importar la dirección en la que se aplique la tensión alrededor de un punto. Por ejemplo, en un ortoedro de un material homogéneo e isotrópico, el coeficiente de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν) son constantes y no dependen de las caras en las que se aplique la deformación.

2.5.1.2 Materiales elásticos ortótropos

(Giraldo Apolinar, 2011). Existen materiales elásticos que tienen propiedades anisótropas, lo que significa que su comportamiento elástico varía en diferentes direcciones. Un tipo común de anisotropía se observa en los materiales elásticos ortótropos. El comportamiento elástico se caracteriza por un conjunto de constantes relacionadas con las tres direcciones mutuamente perpendiculares. La madera es el ejemplo más conocido de un material ortótropo, por sus diferencias en el módulo de elasticidad longitudinal (E) a lo largo de las fibras, así como en los módulos tangencial y perpendicular a los anillos de crecimiento.

2.6 Propiedades mecánicas y aditivas del concreto reforzado

(Brown & McCormac, 2011). El concreto se compone de una mezcla de componentes como arena, grava, agregados de roca triturada, entre otros; Cuando se combina con acero, se obtiene el concreto reforzado, el cual posee la capacidad de resistir tanto tensiones generadas por el acero como compresiones generadas por el propio concreto. La resistencia a la compresión es determina mediante pruebas de resistencia por cilindros a los 28 días. En la práctica, la mayoría de los tipos de concreto utilizados tienen una resistencia que oscila entre 3000 y 7000 libras por pulgada cuadrada (lb/plg²).

(Osorio, A. 2014). Las propiedades mecánicas del concreto y su resistencia a la tracción juegan un papel crucial en el comportamiento de la adherencia, por ende, el Euro-código 2 (UNE-ENV-1992, 1-1:93) establece la tensión de adherencia de cálculo, denominada F_{bd} , la cual se define en función de la resistencia predominante del concreto a compresión, considerando el tipo de barra de alta adherencia (corrugadas) y baja adherencia (lisas).

f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50
Barras lisas	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
Barras de alta adherencia para $\phi \leq 32$ mm	1,9	2,0	2,3	2,7	3,0	3,4	3,7	4,0	4,3

Figura 2-2: Valores de cálculo de tensión de adherencia F_{bd} [Mpa], según UNE-ENV-1992, para buenas condiciones de adherencia.

Dentro de los factores que afectan la tensión de adherencia, es importante considerar propiedades como la dosificación, ya que cuando la relación agua-cemento disminuye, la tensión de adherencia tiende a aumentar. La dosificación del concreto tiene un papel determinante en la retracción plástica y el asentamiento plástico, que están estrechamente relacionados con la formación de fisuras en el recubrimiento (Osorio, A. 2014).

El concreto y el refuerzo (comúnmente de acero) son ampliamente empleados en la

construcción debido a sus propiedades mecánicas complementarias. Mientras que el concreto presenta una desventaja significativa en términos de resistencia a la tensión, el acero destaca por su alta resistencia en este aspecto (Brown & McCormac, 2011). Debido a que el concreto destaca por su alta resistencia a compresión, lo hace ideal para soportar cargas pesadas, mientras que el refuerzo trabaja muy bien a tracción.

2.7 Ensayos a los materiales.

Las normativas NTC 1377 para la elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio y la ASTM-C234 del método de prueba estándar para comparar hormigones sobre la base de la adherencia desarrollada con acero reforzado en donde se describen los ensayos de adherencia de tipo vertical y horizontal, contienen especificaciones y recomendaciones importantes, las cuales pueden ser adaptadas en la metodología a seguir para las pruebas de adherencia con especímenes de concreto y probetas de *Guadua angustifolia*.

En el Título C de la Norma Sismo Resistente NSR-10 (AIS, 2010), numeral C.3.1 de la NSR-10, se establece que los materiales deben ser sometidos a ensayos en muestras representativas antes de su empleo en la construcción. Además, la Ley 400 de 1997 especifica las circunstancias en las cuales se debe llevar a cabo la supervisión técnica.

2.8 Resina epóxica

La resina epóxica (EP) es un adhesivo termoplástico de alta resistencia que se obtiene al combinar dos componentes en proporciones iguales: un polímero termoestable y un agente catalizador. En la mezcla, se agregan agentes de curado, diluyentes y otros aditivos. Este tipo de resina se utiliza ampliamente en diversas aplicaciones, como adhesivos y pegamentos de alta resistencia, recubrimientos para pisos, paredes y techos, para mejorar la durabilidad y la resistencia a la abrasión. Cuando se utiliza en el refuerzo de estructuras, es crucial aplicar en la superficie metálica. Se permite el uso de recubrimientos epóxicos en barras de refuerzo que cumplan con las normas NTC 4013 (ASTM A767M) y NTC 4004 (ASTM A775M).

2.9 Almacenamiento de materiales

El Título C de la Norma Sismo Resistente NSR-10 (AIS, 2010) establece que el material cementante y los agregados deben almacenarse de manera que se evite tanto su deterioro como la presencia de materiales extraños. Se enfatiza que cualquier material que haya sufrido deterioro o contaminación no debe utilizarse en la mezcla de concreto.

2.10 Análisis de varianza (ANOVA).

El análisis de varianza (ANOVA) se utiliza para contrastar las medias de múltiples poblaciones en un experimento. En su formulación más amplia, se establecen dos hipótesis para las pruebas de significancia: una hipótesis nula que postula que todas las medias son idénticas, y una hipótesis alternativa que sugiere que al menos una de las medias es diferente. Esta prueba se emplea para detectar discrepancias entre los tratamientos, y se caracteriza por la partición y suma de cuadrados de las medias, considerando las variaciones atribuibles al tratamiento y a otros factores no controlados (errores), así como la variabilidad total, debida a los tratamientos y a otros factores (errores). Cuando el experimento involucra más de un factor o variable independiente, se aplica un procedimiento denominado ANOVA Multifactorial, el cual emplea un modelo estadístico para describir el efecto de dos o más factores sobre una variable dependiente. (Ortiz Rico, 2024)

2.11 Test HSD de Tukey.

El test de Diferencia Honestamente Significativa (HSD) de Tukey, concebido por el estadístico John Tukey, constituye una herramienta de gran utilidad en la investigación experimental. Este procedimiento estadístico facilita la comparación de las medias de múltiples tratamientos en un experimento aleatorio mediante la creación de intervalos de confianza para las diferencias entre estas medias. Tukey desarrolló uno de los estadísticos de prueba (Q) más ampliamente utilizados, para evaluar la validez de las hipótesis planteadas. La hipótesis nula se rechaza cuando el valor del estadístico Q supera cierto umbral establecido en la tabla de distribución específica de Tukey, para un número determinado de tratamientos a y grados de libertad del error gle . Además, mediante el test de Tukey, es factible construir intervalos de confianza que brindan información adicional sobre las medias en estudio. (Ortiz Rico, 2024)

2.12 FreeCAD

FreeCAD es una aplicación de diseño asistido por computadora en tres dimensiones que se distingue por su carácter de software de código abierto. Con un enfoque específico en la ingeniería mecánica y el diseño de componentes mecánicos, este programa se sustenta en la robusta plataforma de Open CASCADE y se desarrolla mediante la utilización de lenguajes de programación de alto rendimiento, tales como C++ y Python.

2.13 PrePoMax

PrePoMax es una herramienta de pre/posprocesamiento de código abierto, diseñada como solucionador de Elementos Finitos (FEM) Calculix. Caracterizada por buscar optimizar y

agilizar los procesos de trabajo relacionados con FEM. Entre sus capacidades más destacadas se encuentra la capacidad de importar geometrías desde diversos formatos CAD intercambiables, así como archivos en formato “.stl” utilizados comúnmente en el contexto de la impresión 3D. PrePoMax ofrece la posibilidad de generar mallas, tanto de geometrías sólidas como de geometrías basadas en superficies, haciendo uso de elementos finitos lineales y parabólicos.

2.13.1 Región maestra y esclava

El cuerpo maestro (Master) es el componente que controla el contacto desde una perspectiva numérica, este suele ser el receptor de las cargas. Por otro lado, un Cuerpo Esclavo (slave) es el componente que busca establecer contacto con otro componente. Las cargas se transmiten principalmente a través de él. Desde el punto de vista numérico, se cumplirá siempre que un nodo ubicado en el cuerpo Maestro puede penetrar parcial o completamente en el cuerpo designado como Esclavo, mientras que un nodo ubicado en el cuerpo Esclavo no podrá penetrar en el cuerpo Maestro.

2.13.2 Parámetros de mallado (Meshing)

Define que tan precisa será la interacción entre los nodos y superficies del elemento ya sea en 2D o 3D. El mallado analiza todas las superficies generando una red angular que se acople al tamaño del elemento designado, valores más pequeños harán más preciso el análisis.

2.13.3 Modelos de interacción (Surface interactions)

Es la condición del tipo de análisis aplicable a una modelación o elemento determinado, permitiendo delimitar el comportamiento de las superficies y la fricción según sea el caso solicitado.

2.13.3.1 Comportamiento superficial

El comportamiento superficial “Surface behavior” determina la presión de cierre de las superficies del elemento mediante el parámetro K, siendo este la pendiente de la curva de cierre de presión, un valor grande de K hará que el contacto entre las superficies sea más pegajoso. los tipos de casos más comunes de comportamiento superficial son duro o “hard”, lineal, y Tied o “atada”.

2.13.3.2 Coeficiente de fricción (Friction coefficient)

El coeficiente de fricción es una medida que describe la resistencia al movimiento entre dos objetos que están en contacto y que se deslizan uno sobre el otro. Este coeficiente es una

propiedad específica de cada par de materiales en contacto y puede variar dependiendo de varios factores, como la rugosidad de las superficies, la presión aplicada y la naturaleza de los materiales involucrados, como parámetro de comportamiento su valor afecta en gran medida al esfuerzo cortante calculado.

Tabla – Coeficientes de rozamiento, μ , para varias combinaciones de materiales				
Combinación de materiales de construcción			Coeficiente de rozamiento μ	
			Máximo	Mínimo
1	Madera/madera – Superficie de rozamiento paralela a la veta o perpendicular a la veta		1,0	0,4
2	Madera/madera – al menos una superficie de rozamiento perpendicular a la veta (veta de madera transversal o en el extremo)		1,0	0,6
3	Madera/acero		1,2	0,5
4	Madera/hormigón		1,0	0,8
5	Acero/acero		0,8	0,2
6	Acero/hormigón		0,4	0,3
7	Acero/capa de mortero		1,0	0,5
8	Hormigón/hormigón		1,0	0,5

Figura 2-3: Norma UNE-EN 12812. Coeficiente de rozamiento para varias combinaciones de materiales

2.13.3.3 Pendiente de la curva de adherencia (Stick slope)

Es la relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento tangencial relativo en contacto, es decir la pendiente de la relación lineal entre el esfuerzo cortante (τ) y el desplazamiento adyacente del elemento hasta que comienza el deslizamiento después de la adherencia o “stick” (sin movimiento permanente hasta que se alcance el coeficiente de fricción).

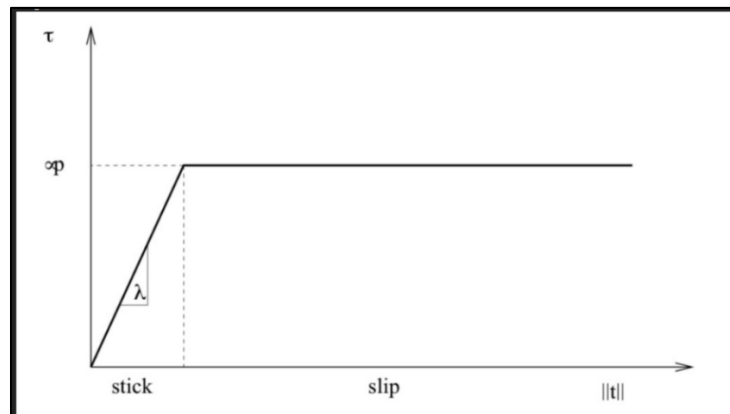


Figura 2-4: Adherencia por fuerza cortante vs desplazamiento tangencial

Capítulo 3

3. Metodología

Para la elaboración de la investigación se desarrollaron 7 fases con el fin de cumplir con los objetivos del proyecto, a continuación, se realiza la descripción de cada uno.

3.1 Primera fase-Revisión Bibliográfica

Se realizó una búsqueda sistemática de la bibliografía centrada en el uso de la guadua en el sector de la construcción, principalmente investigaciones orientadas al uso de este material como refuerzo en elementos estructurales y en el análisis de elementos finitos, recopilados a través de los diferentes recursos disponibles (tesis de grado, artículos de investigación y normativas).

3.2 Segunda fase-Diseño de Mezcla y Ensayos de Adherencia

Consiste en la adaptación de la maquina universal (Pieza mecánica) para la contención de los cilindros de prueba de adherencia, la caracterización de los materiales y elaboración del diseño de mezcla según la normativa ACI-211.

3.2.1 Adaptación de la maquina universal

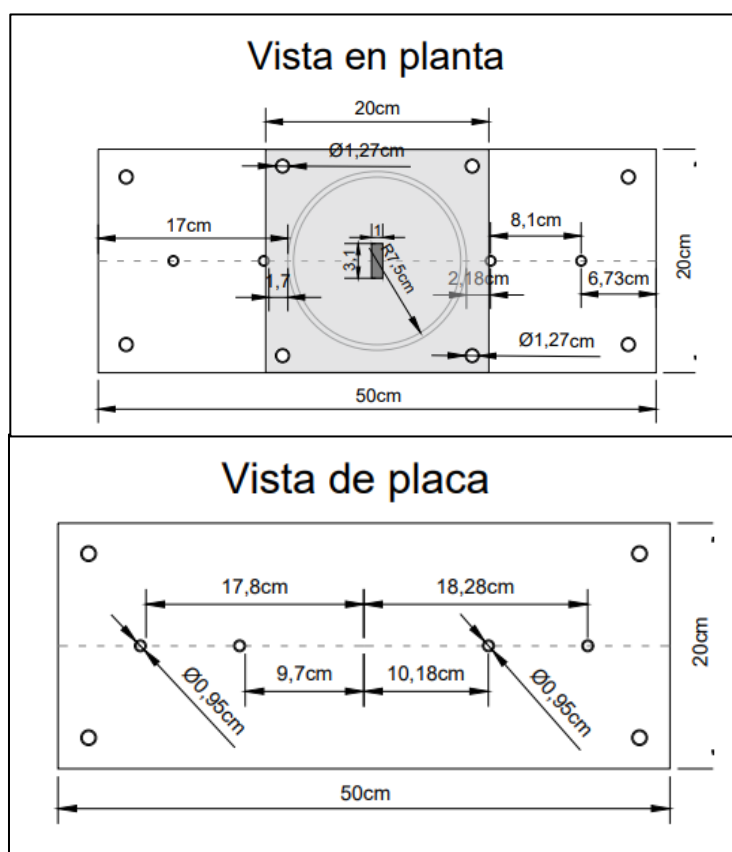


Figura 3-1: Plano para la elaboración de la pieza

La máquina universal admitía en su base el acople de una pieza de acero necesaria para realizar la extracción de las tablillas en los cilindros, por lo cual se realizaron las medidas respectivas para la fabricación de una placa de 1cm de grosor que permita colocar y retener las probetas durante el desarrollo de las pruebas, sus medidas se aprecian en la Figura 3-1, así, la base de este acople sería la placa, y para el mecanismo de retención se utilizó un cilindro de acero de 15x30cm suministrado por la universidad, la base de 20x20cm de este cilindro funcionaría como tapa ajustable por medio de cuatro barras corrugadas cerca de la esquina de esta, y dejaría pasar la tablilla por una ranura hecha en el centro. Este proceso fue efectuado en un sitio especializado en trabajos con acero en un lapso de 21 días.

3.2.2 Procedencia de los materiales.

Los materiales empleados para la elaboración de la mezcla y refuerzos de las probetas fueron adquiridos en las entidades “Arenas del Huila” y “Venta de Guadua el Malecón” ubicados en la ciudad de Neiva-Huila.

3.2.3 Agregado fino y grueso.

Se uso arena gruesa y grava de 3/4 plg – 1 plg de tamaño máximo, en presentación de sacos de 20 kg, respectivamente. Logrando de manera efectiva alcanzar el nivel de resistencia a la compresión del concreto requerido para los propósitos de la presente investigación.

Con el fin de garantizar la uniformidad de los materiales, se procedió a desembalar los agregados y a combinar el contenido del material correspondiente a cada tipo de agregado, dando lugar a la formación de una pila intermedia, cuyo proceso se representa en la Figura 3-2. Posteriormente, los materiales fueron reembolsados.



Figura 3-2: Apilamiento de bolsas, vaciado y mezclado de (a) agregado fino (arena) y (b) agregado grueso (grava).

El cemento utilizado en la investigación corresponde a la marca Argos, adquirido en “Homecenter”-Neiva-Huila.

3.2.4 Guadua.

La Guadua utilizada en la investigación corresponde a la especie *Guadua angustifolia* exportada del departamento del Quindío, fue comprado en “Venta de Guadua el Malecón” de la ciudad de Neiva-Huila, en culmos de 50cm.

3.2.5 Diseño de mezcla.

El proceso de diseño de la mezcla radicó en la estandarización de las muestras de prueba, buscando que todas las probetas presentaran la misma capacidad de resistencia a la compresión. Además, se buscaba evaluar la adhesión de la guadua como refuerzo del concreto. La relevancia e importancia del diseño de mezcla se ve reflejada porque todas las probetas no pueden ser elaboradas durante una misma jornada, debido a restricciones inherentes a factores como la disponibilidad de moldes o formas para el moldeo del concreto.

Existen diversas metodologías para el diseño y la determinación de las proporciones adecuadas de los componentes del concreto, para esta investigación se realizó el método para la dosificación de concretos normales y pesados del American Concrete Institute (ACI - 211). A continuación, se presenta la tabla 3-1 se encuentra la información correspondiente a los ensayos ahora la caracterización física de las propiedades de los agregados.

Ensayo	Agregado Fino	Agregado Grueso	Norma
Muestro de los agregados	x	x	NTC 129 (ICONTEC, 2019)
Cuarteo de las muestras	x	x	NTC 3674 (ICONTEC, 2022)
Módulo de Finura	x		NTC 77 (ICONTEC, 2018)
Tamaño máximo		x	NTC 77 (ICONTEC, 2018)
Estandarización de los tamices	x	x	NTC 32 (ICONTEC, 2018)
Masa Unitaria	x	x	NTC 92 (ICONTEC, 2019)
Densidad y absorción de los agregados	x		NTC 237 (ICONTEC, 2020)
		x	NTC 176 (ICONTEC, 2019)
Contenido de Humedad	x	x	NTC 1776 (ICONTEC, 2019)

Tabla 3-1: Ensayos para los agregados.

3.3 Tercera fase.

Fabricación de las tablillas de guadua:

3.3.1 Pretratamiento al refuerzo de Guadua

Se realizó el pretratamiento de los culmos con Lorsban líquido y ACPM, dado que la Guadua es un material orgánico, siendo susceptible al deterioro biológico. Se realizaron perforaciones en los tallos utilizando una broca de 1/4 de pulgada de diámetro en la proximidad de los nudos, de manera intercalada, tal como se ilustra en la Figura 3-3.

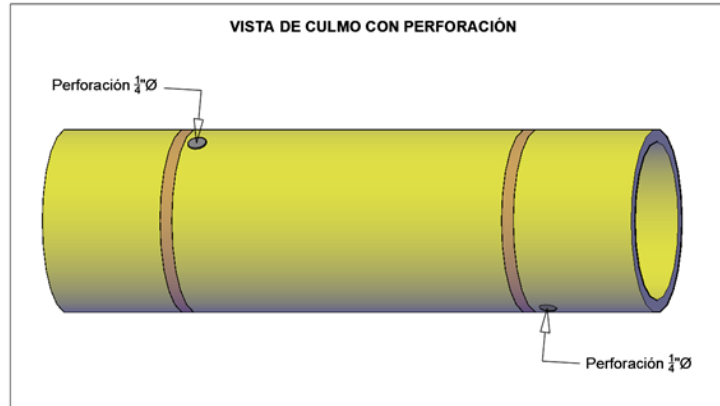


Figura 3-3: Perforación para tratamiento de culmos de guadua

Mediante una jeringa se administró una solución (1:2) de insecticida de amplio espectro Lorsban (Clorpirifos), mezclado con ACPM, específicamente en una proporción de 1 parte de Lorsban por cada 2 partes de ACPM, las perforaciones fueron selladas con masilla (plastilina), y los extremos cubiertos con bolsas para un mejor efecto, se mantuvo en un lugar seco por 7 días, como se muestra en la Figura 3-4.



Figura 3-4: Culmos de bambú con Lorsban liquido más ACPM.

3.3.2 Dimensiones y corte de probetas

Para la obtención de las tablillas, con ayuda de un carpintero se cortaron en total 5 culmos de 20cm de largo y 15cm de diámetro, se obtuvieron 40 tablillas lisas en total (8 por trozo). Ver figura 3-5.

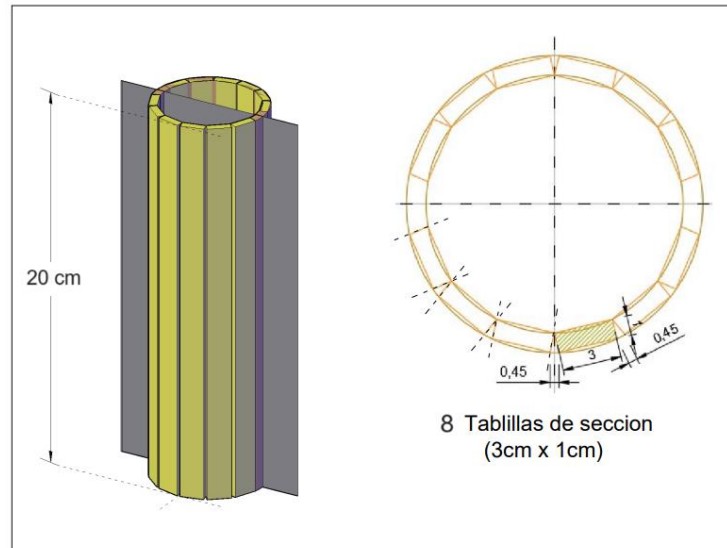


Figura 3-5: Detalle de sección y corte de los culmos de guadua.

Para facilitar el agarre de las probetas con la máquina universal y los cilindros de ensayo. De las tablillas obtenidas, se confeccionaron 18 tablillas acanaladas con ayuda de una caladora. En la figura 3-6 se observan las nomenclaturas y dimensiones utilizadas para las tablillas de guadua.

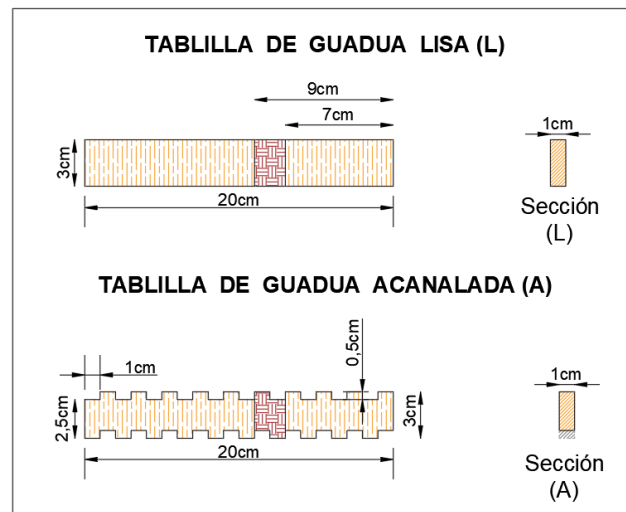


Figura 3-6: Dimensiones para la tablilla lisa y acanalada.

3.3.3 Aplicación de resina

Con el fin de obtener una mayor capacidad de adherencia entre el concreto y la guadua, se opta por la aplicación del adhesivo epóxico Topex Dur 1-1, cuya preparación consiste en la mezcla de sus componentes A y B en partes iguales revolviendo por un tiempo de 3-4 minutos (figura 3-7); con ayuda de una brocha se procede a aplicar el adhesivo por todas las caras de las tablillas.



Figura 3-7: Topex Dur 1-1 para aplicación de las tablillas de guadua.

El tratamiento se aplicó a un total de 9 tablillas lisas y 9 acanaladas, seguido a lo cual se dejaron en reposo por un tiempo de entre 10-15 minutos, para posteriormente ser incrustadas dentro de los cilindros a una longitud de 10cm.

3.3.4 Preparación y curado de las probetas.

Con el fin de poder corroborar el diseño de mezcla (ANEXO A), para una resistencia a la compresión (f'_c) de 21 MPa, se realizaron 2 fundiciones de prueba con cilindros de 100x200mm para los 7 y 14 días de curado, encontrando una relación con lo planteado por Torices, C. (2022), el cual establece que los cilindros con 7 y 14 días de curado alcanzan una resistencia del 65% y 90% respectivamente; obteniendo una resistencia de 10.03 MPa a los 7 días (47.76%) y de 19.20 MPa a los 14 días (91.42%).

Concluida la verificación de la resistencia a compresión, se preparó un cilindro de prueba de adherencia por cada tratamiento para calibrar la máquina universal, estos fueron fallados a los 7 días de su fundición. Se continuo con la fundición de los restantes 36 cilindros de 100x200mm, asegurando la calidad de la mezcla del concreto fresco y su adecuado asentamiento (Prueba del Slump), según la norma NTC 396 (ICONTEC, 2021); estos especímenes fueron nombrados teniendo en cuenta la tabla 3-2.

Factor configuración	+	Factor rugosidad	+	Tiempo de curado	Número de ensayos realizados
Acanalado (A) o Liso (L)	+	Con resina (R) o Sin resina (S)	+	7 días (7), 14 días (14) o 28 días (28)	- n veces (1,2,3)

Tabla 3-2: nomenclatura de cilindros para prueba de adherencia concreto-guadua.

Por ejemplo, un cilindro de tablilla acanalada con resina que fue fallado a los 14 días de curado, siendo el tercer espécimen de ese tratamiento seria denominado: AR7-3; los especímenes se curaron de acuerdo con la norma NTC 1377 (ICONTEC, 2021), para la obtención de óptimos resultados se debe asegurar la correcta hidratación del concreto como puede verse en la Figura 3-8.



Figura 3-8: Tanque utilizado para el proceso de curado.

3.4 Cuarta fase.

3.4.1 Prueba de ensayo de adherencia

La ASTM C234-91 “Método de prueba estándar para comparar la adherencia desarrollada en hormigones sobre la base con Acero reforzado”, aclara que el método de prueba descrito no está diseñado para usarse en pruebas en las que la variable principal sea el tamaño o tipo de barra de refuerzo o para establecer valores de adherencia para propósitos de diseño estructural, así este método de prueba es adaptable para su uso con fines de investigación variando las condiciones según se desee.

3.4.1.1 Pieza metálica

Durante los ensayos de calibración de la máquina, se observó la necesidad de crear pieza metálica, cuya función fue la de permitir el agarre entre las pinzas y la tablilla de guadua, la cual permitió un desarrollo eficiente del ensayo de adherencia, las dimensiones y forma de la pieza utilizada se pueden visualizar en la figura 3-9.

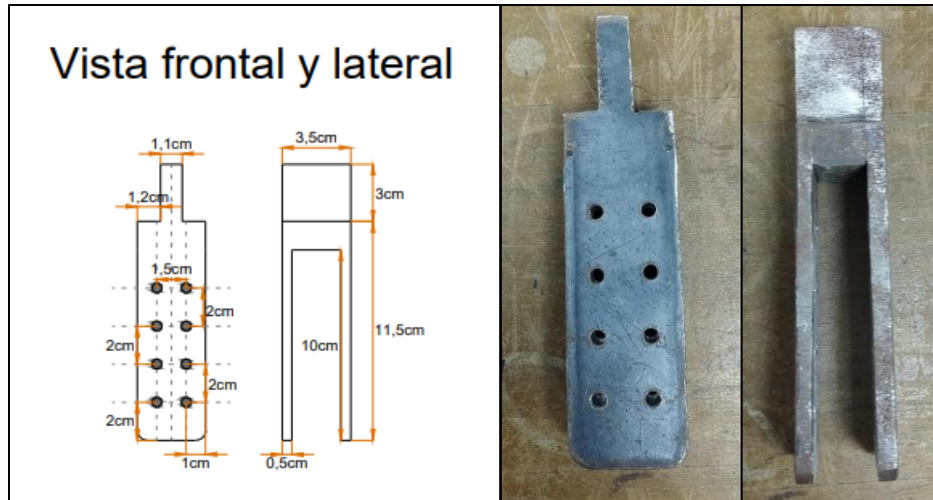


Figura 3-9: Vista frontal y lateral de la pieza metálica

3.4.2 Montaje y Adquisición de datos

Verificada la resistencia última del concreto, se llevó a cabo el montaje del ensayo siguiendo la norma ASTM C234-91. En esta etapa, se procedió a instalar la pieza de adaptación en la máquina universal de ensayos (AGS-X), procurando que quede bien atornillada. Ver Figura 3-10.



Figura 3-10: Pieza metálica ensamblada en la maquina universal preparada para realizar el ensayo a tracción.

Luego, se procedió a tomar la medida determinada por el programa al momento de aplicar la fuerza de tracción. A continuación, se aplicó una carga gradual a la tablilla de guadua a una velocidad de 1.5mm/min hasta terminar con la prueba (ver figura 3-11). Para considerar como concluido el ensayo de adherencia de cada una de las pruebas, debe presentarse cualquiera de las siguientes tres condiciones:

- La tablilla presenta grandes agrietamientos o fracturas visibles
- El concreto se fractura
- El deslizamiento de **al menos** 0,10 pulgadas (2,5mm) se produce en el extremo cargado

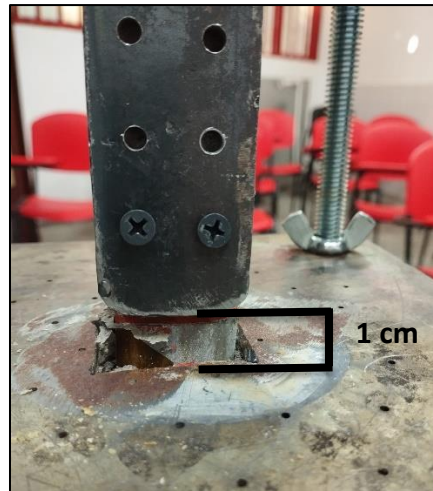


Figura 3-11: Guadua saliendo del cilindro de concreto

Una vez se alcanzó la carga de fallo, se proceden a realizar los cálculos objeto del estudio, dado que se dispone de los valores de Carga vs. Desplazamiento. En primer lugar, se calculó el esfuerzo de adherencia (Ecuación 3.1), que se define como la fuerza en la que la tablilla se deforma o se fractura, considerando el área que está en contacto con el concreto y en segundo lugar se calcula el coeficiente de fricción (Ecuación 3.2)

$$\sigma_{\tau} = \frac{F_{max}}{A_{contacto}} \quad (\text{Ecuación 3.1}) - \text{Esfuerzo de adherencia}$$

Donde:

F_{max} es la fuerza máxima registrada en el ensayo

$A_{contacto}$ es el área de la tablilla de guadua en contacto con el concreto

$$n = \frac{F_F}{F_N} \quad (\text{Ecuación 3.2}) - \text{Coeficiente de fricción}$$

Donde:

F_F es la fuerza de fricción entre la tablilla de guadua y el concreto

F_N es la fuerza normal de la superficie de concreto donde se encuentra embebida la tablilla

3.5 Quinta fase. Descripción los métodos estadísticos usados

Con los datos experimentales obtenidos en los ensayos a tracción, se realizó el análisis de los resultados para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los

tratamientos propuestos. Se utilizó RStudio, Excel y Statgraphics versión estudiantil, para realizar los cálculos y análisis prospectivos, mediante Excel con el complemento “Realstats” se determinó la estadística descriptiva (Media, Error estándar, Mediana, Rango, desviación estándar, y coeficiente de variación).

Para comparar los niveles de cada uno de los dos factores, se graficaron diagramas de caja para cada tratamiento, puesto que, si los gráficos de caja se traslapan, en principio no habrá diferencia significativa entre estos niveles. Para realizar el análisis de varianza multifactorial (ANOVA), se determina la tabla de análisis de varianza, una vez se compruebe que existan diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los tratamientos se opta por realizar la prueba de rangos y grupos “post hoc”, para llevar a cabo comparaciones múltiples de los tratamientos, es decir, para identificar subgrupos homogéneos de medias que no difieren entre sí. Para llevar a cabo este análisis se utilizó el test HSD de Tukey. El nivel de significancia establecido para la prueba de Tukey fue de $\alpha=0.05$. Se realizó la prueba para cada tratamiento por separado y pruebas con las variables en conjunto para los 4 tratamientos del experimento.

Se realiza la verificación de los supuestos de los residuales, mediante el supuesto de normalidad, de varianza constante por medio de la prueba Breusch-Pagan, supuestos de independencia por el método Durbin-Watson.

3.6 Sexta fase: Modelado 3D de probetas con FreeCAD.

Empleando la plataforma de modelado de software libre FreeCAD, se procedió a iniciar la fase subsecuente del proyecto, que consiste en la representación tridimensional de los especímenes. A continuación, se detallan los procedimientos generales para llevar a cabo este proceso:

3.6.1 Espécimen de concreto configuración-Lisa

En la Figura 3-12 se evidencia la presentación final del proceso de modelado, donde el componente principal consiste en un cilindro con un diámetro de 100mm y una altura de 200mm, generado mediante extrusión desde la base del croquis principal, en la cara superior cuenta con un espacio hueco que permita alojar la tablilla. El cuerpo perteneciente a la tablilla de guadua lisa es diferente al del cilindro, este cuerpo se obtiene mediante la extrusión de un croquis secundario realizado en la base interna del cilindro, desde donde se encuentra embebida a una profundidad de 100mm, la sección transversal de esta tablilla es de 30x10 mm con una longitud total de 200mm, sobresaliendo así 100mm del concreto.

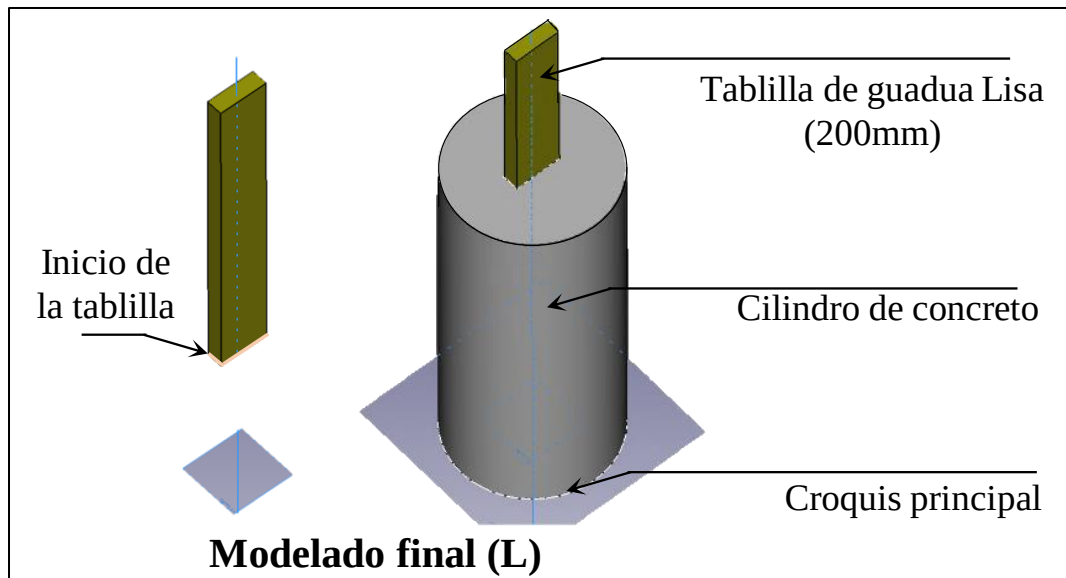


Figura 3-12: Resultado final A.

3.6.2 Espécimen de concreto configuración-Acanalada

En la Figura 3-13, Se presenta la versión final del modelo correspondiente al escenario de la tablilla de guadua acanalada. En contraste con el modelo previo, este exhibe canalizaciones dentro del cuerpo del cilindro, necesarias para alojar este tipo específico de tablilla. En relación al cuerpo de concreto, el croquis principal se divide en dos semicírculos de 100mm de diámetro, los cuales son extruidos hasta una altura de 200mm (altura del cilindro). Esta configuración facilita el vaciado del espacio destinado para la guadua dentada en ambos laterales a partir de la mitad del cilindro, con un empotramiento de 100mm, un ancho de 30mm y espacios dentados asimétricos de 10x5mm cada 10mm. Respecto al cuerpo de la guadua acanalada, se modela mediante la extrusión de un croquis secundario de sección 30x10mm realizado en la cara interna o base, donde estará embebida. Este cuerpo posee una longitud total de 200mm, siguiendo la descripción establecida para este tipo de tablilla, además, se esculpen igualmente espacios dentados (representados con rectángulos blancos) de forma asimétrica cada 10mm.

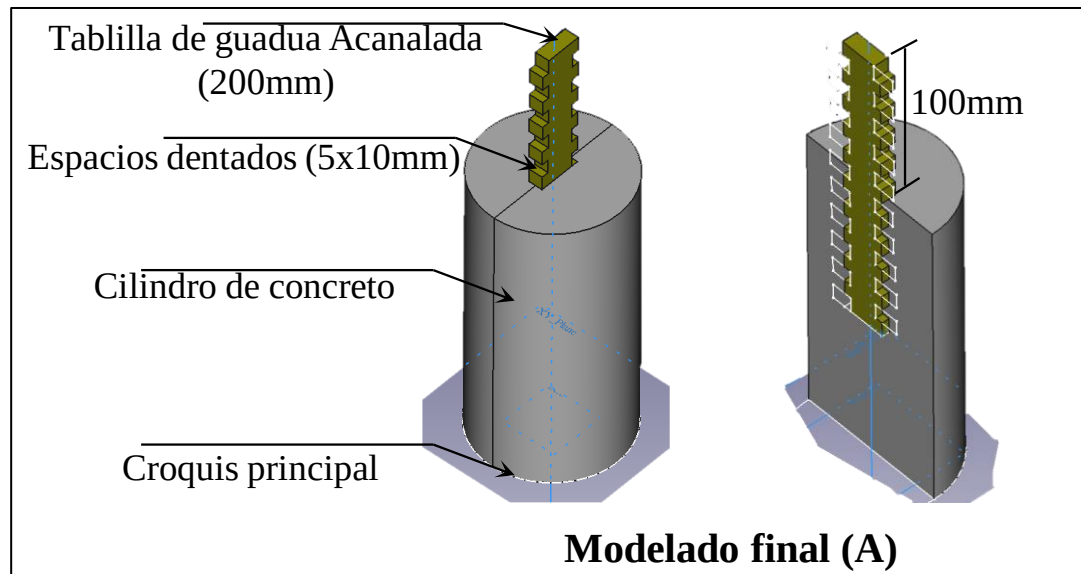


Figura 3-13: Resultado final B.

3.7 Elaboración del modelo matemático con PrePoMax

Haciendo uso ahora de la herramienta para el análisis y procesamiento de elementos finitos (FEM) PrePoMax, se definen las características y restricciones de los especímenes anteriormente modelados.

3.7.1 Análisis de los tratamientos de configuración-Lisa (L) con rugosidad (R)-con resina y sin resina (S).

Para el cálculo de los esfuerzos y desplazamientos críticos (teóricos) de los tratamientos LR y LS se creó un tipo de análisis preliminar para esta configuración, definiendo un tipo de malla por defecto de 10mm, la cual será adaptada posteriormente teniendo en cuenta el análisis de malla de los datos cuando se ajusten los parámetros clave del programa, según los resultados en los ensayos de adherencia.

Es importante definir las propiedades mecánicas y elásticas de los materiales (concreto y guadua) utilizados para el análisis. En la Tabla 3-3, se recopilan los resultados obtenidos de 3 fuentes para el módulo de Young (E) y la relación de poisson (ν), observando una similitud con los valores recomendados en el Título C de la Norma Sismo Resistente NSR-10 (AIS, 2010), según la cual al no tener un estudio de material local para el E y ν del concreto, aconseja utilizar los valores calculados de acuerdo al numeral C.8.5; para el E de la guadua se toma el recomendado igualmente por la norma en el título G y para el ν y densidad de la guadua se utiliza el resultado de estudios locales; para la densidad del concreto se toma la calculada usando la masa y el volumen de los cilindros de prueba de resistencia a compresión.

Propiedades elásticas y mecánicas del concreto	
Módulo de Young_NSR-10 (Titulo C.8.5) *	$E = 3900\sqrt{(21MPa)} = 17872 MPa$
Coeficiente de poisson_NSR-10 (Titulo C.8.5) *	$\nu = 0.2$
Densidad del concreto *	$2.421 \times 10^{-9} \text{ Ton/mm}^3$
Módulo de Young_Murcia, B. Alexander, R. (2015)	$E = (18871.9 \text{ a } 23067.54) = 20969.7 MPa$
Coeficiente de Poisson (21MPa)_Murcia, B. Alexander, R. (2015)	$\nu = (0.175 \text{ a } 0.219) = 0.197$
Módulo de Young_Fernando, F (2013)	$E = 22642.9 MPa$
Coeficiente de Poisson (21MPa)_Fernando, F (2013)	$\nu = (0.16 \text{ a } 0.60) = 0.25$
Propiedades elásticas y mecánicas de la Guadua	
Módulo de Young_NSR-10 (Titulo G) *	$E = 9500 MPa$
Coeficiente de Poisson_Duarte, M. López, G. & Salcedo, J. (2021) *	$\nu = 0.30$
Densidad Guadua Angustifolia_Moreno, J. Cendales, M. (2018) *	$6.07 \times 10^{-10} \text{ Ton/mm}^3$
Módulo de Young_Sapuyes, E. Osorio, J. Takeuchi, C. Duarte, M. Erazo, W. (2018)	$E = 15483 MPa$
Coeficiente de Poisson_Luna, P. Lozano, J. Takeuchi, C. (2014)	$\nu = 0.35$
Módulo de Young_Estacio, D. (2013)	$E = 7592.4 MPa$
Coeficiente de Poisson_Ghavami, K. Marinho, A. (2004)	$\nu = 0.34$

***: Datos tomados para el análisis preliminar**

Tabla 3-3: Recopilación de propiedades elásticas y mecánicas del concreto y la guadua.

En la Figura 3-14, se observan las propiedades empleadas y los resultados preliminares del análisis. Se definieron dos secciones sólidas, una por cada material, utilizando un comportamiento superficial de tipo atado. Los parámetros de interacción de contacto, como el coeficiente de fricción (μ), la pendiente de la curva de cierre de presión (K) y la pendiente de adherencia (Stick slope), fueron aplicados por defecto según las configuraciones predeterminadas del programa, reconociendo que estos valores serán ajustados posteriormente al momento de calibrar los esfuerzos. Se establecieron tres condiciones de contorno: una condición fija en la base del cilindro de concreto, otra similar en la cara interna del concreto donde se encuentra incrustada la base de la tablilla, y una condición de desplazamiento (1 mm por defecto) aplicada en toda la tablilla. Además, se sometió la estructura a una carga de tracción superficial en la parte superior de la misma como prueba. En la parte derecha de la representación gráfica se muestran los esfuerzos calculados por el programa, indicando mediante gradaciones de color (desde azul hasta rojo) los valores más bajos o más altos obtenidos.

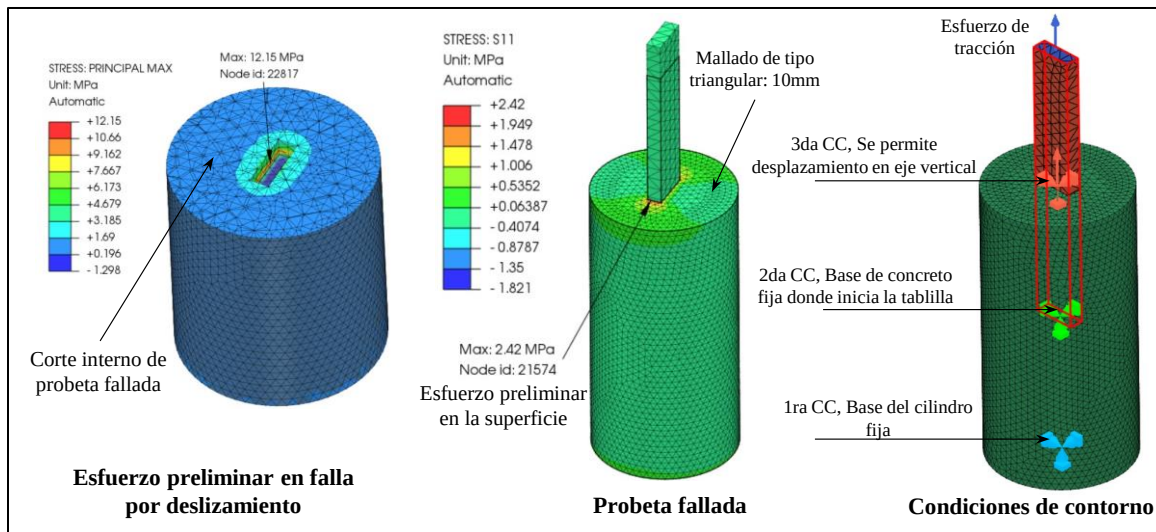


Figura 3-14: Propiedades utilizadas y resultado de análisis preliminar.

3.7.1 Análisis de los tratamientos de configuración-acanalada (A) con rugosidad (R)-con resina y sin resina (S).

El proceso de análisis es muy similar al de la tablilla lisa, sin embargo la pendiente de la curva de cierre de presión (K), del comportamiento superficial debe despreciarse, debido a que se está considerando un comportamiento atado o empotrado “tied”, este tipo de cierre de presión hará que los resultados sean demasiado grandes, pues dicha fuerza actuará también en las canalizaciones de la tablilla modelada, por lo tanto, el valor de “K” deberá considerarse como 0.001N/mm^3 , magnitudes mayores a este valor afectarán los resultados de esfuerzo calculados por el programa.

Por último, debido a la forma irregular y asimétrica de la probeta, la condición de contorno “Fixed” para la base interna de concreto donde se encuentra embebida la tablilla de guadua, debe seleccionarse con detenimiento fijando ambas mitades. (Figura 3-15).

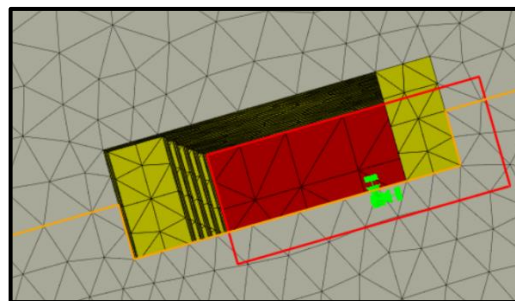


Figura 3-15: Condición fija interna para caso acanalado.

Si estos pasos no se efectúan el programa distribuirá erróneamente la fuerza que se

trasfiere en la tablilla a los costados internos del concreto, ocasionando error en la simulación de extracción. Los análisis entre ambos casos (L y A) variarán según se adapten los parámetros y propiedades del material de acuerdo a los ensayos prácticos, estos cambios en el modelo deben tenerse en cuenta después de efectuadas las pruebas de adherencia, para ajustar los esfuerzos de tracción.

3.8 Séptima fase: Comparativa entre los resultados teóricos y experimentales.

Para culminar la investigación, se toman los resultados dados por el modelo matemático del programa y se comparan con los obtenidos en el laboratorio, con el fin de primero, observar que los datos son iguales entre sí, segundo verificar las zonas de mayor esfuerzo presentado y por último definir el mejor tratamiento planteado.

Capítulo 4

4. Resultados y análisis de resultados

4.1 Diseño de mezcla.

La mezcla de concreto se diseñó siguiendo las pautas del comité ACI-211 (Instituto Americano del Concreto, 2002), para una resistencia de 214Kg/cm^2 (21 MPa), obteniendo una dosificación de 1: 1.85: 2.70, de cemento, arena y grava respectivamente (Anexo A).

4.1.1 Caracterización de los materiales.

Los resultados de la caracterización de materiales son presentados en la Tabla 4-1, los cálculos, gráficas y procedimientos de este apartado se encuentran en el Anexo B.

Agregado grueso (Grava)			Agregado Fino (Arena)		
Parámetro		Norma	Parámetro		Norma
Tamaño MáximoNominal	1" (25.4 mm)	NTC 77	Tamaño MáximoNominal	No.8 (2.5 mm)	NTC 77
Tamaño máximo	1 ½" (38.1mm)	NTC 77	Masa UnitariaSuelta	1790.741Kg/m ³	NTC 77
Masa Unitaria Compactada.	1671.013 Kg/m ³	NTC 92	Masa Unitaria Compactada.	1902.503Kg/m ³	NTC 92
Densidad Aparente	2691Kg/m ³	NTC 176	Densidad Aparente	2608Kg/m ³	NTC 237
Absorción	0.75%	NTC 176	Absorción	2.25%	NTC 237
Contenido total de humedad	0.509 %	NTC 1776	Contenido total de humedad	1.943%	NTC 1776

Tabla 4-1: Caracterización de los materiales.

La caracterización de los agregados revela diferencias en sus propiedades físicas clave, el agregado grueso exhibe una masa unitaria compacta menor que en el agregado fino, esto puede indicar que la masa del material por unidad de volumen es menor, por lo que existe una gran cantidad de espacio entre las partículas individuales; el agregado fino presenta una densidad aparente similar aunque ligeramente menor que la del agregado grueso, indicando que el agregado fino tiene una mayor cantidad de vacíos entre las partículas en relación con su masa total, esto influye en la cantidad de agua que puede retener o absorber, siendo mayor en comparación con la del agregado grueso.

4.2 Sección promedio y área de contacto por tratamiento

4.2.1 Tablillas de configuración lisa

Para el cálculo de la sección promedio en tablillas con factor: configuración-lisas (L) y con factor rugosidad (R-S), se realizó un registro del perímetro de dos secciones por cada una, teniendo en cuenta el tramo que se encontrará embebido en el concreto, verificando grosor y ancho para cada sección, tal y como se ejemplifica en la Figura 4-1 con la tablilla LR7-1; la caracterización dimensional de las demás tablillas se puede observar en el anexo C.

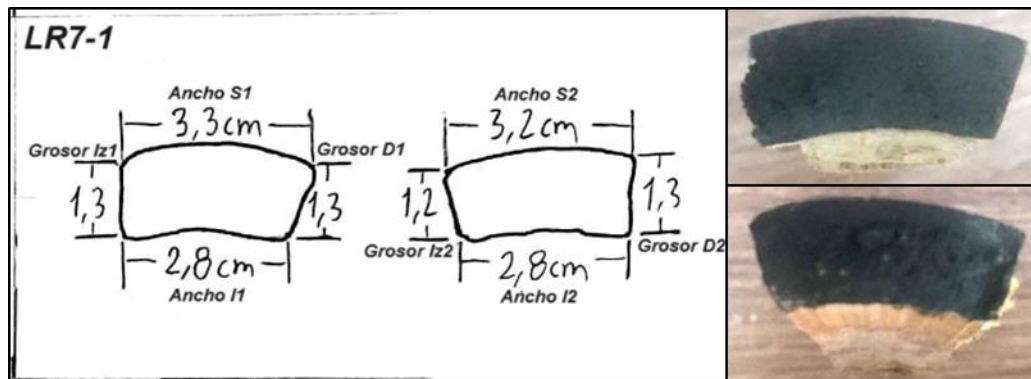


Figura 4-1: Ejemplo de registro de sección de tablillas. S: superior; I: inferior; Iz: izquierda; D: derecha

El área de contacto se calculó sumando las áreas de las caras en contacto con el concreto (paralelas a la tablilla) con un empotramiento de 10cm. Para el caso de la tablilla LR7-1 se registró un ancho promedio de 3.03cm y un grosor de 1.28cm, cuya área de sección y área de contacto para las cuatro caras, fueron calculadas de acuerdo con las ecuaciones 4.1 y 4.2, respectivamente. La mayor área de contacto se registró en la tablilla LS7-2, los resultados para los demás tipos de probetas pueden observarse en la Tabla 4-2.

$$AS_{prom} = An_{prom} \times Gr_{prom} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

$$Area_{contacto_{prom}} = (2 \times An_{prom} \times Em) + (2 \times Gr_{prom} \times Em) \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Donde:

AS_{prom} = Es la sección promedio de la tablilla (cm^2)

An_{prom} = Es el ancho promedio de la tablilla (cm)

Gr_{prom} = Es el grosor promedio de la tablilla (cm)

Em = Es la longitud de empotramiento (10cm) de la tablilla

$$\text{Para: } AS_{prom_LR7-1} = 3.03cm \times 1.28cm = 3.86 \text{ cm}^2$$

$$Area_{contacto_{prom_LR7-1}} = (2 \times 3.03cm \times 10cm) + (2 \times 1.28cm \times 10cm) = 86 \text{ cm}^2$$

Tipo	Ancho prom. (cm)	Grosor prom. (cm)	Área sección (cm ²)	Área de contacto (cm ²)
LR7-1	3.03	1.28	3.86	86.0
LR7-2	3.08	1.23	3.77	86.0
LR7-3	3.23	1.30	4.19	90.5
LS7-1	3.13	1.33	4.14	89.0
LS7-2	3.33	1.33	4.41	93.0
LS7-3	3.25	1.05	3.41	86.0
LR14-1	2.85	1.18	3.35	80.5
LR14-2	3.10	1.15	3.57	85.0
LR14-3	2.98	1.25	3.72	84.5
LS14-1	3.05	1.05	3.20	82.0
LS14-2	3.30	1.33	4.37	92.5
LS14-3	3.10	1.25	3.88	87.0
LR28-1	3.28	1.20	3.93	89.5
LR28-2	3.20	1.23	3.92	88.5
LR28-3	3.30	1.15	3.80	89.0
LS28-1	3.00	1.30	3.90	86.0
LS28-2	2.93	1.10	3.22	80.5
LS28-3	2.95	1.25	3.69	84.0

Tabla 4-2: Áreas de contacto para tablillas lisas

4.2.2 Tablillas de configuración acanalada

Para el cálculo de la sección promedio en tablillas con factor configuración: acanaladas (A) y con factor rugosidad (R-S), se realizó igualmente un registro del perímetro de dos secciones por cada una, teniendo en cuenta la parte vacía por los espacios dentados de 1.0 x 0.5 cm, en el tramo que se encontrará embebido en el concreto, verificando grosor y ancho para cada sección (ver anexo C).

El área de contacto se calculó sumando las áreas de las caras en contacto con el concreto (paralelas a la tablilla) con un empotramiento de 10cm, menos el área de los espacios ocasionados por la canalización que ahora ocupa el concreto. Por cada cara frontal de esta configuración el área se reduce en 5cm² debido a los 10 espacios retirados, como se aprecia en la comparativa de áreas de contacto entre las tablillas lisas y acanaladas en la Figura 4-2.

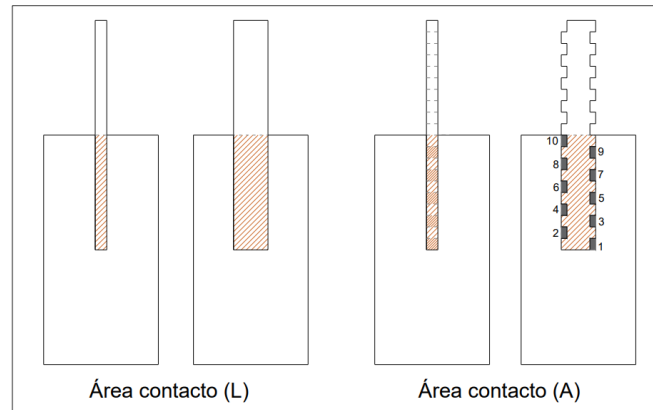


Figura 4-2: Comparación de áreas de contacto para tablillas Lisas y Acanaladas

Para el caso de la tablilla AR7-1 se registró un ancho promedio de 3.15 cm y un grosor de 1.23 cm, cuya área de sección y área de contacto para las cuatro caras, fueron calculadas de acuerdo con las ecuaciones 4.1 y 4.3, respectivamente. La mayor área de contacto se registró en la tablilla AS7-2, los resultados para las demás pueden observarse en la Tabla 4-3.

$$Area_contacto_{prom} = (2 \times An_{prom} \times Em) + (2 \times Gr_{prom} \times Em) - AT_{red} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

Donde:

An_{prom} = Es el ancho promedio de la tablilla (cm)

Gr_{prom} = Es el grosor promedio de la tablilla (cm)

Em = Es la longitud de empotramiento (10cm) de la tablilla

AT_{red} = Es el área de la tablilla reducida por la canalización (cm²)

$$AT_{red} = (2 \times \#N_{esp} \times (An_{dent} \times Gr_{dent})) \quad (\text{Ecuación 4.3.1})$$

Donde:

An_{dent} = Es el ancho de un espacio retirado por canalización (1cm)

Gr_{dent} = Es el grosor de un espacio retirado por canalización (0.5cm)

$\#N_{esp}$ = Es el número de espacios retirados por canalización (10)

$$\text{Para: } AS_{prom_AR7-1} = 3.15\text{cm} \times 1.23\text{cm} = 3.86\text{ cm}^2$$

$$AT_{red} = (2 \times 10 \times (1\text{cm} \times 0.5\text{cm})) = 10\text{cm}^2$$

$$Area_contacto_{prom_AR7-1} = (2 \times 3.15\text{cm} \times 10\text{cm}) + (2 \times 1.23\text{cm} \times 10\text{cm}) - 10\text{cm}^2 = 77.50\text{cm}^2$$

Tipo	Ancho prom. (cm)	Grosor prom. (cm)	Área sección (cm ²)	Área de contacto (cm ²)
AR7-1	3.15	1.23	3.86	77.50
AR7-2	3.10	1.33	4.11	78.50
AR7-3	3.18	1.30	4.13	79.50
AS7-1	3.35	1.28	4.27	82.50
AS7-2	3.20	1.25	4.00	79.00
AS7-3	3.15	1.30	4.10	79.00

AR14-1	2.93	1.23	3.58	73.00
AR14-2	3.05	1.30	3.97	77.00
AR14-3	3.05	1.28	3.89	76.50
AS14-1	3.03	1.18	3.55	74.00
AS14-2	3.05	1.33	4.04	77.50
AS14-3	2.95	1.23	3.61	73.50
AR28-1	3.33	0.98	3.24	76.00
AR28-2	3.13	0.95	2.97	71.50
AR28-3	3.35	1.05	3.52	78.00
AS28-1	3.30	1.03	3.38	76.50
AS28-2	3.15	0.98	3.07	72.50
AS28-3	3.33	0.95	3.16	75.50

Tabla 4-3: Áreas de contacto para tablillas acanaladas.

4.3 Esfuerzo de adherencia por tratamiento

El esfuerzo de tracción (σ_t) se obtiene al dividir la fuerza máxima, con la que la tablilla pasa de estar adherida a deslizarse del concreto, entre el área de contacto obtenida para cada probeta, como esta área es paralela a la fuerza resultante, se trata de un esfuerzo cortante, ver ecuación 4.4.

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A_{contacto}} \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

4.3.1 Esfuerzos presentados en tablillas lisas (L)

Los esfuerzos calculados teniendo en cuenta el factor configuración liso, y el factor rugosidad (R-S) se desglosa en la tabla 4-4.

Tipo	Área de contacto (cm ²)	Fuerza máxima (Kg-f)	Desplazamiento critico (mm)	Esfuerzo máximo de extracción (Kg/cm ²)
LR7-1	86.0	168.81	1.65	1.96
LR7-2	86.0	175.95	1.52	2.05
LR7-3	90.5	253.41	2.15	2.80
LR7-Prom	87.5	199.39	1.77	2.27
LS7-1	89.0	51.22	0.13	0.58
LS7-2	93.0	58.72	0.27	0.63
LS7-3	86.0	20.30	0.10	0.24
LS7-Prom	89.3	43.41	0.16	0.48
LR14-1	80.5	191.69	2.45	2.38
LR14-2	85.0	169.48	2.19	1.99
LR14-3	84.5	127.87	2.51	1.51
LR14-Prom	83.3	163.02	2.38	1.96
LS14-1	82.0	84.83	1.10	1.03

LS14-2	92.5	123.66	0.90	1.34
LS14-3	87.0	139.55	0.81	1.60
LS14-Prom	87.2	116.01	0.94	1.33
LR28-1	89.5	183.39	1.45	2.05
LR28-2	88.5	136.54	0.58	1.54
LR28-3	89.0	191.80	0.87	2.16
LR28-Prom	89.0	170.58	0.97	1.92
LS28-1	86.0	38.21	0.02	0.44
LS28-2	80.5	64.19	0.98	0.80
LS28-3	84.0	32.18	1.00	0.38
LS28-Prom	83.5	44.86	0.66	0.54

Tabla 4-4: Resultados de pruebas de extracción para tablillas lisas

Se evidencia que los esfuerzos promedio para el tratamiento con presencia del factor rugosidad: Resina (R), fueron disminuyendo con el paso del tiempo partiendo con un valor de 2,27 Kg/cm² a los 7 días, luego de 1,96 Kg/cm² a los 14 días, concluyendo con un valor de esfuerzo de 1.92 Kg/cm² a los 28 días; sin embargo, se observa que estos valores de esfuerzos tienden a ser más altos que los obtenidos en los tratamientos sin resina (S), estos últimos presentaron un aumento de los esfuerzos entre los días 7 (0.48 Kg/cm²) y 14 (1.33 Kg/cm²), con una disminución entre los días 14 y 28 (0.54 Kg/cm²), posiblemente ocasionado por la contracción y expansión de la guadua al reaccionar con el concreto. Teniendo en cuenta lo anterior, a los 28 días de curado, donde el concreto ha alcanzado casi el 100% de su capacidad, para la configuración lisa, se presentó un mayor esfuerzo en el tratamiento con resina LR28-3, con una sección promedio de 3.30x1.15cm de 2.16 Kg/cm².

4.3.2 Esfuerzos presentados en tablillas acanaladas (A)

Los esfuerzos calculados teniendo en cuenta el factor configuración acanalado, y el factor rugosidad (R-S) se desglosa en la tabla 4-5.

Tipo	Área de contacto (cm ²)	Fuerza máxima (Kg-f)	Desplazamiento crítico (mm)	Esfuerzo máximo de extracción (Kg/cm ²)
AR7-1	77.50	267.83	4.75	3.46
AR7-2	78.50	494.32	3.90	6.30
AR7-3	79.50	340.09	4.15	4.28
AR7-Prom	78.50	367.41	4.27	4.68
AS7-1	82.50	356.09	4.01	4.32
AS7-2	79.00	138.35	3.95	1.75
AS7-3	79.00	180.12	3.93	2.28
AS7-Prom	80.17	224.86	3.96	2.78
AR14-1	73.00	266.14	3.07	3.65
AR14-2	77.00	166.01	6.70	2.16
AR14-3	76.50	338.53	3.56	4.43

AR14-Prom	75.50	256.89	4.44	3.41
AS14-1	74.00	111.96	5.48	1.51
AS14-2	77.50	161.01	3.25	2.08
AS14-3	73.50	56.18	3.58	0.76
AS14-Prom	75.00	109.72	4.11	1.45
AR28-1	76.00	163.48	1.91	2.15
AR28-2	71.50	108.57	3.26	1.52
AR28-3	78.00	329.66	2.94	4.23
AR28-Prom	75.17	200.57	2.71	2.63
AS28-1	76.50	82.20	2.71	1.07
AS28-2	72.50	95.30	2.41	1.31
AS28-3	75.50	81.44	1.20	1.08
AS28-Prom	74.83	86.31	2.11	1.16

Tabla 4-5: Resultados de pruebas de extracción para tablillas acanaladas

Se evidencia que los esfuerzos promedio para el tratamiento con presencia del factor rugosidad: Resina (R), también fueron disminuyendo con el paso del tiempo, iniciando con un valor de 4.68 Kg/cm^2 a los 7 días, disminuyendo a 3.41 Kg/cm^2 en los 14 días finalizando con una capacidad de 2.63 Kg/cm^2 a 28 días, este valor es 32.82% mayor que el obtenido a 28 días con el tratamiento LR expuesto en la tabla 4-4, demostrando que la morfología de la tablilla presenta un componente positivo para el aumento del esfuerzo; además, estos resultados fueron mayores que los presentados en el tratamiento acanalado (A) sin resina (S), para estos últimos, parece ser que el fenómeno de contracción-expansión de la guadua no tuvo efecto, posiblemente porque las canalizaciones ayudan a prevenirlo, obteniendo valores de esfuerzo para 7 días de 2.78 Kg/cm^2 , 1.45 Kg/cm^2 a los 14 días y concluyendo con un esfuerzo de 1.16 Kg/cm^2 , al comparar este valor con el tratamiento LS, el esfuerzo era 1,14 veces mayor siendo el factor diferencial la morfología de la guadua. Teniendo en cuenta lo anterior, a los 28 días para el tratamiento AR, se presentó el mayor esfuerzo para el tratamiento con resina AR28-3 ($4,23 \text{ Kg/cm}^2$), con una sección promedio de $3.35 \times 1.05 \text{ cm}$.

4.4 Coeficiente de fricción por tratamiento

El coeficiente de fricción encontrado para este tipo de ensayo se trata de un coeficiente cinético, durante la extracción se mantiene una aceleración constante y la fuerza se aumenta gradualmente hasta que la tablilla se desliza del concreto a una fuerza de tracción (F_{Tr}) determinada. La fuerza resultante (F_R) será la ocasionada por la aceleración durante la prueba. Debe tenerse en cuenta que la velocidad con que se realizaron todos los ensayos fue la misma, $2.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (1.5 mm/min) y que la fuerza normal del peso del cilindro (F_P) se transfiere como un componente negativo ($\downarrow$) al agarre (Figura 4-3). Para el cálculo de la fuerza normal del peso del cilindro (Ecuación 4.5), se realizó un promedio de las masas registradas de todas las probetas obteniendo un valor de 3.694 Kg .

$$F_p = m_{PROM} \times g \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

Donde:

m_{PROM} = es la masa promedio de todas las probetas (Kg)

g = es la gravedad (9.81m/s^2)

$$F_p = (3.694 \text{ Kg}) \times (9.81\text{m/s}^2) = 36.238 \text{ N}$$

Para determinar la aceleración (a) se dividió la velocidad entre el tiempo que se alcanzó la mayor carga registrada. Para la fuerza de fricción (F_f) se realizó el respectivo despiece de fuerzas como se observa en la figura 4-3. El coeficiente de fricción (n) será entonces el resultado de dividir la fuerza de fricción (F_f) obtenida en la ecuación 4.6, y la fuerza perpendicular ejercida o fuerza normal (F_N) para retirar la tablilla (ver ecuación 4.7), siendo entonces $F_{Tr} = F_N$.

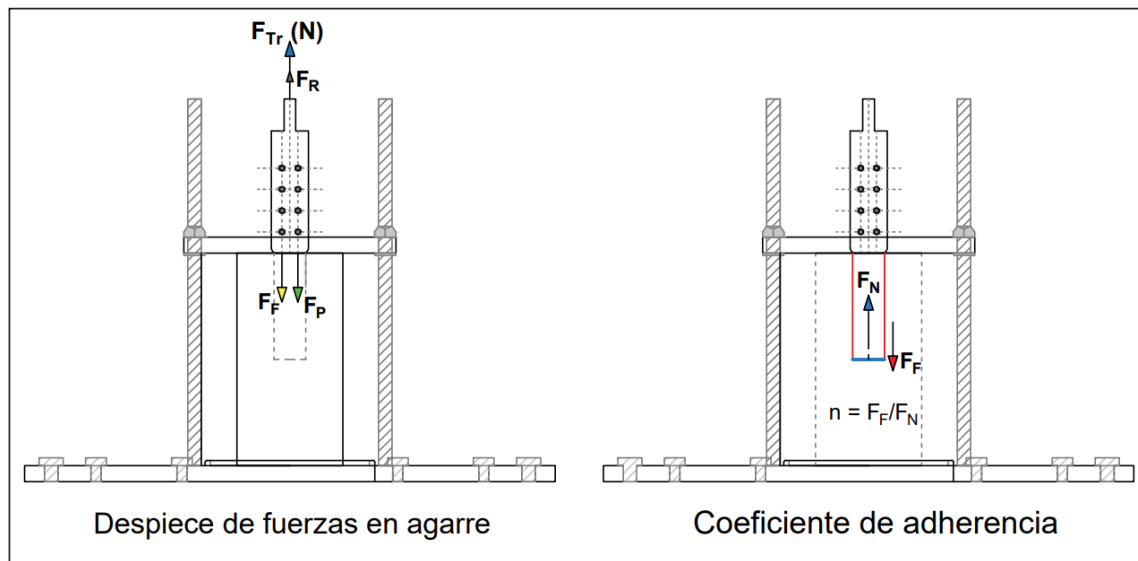


Figura 4-3: Fuerzas para el cálculo para el coeficiente de fricción de las probetas

Si se toma a F_R como resultante entonces:

$$\sum Y = F_{Tr} - F_p - F_f = F_R$$

$$F_f = F_{Tr} - F_R - F_p \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

$$F_R = m_{PROM} \times a \quad (\text{Ecuación 4.6.1})$$

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_{Ens}}{t_{Ens}} \quad (\text{Ecuación 4.6.2})$$

Donde:

F_{Tr} = Fuerza máxima registrada del ensayo de tracción (N)

F_p = Fuerza normal del peso del cilindro (N)

F_R = Fuerza resultante ocasionada por la aceleración durante la prueba (N)

a = Aceleración del ensayo (m/s^2)

V_{Ens} = Velocidad del ensayo de $2.5 \times 10^{-5} m/s$

t_{Ens} = Tiempo que duro el ensayo (s)

Como: $F_{Tr} = F_N$ y $F_F = n * F_N$; despejando el coeficiente de fricción (n) se tiene que:

$$n = \frac{F_F}{F_N} \quad (\text{Ecuación 4.7})$$

Calculando los valores para las ecuaciones 4.6 y 4.7, de la tablilla LR7-1 se tiene que:

$$a = \left(\frac{2.5 \times 10^{-5} m/s}{65.834 s} \right) = 3.80 \times 10^{-7} m/s^2$$

$$F_{R_{LR7-1}} = (3.694 Kg) \times (3.80 \times 10^{-7} m/s^2) = 1.40 \times 10^{-6} N$$

$$F_{F_{LR7-1}} = (1655.99 N) - (1.40 \times 10^{-6} N) - (36.238 N) = 1619.752 N$$

$$n = \frac{F_{F_{LR7-1}}}{F_{N_{LR7-1}}} = \frac{1619.752 N}{1655.99 N} = 0.978$$

Aplicado esto a los resultados obtenidos para cada tipo de probeta se obtienen los coeficientes de fricción en la tabla 4-6.

Coeficiente de fricción cinético para las muestras ensayadas							
Tipo	Fuerza máx. - FN (N)	Desplazamiento (mm)	Tiempo ensayo (s)	a (m/s^2)	F_R (N)	F_F (N)	Coeficiente (n)
LR7-1	1655.99	1.646	65.834	3.80E-07	1.40E-06	1619.752	0.978
LR7-2	1726.07	1.515	60.607	4.12E-07	1.52E-06	1689.832	0.979
LR7-3	2485.94	2.150	85.983	2.91E-07	1.07E-06	2449.702	0.985
LS7-1	502.507	0.130	5.200	4.81E-06	1.78E-05	466.269	0.928
LS7-2	576.003	0.266	10.655	2.35E-06	8.67E-06	539.765	0.937
LS7-3	199.127	0.096	3.828	6.53E-06	2.41E-05	162.889	0.818
AR7-1	2627.39	4.753	190.139	1.31E-07	4.86E-07	2591.152	0.986
AR7-2	4849.26	3.901	156.040	1.60E-07	5.92E-07	4813.022	0.993
AR7-3	3336.26	4.151	166.039	1.51E-07	5.56E-07	3300.022	0.989
AS7-1	3493.26	4.011	160.439	1.56E-07	5.76E-07	3457.022	0.990
AS7-2	1357.25	3.946	157.839	1.58E-07	5.85E-07	1321.012	0.973
AS7-3	1766.98	3.926	157.039	1.59E-07	5.88E-07	1730.742	0.979
LR14-1	1880.5	2.453	98.139	2.55E-07	9.41E-07	1844.262	0.981
LR14-2	1662.62	2.191	87.639	2.85E-07	1.05E-06	1626.382	0.978
LR14-3	1254.43	2.506	100.238	2.49E-07	9.21E-07	1218.192	0.971
LS14-1	832.16	1.100	44.000	5.68E-07	2.10E-06	795.922	0.956
LS14-2	1213.14	0.901	36.040	6.94E-07	2.56E-06	1176.902	0.970
LS14-3	1369.02	0.811	32.440	7.71E-07	2.85E-06	1332.782	0.974
AR14-1	2610.81	3.068	122.739	2.04E-07	7.52E-07	2574.572	0.986

AR14-2	1628.59	6.696	267.839	9.33E-08	3.45E-07	1592.352	0.978
AR14-3	3321	3.563	142.540	1.75E-07	6.48E-07	3284.762	0.989
AS14-1	1098.33	5.481	219.239	1.14E-07	4.21E-07	1062.092	0.967
AS14-2	1579.49	3.253	130.139	1.92E-07	7.10E-07	1543.252	0.977
AS14-3	551.127	3.583	143.339	1.74E-07	6.44E-07	514.889	0.934
LR28-1	1799.1	1.453	58.139	4.30E-07	1.59E-06	1762.862	0.970
LR28-2	1339.47	0.583	23.339	1.07E-06	3.96E-06	1303.232	0.973
LR28-3	1881.55	0.866	34.639	7.22E-07	2.67E-06	1845.312	0.978
LS28-1	374.794	0.016	0.640	3.91E-05	1.44E-04	338.556	0.903
LS28-2	629.679	0.981	39.239	6.37E-07	2.35E-06	593.441	0.942
LS28-3	315.714	0.995	39.804	6.28E-07	2.32E-06	279.476	0.885
AR28-1	1603.75	1.913	76.539	3.27E-07	1.21E-06	1567.512	0.977
AR28-2	1065.11	3.263	130.539	1.92E-07	7.07E-07	1028.872	0.966
AR28-3	3233.99	2.938	117.539	2.13E-07	7.86E-07	3197.752	0.989
AS28-1	806.379	2.711	108.440	2.31E-07	8.52E-07	770.141	0.955
AS28-2	934.855	2.408	96.339	2.60E-07	9.59E-07	898.617	0.961
AS28-3	798.957	1.198	47.939	5.21E-07	1.93E-06	762.719	0.955

Tabla 4-6: Coeficiente de fricción para las probetas ensayadas

Se aprecia que a los 28 días para el caso de las tablillas con el factor configuración: lisas (L) y acanaladas (A), que fueron tratadas con resina (R), se obtuvieron los coeficientes de adherencia (n) mayores, siendo para AR: 0.977 y LR: 0.977 en comparación con las que carecieron del factor rugosidad (S), AS: 0.957 y LS: 0.91. Observando estos resultados se puede observar la importancia de la presencia de la resina en los tratamientos para obtener un mayor valor en el coeficiente.

4.5 Ajuste del modelo para los esfuerzos por tratamiento

Teniendo presentes los resultados de los esfuerzos en los ensayos, los modelos de análisis numérico se adaptaron de acuerdo a lo siguiente:

El cálculo del módulo de Young (E) fue adaptado según los días de curado del concreto, reemplazando la resistencia ($f'c$) en la ecuación 4.8, estableciendo que, para análisis a los 7 días con un $f'c$ de 10.03MPa, se utilizó un E de 12352MPa; para análisis a los 14 días con un $f'c$ de 19.20MPa se utilizó un E de 17089MPa; y para análisis a los 28 días con un $f'c$ de 21MPa se utilizó un E de 17872MPa

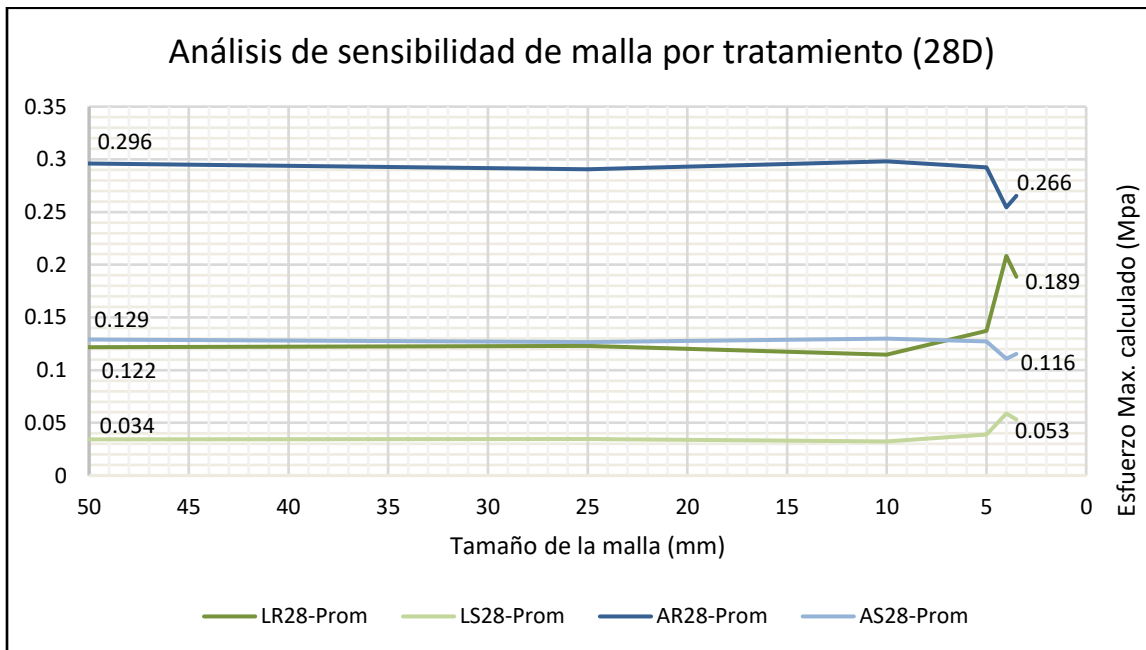
$$E = 3900\sqrt{(f'c \text{ en MPa})} \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

Los comportamientos superficiales (Surface behavior) se mantuvieron como tipo atado o “tied” para todos los tratamientos. Como recomendación del programa, el valor para la pendiente de la curva de cierre de presión (K) suele tomarse entre 5 a 50 veces el módulo de Young (E) del material a analizar (concreto), un valor muy grande resultaría en un incremento en

los esfuerzos calculados. Para la configuración lisa se tomó un valor de 5 veces E, por lo tanto, el valor de K será de 61760 a los 7 días, 85445 a lo 14 días y 89360 a los 28 días. Para la configuración acanalada el valor de K será de 0.001 para todos los días, como se explicó anteriormente en la elaboración del modelo matemático.

La pendiente de la curva de adherencia o “stick slope” indica cual es la fuerza (τ) que alcanza el tratamiento en un desplazamiento relativo, y resulta del ajuste anteriormente expuesto, por lo que depende de la fricción, desplazamiento y fuerza máxima soportada por los tratamientos. Debido a que Prepomax calcula el esfuerzo al retirar la tablilla del concreto, verificando la interacción de los elementos finitos del modelo, la pendiente se ajustó teniendo en cuenta el mejor caso de análisis de mallado para dichos elementos.

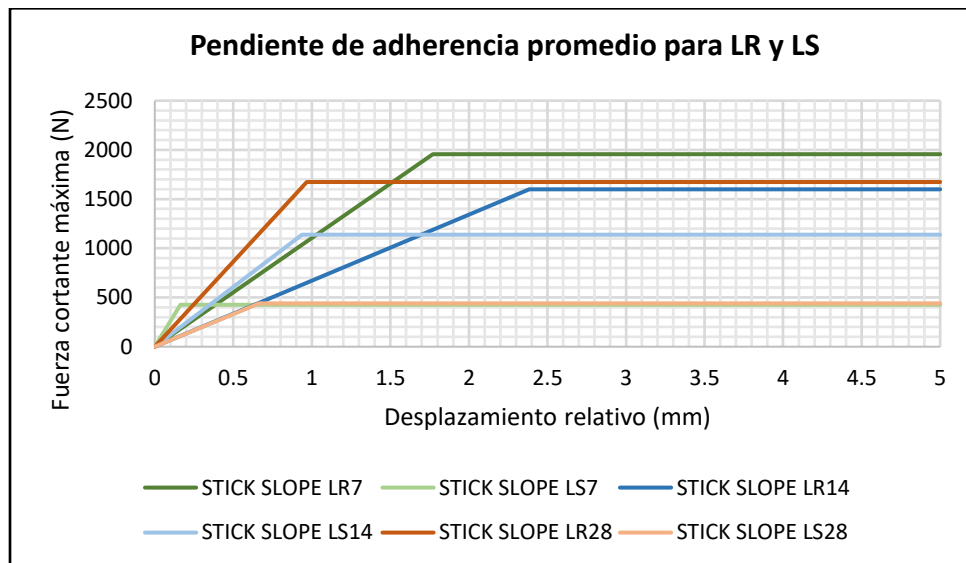
Como resultado del análisis de malla se tiene que, para el caso de las probetas lisas el número de nodos para concreto aumenta a medida que se reduce la malla, pasando de 3005 con 100mm a los 265089 con 3.5mm, y para el caso de las probetas acanaladas el número de nodos también aumenta pasando de 27103 con 100mm a los 272654 con 3.5mm, entre más precisa es la malla más cercanos son los resultados calculados a los reales, el análisis realizado por el programa se muestra en la Grafica 4-1 para los tratamientos promedio LR28, LS28, AR28 y AS28.



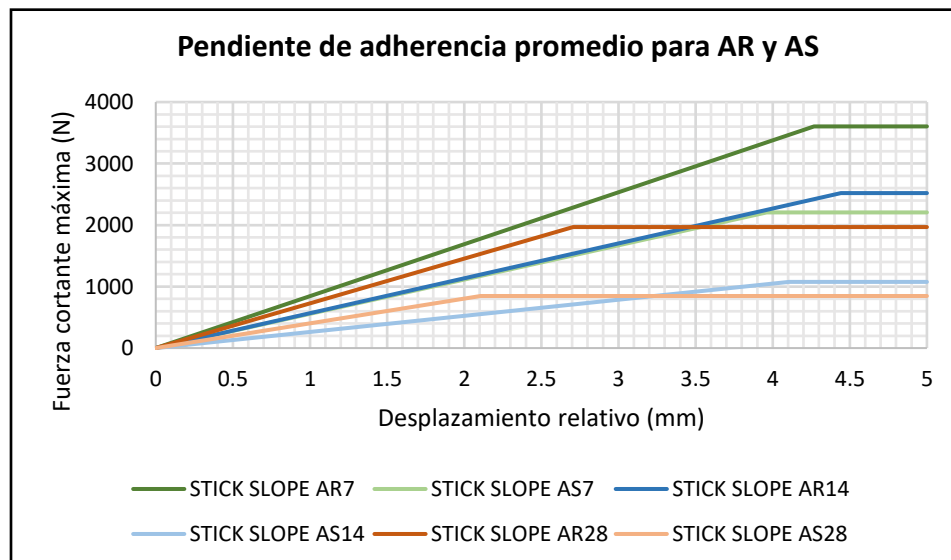
Grafica 4-1: Comparativa del análisis de sensibilidad de malla de los resultados calculados por Prepomax para los tratamientos promedio LR28, LS28, AR28 y AS28

Las pendientes para los tratamientos de configuración lisa (L) (Gráfica 4-2) son mayores a las de los tratamientos de configuración acanalada (A) (Gráfica 4-3), sin embargo, se puede

observar que la fuerza es mayor con una configuración A, porque tuvieron un desplazamiento critico más grande. Los tratamientos lisos LR7 y LR14 tuvieron una pendiente menos inclinada que sus contrapartes sin resina, mientras que el tratamiento LR28 tuvo una pendiente más inclinada, puesto que el desplazamiento critico fue muy cercano al de LS28, lo que podría significar que este tratamiento perdió adherencia con el paso del tiempo. Los tratamientos acanalados AR7, AR14 y AR28 tuvieron una pendiente más inclinada que sus contrapartes sin resina, sin embargo, los tratamientos a 7 y 14 días mantuvieron un desplazamiento critico grande en comparación al de los de 28 días, lo que podría significar que este tratamiento también perdió adherencia con el paso del tiempo.



Grafica 4-2: Pendientes de adherencia para tratamientos con tablilla lisa (L)



Grafica 4-3: Pendientes de adherencia para tratamientos con tablilla acanalada (A)

Los valores para el coeficiente de fricción o “Friction coeficient” fueron modificados utilizando los calculados anteriormente, y los valores para las condiciones de contorno (BCs) “Displacement” y “Traction Force” fueron cambiados por el desplazamiento critico promedio y la fuerza de tracción promedio máxima registrada por cada tratamiento. El resumen de los cambios realizados para cada modelo se muestra en la Tabla 4-7.

Ajuste configuración L	LR7-Prom	LS7-Prom	LR14-Prom	LS14-Prom	LR28-Prom	LS28-Prom
E (Mpa)	12352		17089		17872	
Surface behavior Type	Tied		Tied		Tied	
Surface behavior "K"	61760		85445		89360	
Stick slope (N/mm ³)	0.0077	0.0180	0.0050	0.0085	0.0119	0.0049
Friction coefficient (n)	0.9808	0.8943	0.9767	0.9667	0.9778	0.9103
BCs_Displacement (mm)	1.77	0.16	2.38	0.94	0.97	0.66
BCs_Traction Force (N)	1956	425.88	1599.18	1138.11	1673.37	440.06
Ajuste configuración A	AR7-Prom	AS7-Prom	AR14-Prom	AS14-Prom	AR28-Prom	AS28-Prom
E (Mpa)	12352		17089		17872	
Surface behavior Type	Tied		Tied		Tied	
Surface behavior "K"	0.001		0.001		0.001	
Stick slope (N/mm ³)	0.0066	0.0042	0.0046	0.0021	0.0061	0.0034
Friction coefficient (n)	0.9893	0.9808	0.9843	0.9594	0.9774	0.9570
BCs_Displacement (mm)	4.27	3.96	4.44	4.11	2.71	2.11
BCs_Traction Force (N)	3604.30	2205.83	2520.13	1076.32	1967.62	846.73

Tabla 4-7: Ajustes del modelo por tratamiento para configuración L y A

4.5.1 Comparativa de esfuerzos teóricos y experimentales

Los resultados de análisis del software por cada tratamiento promedio se desglosan en la tabla 4-8, donde se aprecia que los esfuerzos encontrados mediante el ensayo de adherencia y los determinados por Prepomax fueron en promedio un 99,59% idénticos entre sí. Al estar calibrados, es posible determinar otros factores de interés, como el esfuerzo que ocurre justo en la superficie donde se unen el concreto y las tablillas o las zonas críticas donde puedan originarse las grietas de falla.

Resultados obtenidos mediante ensayo experimental y análisis del software							
Tipo	Coeficiente (n)	Esfuerzo máx. ensayo (MPa)	Esfuerzo máx. Prepomax (MPa)	Número de nodos	mallla (mm)	Pendiente de adherencia (N/mm ³)	Esfuerzo máx. superficial (MPa)
LR7-Prom	0.9808	0.2226	0.2233	265089	3.5	0.0077	0.0533
LS7-Prom	0.8943	0.0472	0.0472	265089	3.5	0.0180	0.0113
AR7-Prom	0.9893	0.4587	0.4528	265089	3.5	0.0066	0.1399
AS7-Prom	0.9808	0.2729	0.2697	265089	3.5	0.0042	0.0839

LR14-Prom	0.9767	0.1925	0.1952	265089	3.5	0.0050	0.0466
LS14-Prom	0.9667	0.1300	0.1306	265089	3.5	0.0085	0.0304
AR14-Prom	0.9843	0.3343	0.3307	272654	3.5	0.0046	0.1027
AS14-Prom	0.9594	0.1424	0.1435	272654	3.5	0.0021	0.0453
LR28-Prom	0.9778	0.1879	0.1887	272654	3.5	0.0119	0.0450
LS28-Prom	0.9103	0.0531	0.0533	272654	3.5	0.0049	0.0127
AR28-Prom	0.9774	0.2581	0.2655	272654	3.5	0.0061	0.0821
AS28-Prom	0.9570	0.1134	0.1155	272654	3.5	0.0034	0.0361

Tabla 4-8: Comparativa de esfuerzos máximos obtenidos mediante ensayo experimental y análisis del software Prepomax

Tomando como ejemplo la tablilla LR7-1, el análisis permite relacionar los puntos de falla teóricos con la falla real ocasionada por el esfuerzo máximo en el tratamiento, así, en la Figura 4-4, la falla se presenta en el punto donde la tablilla comienza a deslizarse, es decir en su desplazamiento crítico, representado en el programa con una tonalidad rojiza.

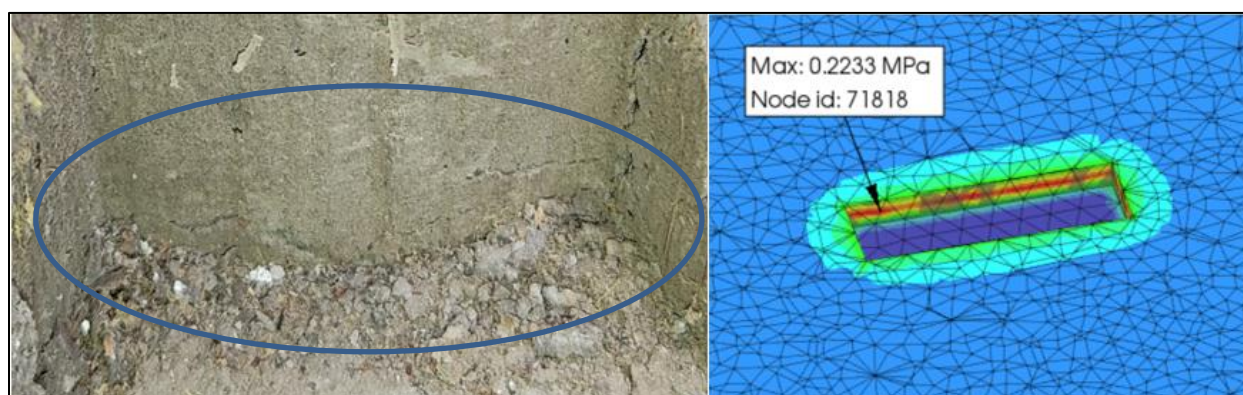


Figura 4-4: Grietas por esfuerzo máximo y localización según Prepomax

4.6 Análisis estadístico para esfuerzo de adherencia.

4.6.1 Estadística descriptiva.

La Tabla 4-9 muestra los resultados obtenidos de los ensayos de adherencia. La totalidad de los ensayos suman 38; de los cuales 36 forman parte del diseño experimental multifactorial para cálculo de adherencia, mientras que los 2 restantes corresponden a cilindros de concreto simple empleados para la prueba de resistencia a la compresión del concreto para verificación del diseño de mezcla.

Número	Configuración	Rugosidad	Sección (cm)	Curado	Fuerza Máxima (N)	Desplazamiento (mm)
1	L	R	3.03 x 1.28	7D	1655.99	1.65
2	L	R	3.08 x 1.23	7D	1726.07	1.52
3	L	R	3.23 x 1.30	7D	2485.94	2.15
4	L	S	3.13 x 1.33	7D	502.51	0.13

5	L	S	3.35 x 1.35	7D	576.00	0.27
6	L	S	3.25 x 1.05	7D	199.13	0.10
7	A	R	3.15 x 1.23	7D	2627.39	4.75
8	A	R	3.10 x 1.33	7D	4849.26	3.90
9	A	R	3.18 x 1.30	7D	3336.26	4.15
10	A	S	3.35 x 1.28	7D	3493.26	4.01
11	A	S	3.20 x 1.25	7D	1357.25	3.95
12	A	S	3.15 x 1.30	7D	1766.98	3.93
13	L	R	2.85 x 1.18	14D	1880.50	2.45
14	L	R	3.10 x 1.15	14D	1662.62	2.19
15	L	R	2.98 x 1.25	14D	1254.43	2.51
16	L	S	3.05 x 1.05	14D	832.16	1.10
17	L	S	3.30 x 1.38	14D	1213.14	0.90
18	L	S	3.10 x 1.25	14D	1369.02	0.81
19	A	R	2.93 x 1.23	14D	2610.81	3.07
20	A	R	3.05 x 1.30	14D	1628.59	6.70
21	A	R	3.05 x 1.28	14D	3321.00	3.56
22	A	S	3.03 x 1.18	14D	1098.33	5.48
23	A	S	3.05 x 1.33	14D	1579.49	3.25
24	A	S	2.95 x 1.23	14D	551.13	3.58
25	L	R	3.20 x 1.23	28D	1799.10	1.45
26	L	R	3.28 x 1.20	28D	1339.47	0.58
27	L	R	3.30 x 1.15	28D	1881.55	0.87
28	L	S	3.00 x 1.30	28D	374.79	0.02
29	L	S	2.93 x 1.10	28D	629.68	0.98
30	L	S	2.95 x 1.25	28D	315.71	1.00
31	A	R	3.13 x 0.95	28D	1603.75	1.91
32	A	R	3.33 x 0.98	28D	1065.11	3.26
33	A	R	3.30 x 1.05	28D	3233.99	2.94
34	A	S	3.30 x 1.03	28D	806.38	2.71
35	A	S	3.15 x 0.98	28D	934.86	2.41
36	A	S	3.33 x 0.95	28D	798.96	1.20
37	Concreto simple		10 x 20	7D	78770	NA
38	Concreto simple		10 x 20	14D	150780	NA

Tabla 4-9: Recopilación de resultados de muestras distinguidas por configuración y rugosidad para tratamiento estadístico

Los parámetros más importantes de estudio son los esfuerzos de tracción y los coeficientes de fricción registrados para cada tratamiento. En la tabla 4-10, se muestra la estadística descriptiva para los resultados de ambos parámetros, de acuerdo con los datos obtenidos en los ensayos de adherencia. Al realizar el análisis para un concreto curado a los 28 días, se observa que el tipo de probeta más relevante fue el acanalado con resina (AR28) presentando esfuerzos superiores a los demás tratamientos, siendo 2.3 veces superior al tratamiento acanalado sin resina (AS28), 1.39 veces mayor al liso con resina (LR28) y 4.91 veces más grande que el liso sin resina (LS28). Otra característica relevante se observa en el coeficiente

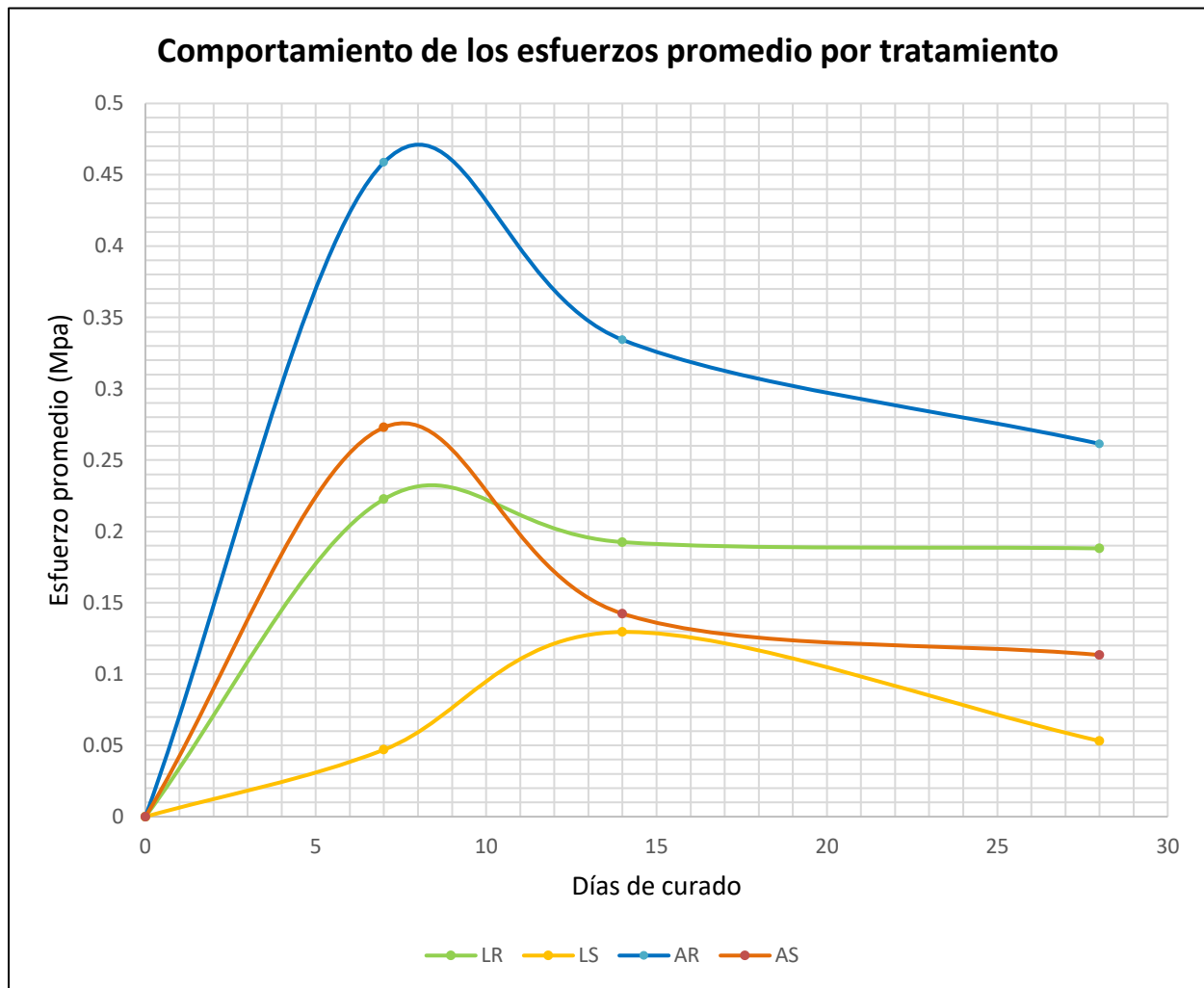
de fricción a los 28 días, obteniendo un resultado similar para los tratamientos de resina AR28 y LR28, con un valor de 0.98, siendo este un 7.36% mayor que el obtenido para LS28. Dado que el coeficiente de fricción representa la magnitud de la fuerza de fricción que contrarresta el movimiento entre dos superficies en contacto, un coeficiente elevado indica una mayor dificultad para el deslizamiento, lo que conlleva a una adherencia más efectiva entre la guadua y el concreto.

Es importante destacar que la desviación estándar de los esfuerzos fue notablemente mayor en los casos que involucraron el uso de resina, sugiriendo que los resultados obtenidos en estos tratamientos se apartaron significativamente de la media, lo que evidencia la naturaleza heterogénea de la guadua como material, por ello, también se observa una alta variabilidad en los coeficientes de variación (CV) para la mayoría de los tratamientos, lo cual indica una dispersión considerable en los datos. Esta dispersión podría mitigarse mediante la realización de ensayos con un mayor número de muestras, no obstante, los datos recopilados resultan valiosos para identificar qué tratamiento promueve una mejor adherencia entre el concreto y la guadua, lo cual está alineado con el propósito principal de la investigación.

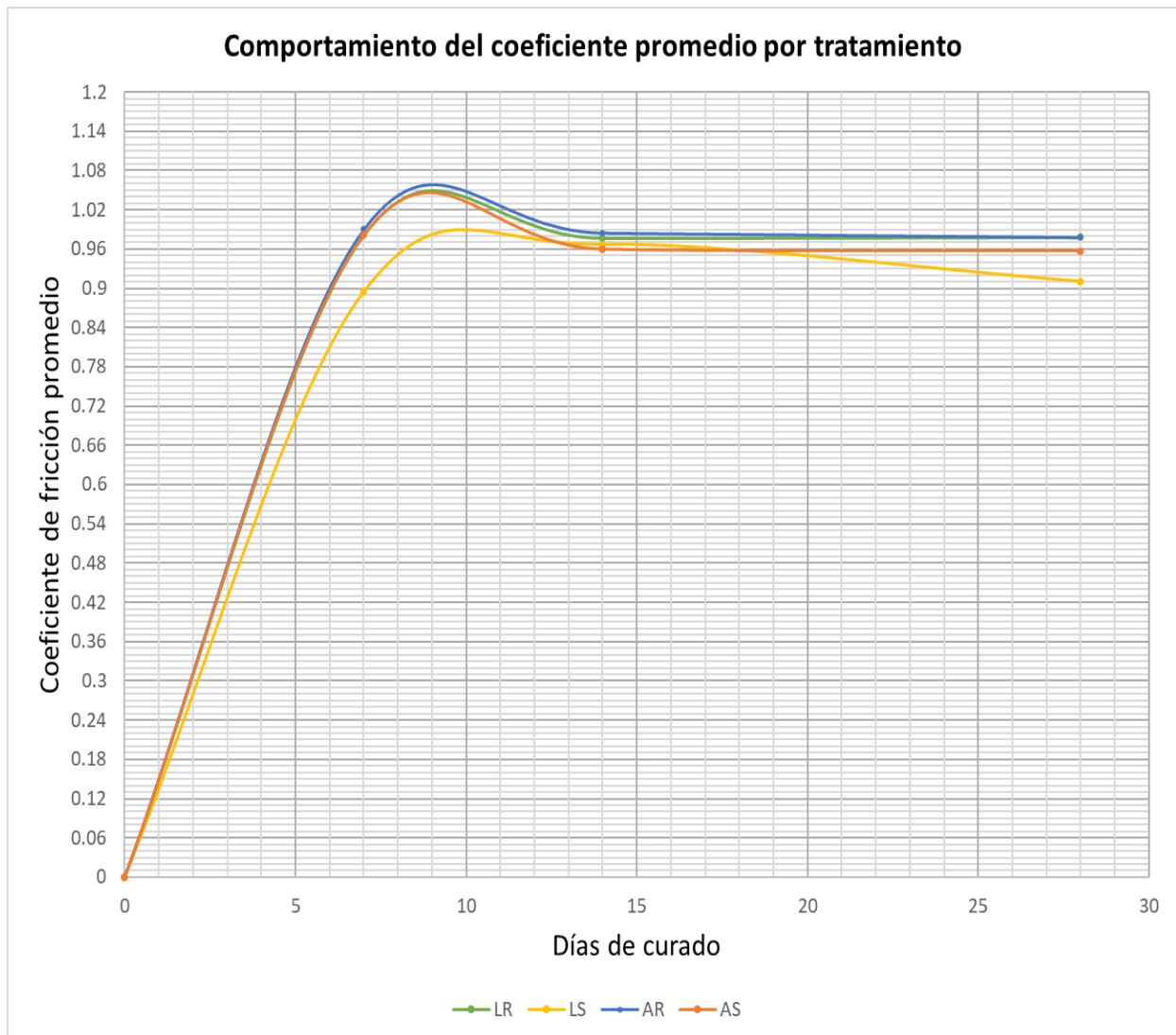
Estadística descriptiva de los esfuerzos de tracción y coeficientes de fricción según tratamiento						
Tratamiento	Media de los esfuerzos (Mpa)	Desviación estándar	Coeficiente de variación de los esfuerzos (%)	Media de los coeficientes (n)	Desviación estándar	Coeficiente de variación de los coeficientes (%)
LR7	0.223	0.0452	20.32%	0.981	0.004	0.41%
LS7	0.047	0.0208	44.20%	0.894	0.066	7.41%
AR7	0.459	0.1434	31.26%	0.989	0.003	0.32%
AS7	0.273	0.1328	48.67%	0.981	0.008	0.84%
LR14	0.192	0.0426	22.15%	0.977	0.005	0.51%
LS14	0.129	0.0279	21.57%	0.967	0.009	0.94%
AR14	0.334	0.1131	33.82%	0.984	0.006	0.60%
AS14	0.142	0.0646	45.38%	0.959	0.022	2.33%
LR28	0.188	0.0335	17.84%	0.978	0.004	0.44%
LS28	0.053	0.0219	41.29%	0.91	0.029	3.21%
AR28	0.261	0.1435	54.91%	0.977	0.011	1.17%
AS28	0.113	0.0135	11.88%	0.957	0.004	0.39%

Tabla 4-10: Estadística descriptiva del esfuerzo y coeficiente resultante por tipo de tratamiento.

La gráfica 4-4 muestra el comportamiento de los esfuerzos promedio durante los 28 días de curado observando una similitud en el comportamiento de un mayor valor en el séptimo día con una disminución gradual hasta el día 28; la gráfica 4-5 muestra el promedio de los valores del coeficiente de fricción promedio a través del tiempo de curado, presentando una forma y comportamiento similar ante los 4 tratamientos establecidos.

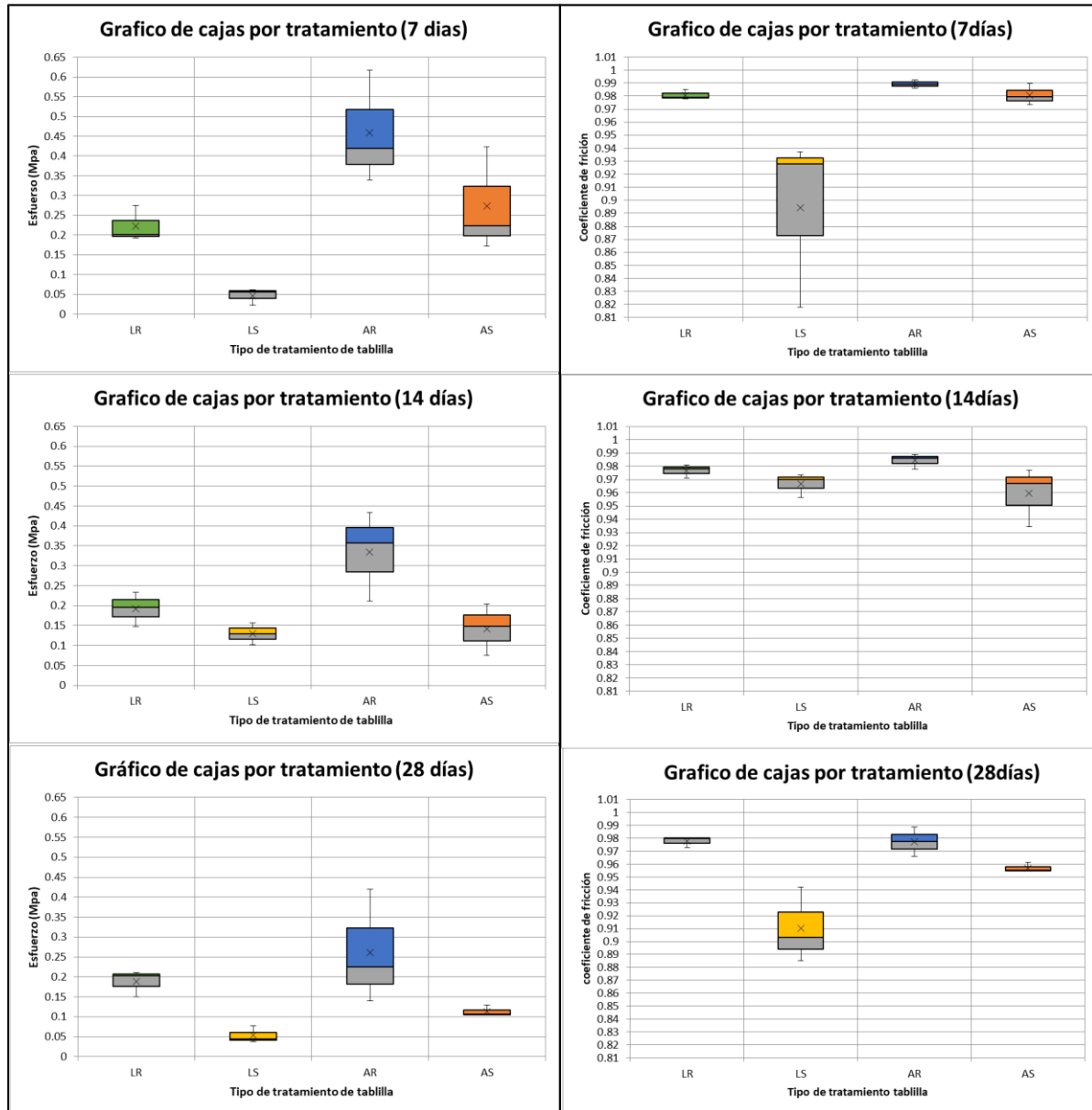


Grafica 4-4: Comportamiento en el tiempo del esfuerzo de tracción promedio por tipo de tratamiento.



Grafica 4-5: Comportamiento en el tiempo del coeficiente de fricción promedio por tipo de tratamiento.

4.6.2 Gráficos de cajas y bigotes por esfuerzo y coeficiente

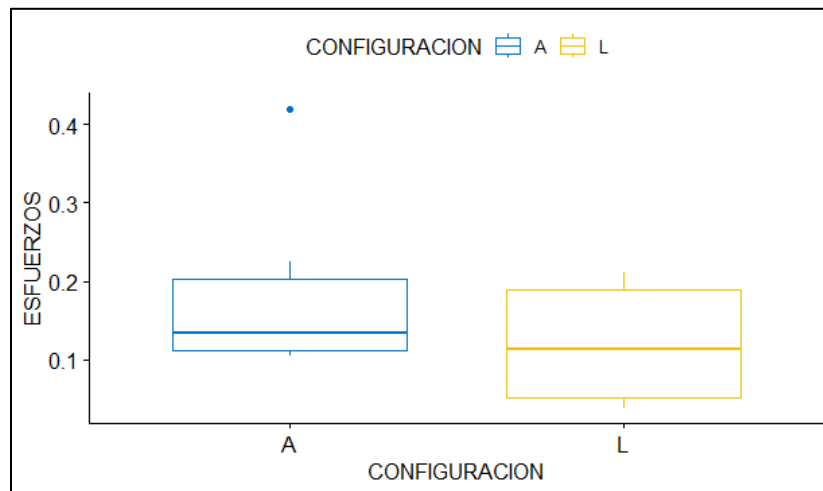


Grafica 4-6: Comparación de comportamiento en el tiempo del esfuerzo y coeficiente de fricción promedio por tipo de tratamiento.

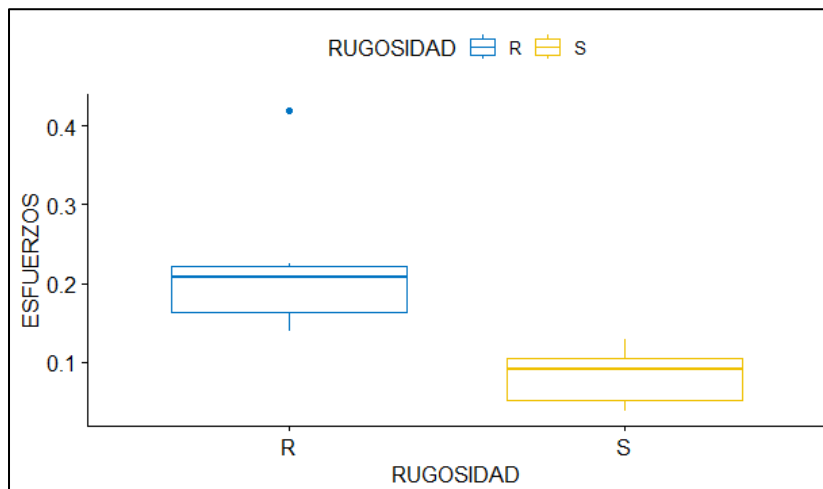
Como se ilustra en la Grafica 4-6, los tratamientos LR y AR exhibieron tanto para el esfuerzo como para el coeficiente de fricción, una mejor estabilidad a lo largo de los tres períodos de curado. No obstante, se evidencia que el esfuerzo requerido para extraer la tablilla disminuyó gradualmente en todos los casos. Este fenómeno sugiere que la expansión y contracción experimentada por la tablilla de guadua dentro del concreto representa un desafío difícil de mitigar. Este efecto solo se observó en el tratamiento LS, donde a los 7 días se presentó un esfuerzo de tracción pequeño, coincidiendo con la alta humedad de la tablilla, a los 14 días, la

tablilla pareció adherirse más al concreto (expansión) pues hubo un aumento en el esfuerzo, sin embargo, a los 28 días los esfuerzos registrados fueron similares a los del séptimo día (contracción). La aplicación de un tratamiento que involucre canalizaciones y resina parece reducir este efecto adverso.

Se realizó el análisis de varianza multifactorial en el software R, con la interfaz gráfica RStudio (Versión 4.3.3, © 2009-2024 RStudio, PBC). En el caso del factor configuración (A-L), en la gráfica 4-7, para los resultados en los esfuerzos, existe un ligero aumento respecto a la configuración acanalada de la guadua vs la lisa, sin embargo, las cajas del diagrama se traslapan, por lo que hay que aplicar otros métodos para determinar si los valores de los esfuerzos son estadísticamente significativos. Para los datos relacionados al factor de rugosidad (gráfica 4-8), existe un aumento significativo de los esfuerzos por la presencia de la resina en las configuraciones, los diagramas de caja no se traslapan permitiendo observar posibles diferencias.

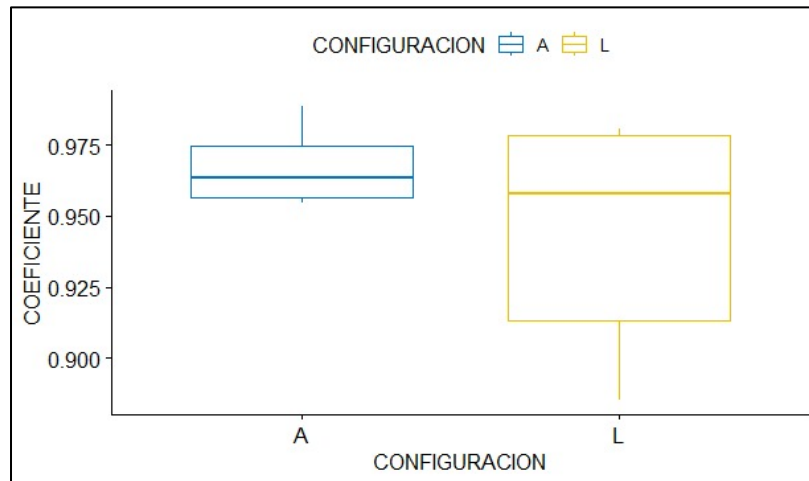


Grafica 4-7: Diagrama de caja del factor configuración (Acanalado vs Lisos) para los esfuerzos

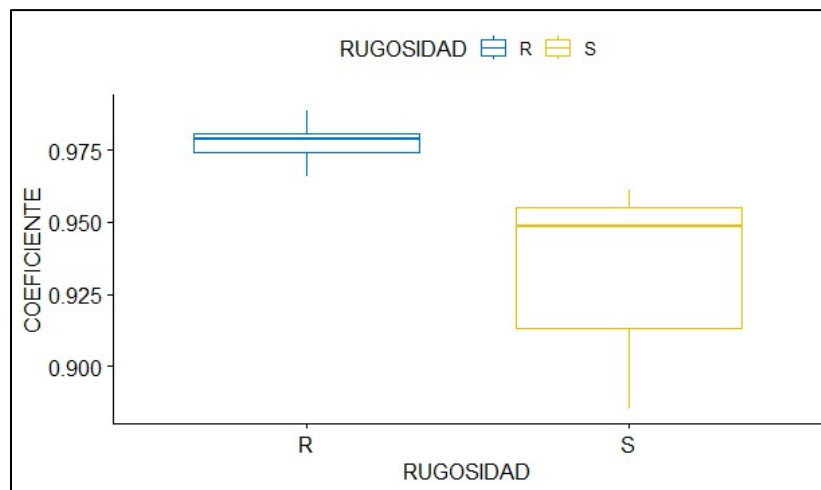


Grafica 4-8: Diagrama de caja del factor rugosidad (Con resina vs Sin resina) para los esfuerzos

Para el caso de los coeficientes de fricción (grafica 4-9), existe un aumento mínimo en el valor relacionado con el factor configuración (A-L), sin embargo, como las cajas del diagrama se traslapan, hay que realizar un análisis de varianza para determinar la robustez de los datos. Para los resultados relacionados al factor rugosidad, existe un aumento significativo en el valor presentado en configuraciones con presencia de resina, los diagramas de caja no se traslapan demostrando que posiblemente existan diferencias entre los tratamientos (ver grafica 4-10).



Grafica 4-9: Diagrama de caja del factor configuración (Acanalado vs Lisos) para el coeficiente



Grafica 4-10: Diagrama de caja del factor rugosidad (Con resina vs Sin resina) para el coeficiente.

4.6.3 ANOVA Multifactorial.

La ANOVA multifactorial se realiza para determinar si hay diferencias significativas entre los tratamientos. La prueba de hipótesis realizada, se presenta de la siguiente forma:

- H_0 : Todas las medias de los tratamientos son iguales.
- H_1 : Al menos una media de los tratamientos diferentes.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Valor-P (>F)
Configuración	1	0.013383	0.013383	2.3909	0.16063
Rugosidad	1	0.060062	0.060062	10.7301	0.01126
Configuración: Rugosidad	1	0.000129	0.000129	0.0230	0.88328
Residuos	8	0.044780	0.005598		

Tabla 4-11: Tabla de ANOVA multifactorial para los esfuerzos a 28 días.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Valor-P (>F)
Configuración	1	0.0016004	0.0016004	6.2898	0.036488
Rugosidad	1	0.0057996	0.0057996	22.7929	0.001401
Configuración: Rugosidad	1	0.0016647	0.0016647	6.5425	0.033761
Residuos	8	0.0020356	0.0002544		

Tabla 4-12: Tabla de ANOVA multifactorial para los coeficientes a 28 días.

La tabla 4-11 ANOVA descompone la variabilidad de los esfuerzos en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que un valor-P (0.0113), es menor que 0.05, el factor RUGOSIDAD tiene un efecto estadísticamente significativo sobre los esfuerzos con un nivel de confianza del 95%.

La tabla 4-12 ANOVA analiza la dispersión de los valores obtenidos para el coeficiente considerando también otros factores. Obteniendo que 3 valores-P correspondientes a configuración, rugosidad, y configuración: rugosidad son menores que 0.05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el coeficiente rechazando la hipótesis nula y determinando que si hay una diferencia significativa en las medias obtenidas por tratamiento.

4.6.3.1 Análisis ANOVA multifactorial – Esfuerzo a 28D

Nivel	Media	Límite Inferior	Límite Superior
CONFIGURACIÓN			
A	0.1874	0.1169	0.2578
L	0.1206	0.0501	0.1910
RUGOSIDAD			
R	0.2247	0.1543	0.2952
S	0.0833	0.0128	0.1537
CONFIGURACIÓN por RUGOSIDAD			
A;R	0.2614	0.1618	0.3610
A;S	0.1134	0.0137	0.2130
L;R	0.1880	0.0884	0.2877
L;S	0.0531	0.0465	0.1528

Tabla 4-13: Medias por Mínimos Cuadrados para ESFUERZOS con intervalos de confianza del 95%

La tabla 4-13 muestra la media de los esfuerzos correspondiente a cada configuración donde se mantiene la tendencia de que el valor más alto corresponde a la combinación AR con un valor de 0.2614, seguido por LR, AS y finalizando con LS con 0.0531, evidenciando que la presencia de resina aporta directamente en obtener esfuerzos mayores. La verificación de los supuestos para garantizar la validez y fiabilidad de los datos obtenidos, se desglosa en el ANEXO D.

4.6.3.2 Análisis ANOVA multifactorial – Coeficiente a 28D

Nivel	Media	Límite Inferior	Límite Superior
CONFIGURACIÓN			
A	0.96718	0.95218	0.98219
L	0.94407	0.92906	0.95907
RUGOSIDAD			
R	0.97762	0.96261	0.99262
S	0.93363	0.91863	0.94864
CONFIGURACIÓN por RUGOSIDAD			
A;R	0.9774	0.95618	0.99862
A;S	0.95697	0.93574	0.97819
L;R	0.9773	0.95661	0.99906
L;S	0.9103	0.88908	0.93152

Tabla 4-14: Medias por Mínimos Cuadrados para COEFICIENTES con intervalos de confianza del 95%.

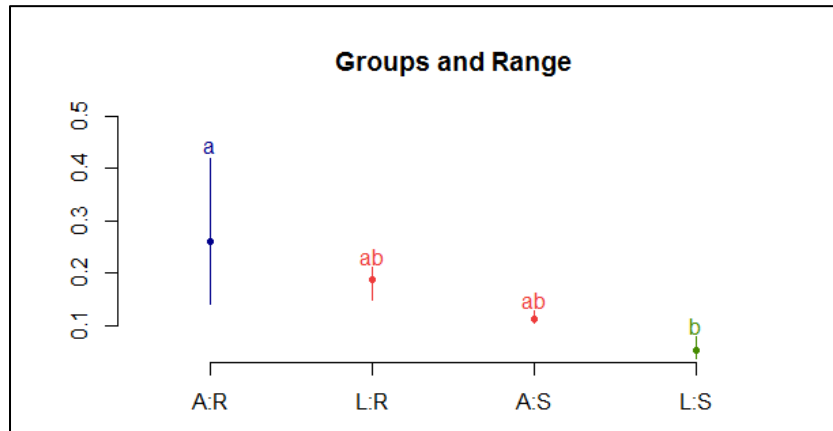
La tabla 4-14 muestra la media de los coeficientes correspondiente a cada tratamiento, donde se mantiene la tendencia de que el valor más alto corresponde a la combinación AR con un valor de 0.9774, seguido por LR, AS y finalizando con LS con 0.9103, evidenciando que la presencia de resina aporta directamente en obtener esfuerzos mayores. La verificación de los supuestos para garantizar la validez y fiabilidad de los datos obtenidos de este caso, también se desglosa en el ANEXO D.

4.6.4 Prueba de Tukey.

Después de comprobar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los factores, nace la necesidad de identificar cual es el mejor tratamiento del experimento, por lo que se realiza la prueba de Tukey.

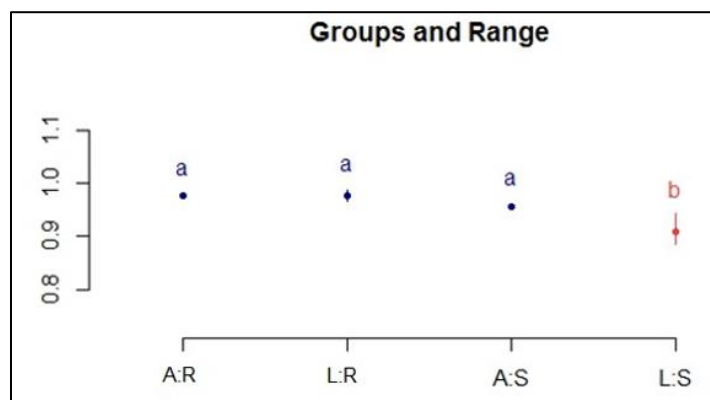
Para el caso de los esfuerzos, la Gráfica 4-11 presenta los resultados del test HSD de Tukey para configuración y rugosidad como ya se había enunciado en la tabla ANOVA, existe diferencia significativa en el tratamiento establecido por configuración: Acanalada y rugosidad: Con Resina; siendo esta el tratamiento con el mejor desempeño corresponde a “AR” (0.2613967—a), debido a que este presenta el esfuerzo promedio más alto, continua el tratamiento “LR” (0.1880586—ab), establecido por la presencia de resina en el tratamiento, continuado por “AS” (0.1133553—ab) y

el ultimo nivel por el tratamiento “LS” (0.053116—b), el análisis señala que hay diferencias entre tratamientos con letras diferentes, por ende, el tratamiento AR (a) y LS (b) presenta una diferencia significativa en sus valores, dándole importancia a la presencia de resina y la configuración acanalada.



Grafica 4-11: Grupos y Rangos de test HSD de Tukey de los factores configuración y rugosidad para los esfuerzos.

Para el caso de los coeficientes de fricción, la Gráfica 4-12 presenta los resultados del test HSD de Tukey para configuración y rugosidad como ya se había enunciado en la tabla ANOVA, existe diferencia significativa en el tratamiento establecido por configuración: Acanalada y rugosidad: Con Resina; siendo esta el tratamiento con el mejor desempeño corresponde a “AR” (0.9774—a), debido a que este presenta el esfuerzo promedio más alto, continua el tratamiento “LR” (0.9773—a), establecido por la presencia de resina en el tratamiento, continuado por “AS” (0.95697—a) y el ultimo nivel por el tratamiento “LS” (0.9103—b), el análisis indica que hay diferencias entre tratamientos con letras diferentes, por ende, el tratamiento AR (a) y LS (b) presenta una diferencia significativa en sus valores dando una importancia para la presencia de resina y la configuración acanalada.

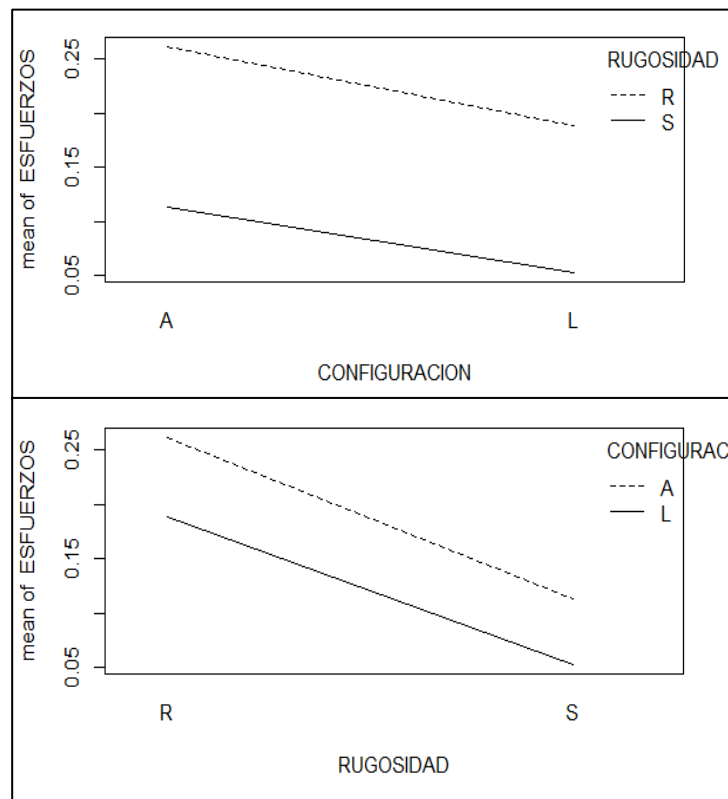


Grafica 4-12: Grupos y Rangos de test HSD de Tukey de los factores configuración y rugosidad para el coeficiente.

4.6.5 Gráficos de interacción.

4.6.5.1 Esfuerzos

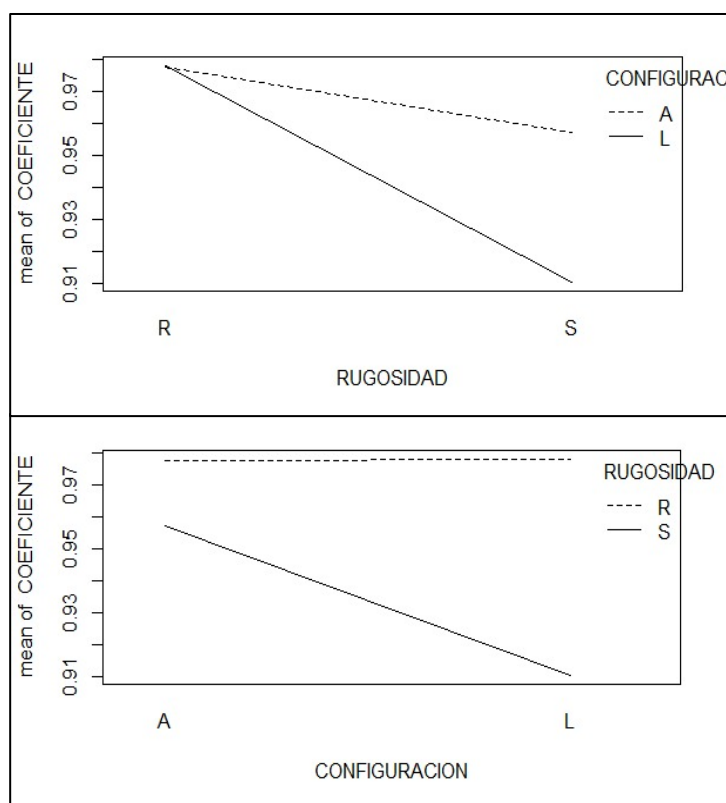
Las Gráfica 4-13 presenta la interacción entre los factores configuración y rugosidad, las gráficas evidencian un comportamiento inversamente proporcional, demostrando que las probetas que presentan la tablilla de bambú acanalada y con resina tuvieron un mayor esfuerzo que las tablillas que son lisas con o sin tratamiento de resina. Los datos relacionados a los tratamientos “AS”, “LS” y “LR” no presentaron diferencias estadísticamente significativas en los esfuerzos registrados.



Grafica 4-13: Promedio de los esfuerzos según los factores de configuración y rugosidad en relación a su dependencia

4.6.5.2 Coeficiente

Las Gráfica 4-15 evidencia que para los valores de coeficiente obtenidos la resina es fundamental sin tener presente el factor configuración, debido a que no existieron grandes variaciones en los datos obtenidos con este factor, mientras que la ausencia de esta destacó notoriamente el valor de coeficiente determinado.



Grafica 4-14: Promedio del coeficiente de fricción según los factores de configuración y rugosidad en relación a su dependencia

4.6.6 Discusión de resultados

Tomando la tablilla lisa sin tratamiento (LS) como punto de referencia, se observó que el esfuerzo promedio para la tablilla acanalada con resina (AR) fue 4.92 veces mayor, siendo un tratamiento significativamente mejor, como se detalla en la tabla 4-15. Este resultado sugiere que la aplicación de resina tiene un impacto considerable en la mejora de la adherencia. Respecto a los coeficientes de fricción, existe una similitud notable entre los resultados de AR y LR, posiblemente debido a la aplicación de la resina (epóxico), esto evidencia la importancia potencial de dicho tratamiento en la interacción entre la guadua y el concreto.

Comparativa de esfuerzos promedio (Mpa) por tipo de tratamiento (28 días)				
TIPO	LR	LS	AR	AS
τ (Mpa)	0.1881	0.0531	0.2614	0.1134
Incremento	3.54	1.00	4.92	2.13
Comparativa del coeficiente de fricción promedio por tipo de tratamiento (28 días)				
TIPO	LR	LS	AR	AS
n	0.9774	0.9103	0.9778	0.9570
Incremento	1.07	1.00	1.07	1.05

Tabla 4-15: Comparativa de esfuerzos de adherencia y coeficiente de fricción promedio por tratamiento (28D)

En la tabla 4-16, se encuentran los resultados de los esfuerzos de tracción obtenidos por otros autores, en ella se puede observar que el esfuerzo de tracción promedio para el mejor tratamiento (Tablilla acanalada con resina - AR), a los 28 días de curado, fue de 2,65 Kg/cm², el cual es diferente a los 6.04Kg/cm² obtenidos por Vargas (2016), utilizando un tratamiento similar con tablilla acanalada y concreto de 21Mpa, sin embargo, hay que tener en cuenta que el aditivo epóxico en su caso fue asfalto líquido, y las longitudes de empotramiento para sus probetas variaron entre 15cm y 20cm.

Poveda (2011) por su parte obtuvo un esfuerzo considerablemente mejor de 14.64Kg/cm², al emplear tablillas acanaladas de guadua prefabricadas con tratamientos específicos de secado, estabilización dimensional, control de humedad y mineralización, además, utilizó cilindros de 15x30cm de concreto prefabricado para garantizar que esta variable no interfiriera en el análisis de los resultados, con una resistencia a la compresión alta ($f'c = 50\text{MPa}$). la combinación de estos y otros factores pueden ser la causa en la diferencia de los esfuerzos encontrados en esta investigación.

Esfuerzo de adherencia entre el concreto y la guadua por tipo de tratamiento			
Autor	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Autor	Esfuerzo (Kg/cm ²)
Poveda, W. (2011)-Acanalada con mineralización (28 días). Em = 10cm	14.64	Poveda, W. (2011)-Lisa con mineralización (28 días). Em = 10cm	5.44
Vargas (2016)-Acanalada con asfalto (28 días). Em = 15-20cm	6.04	Vargas (2016)-Lisa con asfalto (28 días). Em = 15-20cm	5.27
Rojas, V. & Ceballos, J. (2024) - Acanalada con resina (28 días). Em = 10cm	2.65	Rojas, V. & Ceballos, J. (2024) - Lisa con resina (28 días). Em = 10cm	1.92

Nota: "Em" se refiere a la distancia de empotramiento de las probetas

Tabla 4-16: Comparación con otros autores de la capacidad de adherencia (kg/cm²) entre el concreto y la guadua

Comparando los esfuerzos de tracción para varillas de acero corrugado #3 y #4 de la tabla 4-17, obtenidos por Osorio (2014), con los obtenidos con guadua en el mejor tratamiento a los 28 días, se evidencia que los esfuerzos entre la guadua y el concreto solo representan entre un 3.3% a 4.1% de los esfuerzos obtenidos entre el acero y el concreto. En este caso aunque la guadua puede tener una mejor adherencia al concreto en ciertas condiciones, el acero tiene una estructura molecular más ordenada y una mayor cohesión interna en sus partículas, esto le confiere una mayor resistencia a la tracción, ya que las fuerzas aplicadas se distribuyen de manera más uniforme a lo largo de su estructura y no a través de las fibras como en el caso de la guadua, es por esto que el acero generalmente supera a la guadua en resistencia a la tracción debido a sus propiedades intrínsecas y diseño estructural específico para este tipo de carga

Probeta	Fuerza (N)	Esfuerzo (Mpa)
Varilla #3 en agregado mixto	28500	6.35
Varilla #4 en agregado mixto	47100	7.87
Tablilla AR28	1967.62	0.26
Comparativa respecto a #3 (%)	6.90%	4.09%
Comparativa respecto a #4 (%)	4.18%	3.30%

Tabla 4-17: Comparativa de resultados de tracción para probetas con acero corrugado y tablillas de tratamiento AR28

Tanto la madera como la guadua son materiales de origen natural, al analizar los coeficientes obtenidos en la investigación contra los expuestos en la Norma UNE 12812 (2008), se observa que los límites para los coeficientes encontrados en los diferentes tratamientos, se encuentran en el rango para madera establecido por esta norma, los cuales oscilan entre 0.8 y 1. Ver tabla 4-18.

Coeficiente de fricción entre las superficies de estudio a los 28 días		
Tratamiento	Límite inferior	Límite superior
Guadua acanalada con resina epóxica (AR)/Concreto	0.957	0.999
Guadua acanalada sin resina (AS)/Concreto	0.936	0.978
Guadua lisa con resina epóxica (LR)/Concreto	0.956	0.999
Guadua lisa sin resina (LS)/Concreto	0.889	0.932
Madera/Concreto (UNE-EN:12812)	0.800	1.000

Tabla 4-18: Comparativa de límites para coeficientes de fricción entre guadua y concreto

Capítulo 5

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

La presencia de resina epóxica (Topex Dur 1-1) en las tablillas de guadua afecta directamente los valores del esfuerzo y el coeficiente de fricción encontrados en la investigación, según la prueba HSD_Tukey, la aplicación de resina permitió obtener el valor más alto de esfuerzo y coeficiente en “AR” con $\sigma_T = 0.261 (\pm 0.0996)$ Mpa y $n = 0.977 (\pm 0.0212)$; mientras que su ausencia estableció los valores más bajos en “LS” con $\sigma_T = 0.053 (\pm 0.0996)$ Mpa y $n = 0.910 (\pm 0.0212)$.

El análisis del software Prepomax surge de la correlación entre el modelo ajustado y los resultados experimentales, destacando su dependencia de variables como la fricción, el desplazamiento y la fuerza máxima soportada por los tratamientos. Se observa que los esfuerzos máximos se concentran en el desplazamiento crítico de las probetas, tanto en el análisis numérico como en las fallas durante las pruebas prácticas. Las grietas originadas por estos esfuerzos se manifiestan en el punto de inicio del deslizamiento de la tablilla, coincidiendo con el momento en que la fuerza alcanza su valor máximo.

Considerar el uso de tablillas de guadua tratadas con resina como refuerzo del concreto junto con el acero es una opción viable. Aunque la guadua puede ofrecer una buena adherencia al concreto en ciertas condiciones, el acero suele superarla en resistencia a la tracción debido a sus propiedades inherentes y su diseño estructural específico para este tipo de carga. Por lo tanto, mientras que el uso de guadua como refuerzo es preferible a no utilizar ningún refuerzo, se recomienda que este se utilice en conjunto con el acero para garantizar la eficacia del refuerzo del concreto.

Los mayores esfuerzos de tracción se observaron en tablillas de mayor sección, manteniendo siempre el recubrimiento mínimo de refuerzo para el concreto. Según las mediciones realizadas, teniendo en cuenta la configuración, las secciones promedio que mostraron mejores esfuerzos fueron 3.35x1.05cm (± 2 mm) para tablillas acanaladas y 3.30x1.15cm (± 2 mm) para tablillas lisas.

La calidad de la adherencia entre el concreto y la guadua depende en gran medida del tratamiento aplicado a las tablillas. Aunque realizar tratamientos exhaustivos como canalizaciones, estabilización dimensional y aplicación de resina epóxica en guadua seca implica

tiempo y costos adicionales, en ciertas circunstancias donde los costos del acero son elevados, teniendo en cuenta los resultados de rugosidad, la simple aplicación de una emulsión epóxica o asfáltica puede resultar en un notable aumento, hasta 3.54 veces, en el rendimiento de la adherencia del concreto reforzado con este material, incluso sin un tratamiento completo.

5.2 Recomendaciones

Para poder entender más el comportamiento de la adherencia entre la guadua y el concreto se recomienda para futuras investigaciones aumentar el número de ensayos por tratamiento para poder obtener un análisis más minucioso en la significancia estadística de los datos.

Para el caso de los tratamientos al tener en cuenta la variable de configuración (Lisa y Acanalada) es preferible buscar que las tablillas que se pondrán a prueba a tracción tengan unas dimensiones iguales para cada muestra de prueba en sus dimensiones y morfología, debido a que la sección de la guadua en contacto con el concreto juega un papel crucial en la determinación de los esfuerzos.

Plantear la variable de la rugosidad con diferentes aditivos epóxicos para corroborar su relevancia entre los datos obtenidos, identificando si se mantiene la tendencia ante la determinación de los mayores esfuerzos y si existen otras marcas comerciales que aporten una mejor adherencia.

Con el fin de poder observar la influencia de los esfuerzos entre la guadua y el concreto, se recomienda realizar ensayos a diferentes longitudes de empotramientos, con el fin de verificar un valor de esfuerzo general.

Para futuras investigaciones, se sugiere verificar el comportamiento de la maquina universal de medición, corroborando que cuente con un agarre óptimo y con la capacidad de determinar de manera exacta la fuerza y el desplazamiento de la tablilla.

Se sugiere realizar una verificación constante de las condiciones de curado de los cilindros, siempre procurando que la sección superior donde inicia el empalme guadua-concreto no quede sumergida esto debido a que la guadua al ser material vegetal absorbería el agua alterando el experimento puesto que no se crearían los espacios vacíos entre la guadua y el concreto.

6. Bibliografía

- AENOR (1992): Norma Española UNE 36740:1992. Determinación de la adherencia de las barras y alambres de acero para armaduras de hormigón armado. Ensayo de la viga, 11 pp.216
- AENOR (2008): Norma Española UNE 12812:2008. Requisitos de comportamiento y diseño general. Tabla - Coeficiente de rozamiento para varias combinaciones de materiales
- AIS. (2010). *Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo resistente, NSR-10. Título C-G*. Bogotá: AIS.
- American Concrete Institute. (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91) [Práctica estándar para seleccionar proporciones para concreto normal, pesado y en masa]*. American Concrete Institute, Department of Defense - USA. ACI. Recuperado el 30 de 01 de 2022, de https://kashanu.ac.ir/Files/aci%20211_1_91.pdf
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (1991). Método de prueba estándar para comparar hormigones sobre la base de la adherencia desarrollada con acero reforzado. (ASTM C234-91a). <https://www.astm.org/c0234-91a.html>
- Boakye, Emmanuel. Osei, Jack. & Asamoah, Mark. (2018). Finite Element Modelling of Bamboo Reinforced Concrete Beams. *Journal of Construction and Building Materials Engineering* Volume 4 Issue 2. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/326082946>
- Brown, R. H., & McCormac, J. C. (2011). *Diseño de Concreto Reforzado* (Octava Edición con el Código ACI 318-08 ed., Vol. 1). México: Alfaomega Grupo Editor. Recuperado el 04 de 09 de 2021, de https://www.academia.edu/33322001/Diseno_de_Concreto_Reforzado_8a_Ed_Mc_Cormac
- Cedeño, A., & González, J. (2016). Estudios sobre los esfuerzos de adherencia desarrollados entre el acero y el concreto con cabillas de diámetro 3/8", 1/2", 5/8", 3/4" Y 1". *Tekhné*, 1(5). Recuperado a partir de: <https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/tekhne/article/view/2784>
- Cendales-Puentes, M. L. y Moreno-Molina, J. R. (2018). Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la guadua angustifolia Kunth originaria de armenia Quindío. Universidad Católica de Colombia. Bogotá D.C. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/10983/23924>
- Cervera Ruiz, M., & Blanco Díaz, E. (2015). *Resistencia de Materiales* (1 ed., Vol. 1). Barcelona, España: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). Recuperado el 10 de 09 de 2021, de <http://cervera.rmee.upc.edu/libros/Resistencia%20de%20Materiales.pdf>
- Ciro Velásquez, H. J., Osorio Saraz, J. A., & Vélez Restrepo, J. M. (2005). Determinación de la resistencia mecánica a tensión y cizalladura de la Guadua Angustifolia Kunth. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(1), Págs. 2709-2715. Recuperado el 04 de 09 de 2021, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0304-28472005000100010&script=sci_abstract&tlng=en
- Da Silva, F. J., & Fiorelli, J. (2013). Bambú e concreto: estudo da aderência da interface. *Ambiente Construído*, 13(3), 123-134.
- Duarte Toro, M., López Rodríguez, G. A., & Salcedo Rojas, J. L. (20 de Junio de 2021). Analysis of perpendicular compression resistance and determination of the circumferential elasticity modulus of Guadua Angustifolia

- Kunth from the Municipality of Pitalito. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16(12), Págs. 1225-1234. Recuperado el 10 de 09 de 2021, de http://www.arnpjournals.org/jeas/research_papers/rp_2021/jeas_0621_8609.pdf
- Duarte Toro, M., López Rodríguez, G. A., & Salcedo Rojas, J. L. (20 de Junio de 2021). Analysis of perpendicular compression resistance and determination of the circumferential elasticity modulus of Guadua Angustifolia Kunth from the Municipality of Pitalito. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16(12), Págs. 1225-1234. Recuperado el 10 de 09 de 2021, de http://www.arnpjournals.org/jeas/research_papers/rp_2021/jeas_0621_8609.pdf
- Estacio Castañeda D.G. (2013). Evaluación de las propiedades físico -mecánicas del Bambú – Bagua-amazonas. Universidad nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.14074/364>
- FAO. (2008). *Bosques y Energía - Cuestiones clave*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Recuperado el 04 de 09 de 2021, de <http://www.fao.org/3/i0139s/i0139s00.htm>
- Faria, Fernando (2013). Determinación del módulo de elasticidad y la relación de Poisson en concretos estructurales con base al diseño, conceptualización y fabricación de un equipo de ensayo adecuado para tal fin. Universidad católica andrés bello. Caracas - Venezuela. Recuperado de <http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAS4826.pdf>
- Feitosa, R. Q., & Lahr, F. A. R. (2005). Interface bambu-concreto: influência do teor de umidade do concreto na resistência de aderência. In: Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto, São Paulo, SP, 2004. São Paulo: IBRACON.
- Ghavami, K. (1995). Ultimate load behaviour of bamboo-reinforced lightweight concrete beams. *Cement and concrete composites*, 17(4), 281-288. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946595000188?via%3Dihub#!>
- Ghavami, K. (2005). Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement and concrete composites*, 27(6), 637-649. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946504001337>
- Ghavami, K.; Marinho, A. B. 2004. Propiedades físicas e mecánicas do colmo interior do bambú da especie guadua angustifolia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 9: 107-114.
- Giraldo Apolinar, J. (2011). Pruebas de anillos para determinar las constantes elásticas de los nudos de la guadua angustifolia. Universidad del valle. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10893/8011>
- Gómez Castro, R. C., & Acha Daza, N. V. (2010). *Tecnología del bambú* (Primer ed.). (M. Ramos Escamilla, & J. Serrudo Gonzales, Edits.) La Páz, Bolivia: ECORFAN. Recuperado el 04 de 09 de 2021, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=573073>
- Hernández, Jorge. E. & Ramos, Carlos A. (2023). Ensayos a flexión en vigas de concreto reforzado con Bambú (Especie Guadua Angustifolia). Recuperado de: <https://biblioteca.usco.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=48287>.
- Hidalgo Lopez, O. (1974). *Bambu - Su cultivo y aplicaciones*. (Primera ed., Vol. 1). Cali, Valle del Cauca, Colombia: Estudios Tecnicos Colombianos Limitada. Recuperado el 10 de 09 de 2021, de <http://hdl.handle.net/20.500.12324/33244>
- ICONTEC. (2001). *Norma Técnica Colombiana 3459: Agua para la elaboración de concreto*. Bogotá: ICONTEC. Recuperado el 01 de 06 de 2022

- ICONTEC. (2018). *Norma Técnica Colombiana 174: Especificaciones de los agregados para concreto*. Bogotá D.C.: ICONTEC. Recuperado el 01 de 03 de 2022
- ICONTEC. (2018). *Norma Técnica Colombiana 32: Tejido de alambre y tamices para propósitos de ensayo*. Bogotá D.C.: ICONTEC. Recuperado el 01 de 03 de 2022
- ICONTEC. (2018). *Norma Técnica Colombiana 77: Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos*. Bogotá D.C.: ICONTEC. Recuperado el 11 de 02 de 2022
- ICONTEC. (2019). *Norma Técnica Colombiana 129: Práctica para la toma de muestras de agregados*. Bogotá D.C.: ICONTEC. Recuperado el 01 de 03 de 2022
- ICONTEC. (2019). *Norma Técnica Colombiana 176: Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso*. Bogotá D.C.: ICONTEC. Recuperado el 01 de 03 de 2022
- ICONTEC. (2019). *Norma Técnica Colombiana 1776: Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados*. Bogotá D.C.: ICONTEC. Recuperado el 01 de 03 de 2022
- ICONTEC. (2019). *Norma Técnica Colombiana 4045: Agregados livianos para concreto estructural*. Bogotá: ICONTEC.
- ICONTEC. (2019). *Norma Técnica Colombiana 92: Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados*. Bogotá D.C.: ICONTEC. Recuperado el 01 de 03 de 2022
- ICONTEC. (2020). *Norma Técnica Colombiana 237: Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino*. Bogotá D.C.: ICONTEC. Recuperado el 01 de 03 de 2022
- ICONTEC. (2021). *Norma Técnica Colombiana 1377: Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio*. Bogotá D.C.: ICONTEC. Recuperado el 01 de 06 de 2022
- ICONTEC. (2021). *Norma Técnica Colombiana 396: Concretos. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto*. Bogotá D.C.: ICONTEC. Recuperado el 01 de 06 de 2022
- ICONTEC. (2021). *Norma Técnica Colombiana 673: Concretos. Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Bogotá D.C.: ICONTEC. Recuperado el 01 de 06 de 2022
- ICONTEC. (2022). *Norma Técnica Colombiana 3674: Práctica para la reducción del tamaño de las muestras de agregados*. Bogotá D.C.: ICONTEC. Recuperado el 01 de 03 de 2022
- Javadian, A., Wielopolski, M., Smith, I., & Hebel, D. (2016). Bond-behavior study of newly developed bamboo-composite reinforcement in concrete. *Construction and building materials*, 122(1), 110-117. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.084>
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto* (Primera ed.). Skokie, Illinois, EE.UU.: Portland Cement Association. Recuperado el 01 de 06 de 2022
- Lal Banik, R., Liese, W., & Köhl, M. (2015). *Bamboo - the plant and its uses - Chapter 3* (Vol. 1). (W. Liese, & M. Köhl, Edits.) New Delhi, India: Springer International. doi:DOI 10.1007/978-3-319-14133-6
- Luna, Patricia, Lozano, Jorge, & Takeuchi, Caori. (2014). Determinación experimental de valores característicos de resistencia para *Guadua angustifolia*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(1), 77-92. Epub 25 de noviembre de 2013. Recuperado en 11 de abril de 2024, de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2014000100007&lng=es&tlng=es.
- M. Terai y K., Minami. Research and development on bamboo reinforced concrete structure. 15th World conference on earthquake engineering. Lisbon: s.n., 2012. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_2020.pdf
- Mali, P. R., & Datta, D. (Marzo de 2020). Experimental evaluation of bamboo reinforced concrete beams. *Journal of Building Engineering*, 28(1), Art. 101071 with 11 pages. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101071>

- Mishra, M., Kumar, M. K., & Maity, D. (Diciembre de 2019). Experimental evaluation of the behaviour of bamboo-reinforced beam-column joints. *Innovative Infrastructure Solutions*, 4(1), Art. 47 with 13 pages. doi:<https://doi.org/10.1007/s41062-019-0237-9>
- Monteiro, S. N., & Barcellos, A. A. (2009). Bambu com polímeros. Viçosa, MG: Editora UFV.
- Murcia, Brand, & Alexander, Richard. (2015). Obtención del módulo de elasticidad y la relación de Poisson, para concretos de 21y 28 Mpa en seis diferentes obras ubicadas en la zona occidental de Bogotá. Universidad la gran Colombia. Bogotá D.C. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11396/3471>
- Ortiz Rico, Andrés Felipe. (2024). Curso de diseño experimental. Universidad surcolombiana. <https://Diseño%20experimental.pdf>
- Osorio, A. T. (2014). Adherencia de la varilla con la mezcla de concreto obedeciendo a la forma y textura de las gravas de la misma procedencia. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/15061>.
- Petrecca, G. (2014). *Energy Conversion and Management* (Vol. 1). Pavia, Italy: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-06560-1_3
- Poveda Montoya, W. A. (2011). Comparación del bambú con el acero como material de refuerzo a flexión en concreto. Instituto tecnológico de costa rica, escuela de ingeniería en construcción. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/2238/6165>.
- Sanchez, D. (2001). Tecnología del concreto y del mortero. (B. editores., Ed.) Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Bhandar editores. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=EWqQPJhsRAC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- Sapuyes, E., Osorio, J., Takeushi, C., Duarte, M., & Erazo, W. (20 de 06 de 2018). Resistencia y elasticidad a la flexión de la guadua angustifolia Kunth de Pitalito, Huila. *Revista de investigación*, 11(1), Págs. 97- 111. doi:<https://doi.org/10.29097/2011-639X.182>
- Satinder Kaur Khattria, Dr. Hardeep Singh Rai and Dr. Jagbir Singh, Assessment of Building Information Modeling for Structural Analysis Domain, International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET), 11(8), 2020, pp. 381-392. Recuperado de: <https://doi.org/10.34218/IJARET.11.8.2020.038>.
- Takeushi Tam, C. P., & González, C. E. (2007). Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la Guadua Angustifolia y determinación del módulo de elasticidad. *Ingeniería y universidad*, 11(1), Págs. 89-104. Recuperado el 04 de 09 de 2021, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2343080>
- Titilayo Akinlabi, E., Anane-Fenin, K., & Akwada, D. R. (2017). *Bamboo - the multipurpose plant*. Johannesburg, Sudafrica : Springer International. doi:DOI 10.1007/978-3-319-56808-9
- Torices, C. (2022). Resistencia del concreto: resolvemos las dudas más importantes que existen sobre el tema. Cementos Torices. <https://cementosorices.com/blog/construccion/resistencia-del-concreto-resolvemos-tus-dudas-sobre-el-tema/>
- Vargas Vásquez, Wilder Roger. (2016). Vigas de concreto reforzadas con bambú (Guadua angustifolia) para construcciones rurales. IAG-OT Tesis [109]. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2488>.
- Vargas, W., Cerna, A., & Cuéllar, J. (2020). Adherencia en el concreto reforzado con bambú. *Anales Científicos*. 81(2), 365-375. Recuperado de: <https://doi.org/10.21704/ac.v81i2.1666>.

Anexo A. Diseño de mezcla por el método ACI 211.1 – Volumen absoluto:

El procedimiento seguido para la elaboración del presente diseño de mezcla fue realizado con base en los resultados obtenidos por Hernández, Jorge. & Ramos, Carlos. (2023), sirviendo como continuación en el estudio del concreto reforzado con guadua (*angustifolia*), así como en los procesos y recomendaciones propuestas por Sánchez de Guzmán (2001) y Kosmatka, Kerkhoff, Panarese & Tanesi (2004), adaptados de las normativas ACI-211 y ACI-318.

■ 1. Selección del asentamiento.

Se comienza escogiendo el asentamiento (o revenimiento) deseado de la mezcla de concreto, según las especificaciones de las Tablas A-1 y A2 recomendadas por los autores, o del análisis del proceso constructivo a realizar para determinar un asentamiento de diseño de acuerdo con la Tabla A-3, así:

Consistencia	Asentamiento (mm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0 – 20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; concretos de proyección neumática (lanzado)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20 – 35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa.
Semiseca	35 – 50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple.	Colocación con máquinas operadas manualmente.	Secciones simplemente reforzadas, con vibración.
Media	50 – 100	Pavimentos compactados a mano, losas, muros, vigas.	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración.
Húmeda	100 – 150	Elementos estructurales esbeltos.	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración.
Muy Húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos “in situ”	Tubo-embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración. (Normalmente no adecuados para vibrarse).

Tabla A- 1: Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación propuesto por Sánchez de Guzmán (2001).

Construcción de Concreto	Revenimiento mm (plg)	
	Máximo*	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzado.	75 (3)	25 (1)
Zapatas, cajones y muros de subestructuras sin refuerzo.	75 (3)	25 (1)
Vigas y muros reforzados.	100 (4)	25 (1)
Columnas de edificios.	100 (4)	25 (1)
Pavimentos y losas.	75 (3)	25 (1)
Concreto masivo.	75 (3)	25 (1)

Tabla A- 2: Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción adaptado de la ACI-211 por Kosmatka, Kerkhoff y otros (2004).

Criterio	Condición	Consistencia	Asentamiento (mm)
Elemento	vigas	Media	75
Transporte	Carretilla	Media	75
Colocado	manual	Media	75
Compactado	Varillado	Húmeda	125
Densidad Refuerzo	Alta (bambú)	Húmeda	125
Clima	Neiva (Alto)	Húmeda	125
Asentamiento promedio (mm)			100

Tabla A- 3: Análisis del proceso constructivo para determinar asentamiento idóneo.

De acuerdo con Kosmatka, Kerkhoff, y otros (2004) el asentamiento generalmente se indica como una especificación de la obra, con un rango o valor máximo. Puesto que el asentamiento idóneo sería de consistencia media a húmeda, se propone un rango de entre **75 mm a 125 mm** de asentamiento, sin exceder este último valor.

- Selección del tamaño máximo del agregado.

En la Tabla A-4, se presenta un resumen de la información necesaria para este paso. Es importante considerar la Tabla A-5 al seleccionar el tamaño máximo del agregado y asegurarse de que cumpla con los requisitos. Además, se debe verificar en la Tabla A-6 si el tamaño máximo nominal del agregado grueso cumple con los criterios establecidos en la sección C.3.3.2 de la Norma Sismorresistente NSR 10 Título C (AIS, 2010).

Datos iniciales para selección del tamaño máximo del agregado	
Dimensión mínima de la sección (cm)	10
Elemento de construcción	Viga-columna
Tamaño máximo en plg (mm)	1 1/2 (38 mm)
Tamaño máximo nominal en plg (mm)	1" (25 mm)
Espaciamento entre barras paralelas bambú (mm)	N.A
Recubrimiento del elemento estructural (mm)	25

Tabla A- 4: Datos iniciales para selección del tamaño máximo y máximo nominal del agregado.

Teniendo en cuenta una sección mínima de 10cm, y debido a que se busca analizar de manera general la adherencia entre el concreto y la guadua se optará por utilizar un TMN de 3/4"

– 1" (19 a 25mm), abarcando los casos más críticos.

Tamaños máximos de agregados según el tipo de construcción				
Dimensión mínima de la sección (cm)	Tamaño máximo en plg. (mm)			
	Muros reforzados, vigas y columnas	Muros sin refuerzo	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6 – 15	$\frac{1}{2}" (12) - \frac{3}{4}" (19)$	$\frac{3}{4}" (19)$	$\frac{3}{4}" (19) - 1" (25)$	$\frac{3}{4}" (19) - 1\frac{1}{4}" (38)$
19 – 29	$\frac{3}{4}" (19) - 1\frac{1}{2}" (38)$	$1\frac{1}{2}" (38)$	$1\frac{1}{2}" (38)$	$1\frac{1}{2}" (38) - 3" (76)$
30 – 74	$1\frac{1}{2}" (38) - 3" (76)$	$3" (76)$	$1\frac{1}{2}" (38) - 3" (76)$	$3" (76)$
75 o más	$1\frac{1}{2}" (38) - 3" (76)$	$6" (152)$	$1\frac{1}{2}" (38) - 3" (76)$	$3" (76) - 6" (152)$

Tabla A- 5: Tamaños máximos de agregados según tipo de construcción propuesto por Sánchez de Guzmán (2001).

Teniendo en cuenta cilindros verticales con una sección de 100 x 200 mm, incrustados con 1 probeta de guadua de 30mm de ancho, se tiene que:

Verificación del tamaño máximo nominal según apartado C.3.3.2.			
Tamaño máximo nominal no puede ser mayor a:			
1. $1/5$ de la dimensión mínima del elemento.			
40	>	25.00	Cumple
2. $3/4$ del espaciamiento libre entre barras.			
NO APLICA (1 barra)			Cumple
3. $1/3$ de la altura de losa.			
33.33	>	25.00	Cumple

Tabla A- 6: Verificación del cumplimiento del tamaño máximo nominal del agregado según la NSR10 Título C (AIS, 2010).

▪ Estimación del contenido de aire.

Para estimar el contenido de aire, se hace uso de la Tabla A-7 y la Figura A-1, encontrado un valor meta del 1.5% para aire naturalmente atrapado, con un tamaño máximo nominal (TMN) de 25.4mm (1 plg).

Tamaño Máximo nominal del agregado		Contenido de aire en porcentaje (por volumen) *			
mm	plg.	Naturalmente atrapado	Exposición ligera	Exposición moderada	Exposición severa
9.51	$\frac{3}{8}$	3.0	4.5	6.0	7.5
12.7	$\frac{1}{2}$	2.5	4.0	5.5	7.0
19	$\frac{3}{4}$	2.0	3.5	5.0	6.0
25.4	1	1.5	3.0	4.5	6.0
38.1	$1\frac{1}{2}$	1.0	2.5	4.5	5.5
50.8	2	0.5	2.0	4.0	5.0
76.1	3	0.3	1.5	3.5	4.5
152	6	0.2	1.0	3.0	4.0

Tabla A- 7: Cantidad aproximada de aire esperado en concreto sin aire incluido y niveles de aire incluido para diferentes tamaños máximos de agregados propuesto por Sánchez de Guzmán (2001).

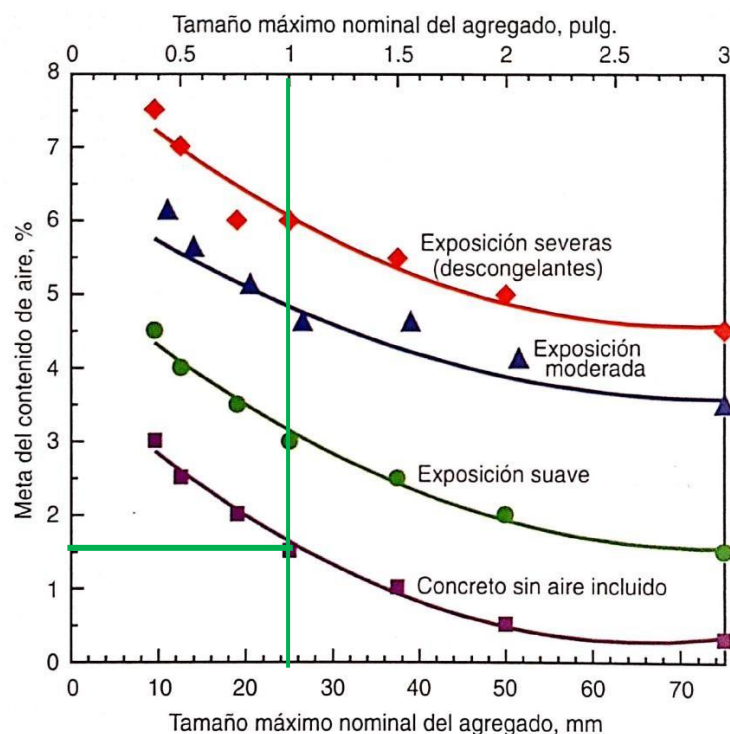


Figura A- 1: Requisitos de contenido total de aire para concretos con diferentes tamaños de agregados. Por Kosmatka, Kerkhoff y otros (2004). Adaptado de ACI 211.1.

- Estimación del contenido de agua de mezclado.

El agregado grueso (grava) que se empleará tiene partículas con una forma angular y una textura rugosa generadas por medio de un proceso de trituración. El concreto no contiene inclusiones de aire y el tamaño máximo del agregado es de 1 ½" (38 mm).

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (plg.)							
		9.51 ¾"	12.7 ½"	19.0 ¾"	25.4 1"	38.1 1 ½"	50.8 2"	64.0 2 ½"	76.1 3"
mm	plg	Agua de mezclado, en Kg/m³ de concreto							
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	159	151	144
75	3	241	218	203	188	175	164	156	148
100	4	244	221	207	192	179	168	159	151
125	5	247	225	210	196	183	172	162	153
150	6	251	230	214	200	187	176	165	157
175	7	256	235	218	205	192	181	170	163
200	8	260	240	224	210	197	186	176	168

Tabla A- 8: Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido tomado de Sánchez de Guzmán (2001).

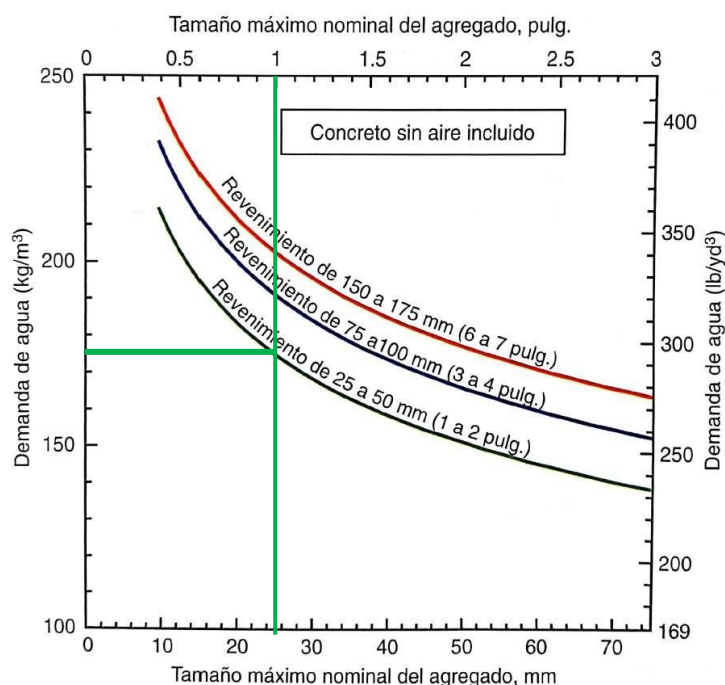


Figura A- 2: Demanda de agua aproximada para varios revestimientos y tamaños de agregados triturados para concreto sin aire incluido. Adaptado de la tabla 9-5 de la ACI 211.1 por Kosmatka, Kerkhoff y otros (2004).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, en la Tabla A-8 proporcionada por Sanchez de Guzman (2001), se establece un requerimiento aproximado de agua de mezclado de entre 175 y 183 Kg/m³. Sin embargo, de acuerdo con la Figura A-2 (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004), se recomienda un valor aproximado de agua de mezclado de 175 Kg/m³. Para tener en cuenta la forma de las partículas en el diseño, se optará por un valor estimado de **179 Kg/m³**

▪ Determinación de la resistencia de diseño.

Según Brown & McCormac (2011) en su libro "Diseño de concreto reforzado", para aplicaciones comunes se suelen utilizar concretos con resistencias de 3000 a 4000 PSI (libras por pulgada cuadrada). En Colombia, la norma sismorresistente NSR-10 (AIS, 2010), en la sección C.1.1, establece que el valor mínimo para el F'_c en concreto estructural no debe ser inferior a 17 MPa. Sin embargo, en la construcción de viviendas unifamiliares de uno o dos niveles, es común utilizar un F'_c de 3000 PSI o 20.68 MPa, lo que redondeando serían 21 MPa o 211 Kg/cm² aproximadamente. En caso de no disponer de registros de pruebas de resistencia con los materiales que se utilizarán, se debe recurrir a la Tabla A-9.

4.6.6.1.1 (a)

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$F'_c < 21$	$F'_{cr} = F'_c + 7.0$

$21 \leq F'c \leq 35$	$F'cr = F'c + 8.3$
$F'c > 35$	$F'cr = 1.10 * F'c + 5.0$

4.6.6.1.2 (b)

Resistencia especificada a la compresión, Kg/cm ²	Resistencia promedio requerida a la compresión, Kg/cm ²
$F'c < 210$	$F'cr = F'c + 70$
$210 \leq F'c \leq 350$	$F'cr = F'c + 85$
$F'c > 350$	$F'cr = F'c + 100$

4.6.6.1.3 (c)

Resistencia especificada a la compresión, lb/plg ²	Resistencia promedio requerida a la compresión, lb/plg ²
$F'c < 3000$	$F'cr = F'c + 1000$
$3000 \leq F'c \leq 5000$	$F'cr = F'c + 1200$
$F'c > 5000$	$F'cr = 1.1 * F'c + 700$

Tabla A- 9: Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay Datos disponibles para establecer la desviación estándar **(a)** en MPa (NSR 10 – Sección C.5.3.2.2), **(b)** en Kg/cm³ proporcionado por Sánchez de Guzmán de ACI 318 (2001) y **(c)** en Psi (lb/plg²). Proporcionado por Kosmatka, Kerkhoff y otros de ACI 318 (2004).

Dadas las ecuaciones de $F'cr$ para el cálculo de diseño de mezcla, se determina el valor en cada sistema de unidad en la Tabla A-10.

Sistema Métrico	MPa	Kg/cm ²	Psi
$F'c$	21	211	3000
$F'cr$	29.3	296	4200

Tabla A- 10: Cálculo de $F'cr$ por sistema de unidades.

▪ Selección de la relación agua-cemento.

Con una Resistencia promedio requerida a la compresión ($F'cr$) de 296 Kg/cm², se procede a revisar la Tabla A-11, obteniendo los valores de relación agua-cemento en peso para cementos colombianos (Portland Tipo 1: uso general sin aire incluido).

Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Relación agua-cemento en peso		
	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0.72	0.65
175	-	0.65	0.58
210	0.70	0.58	0.53
245	0.64	0.53	0.49
280	0.59	0.48	0.45
296 (Interpolación)	0.57	0.46	0.44
315	0.54	0.44	0.42
350	0.49	0.40	0.38

Tabla A- 11: Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos proporcionado por Sánchez de Guzmán (2001).

No obstante, existen otras consideraciones a tener en cuenta, como la exposición al agua dulce, la protección contra el congelamiento y el deshielo, así como la exposición a sulfatos, que se detallan en la Tabla A-12. En base a las condiciones de exposición, se sugiere utilizar una relación agua-cemento (A/c) aproximada de 0.45, con el objetivo de asegurar la protección adecuada del refuerzo de bambú.

Requisitos de relación A/C para concretos		
Máxima relación Agua - Cemento para condiciones de humedecimiento - seco		
Expuesto a agua dulce	0.5	Cumple
Expuesto a agua salina o de mar	0.45	Cumple
Máxima relación Agua - Cemento para exposición a congelamiento - deshielo		
Sección delgada y recubrimiento menor	0.45	Cumple
Todas las demás estructuras	0.5	Cumple
Máxima relación Agua - Cemento para exposición a sulfatos		
Exposición moderada	0.5	Cumple
Exposición severa	0.45	Cumple

Tabla A- 12: Relación agua-material cementante máxima para varias condiciones de exposición tomado de Kosmatka, Kerkhoff y otros (2004).

▪ Cálculo del contenido de cemento.

El contenido se calcula con la Ecuación A.1, se determina el valor requerido en la Ecuación A.2 para un metro cúbico de concreto.

$$C = \frac{A}{(A/C)} \quad (\text{Ecuación A. 1})$$

Donde:

- C = contenido de cemento, en Kg/m³.
- A = Requerimiento de agua de mezclado, en Kg/m³.
- A/C = Relación agua-cemento, por peso

$$C = \frac{179 \frac{kg}{m^3}}{(0.45)} = 398 \frac{kg}{m^3} \quad (\text{Ecuación A. 2})$$

Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	Volumen del agregado grueso seco y apisonado por unidad de volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena											
	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1
9.5	0.50	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39
12.5	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53	0.52	0.51	0.50	0.49	0.48
19.0	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.60	0.59	0.58
25.0	0.74	0.73	0.72	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63
38.0	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.70	0.69
50.0	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72

75.0	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77
150.0	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83

▪ **Estimación de las proporciones de agregados.**

Se plantea dos métodos descritos por Sánchez de Guzmán (2001):

▪ **Método A.C.I 211.1**

Tabla A- 13: Valores de b/b_o para diferentes módulos de finura de la arena propuesto por Sánchez de Guzmán primera edición (1995).

La Tabla A-13 y la Tabla A-14 muestran los valores de b/b_o correspondientes a diferentes módulos de finura de la arena. Estos valores se utilizan para estimar el porcentaje de agregado grueso en un metro cúbico de volumen de concreto

Tamaño máximo nominal del agregado mm (plg.)	Volumen del agregado grueso varillado en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino*			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2)	0.59	0.57	0.55	0.53
19.00 (3/4)	0.66	0.64	0.62	0.60
25.00 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 ½)	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

*Los volúmenes se basan en agregados varillados en seco como se describe en la ASTM C29 (AASHTO 19). Adaptada del ACI 211.

Tabla A- 14: Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto adaptado del ACI 211 propuesto por Kosmatka, Kerkhoff y otros (2004).

▪ **Método grafico – porcentaje óptimo de agregados.**

La Figura A-3 presenta un método gráfico que considera todo el rango de tamaños del agregado usado en el concreto, abarcando desde las partículas más finas de la arena hasta las partículas más grandes del agregado grueso. Esto es importante debido a que, según Sánchez de Guzmán (2001), en Colombia es común que tanto la arena como el agregado grueso no cumplan con las especificaciones granulométricas establecidas en la norma NTC 174 para agregados no controlados o desconocidos. Los datos utilizados para el método grafico se desglosan en la tabla A-15

GRADUACION DE LOS MATERIALES DISPONIBLES					
Tamiz		Porcentaje que pasa (%) – Anexo B		Especificaciones (Sánchez Diego. 1984. Manual de diseño de mezclas)	
mm	Nombre	Material Fino	Material Grueso	Porcentaje que pasa para el tamaño máximo del agregado (mm)	
37.5	Nº 1	100	100	100	100
25	Nº 1"	100	96.83	87	80
20	Nº 3/4"	100	66.42	79	68
12.5	Nº 1/2"	100	17.04	68	55
10	Nº 3/8"	100	9.27	62	47
5	Nº 4	99.57	1.33	48	32
2.5	Nº 8	87.13	0.2	38	22
2	Nº 16	62.17	0.1	30	15
0.63	Nº 30	32.85	0	23	10
0.315	Nº 50	10.16	0	18	7
0.16	Nº 100	2.81	0	14	5

Tabla A- 15: Datos para el método grafico de graduación de materiales disponibles adaptado por Sánchez de Guzmán (2001).

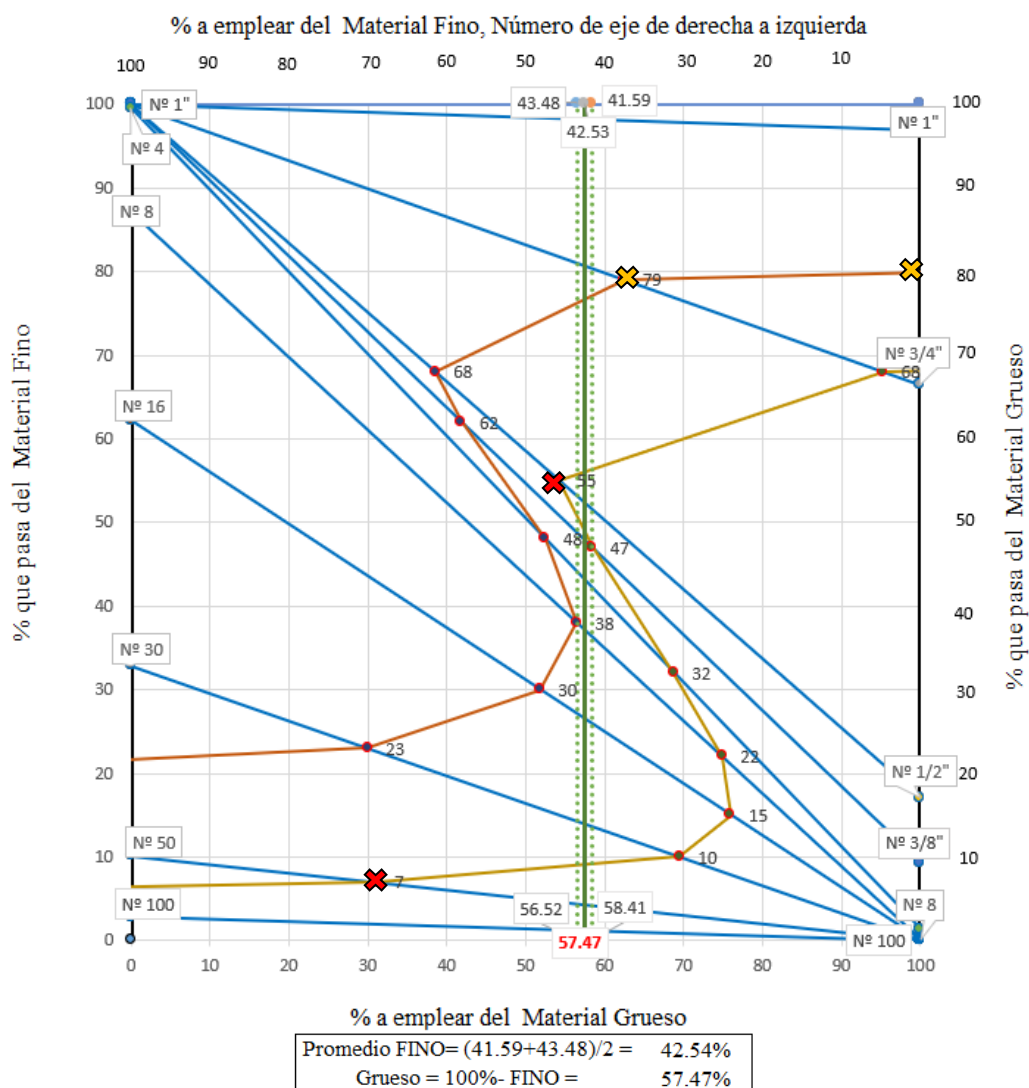


Figura A- 3: Procedimiento grafico para encontrar las proporciones en que deben mezclarse los agregados, eje de las ordenadas es el porcentaje que pasa de los agregados finos y gruesos, eje de las abscisas es el porcentaje de agregado para mezcla propuesto por Fuller & Thompson y adaptado por Sánchez de Guzmán (2001).

▪ Resumen de métodos y criterio.

En la Figura A-3 se observa que no es posible optimizar la granulometría, puesto que el agregado grueso en el tamiz de $\frac{1}{2}$ " y No. 50 (resaltados con una marca roja), no cumple con los rangos de porcentajes del método grafico para un tamaño de agregado máximo de $1\frac{1}{2}$ " (38mm), ya que el porcentaje de material que pasa por los tamices debe ser más alto para una optimización del diseño (el agregado grueso necesita material de menos grosor), esto se puede corroborar alterando los datos en los tamices del problema, de manera similar, el agregado fino no cumple con los rangos de porcentajes en el tamiz de $\frac{3}{4}$ " y 1" (resaltados con una marca amarilla), debido a que el porcentaje que pasa por este debe ser más bajo (necesita un material de mayor grosor). Teniendo esto en cuenta, se decide elegir el método propuesto por la A.C.I 211, como lo sugiere Sánchez de Guzmán en la segunda edición de su trabajo. Este método difiere un poco con los resultados obtenidos por el método gráfico, la Tabla A-16 muestra las proporciones de los métodos.

Método	Valor Ag. grueso
A.C.I 211 – Sánchez de Guzmán	0.635*
A.C.I 211 - Kosmatka, Kerkhoff y otros.	0.645*
Gráfico - Fuller & Thompson	0.575

*Valor por interpolación lineal de las Tablas A-13 y A-14.

Tabla A- 16: Resumen de métodos de proporción del agregado grueso.

$$\frac{b}{b_0} = \frac{(0.635 + 0.645)}{2} = \mathbf{0.64}$$

Se llevan a cabo los cálculos descritos en la Tabla A-17 con el propósito de determinar las proporciones de los materiales necesarios para un metro cúbico de concreto, que se encuentran registradas en la Tabla A-19.

Cálculo de proporción de agregado grueso por m ³			
b/b ₀ (Ag. Grueso por volumen unitario de concreto)		0.64	
Peso seco agregado grueso (P _g)		Volumen absoluto ag. Grueso (V _g)	
$P_g = \left(\frac{b}{b_0}\right) * \text{Masa unit. compactada}$		$V_g = \frac{P_g}{D_a(\text{aparente seca})}$	
P _g (Kg/m ³)	1069.448	V _g (L/m ³)	400.371

Tabla A- 17: Cálculo de la proporción del agregado grueso para un metro cubico de concreto.

En la Tabla A-18 se proporcionan recomendaciones de densidades de cemento realizadas por dos autores para la elaboración del diseño de mezclas.

Autor	Densidad del cemento Portland (g/cm ³)
(Sanchez de Guzman, 2001)	3.1 a 3.15
(Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)	3.1 a 3.25
Valor asumido	3.1

Tabla A- 18: Valores de densidad para cemento Portland por autores y asumido.

Cantidades de materiales por m ³ de concreto			
Material	Peso seco (kg)	Densidad (g/cc)	Volumen (Pg/Da) lit.
Cemento	398.0	3.1	128.387
Ag. Fino	722.924	2.608	277.242
Ag. Grueso	1069.448	2.691	400.371
Agua	179	1	179
Aire (1.5%)	0	0	15
Total	2369.373	--	1000

Tabla A- 19: Cantidades de materiales para un metro cubico de concreto.

▪ Ajuste por humedad de los agregados.

La Tabla A-20 presenta el ajuste por humedad aplicado en la primera fundición para explicar el cálculo realizado siguiendo las instrucciones proporcionadas por Sánchez de Guzmán (2001), basado en el método ACI 211. Los detalles del cálculo se resumen en la Tabla A-21, que muestra los resultados obtenidos a partir de las diez fundiciones realizadas.

Ajuste por humedad de los agregados (Muestra 1)			
Humedad del agregado fino (%)		1.80%	
Humedad del agregado grueso (%)		0.49%	
Absorción del agregado fino (%)		2.25%	
Absorción del agregado grueso (%)		0.75%	
Ajuste agregado grueso (Ph)		Ajuste agregado fino (Ph)	
$P_h = P_s * (1 + H)$		$P_h = P_s * (1 + H)$	
Phg (Kg/m ³)	1074.735	Phf (Kg/m ³)	735.911
Cant. Agua agregado grueso (Ag)		Cant. Agua agregado fino (Af)	
$A = -P_s * (H - a)$		$A = -P_s * (H - a)$	
Ag (Kg = L)	2.775	Af (Kg = L)	3.275
Requerimiento de agua (Ra)			

$A_t = A_{grueso} + A_{fino}$	6.050	Litros
$Ra = Agua + At$	185.050	Litros

Tabla A- 20: Ajuste por humedad de la primera fundición y requerimiento de agua.

Resultados ajuste por humedad - fundiciones realizadas.						
Fundición	Ph (Kg/m³) Grueso	Ph (Kg/m³) Fino	Ag (Kg = L) Grueso	Ag (Kg = L) Fino	At (L)	Ra (L)
1	1074.735	735.911	2.775	3.275	6.050	185.050
2	1075.048	738.030	2.462	1.156	3.618	182.618

Tabla A- 21: Resultados para las dos fundiciones de prueba.

▪ Ajustes a las mezclas de prueba.

En la Tabla A-22 se detalla la relación de ingredientes por metro cúbico de concreto, considerando el ajuste por humedad de los agregados. Por otro lado, las Tablas A-23, A-24 muestran las cantidades y proporciones utilizadas en cada una de las fundiciones realizadas, la Tabla A-24 presenta además las cantidades totales de material utilizadas.

Cantidades finales de materiales por m³ de concreto (Muestra 1)					
Material	1m³		0.1 m³		Proporción
	Peso seco (kg)	Peso húmedo (kg)	Peso seco (kg)	Peso húmedo (kg)	
Cemento	398.0	398	39.8	39.8	1
Ag. Fino	722.924	735.911	72.292	73.591	1.849
Ag. Grueso	1069.448	1074.735	106.945	107.473	2.700
Agua	179	185.050	17.900	18.505	0.465
Total	2369.373	2393.696	236.937	239.370	--

Tabla A- 22: Peso seco, peso ajustado por humedad (húmedo) y proporción de la primera muestra.

Cantidades finales de materiales por 1m³ de concreto								
Muestras	Peso húmedo (Kg)				Proporción			
	Cemento	Ag. Fino	Ag. Grueso	Agua	Cemento	Ag. Fino	Ag. Grueso	Agua
1	398.00	735.91	1074.73	185.05	1	1.849	2.700	0.465
2	398.00	738.03	1075.05	182.62	1	1.854	2.701	0.459
Promedio	398.00	736.97	1074.89	183.83	1	1.852	2.701	0.462

Tabla A- 23: Pesos finales por metro cubico de concreto y proporciones manejadas en campo de las fundiciones de prueba.

Cantidades finales de materiales por cilindro de prueba (0.10 x 0.20 m)								
Cantidad de muestras	Peso húmedo (kg)				Proporción			
Vol = 0.001571 m ³	Cemento	Ag. Fino	Ag. Grueso	Agua	Cemento	Ag. Fino	Ag. Grueso	Agua
1	0.63	1.16	1.69	0.29	1	1.85	2.70	0.46
2	1.25	2.31	3.38	0.58	1	1.85	2.70	0.46
Cantidades finales de materiales por cilindro de concreto (0.10 x 0.20 m)								
Cantidad de muestras	Peso húmedo (kg)				Proporción			
Vol = 0.001571 m ³	Cemento	Ag. Fino	Ag. Grueso	Agua	Cemento	Ag. Fino	Ag. Grueso	Agua
1	0.63	1.16	1.69	0.29	1	1.85	2.70	0.46
2	1.25	2.31	3.38	0.58	1	1.85	2.70	0.46
...	"	"	"	"	"	"	"	"
36	22.51	41.61	60.77	10.46	1	1.85	2.70	0.46
MATERIAL TOTAL	23.76	43.93	64.15	11.05	1	1.85	2.70	0.46

Tabla A- 24: Cantidad total de material por cilindro de concreto y proporciones manejadas en campo de las fundiciones de prueba de concreto y prueba de adherencia.

Con el objetivo de validar el diseño de la mezcla, se realizaron pruebas en 2 cilindros de dimensiones 100 x 200 mm. Estos cilindros fueron tomados a los 7 y 14 días de fraguado, y los resultados obtenidos se encuentran detallados en la Tabla A-25.

LISTA DE CILINDROS TESTIGOS				
FECHA	FUNDICIÓN	T - CURADO	CARGA (kN)	F'c (MPa)
26-Feb	1	7 días	78.77	10.03
26-Feb	2	14 días	150.78	19,20

Tabla A- 25: Lista de cilindros testigos de las fundiciones ejecutadas.

Para las fundiciones de los cilindros a utilizar en pruebas de adherencia de dimensiones 100 x 200mm, se tomaron 3 muestras por cada tiempo de fraguado (7, 14 y 28 días) y por cada tipo de probeta (4 en total), así mismo se realizó 1 cilindro de ajuste por cada tipo (4 en total) para comprobar el agarre de la máquina, cuyos datos fueron descartados, dando un total de 4 cilindros de ajuste y 36 cilindros de prueba, los resultados se encuentran detallados en la tabla A-26.

LISTA DE CILINDROS PARA PRUEBAS DE ADHERENCIA				
Fundición	Fecha	Tiempo - Curado	Desplazamiento (mm)	F _{Tr} max (kg-f)
1	26-Feb	7 días	1.646	168.806
2	26-Feb	7 días	1.515	175.950
3	26-Feb	7 días	2.150	253.409
4	26-Feb	7 días	0.130	51.224
5	26-Feb	7 días	0.266	58.716
6	26-Feb	7 días	0.096	20.298
7	26-Feb	7 días	4.753	267.828
8	26-Feb	7 días	3.901	494.318
9	26-Feb	7 días	4.151	340.088
10	26-Feb	7 días	4.011	356.092
11	26-Feb	7 días	3.946	138.354
12	26-Feb	7 días	3.926	180.120
13	27-Feb	14 días	2.453	191.692
14	27-Feb	14 días	2.191	169.482
15	27-Feb	14 días	2.506	127.873
16	27-Feb	14 días	1.100	84.828
17	27-Feb	14 días	0.901	123.664
18	27-Feb	14 días	0.811	139.554
19	27-Feb	14 días	3.068	266.138
20	27-Feb	14 días	6.696	166.013
21	27-Feb	14 días	3.563	338.532
22	27-Feb	14 días	5.481	111.960
23	27-Feb	14 días	3.253	161.008
24	27-Feb	14 días	3.583	56.180
25	28-Feb	28 días	1.453	183.394
26	28-Feb	28 días	0.583	136.541
27	28-Feb	28 días	0.866	191.799
28	28-Feb	28 días	0.016	38.205
29	28-Feb	28 días	0.981	64.187
30	28-Feb	28 días	0.995	32.183
31	28-Feb	28 días	1.913	163.481
32	28-Feb	28 días	3.263	108.574
33	28-Feb	28 días	2.938	329.663
34	28-Feb	28 días	2.711	82.200
35	28-Feb	28 días	2.408	95.296
36	28-Feb	28 días	1.198	81.443

Tabla A- 26: Lista de fundiciones de cilindros para pruebas de adherencia ejecutados.

Anexo B. Caracterización de los materiales

- Análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos tamiz de agregados finos y gruesos– NTC 77

Para obtener los datos necesarios sobre los agregados de tamaño grueso y fino, se llevaron a cabo los procedimientos de prueba correspondientes según las regulaciones actuales. A continuación, se exponen en la Tabla B-1 y la Tabla B-2 los resultados referentes a la distribución de dimensiones de las partículas, contrastándolos con los estándares establecidos por la NTC 174 (ICONTEC, 2018 - Especificaciones de los agregados para concreto).

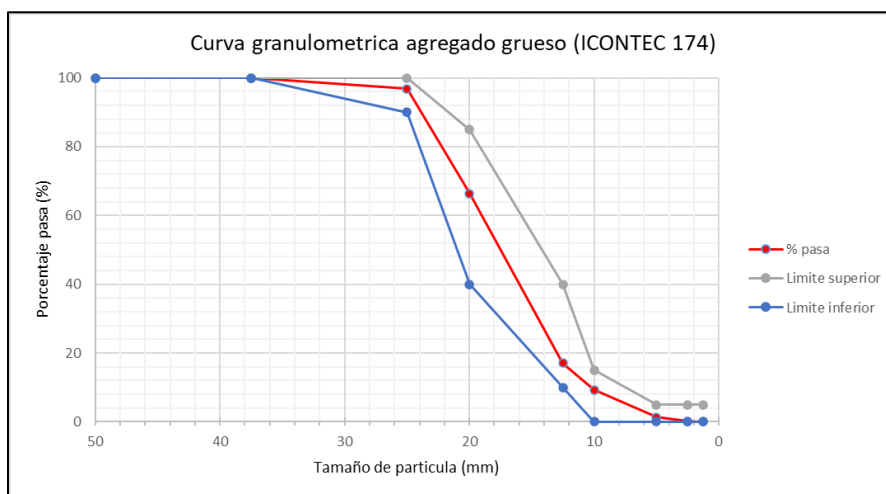
Determinación de la granulometría de agregado grueso						
Abertura (mm)	Tamiz (plg)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa	% Pasa Icontec 174
50	2	0	0	0	100	100
37.5	1 1/2	0	0	0	100	100
25	1	95	3.17	3.17	96.83	90 a 100
20	3/4	912	30.41	33.58	66.42	40 a 85
12.5	1/2	1481	49.38	82.96	17.04	10 a 40
10	3/8	233	7.77	90.73	9.27	0 a 15
5	No. 4	238	7.94	98.67	1.33	0 a 5
2.5	No. 8	34	1.13	99.80	0.20	0 a 5
1.25	No. 16	3	0.10	99.90	0.10	0 a 5
FONDO			3	0.10	100	0
Peso total: (g)		2999	100	--	--	--
Muestra inicial: (g)		3000		Tamaño máximo:		1 1/2"
% Error < 0.3 / Limite NTC 77		0.03%	Aceptable	Tamaño máximo nominal:		1"

Tabla B- 1: Análisis granulométrico del agregado grueso.

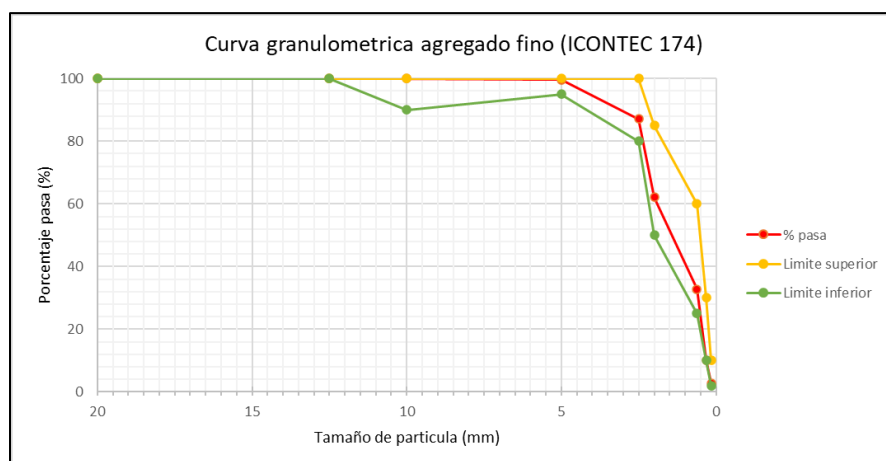
Determinación de la granulometría de agregado fino						
Abertura (mm)	Tamiz (plg)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa	% Pasa Icontec 174
20	3/4	0	0	0	100	100
12.5	1/2	0	0	0	100	100
10	3/8	0	0	0	100	100
5	No. 4	13	0.43	0.43	99.57	95 a 100
2.5	No. 8	372	12.43	12.87	87.13	80 a 100
2	No. 16	747	24.97	37.83	62.17	50 a 85
0.63	No. 30	877	29.31	67.15	32.85	25 a 60
0.315	No. 50	679	22.69	89.84	10.16	10 a 30
0.16	No. 100	220	7.35	97.19	2.81	2 a 10
FONDO		84	2.81	100	0	0
PESO TOTAL: (g)		2992	100	--	--	--
MUESTRA INICIAL: (g)		3000		MODULO DE FINURA:		3.0531
% Error < 0.3 / Limite NTC 77		0.27%	ACEPTABLE			

Tabla B- 2: Análisis granulométrico del agregado fino.

En la Gráfica B-1 y Gráfica B-2 se muestran las curvas de granulometría de los agregados para visualizar cómo se distribuyen las dimensiones de las partículas en relación con los criterios granulométricos establecidos en la NTC 174 (ICONTEC, 2018)



Gráfica B- 1: Curva granulométrica del agregado grueso.



Gráfica B- 2: Curva granulométrica del agregado fino.

- Ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados -NTC 1776.

En este estudio se llevaron a cabo dos fundiciones de prueba de concreto, en las cuales se aplicó la corrección por contenido de humedad en cada lote de mezcla. La Tabla B-3 muestra la cantidad mínima de muestra necesaria de manera ilustrativa.

Tipo de agregado	Tamaño de muestra mínimo (g)
Grueso (TMN = 25mm)	4000
Fino (TMN = 4.75 mm)	500

Tabla B- 3: Tamaños mínimos de muestra para ensayo de gradación.

En la Tablas B-4 y Tabla B-5 se puede apreciar el contenido de humedad de los agregados en cada actividad de fundición, se realizó ajuste por humedad en el diseño de mezcla.

Contenido total de humedad - agregado fino			
Fundición	Peso seco ambiente "W" (g)	Peso seco Horno "D" (g)	Humedad (%)
1	510	501	1.80%
2	513	502.5	2.09%

Tabla B- 4: Contenido total de humedad por cada fundición para corrección por humedad en diseño de mezcla – agregado fino.

Contenido total de humedad - agregado grueso			
Muestra	Peso seco ambiente "W" (g)	Peso seco Horno "D" (g)	Humedad (%)
1	4066	4046	0.49%
2	4032	4011	0.52%

Tabla B- 5: Contenido total de humedad por cada fundición para corrección por humedad en diseño de mezcla – agregado grueso.

- Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados – NTC 92.

Se lleva a cabo el proceso establecido en la NTC 92 (ICONTEC, 2019) y se exhiben los datos en las Tablas B-6 y B-7 para el material fino, así como en las Tablas B-8 y B-9 para el material grueso.

Masa unitaria suelta agregado fino				
Muestra	1. Peso muestra + recipiente	2. Peso muestra (Kg)	3. Volumen del recipiente (m ³)	4. Peso Unitario (2/3)
1	7.336	2.125	0.00118	1803.756
2	7.298	2.087	0.00118	1771.501
3	7.328	2.117	0.00118	1796.965
Promedio	7.321	2.110	P.U (kg/m ³)	1790.741

Tabla B- 6: Masa unitaria suelta del agregado fino.

Masa unitaria compactado agregado fino				
Muestra	1. Peso muestra + recipiente	2. Peso muestra (Kg)	3. Volumen del recipiente (m ³)	4. Peso Unitario (2/3)
1	7.483	2.272	0.00118	1928.533
2	7.445	2.234	0.00118	1896.278
3	7.429	2.218	0.00118	1882.697
Promedio	7.452	2.241	P.U (kg/m ³)	1902.503

Tabla B- 7: Masa unitaria compactada del agregado fino.

Masa unitaria suelto agregado grueso				
Muestra	1. Peso muestra + recipiente	2. Peso muestra (Kg)	3. Volumen del recipiente (m ³)	4. Peso Unitario (2/3)
1	14.169	6.240	0.00403	1548.736
2	14.162	6.233	0.00403	1546.998
3	14.178	6.249	0.00403	1550.970
Promedio	14.170	6.241	P.U (kg/m ³)	1548.901

Tabla B- 8: Masa unitaria suelta del agregado grueso.

Masa unitaria compactado agregado grueso				
Muestra	1. Peso muestra + recipiente	2. Peso muestra (Kg)	3. Volumen del recipiente (m ³)	4. Peso Unitario (2/3)
1	14.169	6.696	0.00403	1661.913
2	14.162	6.800	0.00403	1687.725
3	14.178	6.702	0.00403	1663.402
Promedio	14.170	6.733	P.U (kg/m ³)	1671.013

Tabla B- 9: Masa unitaria compactada del agregado grueso.

La Tabla B-10 presenta los resultados en resumen producto de la masa unitaria de los agregados.

Cuadro resumen - Masa unitaria - NTC 92				
Agregado	Masa unitaria suelta (kg/m ³)	Masa unitaria suelta (g/cm ³)	Masa unitaria compactada (kg/m ³)	Masa unitaria compactada (g/cm ³)
Fino	1790.741	1.791	1902.503	1.903
Grueso	1548.901	1.549	1671.013	1.671

Tabla B- 10: Resultados masa unitaria de los agregados.

- Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso – NTC 176.

La densidad y absorción del agregado grueso se determina por medio de la Norma Técnica Colombiana 176 (ICONTEC, 2019), la masa mínima de la muestra utilizada en el ensayo se contempla en la Tabla B-11.

Tipo de agregado	Tamaño de muestra mínimo (g)
Grueso (TMN = 1")	1000

Tabla B- 11: Tamaño mínimo de muestra para ensayo de densidad y absorción.

El cálculo del procedimiento se resume en la Tabla B-12, especificando la fórmula establecida en la NTC 176 (ICONTEC, 2019) con su respectivo resultado, donde A: es la masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno (grs); B: es la masa en el aire de la muestra de ensayo saturada y superficialmente seca (grs); y C: es la masa en el agua de la muestra de ensayo saturada (grs).

Cálculo de densidad y absorción del agregado grueso		Datos iniciales (a)	
		A (g)	995
		B (g)	1002.5
		C (g)	630
Densidad Aparente (Dap.) (b)		Densidad Nominal (d)	
$D_{aparente} = \frac{A}{(B - C)}$		$D_{nominal} = \frac{A}{(A - C)}$	
D aparente (g/cm³)	2.671	D Nominal (g/cm³)	2.726
Densidad Aparente (Saturada y seca) (c)		Absorción (%) (e)	
$D_{SSS} = \frac{B}{(B - C)}$		$Absor(\%) = \frac{(B - A)}{A} * 100$	
D aparente (g/cm³)	2.691	Absor (%)	0.75%

Tabla B- 12: Cálculo de densidad y absorción del agregado grueso (a) Datos iniciales, (b) cálculo de densidad aparente, (c) cálculo de densidad aparente saturada y seca), (d) cálculo de densidad nominal y (e) absorción.

- Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado fino – NTC 237.

La densidad y absorción del agregado fino se determina por medio de la Norma Técnica Colombiana 237 (ICONTEC, 2020), la masa mínima de la muestra utilizada en el ensayo se contempla en la Tabla B-13.

Muestra	Tamaño de muestra mínimo (g)
NTC 129	1000
NTC 3674 (Cuarteo)	500

Tabla B- 13: Tamaño mínimo de muestra para ensayo de densidad y absorción.

El cálculo del procedimiento se resume en la Tabla B-14, especificando la fórmula establecida en la NTC 237 (ICONTEC, 2019) con su respectivo resultado, donde A: es la masa en

el aire de la muestra de ensayo secado al horno (grs); B: es la masa de la probeta llena con agua (grs); S: es la masa de la muestra saturada y superficialmente seca (grs); y C: es la masa de la probeta con la muestra y el agua (grs).

Cálculo de densidad y absorción del agregado fino		Datos iniciales (a)	
		A (g)	195.6
		B (g)	565
		S (g)	200
		C (g)	688.3
Densidad Aparente (Dap.) (b)		Densidad Nominal (d)	
$D_{aparente} = \frac{A}{(B + S - C)}$		$D_{nominal} = \frac{A}{(B + A - C)}$	
D aparente (g/cm ³)	2.550	D Nominal (g/cm ³)	2.705
Densidad Aparente (Saturada y seca) (c)		Absorción (%) (e)	
$D_{SSS} = \frac{S}{(B + S - C)}$		$Absor(\%) = \frac{(S - A)}{A} * 100$	
D aparente (g/cm ³)	2.608	Abs (%)	2.25%

Tabla B- 14: Calculo de densidad y absorción del agregado fino (a) Datos iniciales, (b) cálculo de densidad aparente, (c) cálculo de densidad aparente saturada y seca), (d) cálculo de densidad nominal y (e) absorción.

ANEXO C. Caracterización dimensional de las tablillas

Cada una de las tablillas de guadua *Angustifolia* fueron obtenidas del mismo culmo, el cual fue dividido en 5 partes de aproximadamente 20cm de largo y 15cm de diámetro, obteniendo 8 tablillas por cada uno, con secciones de 3.0 x 1.0 cm (± 0.3 cm). A criterio de los investigadores, se realizó un registro de las dimensiones de las tablillas utilizadas, el cual se desglosa en la tabla C.1.

Caracterización dimensional de las tablillas utilizadas (cm)								
Tipo	Ancho superior-1	Ancho inferior-1	Grosor Derecho-1	Grosor Izquierdo-1	Ancho superior-2	Ancho inferior-2	Grosor Derecho-2	Grosor Izquierdo-2
LR7-1	3.3	2.8	1.3	1.3	3.2	2.8	1.2	1.3
LR7-2	3.2	2.8	1.3	1.2	3.4	2.9	1.1	1.3
LR7-3	3.5	2.9	1.3	1.3	3.5	3	1.4	1.2
LS7-1	3.4	2.9	1.4	1.3	3.5	2.7	1.3	1.3
LS7-2	3.5	3.3	1.2	1.4	3.6	2.9	1.3	1.4
LS7-3	3.7	2.9	1.1	1.1	3.6	2.8	1	1
L7-Prom	3.183		1.267		3.158		1.233	
LR14-1	3.2	2.6	1.2	1.2	3	2.6	1.1	1.2
LR14-2	3.3	2.8	1.2	1.2	3.3	3	1.1	1.1
LR14-3	3.1	3	1.2	1.3	3	2.8	1.3	1.2
LS14-1	3.4	2.9	1.1	1	3.2	2.7	1.1	1
LS14-2	3.6	3.1	1.4	1.3	3.5	3	1.3	1.3
LS14-3	3.3	3	1.3	1.2	3.3	2.8	1.3	1.2
L14-Prom	3.108		1.217		3.017		1.183	
LR28-1	3.4	3	1.3	1.2	3.3	3.1	1.2	1.2
LR28-2	3.5	3.3	1.2	1.3	3.2	3.1	1.1	1.2
LR28-3	3.6	3.1	1.2	1.1	3.6	2.9	1.2	1.1
LS28-1	3.2	2.5	1.2	1.3	3.6	2.7	1.4	1.3
LS28-2	3.3	2.8	1.1	1.1	3.1	2.5	1.2	1
LS28-3	3.2	2.5	1.1	1.5	3.3	2.8	1.2	1.2
L28-Prom	3.117		1.217		3.100		1.192	
AR7-1	3.4	2.8	1.4	0.9	3.4	3	1.3	1.3
AR7-2	3.6	2.6	1.4	1.2	3.6	2.6	1.4	1.3
AR7-3	3.6	2.9	1.4	1.1	3.6	2.6	1.3	1.4
AS7-1	3.3	3.3	1.4	1	3.8	3	1.5	1.2
AS7-2	3.3	2.9	1.3	1	3.4	3.2	1.4	1.3
AS7-3	3.2	3	1.4	1.3	3.3	3.1	1.3	1.2

A7-Prom	3.158		1.233		3.217		1.325	
AR14-1	3.3	2.8	1.2	1.3	3	2.6	1	1.4
AR14-2	2.8	3.2	1.3	1.3	3	3.2	1.4	1.2
AR14-3	3.5	2.6	1.4	1.2	3.6	2.5	1.1	1.4
AS14-1	3.1	3.1	1.2	1.2	3	2.9	1.2	1.1
AS14-2	3	3.1	1.4	1.2	3.1	3	1.4	1.3
AS14-3	3.1	2.9	1.3	1.2	3	2.8	1.2	1.2
A14-Prom	3.042		1.267		2.975		1.242	
AR28-1	3.2	2.9	0.9	0.9	3.4	3	1	1
AR28-2	3.6	3.1	1	1	3.4	3.2	0.9	1
AR28-3	3.6	3.3	1	1	3.5	3	1.1	1.1
AS28-1	3.6	3.1	1	1	3.3	3.2	1.1	1
AS28-2	3.5	3	1.2	0.9	3.3	2.8	0.9	0.9
AS28-3	3.4	3.1	0.9	1	3.6	3.2	1	0.9
A28-Prom	3.800		0.983		3.242		0.992	

Tabla C-1: Dimensiones de los tipos de tablillas utilizadas y promedio por configuración.

ANEXO D. Verificación de los supuestos del modelo

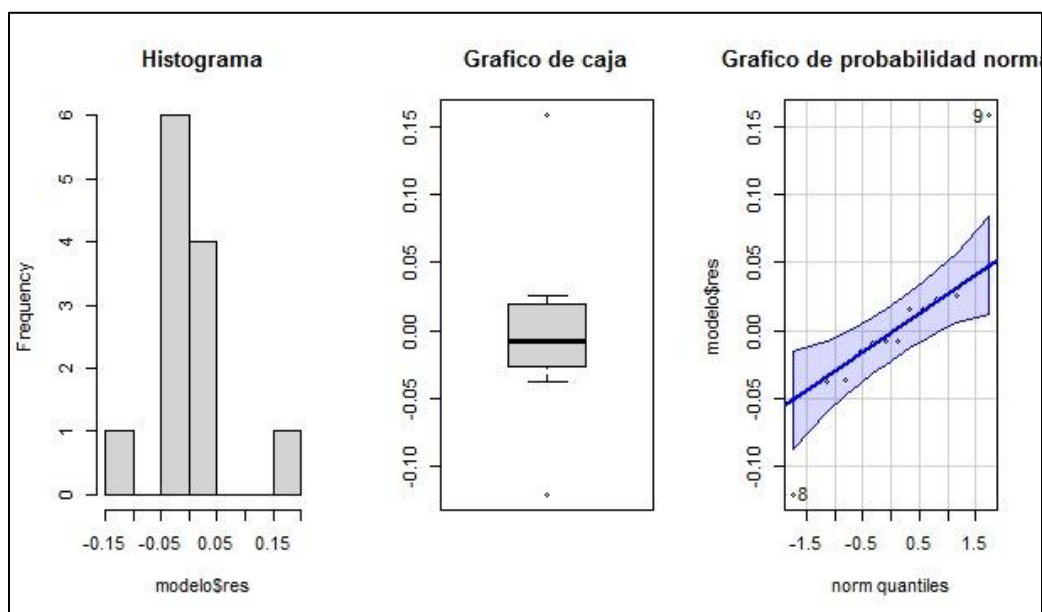
Para Esfuerzos

▪ Supuesto de normalidad.

Observando el histograma y el gráfico de probabilidad normal de la Figura C-1 para los residuales se percibe un comportamiento de normalidad en los residuos, no obstante, mediante el test de Shapiro Wilk, se ratifica esta afirmación. La Tabla C-1 presenta el p-value de la prueba, como es mayor que Alpha, los residuos se ajustan una distribución normal.

Prueba de normalidad Shapiro – Wilk	
W	0.85511
P-Value	0.04257
Alpha	0.05

Tabla D-1: Resultados de la prueba de normalidad Shapiro -Wilk para los residuos de datos demomento último.



Gráfica D-1: Histograma, diagrama de caja y gráfico de probabilidad normal de los residuos del modelo de momento último.

▪ **Supuesto de varianza constante.**

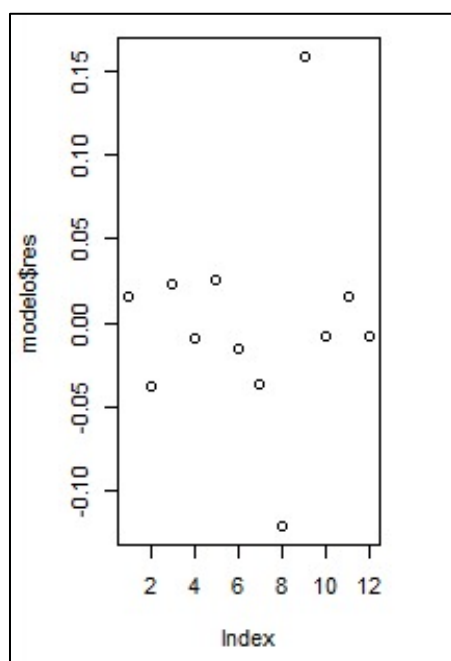
Prueba de puntuación de varianza no constante	
BP	7.0241
Df	3
p-value	0.0713

Tabla D-2: Resultados de la prueba de puntuación de varianza no constante para los residuos de los datos de momento último

El supuesto de varianza constante se analiza mediante la prueba Breusch-Pagan y se comprueba la homogeneidad de varianza, la Tabla C-2 muestra los resultados de la prueba de puntuación de varianza no constante, como el p-value es mayor a 0.05, los residuos cumplen el supuesto de varianza constante.

▪ **Supuesto de independencia.**

El gráfico de la Figura C-2 muestra una aleatoriedad en los residuales, mostrando independencia en los residuales. Con Durbin Watson test se demuestra la independencia de los residuos, cuyo resultado se muestra en la Tabla C-3.



Gráfica D-2: Residuales contra orden del modelo de momento último.

Prueba estadística Durbin – Watson			
Lag	Autocorrelation	D-W Statistic	P-value
1	-0.4013196	2.796226	0.578

Tabla D- 3: Resultados de la prueba de Durbin – Watson para los residuos de los datos de momento último.

- **Supuesto de media cero.**

Aplicando la prueba t-student, presentada en la Tabla C-4 se comprueba el supuesto de media cero de los residuos.

Prueba t-student de una muestra	
t	-7.8423e-17
df	11
p-value	1

Tabla D- 4: Resultados de la prueba de t-student para los residuos de los datos de momento último.

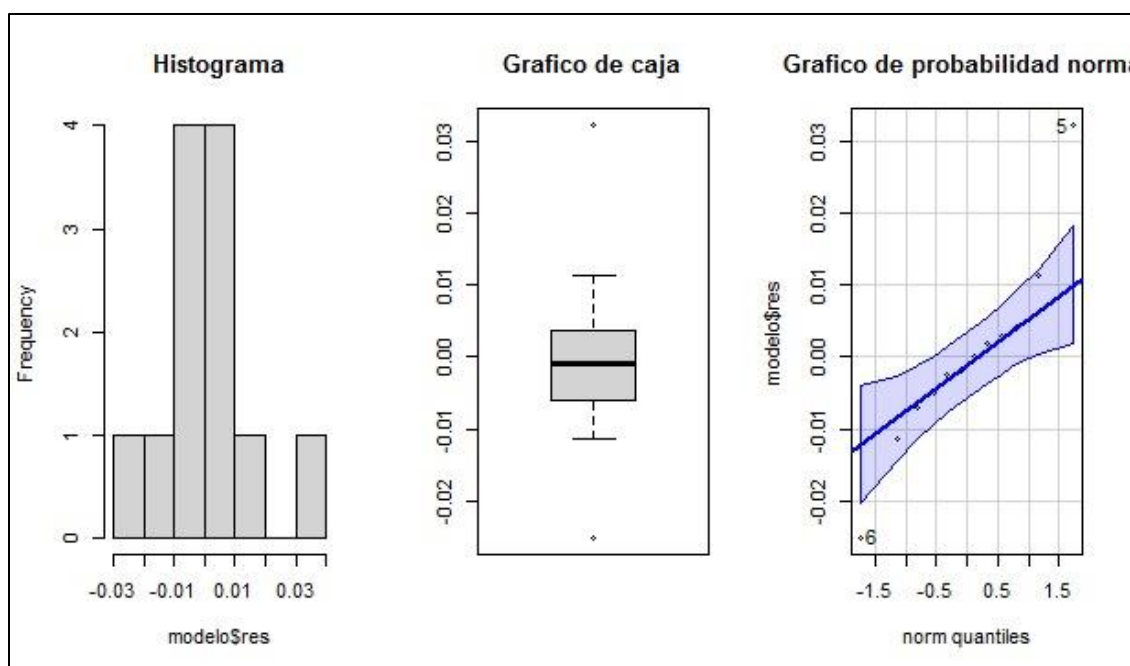
Para Coeficiente

- **Supuesto de normalidad.**

Observando el histograma y el gráfico de probabilidad normal de la Figura C-1 para los residuales se percibe un comportamiento de normalidad en los residuos, no obstante, mediante el test de Shapiro Wilk, se ratifica esta afirmación. La Tabla C-1 presenta el p- value de la prueba, como es mayor que Alpha, los residuos se ajustan una distribución normal.

Prueba de normalidad Shapiro – Wilk	
W	0.91943
P-Value	0.2812
Alpha	0.05

Tabla D-5: Resultados de la prueba de normalidad Shapiro -Wilk para los residuos de datos demomento último.



Gráfica D-3: Histograma, diagrama de caja y gráfico de probabilidad normal de los residuos del modelo de momento último

▪ **Supuesto de varianza constante.**

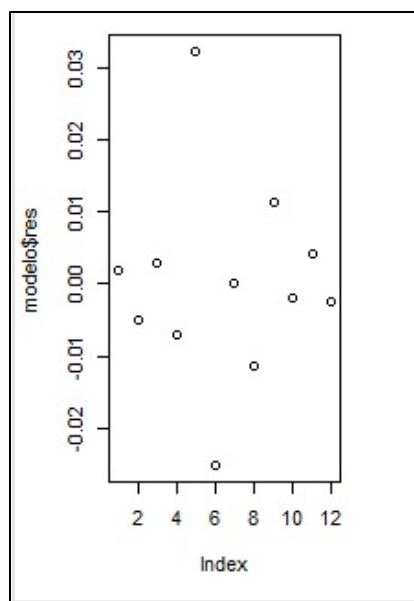
El supuesto de varianza constante se analiza mediante la prueba Breusch-Pagan y se comprueba la homogeneidad de varianza, la Tabla C-2 muestra los resultados de la prueba de puntuación de varianza no constante, como el p-value es mayor a 0.05, los residuos cumplen el supuesto de varianza constante.

Prueba de puntuación de varianza no constante	
BP	6.8034
Df	3
p-value	0.07843

Tabla D-6: Resultados de la prueba de puntuación de varianza no constante para los residuos de los datos de momento último

▪ **Supuesto de independencia.**

El gráfico de la Figura C-2 muestra una aleatoriedad en los residuales, mostrando independencia en los residuales. Con Durbin Watson test se demuestra la independencia de los residuos, cuyo resultado se muestra en la Tabla C-3.



Gráfica D-4: Residuales contra orden del modelo de momento último.

Prueba estadística Durbin – Watson			
Lag	Autocorrelation	D-W Statistic	P-value
1	-0.6125208	3.220361	0.096

Tabla D-7: Resultados de la prueba de Durbin – Watson para los residuos de los datos de momento último.

▪ **Supuesto de media cero.**

Aplicando la prueba t-student, presentada en la Tabla C-4 se comprueba el supuesto de media cero de los residuos.

Prueba t-student de una muestra	
t	-7.7423e-17
df	11
p-value	1

Tabla D-8: Resultados de la prueba de t-student para los residuos de los datos de momento último