

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ESTUDIO DE LOS MATERIALES, PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE SUPERADOBE EN EL PROGRAMA SAP2000, EN EL RANGO LINEAL, SISTEMA ELABORADO CON MEZCLA DE SUELO-CAL Y REFUERZO VERTICAL DE CAÑA GUADÚA (GaK).**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS**

**MEJÍA NAVARRETE LAURA ELIZABETH**

**[laura.mejia@epn.edu.ec](mailto:laura.mejia@epn.edu.ec)**

**RIVERA ENRIQUEZ CARLOS ANTONIO**

**[carlos.rivera01@epn.edu.ec](mailto:carlos.rivera01@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR: ING. LUNA HERMOSA GERMÁN VINICIO, MBA.  
[german.luna@epn.edu.ec](mailto:german.luna@epn.edu.ec)**

**CODIRECTOR: ING. VACA MONCAYO FÉLIX POLICARPO, M.Sc.  
[felvaca@hotmail.com](mailto:felvaca@hotmail.com)**

**Quito, abril 2021**

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, Laura Elizabeth Mejía Navarrete y Carlos Antonio Rivera Enriquez declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Laura Elizabeth Mejía Navarrete

---

Carlos Antonio Rivera Enriquez

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Laura Elizabeth Mejía Navarrete y Carlos Antonio Rivera Enriquez, bajo nuestra dirección.

---

**ING. GERMÁN LUNA HERMOSA, MBA.**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

---

**ING. FÉLIX VACA MONCAYO, M.Sc.**  
**CODIRECTOR DEL PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

A mi padres, Eduardo y Magaly por sus consejos y enseñanzas que me ayudaron a alcanzar esta meta. Gracias por siempre apoyarme en todos los ámbitos de mi vida y levantarme con sus brazos de cada caída.

A mi amigo y compañero de tesis, Carlos Rivera por su ayuda y dedicación inigualable en la elaboración de este trabajo, por su sensibilidad ante la muerte de mi padre y mi embarazo.

A Paty y Alexis, el conocerlos es el recuerdo más bonito de la vida universitaria.

A mis maestros, Ing. German Luna y el Ing. Félix Vaca por su guía, paciencia y consideración, porque siempre estuvieron presto a ayudarnos.

Laura Mejía Navarrete

## **AGRADECIMIENTO**

Primero quiero agradecer a mis padres, la Sra. Gloria y Don Carlos, por el amor, la paciencia, las enseñanzas y por la ayuda en todo momento, sin duda, los mejores padres que jamás alguien podrá tener. A mis hermanas, Pily y Jenny, les quiero más de lo que piensan, y sé que me quieren, gracias por no dejar de creer en mí.

A la Escuela Politécnica Nacional, a la Facultad de Ingeniería Civil y los docentes que compartieron sus conocimientos, a nuestro Director de tesis Ing. Germán Luna y a nuestro Codirector Ing. Félix Vaca, para mí de los mejores profesores que la FICA puede tener, gracias por transmitir sus conocimientos en las aulas y por la ayuda brindada para culminar este proyecto.

Al personal del laboratorio LEMSUR, por su disposición cuando hubo inquietudes y de manera especial al Ing. Gabriel Merino, quien aparte de ayudar en este proyecto, apporto con conocimiento con su tesis de pregrado, mis mejores deseos para él. Así mismo al personal del laboratorio CIV por su predisposición con el primer proyecto, ojalá esa idea logre ser fecundada.

A mis amigos de universidad, Andrés A., Paul Ch., Iván M., Jaime R., Darío C., Jonathan B., Henry P., Ricardo Ch., Oscar C., Carlos V., Luis M., Pablo T., a los “Tributo a Tercera”, cada uno es especial a su manera, a mis primos “Los Riveras” Mauricio, Alonso, Víctor, Alex, Luis, Pablo y Adolfo, jamás envejezcan, a mis amigos de juventud los “Latín Soccer”, a Esteban T., y Leonardo L, hermanos para toda la vida y a dos personas que simplemente quiero agradecer por aparecer en mi vida, Anita C., y Kary S.

A mis abuelos paternos y maternos, que aún están y a los que algún día alcanzaré, familiares, resto de amigos y conocidos, de quienes de alguna manera he aprendido algo, recordarles a todos ellos que “él que persevera alcanza”, creo ser prueba de ello, gracias de verdad.

Carlos Rivera.

## **DEDICATORIA**

En memoria de mi padre, por amarme y protegerme toda su vida.

A mi querida madre, por ser mi ejemplo y dar su mayor esfuerzo para que yo cumpla este logro.

A mi hijo Eduardo, por darme felicidad y fortaleza en la adversidad.

A mis hermanos, Alexandra, Luis, Alfredo, José y Yaritza por su amor y apoyo incondicional.

Laura Mejía Navarrete

## **DEDICATORIA**

En memoria de mi hijo Carlos Rahul Rivera Sánchez,  
jamás te sacaré de mi mente, peor aún de mi corazón...

Carlos Rivera.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	I
CERTIFICACIÓN .....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
DEDICATORIA.....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XV
LISTA DE TABLAS.....	XXV
RESUMEN .....	XXX
ABSTRACT .....	XXXI
PRESENTACIÓN .....	XXXII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
1.3. OBJETIVOS .....	6
1.3.1.OBJETIVO GENERAL .....	6
1.3.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
1.4. ALCANCE .....	7
1.5. JUSTIFICACIÓN .....	8
1.6. METODOLOGÍA .....	9
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE.....	11

2.1. EJE DE INVESTIGACIÓN.....	11
2.2. DOCUMENTOS REVISADOS Y HALLAZGOS.....	11
CAPÍTULO 3 MARCO TEÓRICO .....	15
3.1. LA TÉCNICA DE BIOCONSTRUCCIÓN “SUPERADOBE”.....	15
3.1.1.HISTORIA DEL SUPERADOBE .....	15
3.1.2.MÉTODO CONSTRUCTIVO DADO POR NADER KHALILI.....	15
3.1.3.CONSTRUCCIONES DE TIERRA EN LA REGIÓN.....	18
3.1.4.SUPERADOBE EN EL ECUADOR .....	18
3.2. MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DEL SISTEMA DE SUPERADOBE.....	19
3.2.1.MATERIALES USADOS EN EL SUPERADOBE.....	19
3.2.2.SACOS DE POLIPROPILENO.....	20
3.2.3.REFUERZO VERTICAL.....	21
3.2.4.MATERIAL DE RELLENO.....	24
3.3. TIPOLOGÍAS DE CONSTRUCCIÓN EN SUPERADOBE.....	27
3.3.1.SISTEMA DOMO .....	28
3.3.2.SISTEMA RECTANGULAR .....	29
3.3.3.SISTEMA BÓVEDA.....	29
3.4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN CON TIERRA.....	30

3.4.1.FALLAS TÍPICAS DE LA CONSTRUCCIÓN CON TIERRA .....	30
3.4.2.FALLAS DE CIMENTACIÓN.....	31
3.4.3.FALLA DE CONEXIÓN ENTRE MUROS.....	31
3.4.4.FALLA POR PÉRDIDA DE RECUBRIMIENTO.....	32
3.4.5.FALLA DE DIAFRAGMAS.....	33
3.4.6.FALLA POR FLEXIÓN PERPENDICULAR AL PLANO .....	34
3.4.7.FALLA POR CORTE .....	36
3.5. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES .....	36
3.5.1.PESO POR UNIDAD DE VOLUMEN .....	36
3.5.2.MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	37
3.5.3.RELACIÓN DE POISSON.....	38
3.5.4.COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA .....	39
3.5.5.MÓDULO DE ELASTICIDAD EN CORTANTE .....	40
3.6. LA NEC 2015, PARA EL SISTEMA DE SUPERADOBE.....	41
3.6.1.LA NEC – SE – CG, CARGAS NO SÍSMICAS.....	41
3.6.2.LA NEC – SE – DS, DISEÑO SISMORESISTENTE.....	44
3.6.3.DISEÑO SISMORESISTENTE .....	45
3.6.4.COMPONENTE HORIZONTAL DE LA FUERZA SÍSMICA .....	48
3.6.5.COMPONENTE VERTICAL DEL SISMO DE DISEÑO .....	51
3.6.6.COMBINACIÓN DE LAS FUERZAS ORTOGONALES Y DIRECCIÓN DE APLICACIÓN .....	51
3.6.7.METODOLOGÍA DEL DISEÑO SISMORESISTENTE.....	52
3.6.8.MÉTODOS DE DISEÑO .....	54
3.6.9.CONTROL DE DERIVAS .....	61
3.7. ANÁLISIS LINEAL DEL SISTEMA.....	62
3.7.1.RANGO LINEAL DE LOS MATERIALES .....	63
3.7.2.ELECCIÓN DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL SAP2000.....	63
CAPÍTULO 4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES .....	66

4.1. PROPIEDADES DEL SUELO .....	66
4.1.1. CLASIFICACIÓN SUCS DEL SUELO (PROCEDIMIENTO MANUAL-VISUAL) .....	66
4.1.2. CLASIFICACIÓN SUCS DEL SUELO (PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO) .....	67
4.1.3. DENSIDAD DEL SUELO .....	76
4.2. PROPIEDADES DEL SUELO Y DE LA MEZCLA SUELO-CAL .....	79
4.2.1. COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR .....	79
4.2.2. ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE .....	82
4.2.3. ENSAYO DE CORTE DIRECTO .....	85
4.2.4. ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL “UU” .....	88
4.3. PROPIEDADES DE LA CAÑA GUADÚA ( <i>GaK</i> ) .....	91
4.3.1. CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA CAÑA GUADÚA ( <i>GaK</i> ) .....	92
4.3.2. DENSIDAD DE LA CAÑA GUADÚA ( <i>GaK</i> ) .....	93
4.3.3. COMPRESIÓN EN LA CAÑA GUADÚA ( <i>GaK</i> ) .....	95
4.3.4. TRACCIÓN EN LA CAÑA GUADÚA ( <i>GaK</i> ) .....	98
4.3.5. CORTE EN LA CAÑA GUADÚA ( <i>GaK</i> ) .....	101
4.3.6. FLEXIÓN EN LA CAÑA GUADÚA ( <i>GaK</i> ) .....	104
CAPÍTULO 5 ELABORACIÓN DEL MODELO DEL SISTEMA .....	107
5.1. DISEÑO DEL SISTEMA DE VIVIENDA DE SUPERADOBE PROPUESTO .....	107
5.1.1. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE VIVIENDA .....	108
5.1.2. DIMENSIONES, CANTIDADES Y VOLÚMENES DEL PROTOTIPO .....	112
5.2. ELEMENTOS PARA UN FUTURO ENSAYO FÍSICO .....	115

5.2.1.MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE VIVIENDA DE SUPERADOBE Y REFUERZO VERTICAL DE CAÑA GUADÚA ( <i>GaK</i> ) .....	115
5.3. MODELO EN SAP2000 DEL SISTEMA DE SUPERADOBE. ....	118
5.3.1.CREACIÓN DEL MATERIAL SUELO-CAL. ....	118
5.3.2.CREACIÓN DEL MATERIAL CAÑA GUADÚA ( <i>GaK</i> ).....	121
5.3.3.CONSTRUCCIÓN DE MATERIALES EXTRAS O DE APOYO.....	122
5.3.4.ELABORACIÓN EN LA INTERFAZ DEL PROGRAMA.....	123
5.4. APLICACIÓN DE LA NEC-15 AL SISTEMA .....	135
5.4.1.FACTOR DE ZONA Z .....	135
5.4.2.TIPO DE PERFIL DE SUELO .....	135
5.4.3.COEFICIENTES DE PERFIL DE SUELO .....	135
5.4.4.ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN ACELERACIONES.....	136
5.4.5.APLICACIÓN DEL MÉTODO DBF.....	137
CAPÍTULO 6 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....	142
6.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS MATERIALES .....	142
6.1.1.DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y MECÁNICOS DEL SUELO. ....	142
6.1.2.DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y MECÁNICOS DE LA MEZCLA SUELO - CAL.....	151
6.1.3.DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y MECÁNICOS DE LA CAÑA GUADÚA ( <i>GaK</i> ).....	164
6.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO COMPUTACIONAL. ....	176

6.2.1.DETALLES Y OBSERVACIONES DEL MODELO .....	176
6.2.2.CORTANTE BASAL .....	179
6.2.3.DESPLAZAMIENTOS .....	179
6.2.4.PERÍODOS DE VIBRACIÓN DEL SISTEMA.....	182
6.2.5.CONTROL DE DERIVAS DEL SISTEMA .....	182
6.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....	184
6.3.1.COMPARACIÓN DE RESULTADOS, MEJORAMIENTO DEL SUELO AL AÑADIR CAL .....	184
6.3.2.COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA CAÑA GUADÚA CON TRABAJOS SIMILARES.....	188
6.3.3.COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO COMPUTACIONAL CON TRABAJOS SIMILARES .....	195
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	208
7.1. CONCLUSIONES.....	208
7.2. RECOMENDACIONES .....	215
BIBLIOGRAFÍA .....	217
ANEXOS .....	226
Anexo 1.- Planos arquitectónicos y estructurales. ....	227
Anexo 2.- Informe de Clasificación de suelos. ....	228
Anexo 3. – Informe de Densidad de suelo.....	229
Anexo 4. – Informe de Compactación en suelos. ....	230
Anexo 5. – Informe de Compresión simple.....	231
Anexo 6. – Informe de Corte directo en suelos.....	232
Anexo 7. – Informe de Compresión triaxial en suelos.....	233
Anexo 8. – Informe de Compactación en mezcla suelo-cal.....	234

Anexo 9 - A. – Informe de Compresión simple en la mezcla suelo-cal al 4%.....	235
Anexo 9 - B. – Informe de Compresión simple en la mezcla suelo-cal al 8%.....	236
Anexo 9 - C. – Informe de Compresión simple en la mezcla suelo-cal al 12%.....	237
Anexo 10 - A. – Informe de Corte directo en la mezcla suelo-cal al 4%. .....	238
Anexo 10 - B. – Informe de Corte directo en la mezcla suelo-cal al 8%. .....	239
Anexo 10 - C. – Informe de Corte directo en la mezcla suelo-cal al 12%. .....	240
Anexo 11 - A. – Informe de Ensayo Triaxial UU en la mezcla suelo-cal al 4%.....	241
Anexo 11 - B. – Informe de Ensayo Triaxial UU en la mezcla suelo-cal al 8%.....	242
Anexo 11 - C. – Informe de Ensayo Triaxial UU en la mezcla suelo-cal al 12%.....	243
Anexo 12 - A. – Informe de Ensayo a Tracción Caña guadúa (GaK) Probeta 1.....	244
Anexo 12 - B. – Informe de Ensayo a Tracción Caña guadúa (GaK) Probeta 2.....	245
Anexo 13 - A. – Informe de Ensayo a Compresión Caña guadúa (GaK) Probeta 1.....	246
Anexo 13 - B. – Informe de Ensayo a Compresión Caña guadúa (GaK) Probeta 2.....	247
Anexo 14 - A. – Informe de Ensayo a Corte Caña guadúa (GaK) Probeta 1.....	248

Anexo 14 - B. – Informe de Ensayo a Corte Caña guadúa (GaK)  
Probeta 2..... 249

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Construcción en superadobe con saco discontinuo (izquierda) y saco continuo (derecha) .....	2
<b>Figura 1.2.</b> Colocación de alambre de púas entre hiladas.....	3
<b>Figura 1.3.</b> Caña guadua entre hiladas .....	3
<b>Figura 3.1.</b> Flujograma del proceso constructivo de una vivienda de superadobe, bajo la técnica de DomoTerra .....	17
<b>Figura 3.2.</b> Construcción con adobe, Nono-Pichincha-Ecuador. ....	18
<b>Figura 3.3.</b> Construcción de superadobe en la ciudad de Quito.....	19
<b>Figura 3.4.</b> Saco de polipropileno en rollo, para construcción de superadobe. ....	20
<b>Figura 3.5.</b> Alambre de púas para construcción de superadobe. ....	21
<b>Figura 3.6.</b> Alambre de púas colocado en forma de S.....	22
<b>Figura 3.7.</b> Caña guadúa (GaK), para ensayos.....	22
<b>Figura 3.8.</b> Modelo 1, pared de superadobe con caña guadua tipo estaca. ....	23
<b>Figura 3.9.</b> Modelo 2, pared de superadobe con caña guadua tipo pinchos.....	23
<b>Figura 3.10.</b> Suelo mezclado con agua y cal para preparación de mezcla.....	24
<b>Figura 3.11.</b> Recomendación del uso de aglutinantes para mezclas, según el porcentaje de material existente.....	25
<b>Figura 3.12.</b> Saco de cal para preparación de mezcla. ....	26
<b>Figura 3.13.</b> Sistema domo de construcción con superadobe .....	28
<b>Figura 3.14.</b> Sistema rectangular de superadobe, con cubierta plana.....	29
<b>Figura 3.15.</b> Sistema bóveda de construcción en superadobe .....	29
<b>Figura 3.16.</b> Deterioro de muros debido a la falta de una cimentación.....	31
<b>Figura 3.17.</b> Separación de muros de tierra debido a una mala conexión.....	32

<b>Figura 3.18.</b> Pérdida de recubrimiento en paredes de tierra por mala utilización de materiales para recubrimiento. ....	32
<b>Figura 3.19.</b> Separación de recubrimiento al usar cemento o similares para recubrir construcciones de tierra. ....	33
<b>Figura 3.20.</b> Falla del muro y diafragma debido a la fuerza lateral, por falta de unión entre diafragma y muro.....	33
<b>Figura 3.21.</b> Cubierta mal apoyada, traslape defectuoso en diafragma y muro. ....	34
<b>Figura 3.22.</b> Agrietamiento y separación de muros, por falta de tracción, al aplicar una fuerza externa. ....	34
<b>Figura 3.23.</b> Falla en la parte central del muro, debido a falta de tracción al aplicar una fuerza perpendicular al plano. ....	35
<b>Figura 3.24.</b> Volteo de un muro ya separado, debido a la fuerza perpendicular al muro y la mala unión entre muros.....	35
<b>Figura 3.25.</b> Falla a corte, muestra de fisuras diagonales que siguen la unión de ladrillos de adobe.....	36
<b>Figura 3.26.</b> Carga Viva para residencias según la tabla N° 9 de NEC-15.....	42
<b>Figura 3.27.</b> Cadena de determinación de la demanda sísmica.....	44
<b>Figura 3.28.</b> Valores del factor Z, en función de la zona sísmica adoptada. ....	45
<b>Figura 3.29.</b> Clasificación de los perfiles de suelo.....	46
<b>Figura 3.30.</b> Tipo de suelo - Factor de sitio $F_a$ .....	47
<b>Figura 3.31.</b> Tipo de suelo - Factor de sitio $F_d$ .....	47
<b>Figura 3.32.</b> Tipo de suelo - Factor de comportamiento inelástico $F_s$ .....	48
<b>Figura 3.33.</b> Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones. ....	48
<b>Figura 3.34.</b> Límites de períodos vibración, en función de los coeficientes de la geología del suelo. ....	49
<b>Figura 3.35.</b> Mapa de zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z. ....	50

<b>Figura 3.36.</b> Ecuaciones para los dos tramos del espectro elástico de diseño en desplazamiento.....	50
<b>Figura 3.37.</b> Espectro elástico de diseño en desplazamiento para diseño. ....	50
<b>Figura 3.38.</b> Valor de las derivas máximas permitidas. ....	53
<b>Figura 3.39.</b> Sistema elástico equivalente de la NEC 15.....	55
<b>Figura 3.40.</b> Sistema elástico equivalente de un piso, propuesto por Mejía y Rivera. ....	55
<b>Figura 3.41.</b> Ejemplo de cada tipo de elemento en el programa SAP2000. ....	64
<b>Figura 3.42.</b> Entrepiso de cubierta plana con caña guadua .....	65
<b>Figura 4.1.</b> Muestra de suelo tomada de la parroquia de Calderón - Luz y Vida.....	66
<b>Figura 4.2.</b> Tamices ordenados para la clasificación granulométrica del suelo.....	67
<b>Figura 4.3.</b> Materiales y muestra para prueba de límite plástico. ....	70
<b>Figura 4.4.</b> Instrumentos para el ensayo de límite líquido. ....	72
<b>Figura 4.5.</b> Peso de muestra, para determinación de contenido de humedad. ....	74
<b>Figura 4.6.</b> Picnómetro calibrado para ensayo de densidad de sólidos.....	76
<b>Figura 4.7.</b> Muestra de suelo, al realizar prueba de Proctor estándar. ....	79
<b>Figura 4.8.</b> Ensayo a compresión simple de la muestra de suelo.....	83
<b>Figura 4.9.</b> Ensayo a corte directo de la muestra de suelo.....	85
<b>Figura 4.10.</b> Máquina de ensayo de compresión triaxial. ....	88
<b>Figura 4.11.</b> Caña guadúa ( <i>GaK</i> ) usada para los diferentes ensayos.....	91
<b>Figura 4.12.</b> Caña guadúa ( <i>GaK</i> ) antes de ser cortada a medida para ensayo de contenido de humedad. ....	92
<b>Figura 4.13.</b> Probetas de caña guadúa ( <i>GaK</i> ) para ensayo de densidad.....	93
<b>Figura 4.14.</b> Ensayo de compresión a la caña guadúa ( <i>GaK</i> ) .....	95

<b>Figura 4.15.</b> Toma de datos para probetas de caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Ensayo de compresión.....	96
<b>Figura 4.16.</b> Ensayo a tracción de la caña guadúa ( <i>GaK</i> ) .....	98
<b>Figura 4.17.</b> Toma de datos para probetas de caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Ensayo de tensión.....	99
<b>Figura 4.18.</b> Placas para ensayo de corte a la caña guadúa ( <i>GaK</i> ). .....	101
<b>Figura 4.19.</b> Toma de datos para probetas de caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Ensayo de corte. ....	102
<b>Figura 4.20.</b> Ensayo a flexión de la caña guadúa ( <i>GaK</i> ) .....	104
<b>Figura 4.21.</b> Toma de datos para probetas de caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Ensayo a flexión.....	105
<b>Figura 5.1.</b> Vista esquemática arquitectónica del sistema de superadobe propuesto. ....	107
<b>Figura 5.2.</b> Configuración de un prisma rectangular para el cálculo del momento de inercia.....	109
<b>Figura 5.3.</b> Configuración del sistema, teniendo en cuenta la dirección de la fuerza en el sentido de menor rigidez.....	111
<b>Figura 5.4.</b> Vista esquemática de la configuración del sistema de superadobe. ....	112
<b>Figura 5.5.</b> Dimensión del refuerzo vertical de caña guadúa ( <i>GaK</i> ). .....	113
<b>Figura 5.6.</b> Vista frontal y lateral de la cimentación por encajonamiento en hormigón, de las tres primeras hiladas, para la configuración del sistema de superadobe. ....	116
<b>Figura 5.7.</b> Vista superior de diafragma de caña guadúa ( <i>GaK</i> ), para la configuración del sistema de superadobe. ....	118
<b>Figura 5.8.</b> Dimensiones del sistema de superadobe propuesto. ....	123
<b>Figura 5.9.</b> Configuración del “grid system” para la elaboración del sistema. ....	124

<b>Figura 5.10.</b> Configuración de los materiales para la elaboración del sistema.....	124
<b>Figura 5.11.</b> Definición elementos sólidos en la elaboración del sistema.....	125
Figura 5.12. Determinación de las secciones de corte en el sistema.....	126
<b>Figura 5.13.</b> Modelo computacional de elementos sólidos para análisis del sistema de superadobe propuesto. ....	126
<b>Figura 5.14.</b> Aplicación de la carga muerta D.....	128
<b>Figura 5.15.</b> Aplicación de la carga de cubierta $L_r$ .....	128
<b>Figura 5.16.</b> Aplicación de la carga viva $L$ . ....	129
<b>Figura 5.17.</b> Aplicación de la carga de viento $L$ . ....	130
<b>Figura 5.18.</b> Aplicación de la carga de granizo $S$ . ....	131
<b>Figura 5.19.</b> Aplicación de la carga sísmica, sentido X. ....	132
<b>Figura 5.20.</b> Aplicación de la carga sísmica, sentido Y. ....	132
<b>Figura 5.21.</b> Creación de combinaciones de carga para el análisis del sistema.....	133
<b>Figura 5.22.</b> Creación de combinaciones de sismo en sentido X par el análisis del sistema. ....	133
<b>Figura 5.23.</b> Creación de combinaciones de sismo en sentido Y para el análisis del sistema. ....	134
<b>Figura 5.24.</b> Ejecución de análisis del sistema ante diferentes estados de carga. ....	134
<b>Figura 5.25.</b> Espectro elástico de diseño en aceleraciones.....	137
<b>Figura 5.26.</b> Espectro elástico de diseño en desplazamientos.....	137
<b>Figura 5.27.</b> Espectro elástico de diseño en aceleraciones, indica la ubicación de los períodos $T_a$ para cada dirección.....	139
<b>Figura 5.28.</b> Ubicación de centro geométrico y de centro de masa del sistema.....	141

<b>Figura 6.1.</b> Curva granulométrica para la muestra de suelo.....	143
<b>Figura 6.2.</b> Grafica de curva de compactación. Muestra de suelo.....	146
<b>Figura 6.3.</b> Curva de esfuerzo vs deformación, para la muestra de suelo.....	147
<b>Figura 6.4.</b> Envolvente de falla del esfuerzo de corte en función del esfuerzo normal, para la muestra de suelo a través del ensayo de corte directo. ....	148
<b>Figura 6.5.</b> Curva de esfuerzo frente a la deformación lateral, para la muestra de suelo a través del ensayo de corte directo. ....	149
<b>Figura 6.6.</b> Envolvente de falla del esfuerzo de corte en función del esfuerzo normal, para la muestra de suelo a través del ensayo Triaxial UU.....	150
<b>Figura 6.7.</b> Curva esfuerzo desviador frente la deformación unitaria, para la muestra de suelo a través del ensayo Triaxial UU. ....	150
<b>Figura 6.8.</b> Curva de compactación de la mezcla suelo-cal al 4.0% en peso. ....	152
<b>Figura 6.9.</b> Curva de compactación de la mezcla suelo-cal al 8.0% en peso. ....	152
<b>Figura 6.10.</b> Curva de compactación de la mezcla suelo-cal al 12.0% en peso. ....	153
<b>Figura 6.11.</b> Curva de esfuerzo normal frente a la deformación unitaria de mezcla suelo-cal al 4% de porcentaje en peso. ....	154
<b>Figura 6.12.</b> Curva de esfuerzo normal frente a la deformación unitaria de mezcla suelo-cal al 8% de porcentaje en peso. ....	154
<b>Figura 6.13.</b> Curva de esfuerzo normal frente a la deformación unitaria de mezcla suelo-cal al 12% de porcentaje en peso. ....	155
<b>Figura 6.14.</b> Curvas de esfuerzo normal frente a la deformación unitaria de las mezclas suelo-cal. ....	156
<b>Figura 6.15.</b> Envolventes de falla para las diferentes mezclas de suelo cal y suelo natural por el ensayo de corte directo.....	157

<b>Figura 6.16.</b> Curvas de esfuerzo de corte frente a deformación lateral. Mezcla suelo cal al 4%. Diferentes esfuerzos laterales por el ensayo de corte directo.....	157
<b>Figura 6.17.</b> Curvas de esfuerzo de corte frente a deformación lateral Mezcla suelo cal al 8%. Diferentes esfuerzos laterales por el ensayo de corte directo.....	158
<b>Figura 6.18.</b> Curvas de esfuerzo de corte frente a deformación lateral de mezcla suelo cal al 12%. Diferentes esfuerzos laterales por el ensayo de corte directo.....	158
<b>Figura 6.19.</b> Envoltentes de falla para las diferentes mezclas de suelo cal por el ensayo de Triaxial UU. ....	159
<b>Figura 6.20.</b> Curvas de esfuerzo de corte frente a la deformación lateral de mezcla de suelo cal al 4% a diferentes esfuerzos laterales por el ensayo Triaxial UU.....	159
<b>Figura 6.21.</b> Curvas de esfuerzo de corte frente a la deformación lateral de mezcla de suelo cal al 8% a diferentes esfuerzos laterales por el ensayo Triaxial UU.....	160
<b>Figura 6.22.</b> Curvas de esfuerzo de corte frente a la deformación lateral de mezcla de suelo cal al 12% a diferentes esfuerzos laterales por el ensayo Triaxial UU.....	160
<b>Figura 6.23.</b> Curva de esfuerzo último frente a la deformación unitaria para el ensayo a compresión de la caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 1. ....	166
<b>Figura 6.24.</b> Curva de esfuerzo último frente a la deformación unitaria para el ensayo a compresión de la caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 2. ....	167
<b>Figura 6.25.</b> Curva esfuerzo último frente a la deformación en el ensayo de tracción de la caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 1. ....	170
<b>Figura 6.26.</b> Curva esfuerzo último frente a la deformación unitaria en el ensayo de tracción de la caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 2.....	171
<b>Figura 6.27.</b> Curva esfuerzo último frente al desplazamiento en el ensayo de tracción de la caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 1. ....	172

<b>Figura 6.28.</b> Curva esfuerzo último frente al desplazamiento en el ensayo de tracción de la caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 2. ....	173
<b>Figura 6.29.</b> Curva Fuerza aplicada frente vs deformación en el centro en el ensayo de tracción de la caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 1 .....	174
<b>Figura 6.30.</b> Curva fuerza aplica frente a la deflexión en el centro en el ensayo de tracción de la caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 2.....	175
<b>Figura 6.31.</b> Desplazamiento en sentido “X” en el primer periodo, del sistema de superadobe con refuerzo de estacas caña guadúa ( <i>GaK</i> ).....	176
<b>Figura 6.32.</b> Desplazamiento de muros en el tercer periodo, diafragma amarra los muros del sistema de superadobe con refuerzo de estacas caña guadúa ( <i>GaK</i> ).....	177
<b>Figura 6.33.</b> Sistema de superadobe sin refuerzo alguno (sistema convencional de superadobe). ....	178
<b>Figura 6.34.</b> Sistema de superadobe con refuerzo de estacas caña guadúa ( <i>GaK</i> ).....	178
<b>Figura 6.35.</b> Sistema de superadobe con refuerzo de pinchos caña guadúa ( <i>GaK</i> ).....	179
<b>Figura 6.36.</b> Valores del Corte Basal calculado a través del programa SAP2000. ....	179
<b>Figura 6.37.</b> Valores de deformación en esquina superior izquierda de la parte posterior del sistema. ....	180
<b>Figura 6.38.</b> Valores de deformación en esquina superior derecha de la parte posterior del sistema. ....	180
<b>Figura 6.39.</b> Valores de deformación en esquina superior derecha de la parte delantera del sistema. ....	181
<b>Figura 6.40.</b> Valores de deformación en esquina superior izquierda de la parte delantera del sistema. ....	181
<b>Figura 6.41.</b> Valores de períodos del sistema de superadobe reforzado, determinados por el programa SAP2000. ....	182

<b>Figura 6.42.</b> Curvas de compactación las mezclas de suelo-cal y suelo natural .....	185
<b>Figura 6.43.</b> Curvas de esfuerzo normal frente a la deformación unitaria de la mezcla suelo-cal y suelo natural.....	186
<b>Figura 6.44.</b> Envoltentes de falla para las diferentes mezclas de suelo cal y suelo natural por el ensayo de corte directo. ....	187
<b>Figura 6.45.</b> Envoltentes de falla para las diferentes mezclas de suelo cal y suelo natural por el ensayo Triaxial UU.....	188
<b>Figura 6.46.</b> Tabla del Apéndice N° 6 de la Norma ecuatoriana de la construcción-Guadúa, que presenta valores de ensayos realizados a la caña guadúa ( <i>GaK</i> ).....	190
<b>Figura 6.47.</b> Dimensiones del sistema de adobe propuesto por (Bonilla & Ramos, 2013). Vista en planta y posterior.....	195
<b>Figura 6.48.</b> Dimensiones del sistema de adobe propuesto por (Bonilla & Ramos, 2013). Vista en planta y lateral.....	196
<b>Figura 6.49.</b> Ubicación de medidores de deformación LVDT en el sistema de (Bonilla & Ramos, 2013).....	197
<b>Figura 6.50.</b> Sistema propuesto de superadobe con refuerzo vertical de estacas de caña guadúa ( <i>GaK</i> ).....	199
<b>Figura 6.51.</b> Sistema de superadobe convencional, sin refuerzo de caña guadúa ( <i>GaK</i> ) y sin diafragma.....	199
<b>Figura 6.52.</b> Sistema de superadobe con refuerzo vertical de pinchos de caña guadúa ( <i>GaK</i> ), en toda la longitud vertical de los muros .....	200
<b>Figura 6.53.</b> Secciones de corte para determinación de fuerzas en elementos de cada modelo de sistema de superadobe. ....	203
<b>Figura 6.54.</b> Valores de la Fuerza F1 para las secciones de corte, en cada modelo de sistema de superadobe. ....	204
<b>Figura 6.55.</b> Valores de Fuerza F2, en las secciones de corte, en cada modelo de sistema de superadobe. ....	204

<b>Figura 6.56.</b> Valores de Fuerza F3, en las secciones de corte, en cada modelo de sistema de superadobe. ....	205
<b>Figura 6.57.</b> Valores de Momento M1, en las secciones de corte, en cada modelo de sistema de superadobe. ....	206
<b>Figura 6.58.</b> Valores de Momento M2, en las secciones de corte, en cada modelo de sistema de superadobe. ....	206
<b>Figura 6.59.</b> Valores de Momento M3, en las secciones de corte, en cada modelo de sistema de superadobe. ....	207

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Revisión de materiales: Mezcla suelo-cal y caña guadúa (GaK).....	11
Tabla 2.2. Método constructivo del superadobe.....	12
Tabla 2.3. Modelo computacional del sistema constructivo.....	13
Tabla 3.1. Rango de valores establecidos para $k_T$ . .....	60
Tabla 5.1. Datos para establecer el sentido con mayor rigidez del sistema de superadobe. ....	108
Tabla 5.2. Determinación del sentido menos rígido del sistema propuesto, teniendo en cuenta la condición de muros como prismas.....	110
Tabla 5.3. Dimensiones de muros y aberturas de puerta y ventana. ....	112
Tabla 5.4. Dimensiones del refuerzo vertical de caña guadúa (GaK). ....	113
Tabla 5.5. Volumen de muros y refuerzo vertical en cada elemento del sistema propuesto. ....	114
Tabla 5.6. Volumen de material en el sistema propuesto.....	114
Tabla 5.7. Resumen de pesos específicos y densidades promedio para las diferentes muestras de suelo-cal.....	119
Tabla 5.8. Resumen de valores para el módulo de Elasticidad en diferentes probetas ensayadas a compresión simple y en ensayo Triaxial "UU" .....	120
Tabla 5.9. Estimación de la carga muerta de la cubierta (sobre carga muerta) repartida en el sistema.....	127
Tabla 5.10. Estimación de la carga muerta de los muros (peso propio) repartida en el sistema .....	127
Tabla 5.11. Determinación de la carga por viento en el sistema .....	130
Tabla 5.12. Determinación de la carga por granizo en el sistema.....	131
Tabla 5.13. Determinación de la carga por sismo en el sistema .....	131
Tabla 5.14. Relación de $S_a$ y el $Z$ a través del mapa de zonas sísmicas. ....	135

Tabla 5.15. Resumen de Coeficientes para elaboración del espectro de diseño en aceleración y determinación de límites de los períodos.....	136
Tabla 5.16. Resumen de los períodos en las dos direcciones. ....	138
Tabla 5.17. Valores de la $S_a$ con respecto a períodos $T_a$ , en dos direcciones. ....	138
Tabla 5.18. Peso total del sistema (carga muerta y sobrecarga). ....	140
Tabla 5.19. Resumen de valores para determina el Corte Basal V.....	140
Tabla 5.20. Determinación del centro de masa y centro geométrico.....	141
Tabla 6.1. Determinación de humedad natural del suelo. Norma ASTM D 2216.....	143
Tabla 6.2. Determinación de densidad del suelo. Norma ASTM D 854-14 .....	144
Tabla 6.3. Determinación de gravedad específica en muestra de suelo, datos previos. ....	144
Tabla 6.4. Determinación de la gravedad específica de la muestra de suelo a la temperatura ambiente de 20 °C.....	145
Tabla 6.5. Promedio de dimensiones de especímenes para ensayos de la muestra de suelo.....	147
Tabla 6.6. Datos del ensayo de contenido de humedad para muestra de suelo.....	147
Tabla 6.7. Datos del ensayo de contenido de Esfuerzo Normal ante el Esfuerzo Cortante para la muestra de suelo. ....	148
Tabla 6.8. Resumen de valores de densidad para las mezclas de suelo-cal, en los ensayos de compactación. ....	151
Tabla 6.9. Ensayo de Compresión Simple en Suelos D2166M-16; D854-14 .....	161
Tabla 6.10. Ensayo de Corte Directo en Suelos ASTM D3080-11 .....	161
Tabla 6.11. Ensayo de Compresión Triaxial UU en Suelos ASTM D2850-15.....	161

Tabla 6.12. Resumen de valores para el módulo de Elasticidad de las probetas ensayadas tanto a compresión simple y a ensayo Triaxial.....	162
Tabla 6.13. Resumen de valores para determinar el coeficiente de Poisson de las diferentes probetas ensayadas tanto en el ensayo de compresión simple. Parte 1. ....	163
Tabla 6.14. Resumen de valores para determinar el coeficiente de Poisson de las diferentes probetas ensayadas en el ensayo de compresión simple. Parte 2.....	163
Tabla 6.15. Contenido de humedad de caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 1. Norma NTC 5525. ....	164
Tabla 6.16. Contenido de humedad de caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 2. Norma NTC 5525. ....	165
Tabla 6.17. Datos de ensayo de compresión de caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 1.....	165
Tabla 6.18. Datos de ensayo de compresión de caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 2.....	166
Tabla 6.19. Datos de ensayo compresión-deformación caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Determinación de Coeficiente de Poisson. Parte 1. ....	168
Tabla 6.20. Datos de ensayo compresión-deformación caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Determinación de Coeficiente de Poisson. Parte 2. ....	169
Tabla 6.21. Datos de ensayo compresión-deformación caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Determinación de Coeficiente de Poisson. Parte 3 .....	169
Tabla 6.22. Datos ensayo de tracción para caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 1. ....	170
Tabla 6.23. Datos ensayo de tracción para caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 2. ....	171
Tabla 6.24. Datos ensayo de corte para caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 1.....	172
Tabla 6.25. Datos ensayo de corte para caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 2.....	173
Tabla 6.26. Datos ensayo de flexión para caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 1. ....	174
Tabla 6.27. Datos ensayo de flexión para caña guadúa ( <i>GaK</i> ). Probeta 2. ....	175

Tabla 6.28. Factor de efectos P-Delta ( $\Delta$ ) e índice $Q_{ie}$ .....	183
Tabla 6.29. Resumen de derivas máximas para el sistema de superado con refuerzo de estacas de caña guadúa (GaK).....	183
Tabla 6.30. Comparación de valores de densidad del suelo ante las combinaciones de suelo-cal, a través del ensayo de compactación. ....	184
Tabla 6.31. Resumen de valores para las propiedades de la caña guadúa (GaK), a través de los diferentes ensayos realizados en este trabajo.....	189
Tabla 6.32. Resumen de valores para las propiedades de la caña guadúa (GaK), a través de los diferentes ensayos realizados anteriormente en el laboratorio LEMSUR de la EPN. ....	189
Tabla 6.33. Resumen de valores para la determinación del contenido de humedad de la caña guadúa (GaK), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores. ....	190
Tabla 6.34. Resumen de valores para la determinación de la densidad de la caña guadúa (GaK), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.....	191
Tabla 6.35. Resumen de valores para la determinación del esfuerzo máximo en compresión de la caña guadúa (GaK), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.....	191
Tabla 6.36. Resumen de valores para la determinación del esfuerzo máximo en tracción de la caña guadúa (GaK), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.....	192
Tabla 6.37. Resumen de valores para la determinación del esfuerzo máximo en flexión de la caña guadúa (GaK), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.....	192
Tabla 6.38. Resumen de valores para la determinación del esfuerzo máximo de corte de la caña guadúa (GaK), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.....	193

Tabla 6.39. Resumen de valores para la determinación del módulo de elasticidad en compresión de la caña guadúa ( <i>GaK</i> ), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores. ....	193
Tabla 6.40. Resumen de valores para la determinación del módulo de elasticidad en tracción de la caña guadúa ( <i>GaK</i> ), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores. ....	194
Tabla 6.41. Resumen de valores para la determinación del módulo de elasticidad en flexión de la caña guadúa ( <i>GaK</i> ), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores. ....	194
Tabla 6.42. Resumen de valores de desplazamiento obtenido en el sistema de adobe reforzado de (Bonilla & Ramos, 2013), en el sentido X-X .....	197
Tabla 6.43. Resumen de valores de desplazamiento máximos y mínimos para el sistema de superadobe propuesto, tanto en el sentido “X”, como en el sentido “Y” y en el sentido “Z” .....	198
Tabla 6.44. Resumen de valores de desplazamiento máximos y mínimos para los sistemas: <i>diseño sin refuerzo</i> , <i>diseño con refuerzo de estacas</i> y <i>diseño con refuerzo de pinchos</i> , en los tres sentidos “X”, “Y” y “Z” .....	201
Tabla 6.45. Resumen de valores de períodos, modos de vibración, desplazamientos en las esquinas superiores y reacciones en la base, para: <i>diseño sin refuerzo</i> , <i>diseño con refuerzo de estacas</i> y <i>diseño con refuerzo de pinchos</i> , en los tres sentidos “X”, “Y” y “Z” .....	202

## RESUMEN

El presente trabajo técnico experimental, muestra un sistema de bioconstrucción en superadobe mejorado, como una alternativa ante la problemática de la falta de vivienda para familias de Ecuador y la región. El sistema de superadobe, es adecuado a los requerimientos de la región, y es reforzado verticalmente con estacas de caña guadúa, para poder evaluarlo ante los requisitos de la normativa ecuatoriana NEC-15, en su capítulo de sismo resistencia, y a su vez compararlo con trabajos similares de construcción en tierra.

Se sustituye materiales como el alambre de púas con el uso estacas de caña guadúa, se establece una mezcla de suelo-cal en proporciones adecuadas y óptimas para después configurar de forma ortogonal un sistema modular, por lo que en una primera instancia se revisa bibliografía respecto a los materiales adecuados y después respecto al sistema plateado de superadobe en forma rectangular.

Los materiales son analizados para determinar sus propiedades mecánicas y físicas, a través de los ensayos se caracteriza el suelo y se determina un mejoramiento de este a través del uso de cal; a la caña guadúa se le realizan varios ensayos que indiquen las propiedades mecánicas con las que cuenta.

Se incorporan las características de los materiales al programa computacional SAP2000 V22.1, a través de su interfaz; en el cual se realiza una simulación computacional del comportamiento del modelo reforzado de superadobe con caña guadúa y se establece los desplazamientos, así también los períodos y los modos de vibración.

Finalmente, el sistema de superadobe es comparado con varios modelos con mayor y menor reforzamiento vertical.

**Palabras clave:** sistema de superadobe, refuerzo vertical de caña guadúa, suelo-cal, diseño sismo resistente.

## ABSTRACT

This technic experiment demonstrates how the bioconstruction improves the system in earthbag, which is an alternative for the problems produced by the lack of places for living from Ecuador and the region. Earthbag system is adequate to the requirements of the region, and it has a vertical reinforcement with guadúa cane stakes, to compare with Ecuadorian norms *NEC-15* in the strength earthquake chapter, as well as similar works made on land.

The materials such as barbed wire is replaced with guadúa cane stakes, then establish the mix soil-cal (calcium hydroxide) in adequate and optimum proportions, after that, configure the modular orthogonal system, hence firstly review the bibliography of adequate materials for the system given to the earthbag in a rectangular form.

The materials have to be analyzed to establish the mechanic properties and physics too, with them the land is characterized that permits to determine a development of it throughout the use of cal (calcium hydroxide), the guadúa cane is brought through diverse essays than signs their mechanic properties.

Also it incorporates the main characteristics of the materials to the computer program called SAP2000 V22.1., through its interface, where a computer test is made about the behavior of the earthbag reinforced model with guadúa cane to establish displacements, so too the periods and vibration modes.

Finally, the earthbag system is compare with different models that have major and minor vertical reinforcement.

**Key words:** earthbag system, guadúa cane vertical reinforcement, land-cal, resisted earthquake design.

## PRESENTACIÓN

Este trabajo consta de siete capítulos, los cuales fueron elaborados siempre pensando en cumplir el objetivo inicial que es modelar el sistema de superadobe en sap2000 y además dar un nuevo enfoque para la inserción del sistema propuesto como alternativa en la bioconstrucción.

En el primer capítulo, se delimita el trabajo y a su vez se presentan los objetivos y la necesidad de incurrir en este campo de investigación para que más personas opten por la bioconstrucción.

En el segundo capítulo se da un breve detalle sobre la historia cronológica del sistema del superadobe, presentado como tablas los trabajos realizados tanto por autores nacionales como internacionales. Pese a que existen muy buenos aportes aún falta mucho por conocer y demostrar.

En el capítulo tres, se tratan diferentes temas que relacionados complementan el objetivo inicial, se plantean las características de los materiales y su interrelación, además se determinan los inconvenientes y comportamientos de sistemas similares.

En el capítulo cuatro, se detalla a profundidad cada ensayo realizado a cada material, tanto al suelo como a la caña guadúa, a cada mezcla de suelo cal y otras posibilidades de combinaciones que fueron descartadas en un proceso de preselección.

En el capítulo cinco, se muestra la elaboración del diseño del sistema de superadobe propuesto, se indica también un pequeño manual y resumen de los aprendizajes obtenidos en el curso de superadobe donde se llevó la teoría de la mano con la práctica, pensando siempre en involucrar a más personas en este novedoso sistema.

El capítulo seis, es un resumen de todos los resultados que se obtuvieron, tanto en el capítulo cuatro como en el capítulo siguiente, el capítulo cinco, además de ello se determinan algunas otras propiedades de los materiales que no se pudieron determinar directamente en el laboratorio.

El último capítulo, el siete, presenta las conclusiones de todo el trabajo realizado y se da unas últimas recomendaciones para los interesados en realizar más investigaciones sobre este sistema y el campo de la bioconstrucción.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

El sector de la construcción está considerado entre los mayores empleadores a nivel mundial, esto se debe a la gran cantidad de empresas que se dedican a actividades de construcción y las áreas que se relacionan (Maya & Vergara, 2017), ha sido tradicionalmente una de las industrias más contaminantes tanto en la fase de extracción y elaboración de sus materiales como en la construcción propiamente dicha, por ejemplo, el cemento y el acero que se requieren, tienen procesos que pese, a las mejoras tanto ambientales como tecnológicas que dichas industrias se han visto impuestas a usar, los índices de contaminación siguen fluctuando en valores considerables (Gallestey, Castagnoli, & Clive, 2004). Los residuos derivados de la construcción y demolición son mayores a una tonelada anual por habitante (Ambientum, 2018).

El gobierno del 2007 hasta el 2017 tuvo un gasto público excesivo en infraestructura de mega obras, en obras de uso esencial (escuelas, colegios hospitales) y en carreteras, pero eso hizo que la construcción genere un progreso importante (Maya & Vergara, 2017), en tanto, el alto número de personas sin vivienda propia continua siendo un problema en el Ecuador, y por eso “el déficit de vivienda de buena calidad afecta en la actualidad a más de 1,7 millones de hogares y la causa principal es la asequibilidad a una vivienda buena y segura” (MIDUVI, 2016, pág. 3). La población con menos recursos debe buscar alternativas que sean seguras y económicas para construir, ya que la inversión tanto en mano de obra, costos operativos y materiales e insumos suman valores no factibles para personas con escasos recursos económicos, además que el financiamiento habitacional tiene un interés muy elevado (Ceballos, 1992), por tanto las alternativas de construcción en bioconstrucción se hacen más que necesarias en la actualidad, entre ellas la construcción con tierra y el superadobe figuran como una buena solución.

El superadobe convencional se compone de sacos de polipropileno rellenos de tierra estabilizada con aglutinantes que pueden ser cal o cemento, ambos materiales se han usado para mejorar las características resistentes del suelo una

vez compactado. Los sacos de polipropileno son capaces de resistir las tracciones que se producen al compactar por apisonamiento la mezcla suelo-aglutinante que se encuentra en el interior del saco, durante el proceso constructivo del sistema, estos sacos se apilan ordenadamente para conformar hiladas y generar espacios cerrados como domos, sistemas rectangulares o sistemas abovedados, finalmente el uso de los sacos de polipropileno termina al fraguar la mezcla suelo-aglutinante y este puede ser retirado parcialmente con alguna técnica de quemado. (Canadell, 2014)

Las construcciones de superadobe convencional pueden ser con sacos continuos “en forma tubular o discontinuos en forma de bloque, entre las hiladas se coloca alambre de púas que provee adherencia entre los sacos de una hilada a otra” (Canadell, 2014, pág. 21), la falla por corte y el desplazamiento entre hiladas es evidente en este sistema, por esta razón como aporte en este trabajo técnico se va a reemplazar el alambre de púas por un refuerzo vertical, tipo estacas de caña *guadúa angustifolia kunth*, que desde ahora será denominada en este trabajo como caña *guadúa (GaK)*. Se elige a la caña *guadúa (GaK)* como refuerzo vertical, porque es un material renovable y no contaminante como el acero y de menor costo que la madera (Ambientum, 2018).



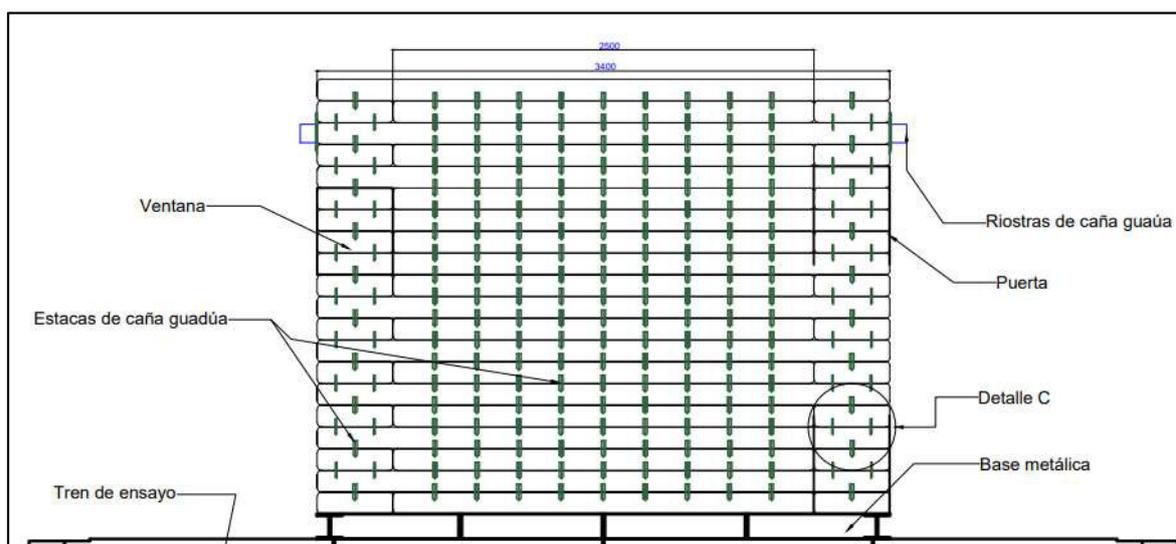
**Figura 1.1.** Construcción en superadobe con saco discontinuo (izquierda) y saco continuo (derecha)

*Fuente:* (Canadell, 2014, pág. 27)



**Figura 1.2.** Colocación de alambre de púas entre hiladas

*Fuente:* (Canadell, 2014, pág. 13)



**Figura 1.3.** Caña guadua entre hiladas

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

La cal hidratada presenta un desempeño favorable para la construcción ya que estabiliza cualquier tipo de suelo y es totalmente sustentable por su procedencia (Tovar & García). En este trabajo se prefirió la cal hidratada ante el cemento ya que se prefiere materiales que involucren menos procesos para su obtención y con ello reducir la contaminación que involucra el proceso productivo, al fin de tener materiales más amigables con el medio ambiente (Caballero, 2015), por ejemplo, en la etapa de elaboración de los materiales, el transporte de maquinaria, movimiento y desalojo para producir cemento o extraer los materiales pétreos y

otros para las construcciones del hormigón, representan más del 90% de las emisiones de carbono del total de esta actividad (García-Ochoa, Quito-Rodríguez, & Perdomo, 2019) . Por otra parte, la caña guadúa (*GaK*) es una ventaja para la construcción alternativa o bioconstrucción, ya que además de características tanto físicas como mecánicas favorables, es un recurso renovable, de fácil manejo y rápido crecimiento (Nolivos & Yaselga, 2010).

“Ecuador es una zona altamente sísmica, históricamente ha sido afectado por numerosos terremotos destructivos tales como: Esmeraldas (1906), Ambato (1949), Bahía de Caráquez (1998), Pedernales (2016)” (Moncayo, Vargas, & Barzola, 2017, pág. 16). Los terremotos son catástrofes naturales que no se pueden evitar, y actualmente tampoco predecir, por lo tanto, las edificaciones se diseñan para resistir los movimientos que se producirán durante su vida útil, los sistemas de pórticos junto a la construcción informal son una mala combinación para una región con alta peligrosidad sísmica (Lara, Aguirre, & Gallegos, 2018), es necesario implementar métodos constructivos acordes a la realidad, menos contaminantes, económicos y más seguros ante el peligro sísmico, para comprobar que los sistemas resistan ante el peligro sísmico se debe someter a la estructura a cargas horizontales y comprobar que cumple ante dichas sollicitaciones (Ortiz, 2013).

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Debido a la alta amenaza sísmica existente en el Ecuador, se necesita estudiar el comportamiento de sistemas estructurales que disminuyan el riesgo y brinden seguridad, existen algunas alternativas entre las cuales, las más aplicables son el ensayo de prototipos a escala natural sometidos a cargas cíclicas y el análisis a través de modelos numéricos en programas computacionales con la aplicación de simuladores. Como ventaja en el diseño computacional los materiales y el diseño, se puede modificar de forma económica a diferencia de un modelo a escala real, el cual, requiere de una mayor inversión para elaborar un nuevo prototipo en cada esquema de cargas.

En el ensayo físico a carga lateral, se deberá disponer del análisis e interpretación de resultados, para evidenciar que el sistema resiste total o parcialmente ante la aceleración proporcionada. (Centro de Investigación de la Vivienda CIV, 2016), por

otro lado, en la simulación computacional se debe recopilar toda la información necesaria para delimitar las variables y obtener un modelo lo más parecido a la realidad del sistema.

Al final se puede correlacionar los resultados que arroje el ensayo real con los resultados de la simulación computacional y a su vez con la NEC-15 en el capítulo de peligro sísmico.

Por lo tanto, en el presente trabajo se plantea analizar mediante la implementación del software SAP2000 - V22, un sistema constructivo modular de superadobe elaborado con el sistema dado por Nader Khalili con las variantes que se anotan: su forma en planta será rectangular (cuatro muros) cuyos sacos serán rellenos de suelo-cal, y con el refuerzo vertical de caña *guadúa* (*GaK*) entre hiladas para luego determinar el comportamiento al aplicar un porcentaje en peso del sistema mediante lo que determina la NEC – SE – DS – 2015, y finalmente compararlo con los requisitos mínimos de diseño sismo resistente de dicha norma.

Como se mencionó anteriormente, la falta de vivienda propia y segura radica en varios factores, por lo que, un cambio en el enfoque de construcción de interés social con variantes de materiales propios de la región y que sean de fácil acceso y pronta recuperación ecológica es necesario. Los sistemas constructivos deben ser además confortables, y en este marco el superadobe desempeña el rol perfecto, se debe incluir que la capacitación para la construcción de las mismas recaerá en manuales simples y de libre acceso; además se puede realizar en fases o etapas sin ningún problema, y en adición a esto, se puede llevar a cabo la construcción del sistema en mingas, o a través de microempresas locales de constructores que a su vez puedan impartir el conocimiento a más comunidades y se genere empleo local para la población (Argüello & Ramón, 2004) .

La vivienda propuesta en el modelo computacional está enfocada a la bioconstrucción; diseñada con superadobe y usando materiales de fácil obtención en el Ecuador, especialmente en zonas rurales, con la meta de disminuir la problemática de déficit de vivienda y reducir la contaminación en la construcción; una vez que se compruebe que la estructura propuesta cumple con los requisitos mínimos de diseño como los requeridos en la NEC – SE – DS - 2015.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Modelar computacionalmente el sistema de una vivienda de superadobe con el supuesto de construcción con sacos llenos de suelo-cal y refuerzo vertical de estacas de caña *guadúa* (*GaK*), frente a cargas laterales, mediante el programa SAP2000, para verificar el cumplimiento de los requisitos mínimos de diseño sismo resistente de la NEC – SE – DS - 2015.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar el suelo mediante ensayos de laboratorio y determinar la dosificación de la mezcla suelo-cal para obtener un mejor desempeño en las propiedades mecánicas del suelo y obtener valores requeridos para el modelo computacional.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de la caña *guadúa* (*GaK*) a través de ensayos de laboratorio, analizar los resultados y llevarlos como datos iniciales del programa SAP2000.
- Realizar el modelo computacional del sistema de una vivienda de superadobe, mediante el software SAP2000 en el rango lineal, para verificar que cumpla con los requisitos mínimos de diseño sismo resistente de la NEC– SE – DS - 2015.
- Cuantificar la fuerza de corte basal máximo que podrá soportar el sistema de vivienda de superadobe en base a la Norma Ecuatoriana de la Construcción, en el apartado de peligro sísmico, junto con los sismos ocurridos en el año del 2016 en Ecuador, así determinar el período de la estructura, y con ello aceptar, rechazar o dar alternativas al sistema de superadobe para la construcción en el Ecuador.

#### 1.4. ALCANCE

El presente trabajo de investigación busca introducir como bioconstrucción la técnica del superadobe desarrollada por Nader Khalili, con ciertas adecuaciones a las condiciones de Ecuador, como el uso de una mezcla suelo-cal, cuya porción de suelo es del sector norte del cantón Quito (Parroquia Calderón) y se reemplaza al alambre de púas con estacas de caña guadúa (*GaK*), de la ciudad de Esmeraldas; para lo cual se asume el comportamiento del sistema aplicado a una vivienda de un piso con un área de 11.22 m<sup>2</sup>, ya que de darse seguimiento a esta tesis, se pueda hacer dicha construcción en escala real, y así el sistema de superadobe descrito, pueda ser ensayado en el laboratorio del Centro de Investigación de la Vivienda (CIV) de la Escuela Politécnica Nacional, a carga lateral sobre una de las plataformas que el centro posee.

El modelamiento computacional del sistema, se lleva a cabo en el programa SAP2000-V22, el cual es la versión más actual al momento de realizar este trabajo técnico, en adición, dicho programa es una herramienta computacional, que permite el ingreso de las propiedades físicas y mecánicas de los elementos (materiales) y realizar un ajuste de las mismas de ser necesario, todo esto se llevará a cabo dentro del rango estático lineal, bajo condiciones asumidas, que se irán explicando de acuerdo a la necesidad del desarrollo del programa y en medida de las limitantes tanto experimentales como cognitivas en la adquisición de las múltiples características de dichos materiales.

Los ensayos iniciales se enfocan en la caracterización y estudio del suelo extraído de la parroquia de Calderón; los ensayos siguientes buscan obtener una mezcla idónea de suelo-cal, mediante ensayos de compresión Triaxial UU en el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas de la Escuela Politécnica Nacional (LEMSUR). En general, en la técnica del superadobe se usa alambre de púas entre las hiladas, pero en este trabajo técnico se usa estacas de caña guadúa (*GaK*), procedentes de Esmeraldas, por lo tanto, la caña *guadúa* (*GaK*), es el tercer material o elemento que se ensaya, para determinar sus propiedades físicas y mecánicas a través de la norma (NTC5525, 2007) y los valores obtenidos serán comparados con los valores de la norma (NEC-SE-GUADÚA, 2016).

Una vez obtenido los valores de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales a trabajar, se realiza el prototipo digital para la modelación a carga lateral, así determinar si la estructura resiste total o parcialmente ante un porcentaje de la aceleración de la gravedad, denominado corte basal, el cual está en función del peso de la estructura, dicho modelo digital, debe ser elaborado bajo todos los criterios de los planos de detalle, además que el modelo digital es simulado y limitado de acuerdo con la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC-15).

El sistema es validado si al determinar los esfuerzos y derivas producidos por la carga lateral, están en el rango admitido por la norma Ecuatoriana de la Construcción, en el capítulo Peligro Sísmico y se verifica que el comportamiento estructural cumple los requisitos mínimos de diseño de esta misma normativa.

## **1.5. JUSTIFICACIÓN**

La investigación se realiza con el propósito de aportar conocimientos sobre el comportamiento del sistema constructivo de superadobe frente a cargas laterales. Los resultados de esta investigación podrán validar al sistema constructivo propuesto e incorporarán al superadobe como un sistema de bioconstrucción alternativo, ya que se estaría demostrando que el comportamiento de viviendas construidas con el sistema de superadobe y con refuerzo vertical de caña guadúa (*GaK*), cumplen los requisitos mínimos de diseño de la NEC – SE – DS.

En el presente estudio se determina el comportamiento global de la estructura y las derivas frente a fuerzas cercanas a su cortante basal para revisar que dichas derivas sean menores que los límites de derivas que establece la Norma Ecuatoriana de la Construcción en el apartado correspondiente al peligro sísmico, diseño sismo resistente, así como la resistencia global de la estructura y su estabilidad, además de algunos otros parámetros.

El sistema de vivienda de superadobe propuesto, es construido tomando como referencia la técnica dada por Nader Khalili que usa sacos de polipropileno rellenos con suelo-cal y refuerzo de alambre de púas para combatir el cizallamiento, el cual es reemplazado por estacas de caña guadúa (*GaK*) como refuerzo vertical, y bajo

requerimientos de la Norma de Perú para la construcción con tierra NORMA E.080 Diseño y Construcción Con Tierra Reforzada (Ministerio de vivienda, 2017).

Ecuador, al ser un país que tiene el compromiso de reducir todo tipo de contaminación y luchar contra el cambio climático al igual que otros 175 países participantes en el Acuerdo de París sobre el cambio climático (Ministerio del Ambiente y Agua, 2016), y con la necesidad de implementar nuevos sistemas constructivos que generen baja contaminación ambiental, bajo costo, de buen comportamiento sismo resistente, que brinden comodidad y confiabilidad a los usuarios, por ende, en la presente investigación se modela el sistema constructivo frente a carga lateral elaborada con tierra común del sector norte de Quito, estabilizada con cal hidratada para rellenar los sacos de polipropileno y refuerzo vertical de caña guadúa (*GaK*) traída de Esmeraldas, los resultados obtenidos en laboratorio de materiales LEMSUR, servirán como datos iniciales para el modelamiento computacional.

Surge la necesidad del estudio de un sistema de superadobe con paredes verticales y una cubierta (diafragma) que se constituye por una malla de caña guadúa (*GaK*) que junta a los elementos muro, para así establecer relaciones entre los desplazamientos, resistencias, funcionalidad ante cargas laterales.

Finalmente se determinan parámetros bajo los cuales la construcción en superadobe puede ser segura para zonas de peligro sísmico como es el Ecuador, y en el futuro realizar otras investigaciones y así ubicar al superadobe como una solución de bioconstrucción.

## **1.6. METODOLOGÍA**

Se han revisado documentos científicos especializados en la técnica de construcción de superadobe, carga lateral cíclica, documentos sobre los distintos refuerzos aplicados a la construcción con tierra y estudios sobre la estabilización de suelos, así también, se realizó la revisión de bibliografía sobre el uso del programa SAP2000 y el uso de elementos finitos.

Se determinaron las dimensiones del sistema, para lo cual se consideró un módulo de construcción de cuatro muros de superadobe que se consideran paredes para

el sistema, con un área de 11.22 m<sup>2</sup>, esta área puede ser usada con diferentes propósitos, ya sea para el uso como dormitorio, comedor o cocina.

Se caracterizó el suelo mediante una clasificación SUCS y se determinó diferentes propiedades para luego estimar la mejora de dicho suelo al añadir cal hidratada, se cuantificó y caracterizó la mezcla suelo-cal, para lo cual se añadió cal en diferentes porciones (4, 8 y 12% de peso del suelo), y a través del ensayo de compresión triaxial "UU" se definen coeficientes como el ángulo de fricción y la cohesión de la mezcla, y por último se comprobaron las propiedades de la caña *guadúa* (*GaK*) en base a lo descrito en la (NTC5525, 2007) "Manual de laboratorio sobre métodos de ensayo para la determinación de propiedades físicas y mecánicas del bambú (contenido de humedad, densidad seca al aire, densidad básica y densidad seca o anhidra y de las propiedades mecánicas de resistencia).

Se realizó la modelación computacional del sistema de construcción, se tomó un módulo de superadobe, de sacos de polipropileno rellenos con la mezcla suelo-cal, en forma de hiladas; entre hiladas se coloca estacas de caña *guadúa* (*GaK*). El estudio del sistema de la vivienda de superadobe a carga lateral, consistió en la modelación computacional bajo las características y parámetros de los materiales.

Se analizan los resultados obtenidos del modelo a carga lateral aplicado al sistema modular de cuatro muros (paredes), para comparar o interpretar dichos valores y validar el uso de la técnica de superadobe propuesta, además, se realizó una evaluación cuantitativa de los elementos (muros, uniones y diafragma) que la conforman. Se observó que los esfuerzos en los elementos no sobrepasen los valores de diseño y las afectaciones de los elementos y de sus conexiones.

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DEL ARTE

#### 2.1. EJE DE INVESTIGACIÓN

Para esta investigación se considera tres ejes principales de estudio, los cuales son:

- El análisis de materiales, que a su vez se subdivide en: la mezcla suelo-cal y la caña guadúa (GaK).
- El método constructivo del superadobe y
- El modelo computacional del sistema constructivo.

Para cada uno de ellos se presenta los documentos de mayor importancia para la elaboración de esta investigación, en orden cronológico y resaltando su importancia tanto internacional como académica.

#### 2.2. DOCUMENTOS REVISADOS Y HALLAZGOS

**Tabla 2.1. Revisión de materiales: Mezcla suelo-cal y caña guadúa (GaK)**

Descripción del documento	Meta principal	Variante / Palabra clave	Metodología de investigación	Conclusiones principales
<p>“Estudio de las propiedades físicas de la caña guadúa y su aplicación como refuerzo en la construcción de estructuras de adobe.”</p> <p>(Bonilla &amp; Merino, 2017)</p> <p>Quito, Pichincha, Ecuador.</p>	<p>“Realizar un estudio analítico y experimental acerca de la caña guadúa, para su aplicación como refuerzo en la construcción con adobe”.</p>	<p>Adobe</p> <p>Caña guadúa</p> <p>Refuerzo</p> <p>Propiedades</p> <p>Muros</p>	<p>Recopilación bibliográfica.</p> <p>Diseño, construcción e instrumentación de muros de adobe reforzado y no reforzado.</p> <p>Diseño del modelo matemático de un muro de adobe.</p>	<p>El refuerzo de caña guadúa es efectivamente una alternativa para mejorar las propiedades de los muros de adobe.</p>
<p>“Estudio del comportamiento sismo-resistente en una estructura espacial de caña guadúa sometida a carga lateral con</p>	<p>Realizar un estudio experimental, mediante un ensayo de carga lateral con inversión (cíclica cuasi-estática) aplicada a un</p>	<p>Guadúa</p> <p>Angustifolia</p> <p>Kunth</p> <p>Comportamiento</p> <p>Sismo-resistente</p>	<p>Uso de método de investigación descriptiva con un diseño experimental.</p>	<p>“Las propiedades mecánicas de la caña guadúa varía según la orientación del ensayo”, además que presenta</p>

<p>inversión, utilizando una modificación de la conexión Simón Vélez.” (Herrera &amp; Viteri, 2018)</p> <p>Quito, Pichincha, Ecuador.</p>	<p>modelo físico práctico, para definir el comportamiento sismo-resistente de la estructura en función de la conexión propuesta.</p>	<p>Curva de Histéresis</p> <p>Curva de Capacidad.</p> <p>Resistencia</p> <p>Propiedades</p>	<p>Se investiga, recopila y analiza información de investigaciones relacionadas con las propiedades físicas y mecánicas de la caña guadúa.</p> <p>Realizan ensayos a la caña guadúa.</p> <p>Se colocarán sensores de desplazamiento en la estructura espacial que permitirán registrar datos de desplazamiento</p>	<p>excelentes propiedades, es un material renovable, y su uso no requiere un proceso industrial sofisticado.</p>
---	--	---	--	--

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 2.2. Método constructivo del superadobe**

<b>Descripción del documento</b>	<b>Meta principal</b>	<b>Variante / Palabra clave</b>	<b>Metodología de investigación</b>	<b>Conclusiones principales</b>
<p>“Structural Resistance of Earthbag Housing Subject to Horizontal Loading.” (Croft, 2011)</p> <p>California, Estados Unidos.</p>	<p>Ensayar a carga lateral varios muros de superadobe para determinar un comportamiento optimo a través de ensayos y modelación.</p>	<p>Sueradobe</p> <p>Carga Lateral</p> <p>Resistencia</p> <p>Mejor comportamiento</p>	<p>Recopilación bibliográfica.</p> <p>Diseño, construcción e instrumentación de muros de superadobe</p> <p>Diseño del modelo matemático de un muro de adobe.</p>	<p>El refuerzo longitudinal de alambre de púas presenta un mejoramiento en el comportamiento del muro ante cargas laterales, pero verticalmente los ensayos no fueron suficientes para determinar el comportamiento de las bolsas de superadobe.</p>
<p>“Estudio Estructural de domos realizados con la técnica de falsa cúpula y superadobe.” (Canadell, 2014)</p> <p>Barcelona, España.</p>	<p>“Determinar las bases de cálculo para realizar las comprobaciones estructurales con fundamento teórico y no solamente confiar en datos empíricos, y desarrollar una</p>	<p>Estudio estructural</p> <p>Falsa cúpula</p> <p>Superadobe</p> <p>Capacidad resistente</p> <p>Colapso</p>	<p>Recopilación bibliográfica.</p> <p>Proponer un método de cálculo para las características de las estructuras de superadobe.</p>	<p>Se desarrollo una base de cálculo para comprobaciones estructurales usando teoría como base, los cuales son comprobados, evaluando el colapso y la capacidad resistente</p>

	herramienta de cálculo que sea simple y asequible para que un usuario pueda verificar las comprobaciones de seguridad estructural”		Definir l mecanismos de estabilidad y resistencia para comprobar la estructura.  Evaluar resultados pra garantizar la seguridad estructural.	
Domos de Superadobe. (Caballero, 2015) España.	Potenciar la construcción de superadobe, con un enfoque tradicional y con la debida conciencia ambiental, así dar diferentes posibilidades de construcción	Técnica de superadobe  Cálculo estructural  Programa descriptivo	Recopilación bibliográfica.  Determinar una metodología constructiva para el superadobe	La construcción con superadobe lleva eficazmente a una conciencia ambiental y además se puede ir incorporando de a poco para reemplazar construcciones tradicionales y dar variedad constructiva

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 2.3. Modelo computacional del sistema constructivo.**

Descripción del documento	Meta principal	Variante / Palabra clave	Metodología de investigación	Conclusiones principales
“Estudio del comportamiento sísmico y alternativas de rehabilitación de edificaciones en adobe y tapia pisada con base en modelos de escala reducida ensayados en mesa vibratoria.” (Rodríguez & Fonseca, 2003) Bogotá, Colombia	“El objetivo general de la presente investigación es comprender el comportamiento sísmico de estructuras de adobe y tapia pisada y encontrar la alternativa o alternativas de reforzamiento optimas, con base en el comportamiento de modelos a escala reducida ante cargas dinámicas o sísmicas impuestas mediante la mesa vibratoria.”	Comportamiento sísmico  Adobe y tapia pisada  Alternativas de reforzamiento	Recopilación bibliográfica.  Ensayo de materiales.  Modelación experimental de modelos físicos.  Modelación analítica de modelos físicos.	El período de las estructuras se ve reducido para aquellas estructuras que poseen un refuerzo.  Los modelos analíticos sirven incluso para indicar el comportamiento elástico de las estructuras y la solicitaciones sísmicas a las cuales el estructuras responden.
“Investigación de un sistema estructural	Análisis de de muros de adobe reforzados con enchape armado	Sistema estructural	Recopilación bibliográfica.	El reforzamiento adecuado de adobe efectivamente

<p>alternativo basado en el reforzamiento de paredes de adobe.”</p> <p>(Bonilla &amp; Ramos, 2013)</p> <p>Quito, Pichincha, Ecuador.</p>	<p>con malla elestro soldada, sometida a carga a horizotal, por su componente en peso propio del sistema, resistiendo paulatinamente uno de sus lados.</p>	<p>Reforzamiento</p> <p>Adobe</p>	<p>Dimensionamiento de paredes para conforma el prototipo.</p> <p>Modelación teórica de acerdo los parámetros</p> <p>Diseño y construcción del experimento</p>	<p>brinda una resistencia muy recomendable al sistema.</p>
--	--	-----------------------------------	--	--

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

## **CAPÍTULO 3**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **3.1. LA TÉCNICA DE BIOCONSTRUCCIÓN “SUPERADOBE”**

##### **3.1.1. HISTORIA DEL SUPERADOBE**

Nader Khalili fue un arquitecto iraní, que realizó sus estudios en Irán, Turquía y los Estados Unidos, desarrolló el sistema constructivo conocido como Superadobe en 1984, por una solicitud de la NASA ya que se requería el diseño de viviendas para los asentamientos humanos en la Luna y Marte; en esta etapa inicial el proyecto era solo teórico, luego Nader Khalili se asoció con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados (ACNUR) y aplicó su investigación a los refugios de emergencia. Posteriormente fundo Cal-Earth donde se realizan estudios y se forman instructores para extender la técnica del superadobe (Canadell, 2014, pág. 20).

El método constructivo se acopla muy bien a las necesidades de la construcción de Ecuador debido a que las construcciones con suelo ha sido uno de los métodos tradicionales de la región. En adición, el superadobe suple las necesidades de vivienda básica de los ecuatorianos, ya que el suelo de la misma excavación para la cimentación sirve para el relleno de los sacos, las paredes soportan su peso propio y cumplen con: entorno, ventilación, soleamiento, confort, confort térmico, función, espacio, forma, estética y paisajismo (Cruz & Sotomayor, 2016).

##### **3.1.2. MÉTODO CONSTRUCTIVO DADO POR NADER KHALILI.**

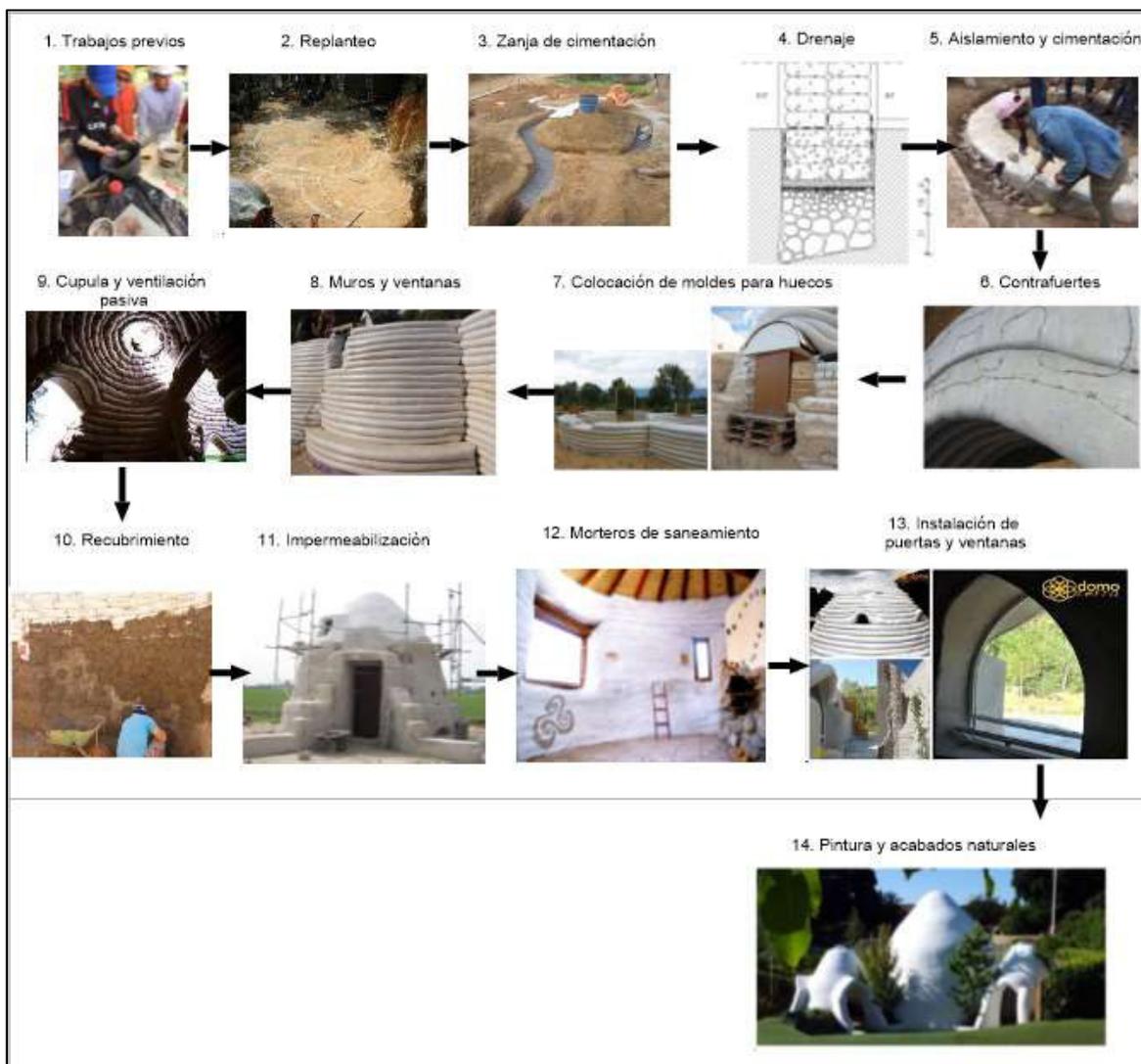
El método constructivo fue establecido por el Instituto CalEarth de California en Estados Unidos, que es un instituto de arquitectura fundado por Nader Khalili, donde se imparten conocimientos a cientos de personas y asociaciones interesadas en el aprendizaje y desarrollo del sistema de superadobe, entre ellos Domoterra, que “es un equipo de profesionales dedicado a la bioconstrucción bajo la técnica de Saco Continuo de Tierra Estabilizada de España” (DomoTerra, 2016, pág. 1). DomoTerra ha tenido incursión en países de Latinoamérica entre ellos Ecuador, impartiendo sus conocimientos sobre el superadobe o más conocido como “*Earth-*

*Bag Building*”, así la enseñanza y difusión de esta técnica a empezado a tomar escenario en diferentes partes del mundo, en varios idiomas y lo más importante, la adición de nuevas investigaciones que cuantifican y cualifican al superadobe como una técnica de bioconstrucción sustentable.

El proceso de construcción del superadobe está enfocado de una forma sistemática, ordenada y en función básica de la construcción convencional; los pasos a seguir se presentan en el diagrama de la figura 3.1. y se describen a continuación:

1. Trabajos previos: Caracterizar el suelo y determinar los porcentajes de suelo y cal de manera empírica o experimental para elaborar la mezcla con la que se rellenan los sacos.
2. Replanteo: trazar en el suelo el diseño del proyecto a ejecutarse.
3. Zanjas de Cimentación: remover suelo entre unos 30 a 60 cm de profundidad.
4. Drenaje: colocar drenajes de ser necesarios, con una cama de rocas estratificadas y áridos de diferentes diámetros.
5. Aislamiento y cimentación: ubicar geo-membranas para aislar a las tres primeras hiladas del suelo que serán la cimentación; y así evitar que la humedad llegue a las hiladas superiores que forman los muros de superadobe. Entre hiladas colocar alambre de púas en forma de S.
6. Contrafuertes: el uso de contrafuertes es necesario para el sistema de domos, para contrarrestar las fuerzas sísmicas.
7. Colocación de moldes para huecos: tener moldes tanto para orificios de instalaciones y puertas es muy recomendable.
8. Muros y ventanas: levantar las hiladas una sobre otra con el respectivo apisonamiento teniendo en cuenta los espacios para puertas, ventanas y juntas con otros domos o módulos.
9. Cúpula y ventilación pasiva: la cúpula debe ir cerrando al domo y el uso de ventilación en lugares cálidos se debe prever.
10. Recubrimiento: se puede retirar o dejar los sacos en el sistema antes de revocarlos y enlucirlos.

11. Impermeabilización: usar un mortero para cubrir por completo el sistema y así evitar cual fisura o grieta que lo perjudique.
12. Morteros de saneamientos: cubrir el interior del piso, para evitar que la humedad se transfiera al interior.
13. Instalación de puertas y ventanas: colocar puertas y ventanas en los sitios.
14. Pinturas y acabados naturales: usar pigmentos naturales da un realce embellecedor al sistema y ayuda a disminuir la contaminación (DomoTerra, 2016).



**Figura 3.1.** Flujograma del proceso constructivo de una vivienda de superadobe, bajo la técnica de DomoTerra

*Fuente:* (DomoTerra, 2016)

### 3.1.3. CONSTRUCCIONES DE TIERRA EN LA REGIÓN

La construcción en tierra posee variedades de sistemas, entre estos los más usados en el Ecuador es el adobe y el tapial, ya que fueron utilizados para la construcción de iglesias y viviendas que siguen en pie en la actualidad, algunas de estas con ayuda de nuevas tecnologías de reforzamiento estructural, varias de estas están inscritas como patrimonio de la humanidad en la UNESCO. Se debe recalcar que hoy en día, el porcentaje de la población que está viviendo en casas de tierra de manera precaria es la tercera parte del total y en los países subdesarrollados este porcentaje superan más de la mitad del total (Cruz & Sotomayor, 2016).



**Figura 3.2.** Construcción con adobe, Nono-Pichincha-Ecuador.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

### 3.1.4. SUPERADOBE EN EL ECUADOR

El sistema de superadobe, puede ser usado tanto en zonas cálidas y áridas, así como en zonas de temperaturas bajas como los páramos andinos, esto dependerá de la arquitectura y acabados que se den al sistema constructivo (DomoTerra, 2016), el superadobe presenta grandes beneficios arquitectónicos, como beneficios acústicos y térmicos (Caballero, 2015), también muchos arquitectos y personas interesadas en disminuir la cantidad de contaminación han optado por el superadobe como el sistema de bioconstrucción mejor adaptado a sus necesidades y a la región.

El sistema fue implementado por el Instituto Metropolitano de Diseño “Mauricio González González” ubicado en la ciudad de Quito, en el sector la Vicentina, en el año 2014, el uso de la construcción es para un laboratorio de producción musical y mercadotecnia, se permitió una visita técnica a dicho lugar y se pudo constatar varios de los beneficios del sistema tanto en el aspecto térmico como en el acústico,

tras un recorrido por parte del arquitecto Marcos Plain, encargado del lugar, supo indicar, que la idea fue llevada a cabo hace ya algunos años y su objetivo es que la población visite el lugar y opte por construcciones similares.



**Figura 3.3.** Construcción de superadobe en la ciudad de Quito.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

## **3.2. MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DEL SISTEMA DE SUPERADOBE**

### **3.2.1. MATERIALES USADOS EN EL SUPERADOBE.**

El superadobe tiene como esencia tres materiales que son: tierra, saco y cualquier otro que ayude a la adherencia entre hiladas. La tierra al ser el material ecológico más abundante que pueda existir es usada mucho en el campo de la bioconstrucción; y como plus en el superadobe la tierra se estabilizada con cal o cemento y contenida por sacos de polipropileno para resistir a la compresión; pero necesita de otro material que le ayude a resistir tracciones, como el alambre de púas colocado entre hiladas, madera en el sentido de las hiladas o usar la propuesta

de este trabajo que es la caña guadua de manera vertical ya sea como estaca atravesando las hiladas parcial o totalmente. (Canadell, 2014)

### 3.2.2. SACOS DE POLIPROPILENO

La técnica del superadobe convencional consiste en usar sacos llenos de suelo-cal o suelo-cemento, dichos sacos son de polipropileno, el cual es un biopolímero extraído de biomasa, o proteínas de fuente animal como la gelatina y de origen vegetal. Los sacos de polipropileno son biodegradables, esto ayuda a que después de dos meses de la construcción estos se degraden, o sean desgarrados para un mejor secado de los muros y se facilite la adherencia entre el mortero usado como recubrimiento y los muros de superadobe.



**Figura 3.4.** Saco de polipropileno en rollo, para construcción de superadobe.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

El saco continuo da facilidad de construcción y el diámetro varía según la necesidad, pero se recomienda que el diámetro mínimo sea de 30 cm y el máximo de 60 cm debido a que muros muy delgados no son recomendables y al ser muy grandes es muy pesado para trabajar (Cataldo, 2014).

El empleo de sacos en forma de tubo continuo permite dar solidez a los muros, por lo que aportan monolitismo horizontal. Cuando los sacos son colocados en hiladas en forma de anillo la estructura toma forma de cúpula o domo y responden muy bien a acciones horizontales típicas de sismos. Frente acciones verticales, el gran espesor del saco ya que obtiene mayor área transversal por ser apisonado y el hecho de que todos los muros

exteriores son portantes, permite reducir las tensiones verticales considerablemente (Canadell, 2014, pág. 13)

Los sacos de polipropileno al final de la construcción serán retirados, tirando de ellos o quemándolos, los muros de adobe finalmente se recubren ya sea por acabados de aglutinante natural o una mezcla similar a la de construcción, no se recomienda usar cemento directamente ya que el muro necesita respirar (DomoTerra, 2016).

### 3.2.3. REFUERZO VERTICAL

La técnica del superadobe convencional presenta de manera común el uso de alambre de púas para conectar una hila con otra, en este trabajo se reemplaza el alambre de púas por el refuerzo de caña guadúa (*GaK*), a continuación, se describen los dos refuerzos:

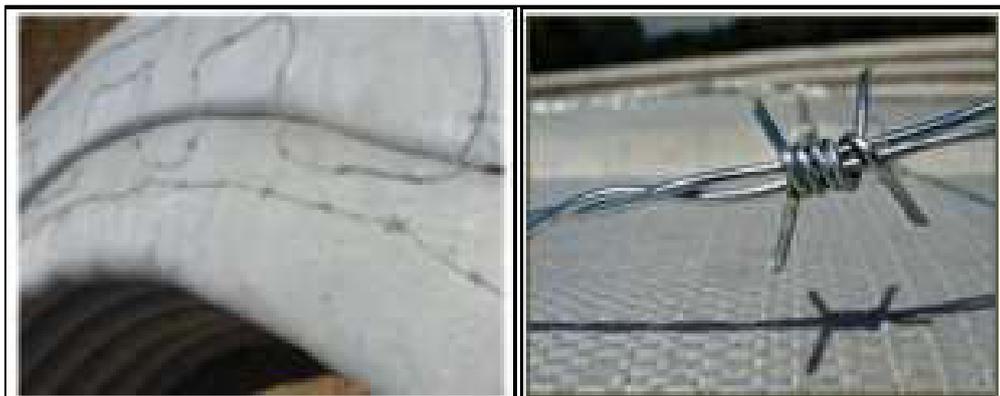
#### 3.2.3.1. Alambre de púas.



**Figura 3.5.** Alambre de púas para construcción de superadobe.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

El alambre de púas se usa básicamente para la adherencia entre hiladas de sacos de polipropileno, existe un método que indica el Instituto de (CalEarth, 1999), el cual debe ser en forma de “S” y con púas hacia arriba y hacia abajo para garantizar que éstas penetren en el saco (DomoTerra, 2016)



**Figura 3.6.** Alambre de púas colocado en forma de S

*Fuente:* (Caballero, 2015)

### 3.2.3.2. Caña guadúa angustifolia (*GaK*).



**Figura 3.7.** Caña guadúa (*GaK*), para ensayos.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

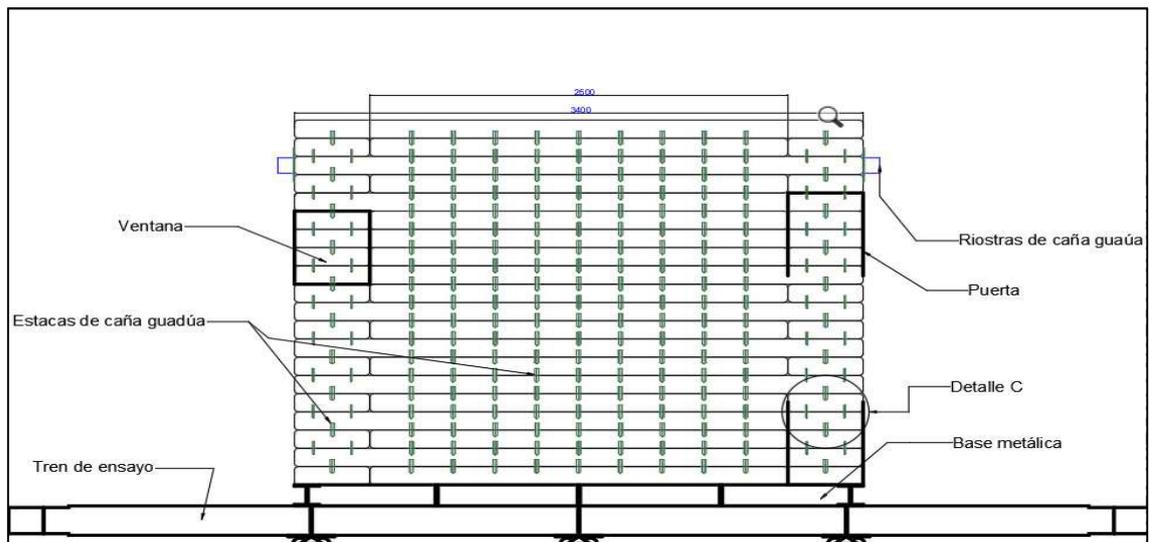
La caña guadúa (*GaK*), es un tipo de raíz vertical, erecta en la base. Según Bonilla & Merino (2017) la altura varía entre 6 y 20 m, el diámetro entre 8 y 20 cm; las condiciones ideales para el cultivo son: temperatura entre 18 y 28°C, altitud entre los 400 y 1200 msnm, precipitaciones superiores a 1200 mm y una humedad relativa de al menos 80%; nacen en suelos arenosos-limosos, arcillosos, profundos y solo requiere 120 días para alcanzar su desarrollo y se aprovecha entre 4 a 5 años de plantada.

Para examinar las ventajas que aporta la caña guadua al superadobe se realizan tres modelos computacionales; en el primer modelo del sistema en estudio, se establece el uso de estacas de caña guadúa (*GaK*) de aproximadamente 13 cm,

estas estacas sirven de enlace entre hiladas, y se incorporan cada 50 cm a lo largo de los muros.

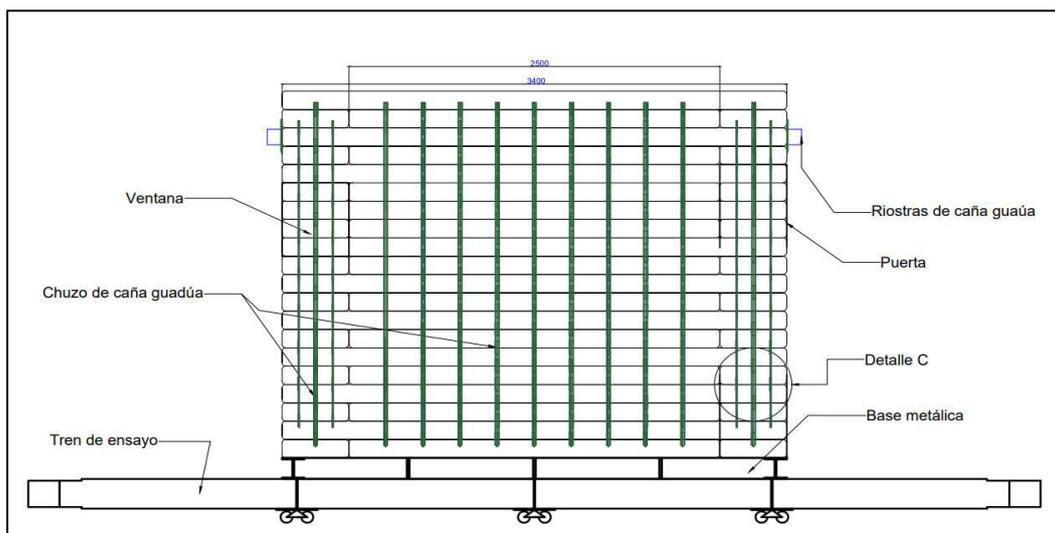
Un segundo modelo, posee la misma geometría al primero, pero con el uso de “pinchos” de caña guadúa (*GaK*), que atraviesan por completo en forma vertical a los muros de superadobe, como refuerzo vertical, espaciados cada 50 cm.

El tercer modelo también posee la misma geometría, pero no se utiliza ningún elemento como refuerzo.



**Figura 3.8.** Modelo 1, pared de superadobe con caña guadúa tipo estaca.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera



**Figura 3.9.** Modelo 2, pared de superadobe con caña guadúa tipo pinchos.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

### 3.2.4. MATERIAL DE RELLENO

El material de relleno en la construcción de superadobe debe ser un suelo no orgánico, que se obtiene al excavar las zanjas para la cimentación (suelo de emplazamiento), también puede ser suelo de otro lugar; el mejoramiento del suelo depende de su clasificación y puede ser estabilizado con cal, cemento u otro tipo. Se detalla la estabilización de suelos a base de cal, ya que es un material que genera poca contaminación en la fase de extracción y fabricación (Higuera, Gomes, & Pardo, Caracterización de un suelos, 2012).

#### 3.2.4.1. Estabilización de suelos.



**Figura 3.10.** Suelo mezclado con agua y cal para preparación de mezcla.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

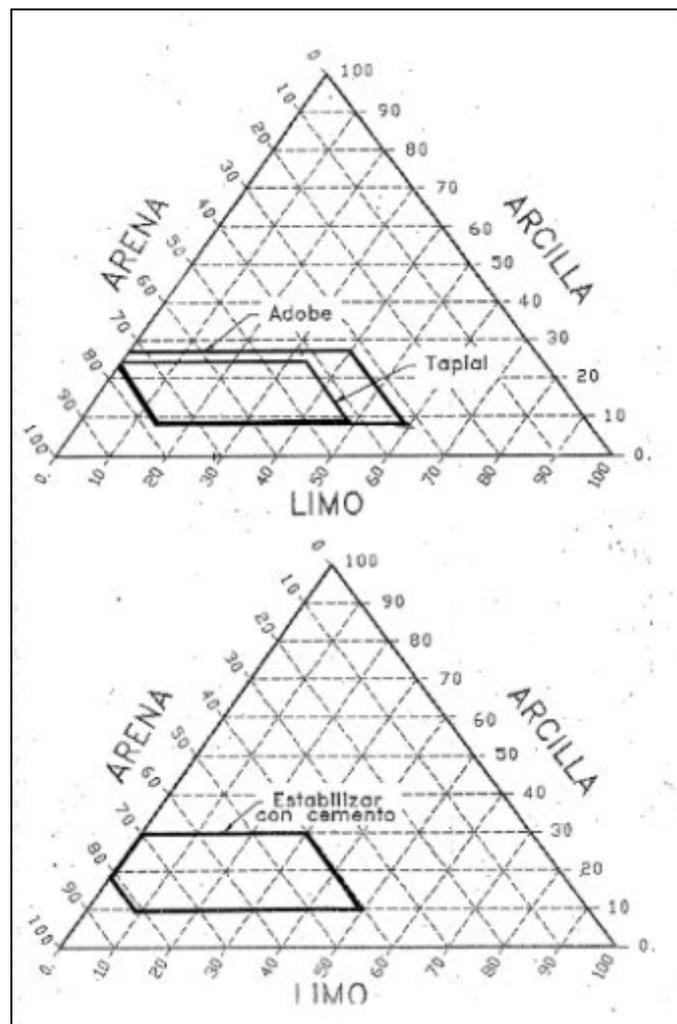
El suelo, puede entenderse como la conformación de minerales y partículas de rocas de diferente origen y tamaño que se han agrupado con el transcurso del tiempo, dichas partículas aportan diferentes propiedades o cualidades que caracteriza al suelo final (Rucks, García, Kaplán, & Hill, 2004).

A través de la estabilización del suelo se pretende que las características cambien de manera importante de acuerdo al uso que se dará como material de construcción, estas mejoras influyen a la resistencia, estabilidad a largo plazo, permeabilidad, compresibilidad, y a la permanencia misma de estas propiedades a lo largo de la vida útil del material. (Higuera, Gomes, & Pardo, Caracterización de un suelos, 2012)

La estabilización de suelos a través de aglutinantes como la cal o el cemento puede llevarse en cualquier tipo de suelo, pero se debe tener en cuenta todos los parámetros y recomendaciones para cada tipo de suelo, lo óptimo es descartar a

los suelos orgánicos y si se desea trabajar con cemento se debe cuidar la granulometría de las partículas del suelo a estabilizar (De la Fuente Lavalle, 2013)

La figura 3.11. muestra la relación entre la cantidad de arenas, limos y arcillas, y el rango en el cual se debe estabilizar con cemento.



**Figura 3.11.** Recomendación del uso de aglutinantes para mezclas, según el porcentaje de material existente.

*Fuente:* (Blanco & Morales, pág. 11)

#### 3.2.4.2. Estabilización con cal

La estabilización de suelos con cal se puede hacer con cal viva o cal hidratada, en el presente estudio se analizó el tratamiento con cal hidratada, ya que es de mayor acceso. La cal aporta rigidez y dureza al suelo, además que se puede usar casi en todo tipo de suelos, como ya se mencionó, los suelos orgánicos requieren una

separación o tratamiento muy especial, si se desea mejorar o cambiar sus propiedades (Álvarez, José, Navarro, Durán, & Sirera, 2018)

Haciendo referencia a (Higuera, Gomes, & Pardo, Caracterización de un suelos, 2012) se determina que la cal es un buen estabilizante volumétrico para las arenas, con un porcentaje entre un 4% a un 12% en peso, y que se trata de una estabilización fisicoquímica de intercambio iónico y cementación.

La cal apagada de composición  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , mejor conocida como Hidróxido de calcio, se presenta comúnmente como un polvo blanco y amorfo, soluble parcialmente en agua y que endurece lentamente, los sistemas que usan este tipo de estabilizante con el tiempo se convierten en una piedra calcaría (Higuera, Gomes, & Pardo, Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio, 2012).

#### 3.2.4.2.1. Estabilización con cal hidratada.



**Figura 3.12.** Saco de cal para preparación de mezcla.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

Para (Higuera, Gomes, & Pardo, Caracterización de un suelos, 2012), es necesario introducir el concepto de cal útil viva (CUV), que es el origen de la cal apagada, en resumen, la piedra caliza es la materia prima, si la piedra caliza es calcinada se genera la cal viva u óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), al adicionar agua a esta cal viva se genera la cal apagada, cal hidratada o hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), que presenta características como el ser capaz de reaccionar química y físicamente con el suelo al agregar agua, con ello se permite expresar todos los ensayos o dosificaciones respecto a este parámetro.

En la investigación (Higuera, Gomez, & Pardo, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2012), concluyen que, con la adicción adecuada de hidróxido de calcio a un determinado suelo, se dan los siguientes cambios en general:

Se presenta una reducción de la densidad seca máxima a medida que aumenta el porcentaje de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; se presenta un incremento sustancial en las mezclas del 2% al 6% de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , de ahí en adelante la resistencia disminuye; la mezcla suelo-hidróxido de calcio presenta una buena estabilidad hídrica, la estabilidad del suelo tratado con hidróxido de calcio aumentó significativamente en relación con el suelo sin tratar, al someterse a condiciones de saturación, incluso tiempo después del período de observación (Higuera, Gomes, & Pardo, Caracterización de un suelos, 2012, págs. 39,40)

“Se consideran suelos aptos para mezclas de suelo-cal aquellos cuyo consumo de cal en peso se encuentren entre 5% y 12% con respecto al peso del suelo” (Ciencia y Sociedad, 2008).

### **3.3. TIPOLOGÍAS DE CONSTRUCCIÓN EN SUPERADOBE**

La construcción en tierra puede tomar diseños más allá de los comunes o tradicionales, siempre y cuando se tenga en cuenta sus propiedades, ya que el uso correcto del material requiere un arduo y preciso conocimiento de este. Se puede cambiar su configuración de acuerdo a la necesidad de cada región o de cada familia si se lo requiere; la tierra como tal ha sido y será un material de construcción inagotable y el más amigable con el entorno. (CalEarth, 1999)

### 3.3.1. SISTEMA DOMO



**Figura 3.13.** Sistema domo de construcción con superadobe

Fuente: (DomoTerra, 2016)

Las paredes del domo son auto sostenibles (sistema de paredes portantes) las cuales poseen gran capacidad portante y están libres de volcamiento inclusive ante cargas laterales como las de un sismo, esto es un requerimiento mínimo para la construcción en Ecuador.

La parte inferior del domo crece hasta los 80 cm donde su geométrica es circular y más robusta, porque se construyen hiladas alado del muro llamadas contrafuerte; esto hace que la estructura sea más estable y resista los esfuerzos mayoritariamente por forma; se separa la parte inferior con una línea imaginaria llamada "*springline*", la parte superior es la cúpula que se choca o cierra en la punta más alta de la estructura ayudando a que la parte inferior este en compresión. (Canadell, 2014, pág. 28)

### 3.3.2. SISTEMA RECTANGULAR

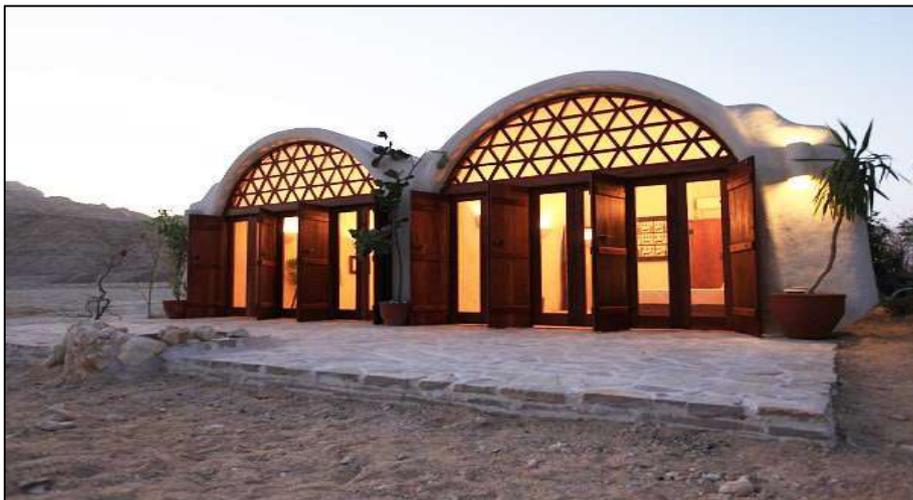


**Figura 3.14.** Sistema rectangular de superadobe, con cubierta plana.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

Existe la posibilidad de construir sistemas rectangulares, los cuales deben considerar parámetros como el volteo de muros y otras fallas que suelen presentarse en construcciones en tierra de forma ortogonal, además se debe considerar el uso de diafragmas que anclen a todos los elementos muro.

### 3.3.3. SISTEMA BÓVEDA



**Figura 3.15.** Sistema bóveda de construcción en superadobe

*Fuente:* (DomoTerra, 2016)

El sistema de bóvedas consta de un arco en la parte superior, con lo cual se recuerda el proverbio árabe “el arco nunca duerme”, el empuje de los arcos y las bóvedas es transmitido hasta el suelo (Huerta, 2004).

### **3.4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN CON TIERRA.**

#### **3.4.1. FALLAS TÍPICAS DE LA CONSTRUCCIÓN CON TIERRA**

El costo de las viviendas con tierra es sumamente bajo, además presentan facilidad en la etapa constructiva, pero resultan inseguras para zonas de alto peligro sísmico si no presentan una configuración correcta y refuerzos necesarios, caso contrario estos sistemas se ven muy afectados. (Ottazzi, Felipe, Blondet, Villa-García, & Ginocchio, sf). La vulnerabilidad sísmica estructural de las construcciones de adobe, tapia pisada y en general de la construcción con tierra se magnifica debido al tiempo de uso y el deterioro de propiedades mecánicas, en general su capacidad de soporte ante un evento sísmico es mínima si no existe un refuerzo (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf).

Para la construcción con adobe tradicional no existe un diafragma rígido que enlace a los muros o paredes y el conjunto genere un solo sistema, por lo que la fuerzas sísmicas no se distribuyen de acuerdo a la rigidez de los muros, por lo tanto, cada muro actúa independientemente, adicional al diafragma se debe tener cuidado con la flexión, el volteo y el corte de cada muro (Gutierrez, Manco, & Loaiza, 2003).

Para (Gutierrez, Manco, & Loaiza, 2003), se puede presentar varios niveles en el desempeño de una sistema, que se numeran y describen a continuación;

- Primer nivel, el sistema es completamente operacional y los muros no presenten daños que alteren su rigidez.
- Segundo nivel, el módulo es el operacional, pero ya presenta pequeños daños en la estructura de sus muros, pero su rigidez aún se conserva en gran porcentaje.
- Tercer nivel (de supervivencia), la estructura del sistema tiene daños estructurales importantes, pero la resistencia lateral la mantiene y se controla el colapso.
- Cuarto nivel (cerca al colapso), el sistema ya ha perdido toda su rigidez, la pérdida de elementos no estructurales es evidente.

- Quinto nivel (colapso de la estructura), el módulo tiene falla de los muros por flexión, corte o volteo y la estabilidad del conjunto se pierde en su totalidad.

### 3.4.2. FALLAS DE CIMENTACIÓN

La falta de una cimentación, como es evidente en cualquier tipo de construcción presenta asentamientos diferenciales que pueden traducirse en agrietamiento en los muros y/o paredes, que terminan debilitando a toda la estructura, sin olvidar que al tratarse de construcciones con tierra la erosión pasará una buena factura al no impermeabilizar las bases de este tipo de estructuras, he ahí la importancia de una buena cimentación (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf).



**Figura 3.16.** Deterioro de muros debido a la falta de una cimentación

*Fuente:* (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf, pág. 43)

### 3.4.3. FALLA DE CONEXIÓN ENTRE MUROS

La conexión entre muros es primordial, ya que una buena junta en sistemas de tierra da como resultado un mejor comportamiento y disminuye eficazmente la inestabilidad de los elementos (muros), ya que ante cargas perpendiculares a su plano de elevación se ven fuertemente afectados y pueden separarse con facilidad y llegar a voltearse (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf).



**Figura 3.17.** Separación de muros de tierra debido a una mala conexión

*Fuente:* (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf, pág. 46)

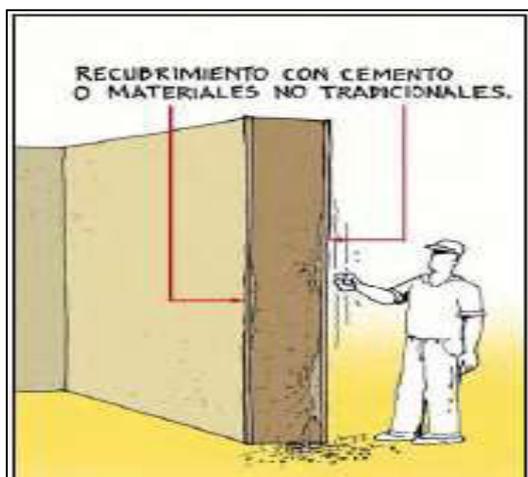
#### 3.4.4. FALLA POR PÉRDIDA DE RECUBRIMIENTO

Los agentes climáticos siempre afectarán a las edificaciones, independientemente de su material de construcción, la prevención de que sufra daños recae sobre el material de recubrimiento, en efecto materiales como el cemento (no tradicionales) suelen ser necesarios, pero para la construcción con tierra lo mejor es usar aditamentos a base de cal y yeso, ya que el cemento puede producir que el muro no posea evaporación, la cohesión disminuirá internamente, al final se traduce en pérdida de la capacidad portante del muro y las construcciones se verán gravemente afectadas (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf).



**Figura 3.18.** Pérdida de recubrimiento en paredes de tierra por mala utilización de materiales para recubrimiento.

*Fuente:* (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf, pág. 46)

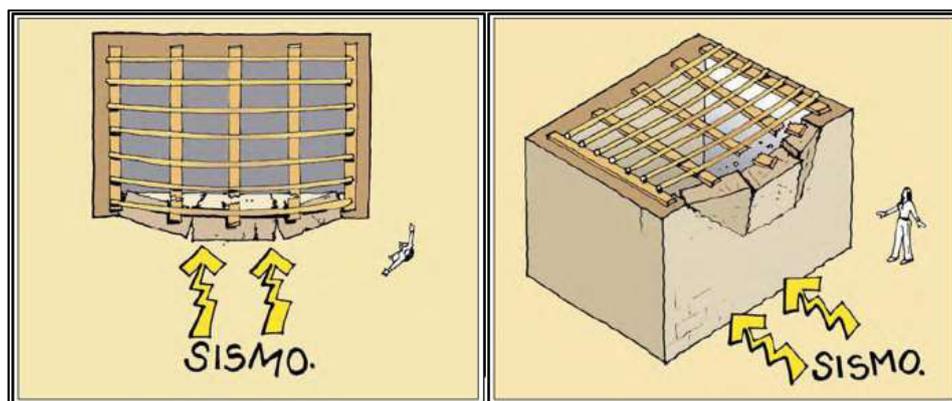


**Figura 3.19.** Separación de recubrimiento al usar cemento o similares para recubrir construcciones de tierra.

*Fuente:* (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf, pág. 46)

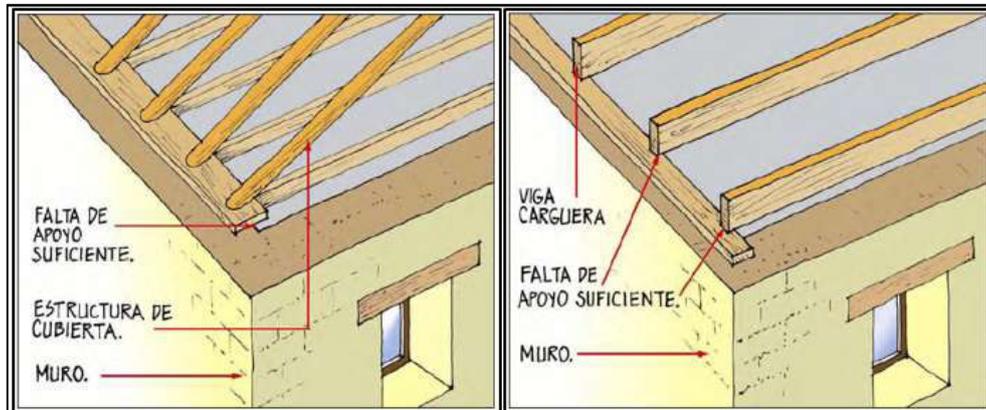
### 3.4.5. FALLA DE DIAFRAGMAS

Un diafragma que se comporte en forma rígida en su propio plano es ideal para “amarrar” a la estructura, ya que las cargas laterales que se producen por la inducción del sismo resultan demasiado perjudiciales, ya sea en viviendas de uno o más niveles, debido a que la fuerza perpendicular a un muro hace que éste falle por completo (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf). Además de una longitud de “desarrollo” adecuada para las cubiertas y entresijos es sumamente necesario, ya que si existe algún desplazamiento relativo entre el muro vertical (pared/bastidor) y el diafragma horizontal (cubierta/techo) puede llegar al colapso de este último llegando a ser muy perjudicial para el sistema (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf).



**Figura 3.20.** Falla del muro y diafragma debido a la fuerza lateral, por falta de unión entre diafragma y muro.

*Fuente:* (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf, pág. 47)

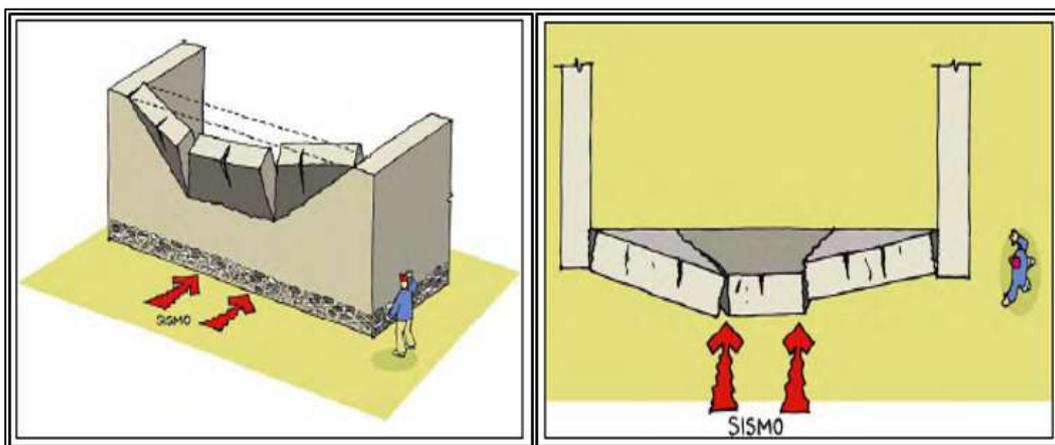


**Figura 3.21.** Cubierta mal apoyada, traslape defectuoso en diafragma y muro.

*Fuente:* (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf, pág. 48)

### 3.4.6. FALLA POR FLEXIÓN PERPENDICULAR AL PLANO

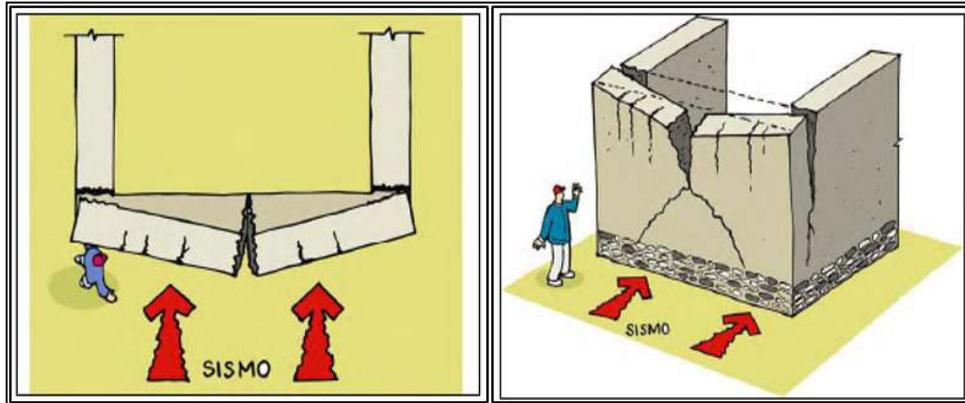
Al no lograr disipar energía, los muros que sufren las fuerzas sísmicas de forma perpendicular se empiezan a agrietar, puede ser en la base o a otra altura y en las esquinas superiores, esto se debe a su poca resistencia a la tracción, se genera separación de los muros y constituye el mecanismo de falla (Gutierrez, Manco, & Loiza, 2003).



**Figura 3.22.** Agrietamiento y separación de muros, por falta de tracción, al aplicar una fuerza externa.

*Fuente:* (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf, pág. 55)

En algunos casos el muro tiene una falla en la parte central, es decir, el agrietamiento vertical se da en la zona central junto con agrietamientos diagonales, que terminan en la falla del muro debido a la falta de refuerzo que confine al muro (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf).

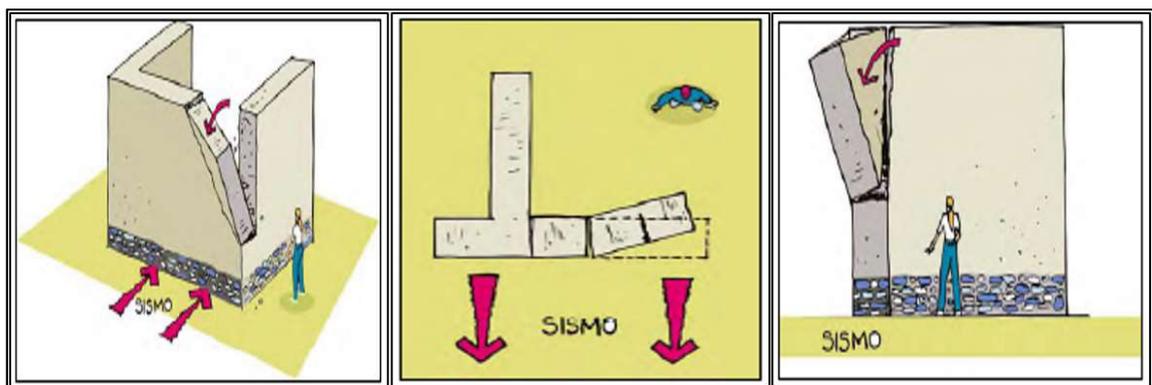


**Figura 3.23.** Falla en la parte central del muro, debido a falta de tracción al aplicar una fuerza perpendicular al plano.

*Fuente:* (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf, pág. 54)

Si existe esquinas no confinadas de muros o a su vez su confinamiento no es suficiente con muros transversales, es muy propenso a que sufra una falla de flexión en las esquinas que no están conectadas (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf).

Ya separado el muro debido a la falla de las uniones, éstos poseen independencia para trabajar y al ser sometidos a las fuerzas del sismo, en la mayoría de los casos el momento resistente generado por el peso del muro no es suficiente, y terminan siendo volteados por el momento actuante y puede darse el colapso de la cubierta (Gutierrez, Manco, & Loaiza, 2003).

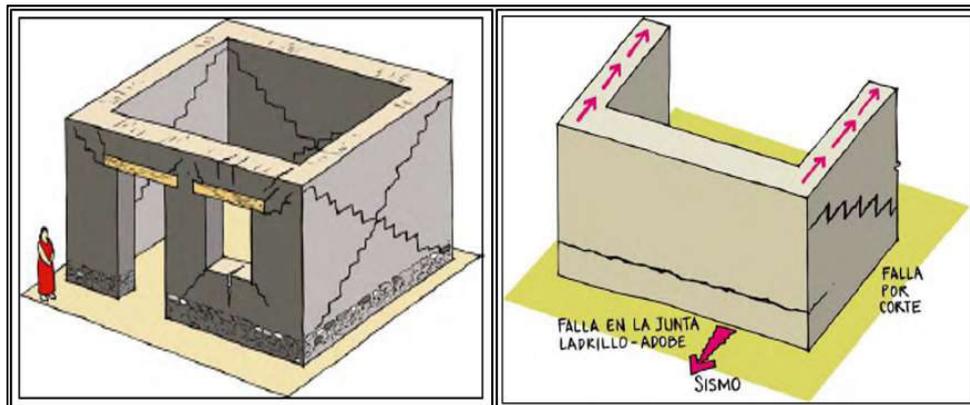


**Figura 3.24.** Volteo de un muro ya separado, debido a la fuerza perpendicular al muro y la mala unión entre muros.

*Fuente:* (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf, pág. 56)

### 3.4.7. FALLA POR CORTE

Ante la presencia de fuerzas horizontales (empujones horizontales) actuantes de forma paralela al plano de un muro, se generan grietas de orientación diagonal que buscan las juntas y esquinas de puertas y ventanas o dinteles, y los muros pueden llegar a colapsar por volteo (Gutierrez, Manco, & Loaiza, 2003).



**Figura 3.25.** Falla a corte, muestra de fisuras diagonales que siguen la unión de ladrillos de adobe.

*Fuente:* (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, sf, pág. 57)

## 3.5. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

### 3.5.1. PESO POR UNIDAD DE VOLUMEN

El peso por unidad de volumen o peso específico de un material, se entiende como la relación que existe entre el peso de una sustancia o elemento en el estado que se encuentre y el volumen que ocupe dicha sustancia a una temperatura y presión ambiente, además se toma como referencia el agua ya que se entiende que el agua destilada tiene un peso específico de  $1.00 \text{ kg/dm}^3$  (Serway & Jewett, 2008), en algunos casos este valor de peso específico puede variar ya que muchas sustancias pueden ser comprimidas y se puede ubicar más cantidad de sustancia en una misma unidad de volumen.

Por otra parte, el peso específico también puede expresarse como la unidad de masa contenida en una unidad de volumen (densidad) multiplicada por la constante de gravedad terrestre (Serway & Jewett, 2008)

Las ecuaciones que determinan estos dos conceptos son:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1)$$

Donde:

- $\gamma$ : Peso específico o peso por unidad de volumen ( $\text{N}/\text{m}^3$ ).
- $W$ : Peso de la sustancia (N).
- $V$ : Unidad de volumen ( $\text{m}^3$ ).

$$\gamma = \delta * g \quad (2)$$

Donde:

- $\gamma$ : Peso específico o peso por unidad de volumen ( $\text{N}/\text{m}^3$ ).
- $\delta$ : Densidad de la sustancia ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
- $g$ : constante de gravedad terrestre ( $\text{m}/\text{s}^2$ ).

### 3.5.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Para tratar el concepto de módulo de elasticidad, se debe primero revisar la definición de sus componentes, ya que por definición, el módulo de elasticidad es la constante de proporcionalidad de la relación del esfuerzo actuante frente la deformación unitaria producida, ahora bien esta relación es conocida como Ley de Hooke y es una relación lineal que representa exactamente eso, la relación ente el esfuerzo, ya sea de compresión o de tracción, sobre la deformación axial ya sea de alargamiento o acortamiento, según corresponda (Gere & Goodno, Mecánica de Materiales, 2009).

La ecuación que representa la Ley de Hooke es la siguiente:

$$\sigma = E * \epsilon \quad (3)$$

Donde:

- $\sigma$ : esfuerzo normal a la sección ( $\text{N}/\text{m}^2$ ).
- $E$ : Módulo de elasticidad ( $\text{N}/\text{m}^2$ ).
- $\epsilon$ : Deformación unitaria longitudinal (--).

Entonces, se debe tener en cuenta los dos conceptos implicados en esta ecuación que son: el esfuerzo normal a una sección y la deformación unitaria longitudinal.

Para (Gere & Timoshenko, Mecánica de Materiales , 1990) la deformación unitaria puede ser a tensión o compresión y en general toma el nombre de deformación unitaria normal, ya que hace referencia a esfuerzos normales a una superficie, dicha deformación se define como el alargamiento o acortamiento longitudinal por unidad de longitud, y la expresión matemática que representa dicha deformación es:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (4)$$

Donde

- $\delta$ : Variación total de longitud (m).
- L: Longitud inicial (m).
- $\epsilon$ : Deformación unitaria longitudinal (--) o (mm/m).

Para el otro concepto, el de esfuerzo, también se hace referencia a (Gere & Timoshenko, Mecánica de Materiales , 1990), para quienes la fuerza repartida uniformemente sobre un área específica se denomina esfuerzo, y depende si la fuerza aplicada es de tensión o compresión para determinar si el esfuerzo es tensional o de compresión respectivamente, la ecuación que define el concepto de esfuerzo es:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Donde:

- $\sigma$ : esfuerzo normal a la sección (N/m<sup>2</sup>).
- F: Fuerza uniforme aplicada sobre la sección transversal (N).
- A: Área de la sección transversal (m<sup>2</sup>).

### 3.5.3. RELACIÓN DE POISSON

La relación de Poisson, (Gere & Goodno, Mecánica de Materiales, 2009) definen la relación que existe en el estrechamiento de la sección transversal de un material

cuando se aplica una fuerza de estiramiento o a su vez el ensanchamiento de la sección transversal mientras se aplica una fuerza de compresión, es decir, relaciona las deformaciones unitarias de las dos dimensiones, la deformación unitaria transversal con la deformación unitaria longitudinal, la expresión matemática que define este concepto es:

$$\mu = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_l} \quad (6)$$

Donde:

- $\mu$ : Relación de Poisson (--).
- $\epsilon_a$ : Deformación unitaria transversal (m).
- $\epsilon_l$ : Deformación unitaria longitudinal (m).

#### 3.5.4. COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA

La expansión térmica es otro de los factores físicos que influyen en el comportamiento de los materiales, por lo cual se recurre a la definición de (Serway & Jewett, 2008), que definen a la expansión térmica como la variación del volumen de una sustancia o sólido al variar la temperatura, esta expansión térmica se produce debido a la separación promedio que existe entre los átomos de una sustancia o sólido, la expresión matemática que define al coeficiente expansión térmica es:

$$\alpha = \frac{\Delta L / L_i}{\Delta T} \quad (7)$$

Donde:

- $\alpha$ : Coeficiente de expansión térmica ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).
- $\Delta L$ : Variación lineal (mm).
- $L_i$ : Longitud inicial (m).
- $\Delta T$ : Variación de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Además, cabe mencionar que la conductividad térmica para los muchos suelos específicamente arenas es baja, debido a que las arenas poseen baja difusividad

térmica y, por lo tanto, los cambios de temperatura en este tipo de suelo no se consideran significativos (Castillo, 2018).

### 3.5.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD EN CORTANTE

Para (Gere & Timoshenko, Mecánica de Materiales , 1990) la parte inicial de la relación entre el esfuerzo en cortante frente a la deformación en cortante se presenta como una línea recta, muy similar a la de tensión, y es una región elástico lineal, por lo tanto, el esfuerzo cortante y la deformación son directamente proporcionales y se relacionan por el módulo de elasticidad a cortante, o llamado también módulo de rigidez y corresponden a la ley de Hooke en cortante:

$$\tau = G * \gamma \quad (8)$$

Donde:

- $\tau$ : esfuerzo cortante paralelo a la sección (N/m<sup>2</sup>).
- G: Módulo de elasticidad a cortante (N/m<sup>2</sup>).
- $\gamma$ : Deformación unitaria angular (--).

El módulo de elasticidad en tensión y el módulo de elasticidad en cortante se relacionan entre sí, por ser el mismo material y teniendo en cuenta la relación de Poisson, a través de la siguiente ecuación (Gere & Timoshenko, Mecánica de Materiales , 1990)

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \mu)} \quad (9)$$

Donde:

- E: Módulo de elasticidad a tensión (N/m<sup>2</sup>).
- G: Módulo de elasticidad a cortante (N/m<sup>2</sup>).
- $\mu$ : Relación de Poisson (--).

Se debe tener en cuenta que los valores de Poisson están en el rango de entre cero a un medio (0.5), por lo cual el valor del módulo de elasticidad en cortante debe estar en relación de un tercio y un medio del valor del módulo de elasticidad en tensión (Gere & Timoshenko, Mecánica de Materiales , 1990).

### **3.6. LA NEC 2015, PARA EL SISTEMA DE SUPERADOBE**

#### **3.6.1. LA NEC – SE – CG, CARGAS NO SÍSMICAS**

La (NEC-SE-CG, 2015), señala que existen básicamente tres tipos de cargas: cargas permanentes, cargas variables y cargas accidentales, de la combinación de éstas, se desarrolla la base de la norma en cuestión, teniendo en cuenta que no se consideran las cargas de procesos constructivos, cargas dinámicas de viento y cargas por factores externos como explosiones ni hundimiento de cimentaciones.

Se emplea también, para estructuras convencionales el diseño por última resistencia y el diseño por esfuerzos de trabajo, sin embargo, no se establece una limitación estricta de usar estos métodos para nuevos sistemas como lo es el superadobe convencional y el superadobe propuesto.

##### **3.6.1.1. Cargas permanentes y variables**

Se considera cargas permanentes para la (NEC-SE-CG, 2015), todo el peso que proviene de materiales estructurales (Vigas, columnas, muros y diafragmas) y no estructurales (instalaciones, recubrimientos) u objetos que ocasionen cargas puntuales permanentes, mientras que las cargas variables agrupan a todas las cargas móviles como personas o muebles y equipos móviles o temporales.

###### *3.6.1.1.1. D, Cargas Muertas*

Se debe consultar el peso específico de todos los materiales a usar, o a su vez determinar el peso específico que no esté establecido en la tabla N° 8 de la (NEC-SE-CG, 2015) y determinar todos los volúmenes de los mismos y las áreas en los cuales van a ser usados y así obtener todo el peso o carga muerta del sistema de superadobe.

###### *3.6.1.1.2. L, Cargas Vivas*

Existe la posibilidad de reducción del valor de la carga viva para los elementos, pero para la aplicabilidad del sistema se desea aumentar las cargas, antes que reducirlas, para probar así a máxima carga el sistema propuesto de superadobe, para esto se puede usar la tabla N°9 de la (NEC-SE-CG, 2015), en la figura 3.26. se presenta la sección para uso de viviendas:

Ocupación o Uso	Carga uniforme (kN/m <sup>2</sup> )	Carga concentrada (kN)
<b>Residencias</b>		
Viviendas (unifamiliares y bifamiliares)	2.00	
Hoteles y residencias multifamiliares	2.00	
Habitaciones	4.80	
Salones de uso público y sus corredores		

**Figura 3.26.** Carga Viva para residencias según la tabla N° 9 de NEC-15.

*Fuente:* (NEC-SE-CG, 2015)

### 3.6.1.1.3. P, Cargas por viento

La (NEC-SE-CG, 2015), determina que la velocidad mínima adoptada para viento debe ser considerada como 21 m/s, esta velocidad se puede incluir en la ecuación (11), para obtener una velocidad corregida, para luego con ayuda de la ecuación (10) determinar la presión del viento, a continuación se presenta dichas ecuaciones:

$$P = \frac{1}{2} \rho V_{bc}^2 c_{ea} c_{fr} \quad (10)$$

Donde:

- P: Presión del viento (N/m<sup>2</sup>).
- V<sub>bc</sub>: Velocidad del viento (corregida) (m/s).
- ρ: Densidad del aire (1.25 kg/m<sup>3</sup>).
- c<sub>ea</sub>: Factor de entorno/altura.
- c<sub>fr</sub>: Factor de forma.

$$V_{bc} = V_{im} * \sigma \quad (11)$$

Donde:

- V<sub>bc</sub>: Velocidad del viento (corregida) (m/s).
- V<sub>im</sub>: Velocidad instantánea máx. registrada a 10 m de altura (N/m<sup>2</sup>).
- σ: Coeficiente de correlación.

Los coeficientes c<sub>e</sub> y c<sub>f</sub> se pueden estimar de las tablas N°6 y N°7, en cuanto al coeficiente de correlación se puede verificar en la tabla N°5, todos estos

coeficientes de las tablas especificadas de la (NEC-SE-CG, 2015) en el capítulo 3.2.4.

#### 3.6.1.1.4. *S*, Cargas de granizo

La (NEC-SE-CG, 2015) establece que se tome una carga mínima de granizo 0.5 kN/m<sup>2</sup>, en cubiertas de pendiente menor al 15% y 1.0 kN/m<sup>2</sup>, en cubiertas de pendiente menor al 5%, caso contrario se debe tomar en cuenta la altura de acumulación, así plantea la ecuación (12):

$$S = \rho_s * H_{ac} \quad (12)$$

Donde:

- S: Peso o carga producido por granizo (kN/m<sup>2</sup>).
- $\rho_s$ : Peso específico del granizo (1000 kg/m<sup>3</sup>).
- $H_{ac}$ : Altura para acumulación de granizo (m).

#### 3.6.1.2. Combinaciones de cargas

Las combinaciones de cargas permanentes, variables y accidentales se presentan en siete combinaciones con distintos factores, y estos factores a su vez dependen del uso o servicio en el que se vaya a usar la estructura o sistema, esto se puede revisar con más detalle en el apartado 3.4.3. de la (NEC-SE-CG, 2015), así las combinaciones quedan acentuadas como:

$$\text{Combinación 1: } 1.4 D \quad (13)$$

$$\text{Combinación 2: } 1.2 D + 1.6 L + 0.5 \text{ máx } [L_r; S; R] \quad (14)$$

$$\text{Combinación 3: } 1.2 D + 1.6 \text{ máx } [L_r; S; R] L + \text{ máx } [L; 0.5W] \quad (15)$$

$$\text{Combinación 4: } 1.2 D + 1.0 W + 0.5 \text{ máx } [L_r; S; R] \quad (16)$$

$$\text{Combinación 5: } 1.2 D + 1.0 E + L + 0.2 S \quad (17)$$

$$\text{Combinación 6: } 0.9 D + 1.0 W \quad (18)$$

**Combinación 7: 0.9 D + 1.0 E**

**(19)**

Donde:

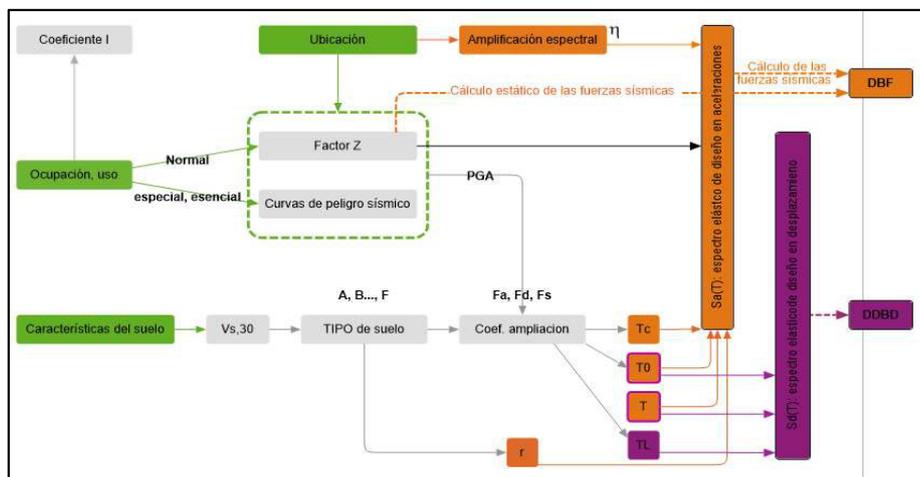
- D: Carga Muerta.
- E: Carga de sismo.
- L: Carga viva.
- $L_r$ : Carga de cubierta.
- S: Carga de granizo.
- W: Carga de viento.

**3.6.2. LA NEC – SE – DS, DISEÑO SISMORESISTENTE**

La (NEC-SE-DS, 2015) determina que la respuesta de una edificación o en este caso de un sistema debe solventar las sollicitaciones sísmicas del suelo, y teniendo en cuenta la filosofía que se basa en el desempeño, que busca evitar el colapso del sistema estructural y así evitar la pérdida de vidas humanas.

Por ende, para determinar la resistencia mínima de diseño, este sistema, debe basarse en las fuerzas sísmicas de diseño de la (NEC-SE-DS, 2015)

Para tener un punto de referencia se requiere establecer un modelo de análisis, para lo cual se hace referencia a la Cadena de determinación de la demanda sísmica, como se muestra en la figura 3.27.:



**Figura 3.27.** Cadena de determinación de la demanda sísmica.

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015, pág. 131)

Esta cadena representa la metodología para el análisis de edificaciones de hormigón armado, por lo que se adapta al sistema de superadobe propuesto y se toma en cuenta ciertos criterios, pero sin perder de vista el nivel de desempeño sísmico, el tipo de sistema con su configuración y el método de análisis que se emplee.

### 3.6.3. DISEÑO SISMORESISTENTE

#### 3.6.3.1. Factor de Zona Z

La zonificación sísmica se especifica en el capítulo 3 de la (NEC-SE-VIVIENDA, 2015), en el cual se atribuye diferentes valores a través de un mapa de zonificación, el cual es elaborado para: *“un estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (período de retorno de 475 años), que incluye una saturación a 0.5 g de los valores de aceleración sísmica en roca en el litoral”*, la figura 3.28. muestra los valores del factor Z para cada zona sísmica:

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	$\geq 0.50$
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

**Figura 3.28.** Valores del factor Z, en función de la zona sísmica adoptada.

*Fuente:* (NEC-SE-DS, 2015, pág. 39)

#### 3.6.3.2. Curvas de Peligro Sísmico

La (NEC-SE-DS, 2015), en su capítulo 3.1.2. indica que: *“el diseño de estructuras de ocupación especial o estructuras esenciales y estructuras diferentes a las edificaciones, se debe utilizar diferentes niveles de desempeño sísmico”*, para lo cual se relaciona a la aceleración sísmica en el terreno conocida como (PGA) por sus siglas en inglés (*Peak Ground Acceleration*), con un nivel de probabilidad anual de excedencia.

### 3.6.3.3. Perfil del suelo para el diseño sísmico

En el capítulo 3.2. Geología local de la (NEC-SE-DS, 2015) se define seis tipos de perfiles de suelos desde la categoría A hasta la F, para esta caracterización se usa los 30 m. superiores en cada perfil excepto para la categoría F, debido a que los suelos de tipo F corresponden al grupo de suelos orgánicos y por tal razón son tratados de manera especial, en la figura 3.29. se muestra la categorización que la (NEC-SE-DS, 2015) da a cada tipo de perfil:

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez competente	$1500$ m/s > $V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760$ m/s > $V_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ KPa
D	Perfiles de suelos rígidos, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360$ m/s > $V_s \geq 180$ m/s
	Perfiles de suelos rígidos, que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100$ kPa > $S_u \geq 50$ kPa
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180$ m/s
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcilla blanda	IP > 20 $w \geq 40\%$ $S_u < 50$ kPa
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1—Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersos o débilmente cementados, etc.	
	F2—Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas)	
	F3—Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con índice de plasticidad IP > 75)	
	F4—Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 30 m)	
	F5—Suelos con contrastes de impedancia $\alpha$ ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidad de ondas de corte	
F6—Rellenos colocados sin control ingenieril		

**Figura 3.29.** Clasificación de los perfiles de suelo.

*Fuente:* (NEC-SE-DS, 2015, pág. 30)

### 3.6.3.4. Coeficientes de perfil de suelo

Para los diferentes perfiles de suelo la (NEC-SE-DS, 2015) propone coeficientes desde el perfil A hasta el perfil E, estos coeficientes determinan 3 tipos de factores  $F_a$ ,  $F_d$  y  $F_s$ , el perfil de suelo F no se toma en cuenta ya que requiere de estudios específicos, donde:

- $F_a$ : es el factor o coeficiente de ampliación de las ordenadas del espectro de respuesta elástico, de las aceleraciones de suelo en las zonas de período corto.
- $F_d$ : es el factor de ampliación de las ordenadas del espectro elástico, de respuesta de desplazamiento para diseño en roca y
- $F_s$ : es el factor que considera el comportamiento no lineal de los suelos, así también, la degradación del período del sitio y los desplazamientos relativos del suelo en los espectros de aceleración y desplazamiento.

A continuación, se muestran las figuras 3.30., 3.31. y 3.32. que contienen las tablas para determinar los valores de los diferentes factores:

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	$\geq 0.5$
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1.0	0.85
F	Véase <a href="#">Tabla 2</a> : Clasificación de los perfiles de suelo y la sección <a href="#">10.5.4</a>					

**Figura 3.30.** Tipo de suelo - Factor de sitio  $F_a$ .

*Fuente:* (NEC-SE-DS, 2015, pág. 31)

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	$\geq 0.5$
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	Véase <a href="#">Tabla 2</a> : Clasificación de los perfiles de suelo y <a href="#">10.6.4</a>					

**Figura 3.31.** Tipo de suelo - Factor de sitio  $F_d$ .

*Fuente:* (NEC-SE-DS, 2015, pág. 31)

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	Véase <a href="#">Tabla 2</a> : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

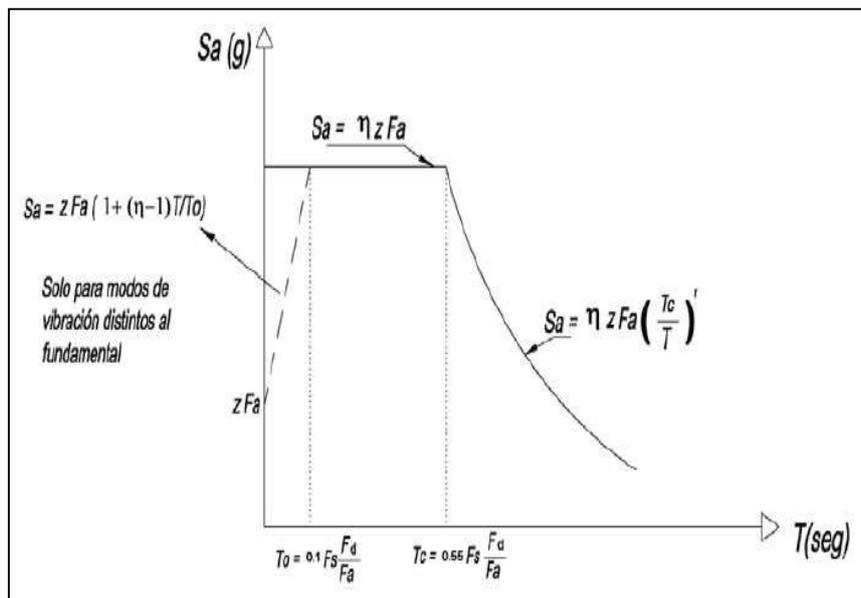
**Figura 3.32.** Tipo de suelo - Factor de comportamiento inelástico  $F_s$ .

*Fuente:* (NEC-SE-DS, 2015, pág. 32)

### 3.6.4. COMPONENTE HORIZONTAL DE LA FUERZA SÍSMICA

#### 3.6.4.1. $S_a$ , Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones

La (NEC-SE-DS, 2015), en su capítulo 3.3 define el espectro de respuesta elástico de aceleraciones  $S_a$ , tomado como una fracción de la gravedad, usado para el sismo de diseño en función del factor de la zona sísmica  $Z$ , el tipo de suelo donde se cimentarán la obras y los coeficientes de amplificación, se determina con la figura 3.33. mostrada a continuación:



**Figura 3.33.** Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones.

*Fuente:* (NEC-SE-DS, 2015, pág. 33)

En la figura 3.33. se formulan tres ecuaciones de la función de  $S_a$  en función del período, en las cuales los términos que se usan para las tres secciones de la curva son:

- r. – Factor que depende de la ubicación geográfica del sitio de emplazamiento, tomado el valor de 1.0 para todos los tipos de suelos excepto para el tipo de suelo E, para este tipo de suelo se toma el valor de 1.50.
- T.- Es el período de vibración fundamental de la estructura.
- T<sub>0</sub>. - Es la frontera mínima del período de vibración del espectro sísmico de aceleraciones.
- T<sub>c</sub>. - Es la frontera mínima del período de vibración del espectro sísmico de aceleraciones.

Además, de los límites T<sub>0</sub> y T<sub>c</sub> se debe considerar el límite T<sub>L</sub>, que es el límite para el período de vibración en respuesta del desplazamiento, así estos tres límites pueden calcularse con las ecuaciones dadas en la (NEC-SE-DS, 2015) en el capítulo 3.3.1. que se muestran en la figura 3.34., y que se determinan en función de los coeficientes de F<sub>a</sub>, F<sub>d</sub> y F<sub>s</sub>.

$$T_c = 0.55 F_s \frac{F_d}{F_a}$$

$$T_L = 2.4 \cdot F_d$$

$$T_0 = 0.10 F_s \frac{F_d}{F_a}$$

**Figura 3.34.** Límites de períodos vibración, en función de los coeficientes de la geología del suelo.

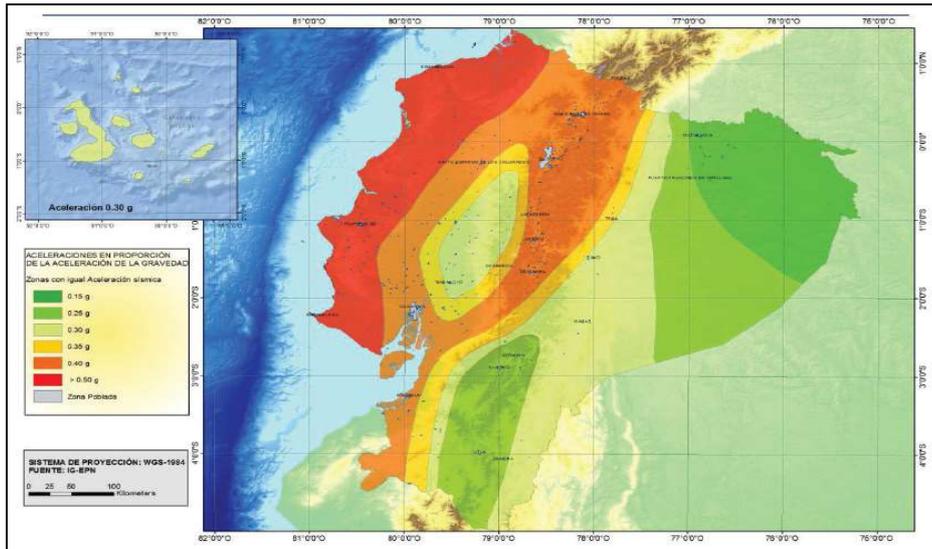
*Fuente:* (NEC-SE-DS, 2015)

En consecuencia, se observa tres intervalos de S<sub>a</sub> definidos por tres ecuaciones diferentes por intervalos de períodos diferentes.

#### 3.6.4.2. η, Relación entre el S<sub>a</sub> y PGA

La relación entre S<sub>a</sub> y el PGA (η), establece el valor de la relación entre la aceleración espectral y el PGA, el valor del PGA puede ser reemplazo por el valor de Z, si el período de retorno se encuentra en el rango de 0.15 a 0.50, (S<sub>a</sub>/Z en roca), este periodo de retorno puede tomar valores de 1.80 para las provincias de la Costa excepto Esmeraldas, 2.48 para todas las provincias de la Sierra e incluye a Esmeraldas y 2.60 para todas las provincias del Oriente.

La figura 3.35. hace referencia a la relación que existe entre el PGA y el mapa de zonas sísmicas del Ecuador de la (NEC-SE-DS, 2015).



**Figura 3.35.** Mapa de zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z.

*Fuente:* (NEC-SE-DS, 2015, pág. 27)

### 3.6.4.3. $S_d$ , Espectro elástico de diseño en desplazamiento

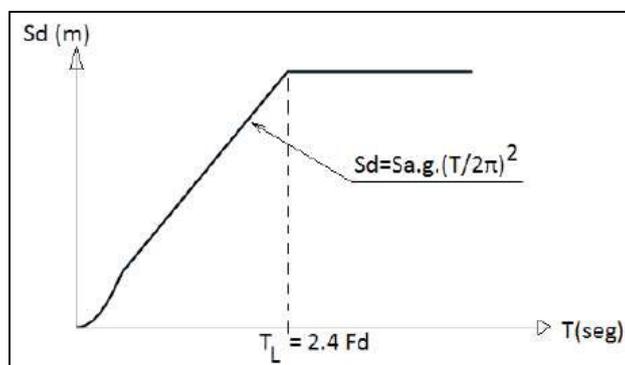
Este espectro es una función del espectro elástico de diseño en aceleraciones, para este espectro se definen dos tramos, los cuales son diferenciados por  $T_L$ , las ecuaciones que rigen los dos tramos vienen definidos por las ecuaciones presentadas en la figura 3.36. y generan una gráfica muy similar a la figura 3.37.:

$$S_d = S_a(g) \cdot (T/2\pi)^2$$

$$S_d = S_a(g) \cdot (T_L/2\pi)^2$$

**Figura 3.36.** Ecuaciones para los dos tramos del espectro elástico de diseño en desplazamiento.

*Fuente:* (NEC-SE-DS, 2015)



**Figura 3.37.** Espectro elástico de diseño en desplazamiento para diseño.

*Fuente:* (NEC-SE-DS, 2015, pág. 36).

### 3.6.5. COMPONENTE VERTICAL DEL SISMO DE DISEÑO

La componente vertical del sismo es tomada en cuenta si existieran elementos que exceden los límites de las plantas de los pisos, en volados o elementos que posean grandes luces, en el sistema propuesto dichos elementos no se presentan, pero pese a ello, se deberá calcular el valor de esta componente.

En general para la componente vertical denotada como  $E_v$ , la (NEC-SE-DS, 2015), indica que puede establecerse a través del escalamiento de la componente horizontal de la aceleración por un factor equivalente al 66.67%, así se presenta la ecuación (20):

$$E_{ver} \geq \frac{2}{3} E_{hor} \quad (20)$$

Donde:

- $E_{ver}$ : Componente del sismo en sentido vertical.
- $E_{hor}$ : Componente del sismo en sentido horizontal.

### 3.6.6. COMBINACIÓN DE LAS FUERZAS ORTOGONALES Y DIRECCIÓN DE APLICACIÓN

Existe una combinación tanto de las fuerzas horizontales junto con las verticales, ahora bien, las fuerzas horizontales tienen una muy baja probabilidad de que se localicen o se alineen con las direcciones principales de las estructuras, por lo que las excentricidades de estas componentes deben ser tomadas en cuenta, en este contexto la fuerza de sismo final se obtiene como la suma de las componentes, la componente vertical ya revisada en el capítulo 3.6.5. más la componente horizontal que se determina como se muestra en la ecuación (22), la suma de la componente vertical y horizontal se muestra en la ecuación (21):

$$E = E_v + E_h \quad (21)$$

Donde:

- $E$ : Efectos del sismo
- $E_v$ : Componente vertical del sismo
- $E_h$ : Componente horizontal del sismo

La componente horizontal resulta de la raíz cuadrada, de la suma de los cuadrados de las dos componentes principales, como se muestra en la ecuación (22):

$$E_h = \pm \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (22)$$

Donde:

- $E_h$ : Componente horizontal del sismo
- $E_x$ : Componente en X de la fuerza sísmica.
- $E_y$ : Componente en Y de la fuerza sísmica.

### 3.6.7. METODOLOGÍA DEL DISEÑO SISMORESISTENTE

La metodología del diseño sismo resistente, se basa en construir sistemas para resistir un sismo de diseño, el cual tiene un período de retorno de 475 años, es decir, un evento sísmico que tiene el 10% de probabilidad de ser excedido en 50 años, esto se hace con el fin de salvaguardar la vida de los usuarios de la estructura, para conseguir esta metodología se debe aplicar ciertos criterios que dependen de diferentes factores como lo estipula la (NEC-SE-DS, 2015), dichos criterios se desglosan a continuación:

#### 3.6.7.1. I, Factor de Importancia

La (NEC-SE-DS, 2015), en su capítulo 4.1 determina el factor de importancia I, para identificar tres tipos de categorías de sistemas: edificaciones esenciales, estructuras de ocupación especial y otras estructuras, asignándoles el valor de 1.50, 1.30 y 1.00 respectivamente, esta diferenciación se la puede analizar en la tabla N° 6 del mismo capítulo de la NEC, básicamente lo que se intenta incrementar es la demanda sísmica de diseño dependiendo las características de uso o de importancia y que los sistemas que requieran permanezcan funcionales tras la ocurrencia de un evento sísmico.

#### 3.6.7.2. Requisitos mínimos de diseño

Los requisitos varían dependiendo el factor de importancia, un factor de importancia mayor implica mayores requisitos, así para las edificaciones esenciales y de ocupación especial que tienen un factor de importancia I mayor a 1 los requisitos

se establecen en el capítulo 4.3. de la (NEC-SE-DS, 2015), mientras que los requisitos para los sistemas con factor de importancia I equivalente a 1 son:

- Los daños en elementos estructurales y no estructurales ante la ocurrencia de terremotos pequeños y frecuentes deben ser previstos para toda la vida útil de la estructura.
- Los daños graves en elementos estructurales deben ser previstos mientras que los daños en elementos no estructurales deben ser controlados, durante la vida útil de la estructura, en la presencia de terremotos moderados y poco frecuentes.
- Se debe evitar el colapso de la estructura y así salvaguardar la vida de sus ocupantes ante terremotos que pueden ocurrir rara vez durante la vida útil de la estructura.

Esta filosofía de diseño se consigue si el sistema es diseñado bajo los siguientes parámetros:

- Seguridad de vida. - La estructura debe tener la capacidad de resistir las fuerzas que se especifican en la (NEC-SE-DS, 2015) .
- Limitación de daños y deformaciones. - Las derivas de piso en la estructura deben ser menores a las admisibles dispuestas por la (NEC-SE-DS, 2015).
- Ductilidad. - La disipación de energía de deformación inelástica debe hacerse a través de las técnicas de diseño por capacidad o a través de dispositivos de control sísmico.

### 3.6.7.3. Límites permisibles de las derivas de piso

Las derivas de piso según la (NEC-SE-DS, 2015), no debe exceder los límites de deriva inelástica que se indica en la figura 3.38.:

Estructuras de:	$\Delta_M$ máxima (sin unidad)
Hormigón armado, estructuras metálicas y de madera	0.02
De mampostería	0.01

**Figura 3.38.** Valor de las derivas máximas permitidas.

*Fuente:* (NEC-SE-DS, 2015)

En este contexto el sistema de superadobe propuesto deberá cumplir con los dos primeros parámetros, es decir:

- debe resistir las fuerzas especificadas en la (NEC-SE-DS, 2015) y
- las derivas de piso deben ser menores a las indicadas en la figura 3.38.

En cuanto a la forma de disipación de energía se asume que el sistema debe resistir dicha energía debido a la gran rigidez que posee, además al ser un sistema de un solo piso las derivas de piso se consideran como los desplazamientos en lo alto de los muros que conforman el sistema.

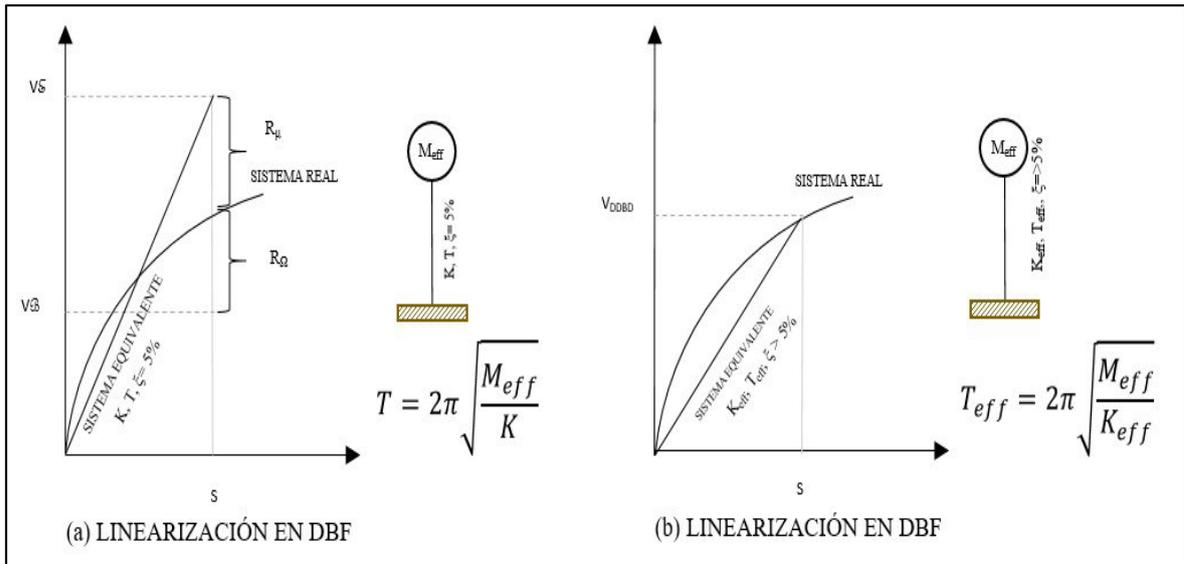
### **3.6.8. MÉTODOS DE DISEÑO**

Para el diseño de estructuras puede usarse tanto los procedimientos estáticos como dinámicos para la obtención de fuerzas laterales.

Para ello se debe determinar factores como indica la (NEC-SE-DS, 2015) en el capítulo 5.2 y así establecer un método estático basado en fuerzas o métodos dinámicos que permiten tener en cuenta modos de vibración diferentes al modo fundamental, finalmente se pueden usar métodos de análisis no lineales que requieren un nivel de conocimientos más abundante respecto al tema de las estructuras.

La (NEC-SE-DS, 2015), establece el método de Diseño Basado en Fuerzas (DBF) y el método de Diseño Basado en Desplazamientos (DBD), el primero es necesario para cualquier estructura y el segundo puede sustituirlo tomando las debidas precauciones. Para análisis de sistemas específicos puede usarse normas internacionales como recomienda la misma norma.

La (NEC-SE-VIVIENDA, 2015) determina el uso de un sistema elástico equivalente, es decir, *“la respuesta real, no lineal e inelástica de las estructuras es linealizada”* como se muestra en la figura 3.39.:

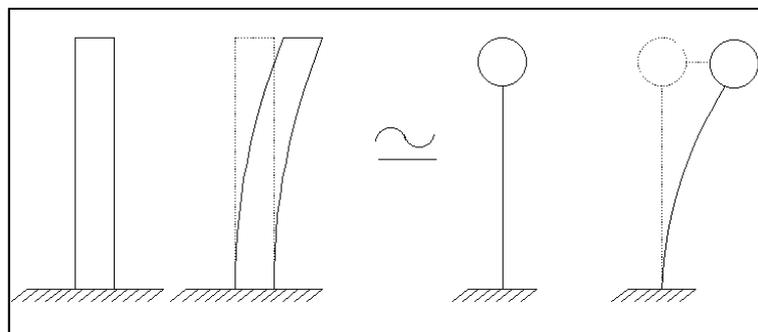


**Figura 3.39.** Sistema elástico equivalente de la NEC 15.

*Fuente:* (NEC-SE-DS, 2015, pág. 78)

Se observa que existe la posibilidad de usar un amortiguamiento viscoso a partir de 5% o mayor, y la determinación de la rigidez puede verse afectada por el agrietamiento de elementos estructurales, con el concepto de que los elementos sufren agrietamiento desde su proceso inicial de formación, y el período igualmente es estimado.

Pese a que en la realidad un sistema de muros o un sistema dual, ya sea de hormigón, superadobe o de cualquier otro material no puede idealizarse como el sistema equivalente de la NEC 15, debido a que un muro representa un sistema continuo y la masa no se concentra en un solo punto, como el sistema mostrado en la figura 3.40; el sistema propuesto de superadobe, al ser un sistema de un solo piso, guarda similitud a la idealización del sistema de un grado de libertad con una masa concentrada.



**Figura 3.40.** Sistema elástico equivalente de un piso, propuesto por Mejía y Rivera.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

### **3.6.8.1. Consideraciones para el pre-diseño y diseño conceptual**

La (NEC-SE-DS, 2015) establece los distanciamientos mínimos que debe existir entre dos estructuras en el caso de que estas formen un solo conjunto o si son estructuras completamente diferentes, en todo caso en primera instancia debe ceñirse a la normativa de cada municipio y en ausencia de dicha normativa se dan recomendaciones de separación mínima.

Para el caso del sistema propuesto de superadobe se debe regir tanto por la norma peruana Norma E0.80 (Ministerio de vivienda, 2017) ya que es la norma de construcción con tierra que por la región sería la más conveniente de usar, junto con las instrucciones del instituto español a cargo de la difusión de la técnica de construcción de superadobe convencional (DomoTerra, 2016) y las normas establecidas por el Instituto de Arquitectura con tierra de California, Estados Unidos (CalEarth, 1999) que es el centro creado por el Arquitecto Nader Khalili.

#### *3.6.8.1.1. Configuración estructural*

Un buen desempeño sísmico parte de un diseño arquitectónico y estructural muy simple y regular, el modelo del sistema de superadobe propuesto se realiza en ese sentido, por lo que se intenta tener la mayor regularidad en planta y en elevación, con el conocimiento previo de que la (NEC-SE-DS, 2015) establece criterios de reducción de la capacidad sísmica de un sistema al poseer algún tipo de irregularidad tanto en planta como elevación en el capítulo 5.2.3. de la misma norma a través de las tablas N°13 y N°14, para determinar los valores posibles de  $\Phi_P$  y  $\Phi_E$  que son coeficientes de cuantificación.

### **3.6.8.2. Métodos de análisis para el DBF**

Para la (NEC-SE-DS, 2015), tanto el método de análisis estático lineal y el método pseudo-dinámico son obligatorios para los sistemas estructurales, a excepción de estructuras totalmente regulares.

El método DBF de la (NEC-SE-DS, 2015), sigue tanto la filosofía de diseño establecida en el capítulo 4.2 de la NEC, como la determinación de las fuerzas sísmicas de diseño, también señala la verificación de los elementos estructurales bajo los efectos de las fuerzas externas.

Este método presenta dos desventajas, la primera es que supone un mismo coeficiente R (coeficiente de reducción) sin importar el período y tipo de suelo; la segunda es que asume una resistencia independiente de la rigidez y viceversa.

Como se mencionó en la sección 3.6.6., la rigidez de los muros de mampostería varía de acuerdo al agrietamiento de los mismos, la (NEC-SE-DS, 2015) establece una relación entre la altura total y la longitud del muro en los cuales si la relación está dentro del intervalo de  $[0 ; 1.5]$  no se debe considerar el agrietamiento del muro, si dicha relación tiene un valor entre  $]1.5 ; 3[$ , se debe obtener un valor para el coeficiente de inercia agrietada por interpolación entre 1.0 y 0.5, mientras que si el valor va de  $[3 ; +\infty[$  se establece un valor de 0.5 multiplicado por la inercia de dicho muro.

Para la determinación del valor de la carga sísmica denominada por W en la (NEC-SE-DS, 2015), se considera que este valor es equivalente a un porcentaje de la carga muerta total de la estructura.

#### **3.6.8.3. Procedimiento de cálculo del DBF**

Se determina los lineamientos tanto para el análisis estático y para el análisis dinámico (espectral y de paso a paso en el tiempo), siendo obligatorio el análisis estático lineal y el pseudo dinámico.

En el análisis estático, se contempla lo estipulado en los capítulos 3.6.2. y 3.6.3. del presente trabajo, para la elaboración del espectro de aceleración, este espectro puede también ser usado en los procedimientos dinámicos y se debe considerar que el valor del cortante basal de los métodos dinámicos no puede ser menor al 80% del cortante basal del método estático en estructuras regulares (NEC-SE-DS, 2015), como en el sistema de superadobe propuesto.

El espectro de respuesta elástico en aceleración puede usarse para representar y determinar la carga sísmica horizontal y la componente vertical se la puede obtener a través del escalonamiento del factor mínimo de  $2/3$  (NEC-SE-VIVIENDA, 2015).

#### **3.6.8.4. V, cortante basal de diseño (DBF)**

La (NEC-SE-DS, 2015) establece la ecuación (23) para la determinación del cortante basal (V) en una dirección, que se define como el porcentaje en peso de

la estructura que actúa en reacción por parte del sistema, ante la aceleración del suelo en una dirección.

$$V = \frac{I S_a(T_a)}{R \Phi_P \Phi_E} * W \quad (23)$$

Dónde:

- V: Corte Basal.
- W: Carga sísmica reactiva.
- I: Factor de Importancia
- $S_a(T_a)$ : Espectro de diseño en aceleración.
- R: Factor de reducción de resistencia sísmica.
- $\Phi_P, \Phi_E$ : Coeficiente de configuración en planta y elevación.

Para obtener el valor de  $T_a$  la misma norma presenta las ecuaciones (24), (25) y (26) que se describen a continuación:

$$T = C_t * h_n^\alpha \quad (24)$$

Dónde:

- T: Período de vibración  $T_a$ .
- $C_t$ : Término que depende del tipo de edificio.
- $h_n$ : Altura de la edificación máxima.
- $\alpha$ : Coeficiente exponencial, equivalente a 1 para sistemas con muros.

$$C_t = \frac{0.0062}{\sqrt{C_m}} \quad (25)$$

$$C_m = \frac{100}{A_{eB}} \sum_{i=1}^{n_m} \left[ \left( \frac{h_n}{h_{mi}} \right)^2 \frac{A_{mi}}{1+0.83 \left( \frac{h_{mi}}{l_{mi}} \right)^2} \right] \quad (26)$$

Dónde:

- $A_{eB}$ : Área de edificación en la base ( $m^2$ ).
- $n_m$ : Número de muros de la edificación diseñados para resistir las fuerzas sísmicas en la dirección de interés.
- $h_{mi}$ : Altura del muro i (m).

- $A_{mi}$ : Área de cortante mínima en la sección de un muro estructural  $i$ , tomada en un plano horizontal, para el primer nivel de la estructura y en el sentido de estudio ( $m^2$ ).
- $l_{mi}$ : Longitud medida horizontalmente de un muro estructural  $i$  en el primer nivel y en la dirección de análisis (m).

Con este período se debe dimensionar la estructura y además se debe realizar interacciones consecutivas entre este período y la ecuación que está a continuación, hasta obtener una variación no mayor al 10% entre los dos períodos.

$$T_a = 2 \pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i \delta_i^2}{g \sum_{i=1}^n f_i \delta_i}} \quad (27)$$

Dónde:

- $w_i$ : Peso asignado al piso  $i$ , siendo una porción de la carga reactiva  $W$  [peso  $w$ /cargas  $W$ ].
- $f_i$ : Distribución de las fuerzas laterales en el piso  $i$ , aproximada.
- $\delta_i$ : Deflexión elástica de piso  $i$ , calculada usando  $f_i$ .

### 3.6.8.5. R, factor de reducción

El factor de reducción propuesto por la (NEC-SE-DS, 2015), indica que el valor de esta constante sea considerada, de tal manera que si las estructuras son muy dúctiles y cumplen los lineamientos propios de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, el valor del cortante basal pueda verse reducido directamente, además, se dispone de criterios como el tipo de estructura, el tipo de suelo, los períodos de vibración considerados y otros factores, el valor de  $R$  puede ir desde 1 hasta 8 para los diferentes sistemas estructurales, siendo 8 el valor al sistema de mayor ductilidad y 1 al de menor, de todo esto se puede tener un conocimiento más amplio en el capítulo 6.3.4. de la (NEC-SE-DS, 2015) y en las tablas N°15 y N°16 de la misma norma.

#### 3.6.8.5.1. Distribución vertical de las fuerzas sísmicas

La distribución de fuerzas en sentido vertical es muy similar a un triángulo, en el caso del sistema propuesto, al ser solo de un nivel, no es necesario considerar esta

distribución, pero la (NEC-SE-DS, 2015) propone en su capítulo 6.3.5. la ecuación (28) para obtener dicha distribución:

$$V_b = \sum_{i=1}^{n_p} F_{Li} ; V_{px} = \sum_{i=x}^{n_p} F_{Li} ; F_{Lx} = \frac{w_{px} h_{px}^{k_T}}{\sum_{i=1}^n w_{pi} h_{pi}^{k_T}} V \quad (28)$$

Dónde:

- $V_b$ : Cortante basal.
- $V_{px}$ : Fuerza Cortante en el piso x, de la estructura.
- $F_{Li}$ : Fuerza lateral, aplicada en el piso i.
- $F_{Lx}$ : Fuerza lateral aplicada en el piso x.
- $n_p$ : Número de pisos.
- $w_{pi}$ : Peso asignado al piso i.
- $w_{px}$ : Peso asignado al piso x.
- $h_{px}$ : Altura del piso x.
- $h_{pi}$ : Altura del piso i.
- $k_T$ : Factor relacionado al período de la estructura.

Para establecer el valor de k, la (NEC-SE-DS, 2015) presenta los siguientes rangos:

**Tabla 3.1. Rango de valores establecidos para  $k_T$ .**

Valor de T (s)	$k_T$
$\leq 0.5$	1
$0.5 < T \leq 2.5$	$0.75 + 0.5 T$
$> 2.5$	2

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera

#### 3.6.8.5.2. Distribución horizontal de las fuerzas sísmicas

Se desea que la fuerza cortante se dirija a cada elemento, por lo tanto, se debe tomar en cuenta la rigidez, la masa y los respectivos centros de rigidez y de masa. En estructuras regulares se considera un valor 5% de excentricidad, debido a la torsión accidental (NEC-SE-DS, 2015), de otro modo se debe determinar la excentricidad entre el centro gravedad y el centro de masas.

### 3.6.8.5.3. *P-Δ Efectos de segundo orden y $Q_i$ Índice de estabilidad*

Existen efectos P-Δ, que se forman a partir de efectos adicionales producidos por incrementos en las fuerzas internas y las derivas del sistema, se establece el índice de estabilidad  $Q_i$  en un rango de 0.1 a 0.3., que determina si se debe o no considerar dichos efectos, de ser el caso el factor  $f_{P-\Delta}$  debe ser multiplicado por las derivas de piso, fuerzas internas y los momentos resultantes del producto de las cargas laterales de diseño, la (NEC-SE-DS, 2015) propone las ecuaciones (29) y (30) descritas a continuación:

$$f_{P-\Delta} = \frac{1}{1 - Q_{ie}} \quad (29)$$

Dónde:

- $f_{P-\Delta}$ : Factor de mayoración.
- $Q_{ie}$ : Índice de estabilidad de piso i.

$$Q_{ie} = \frac{P_{pi} \Delta_{pi}}{V_{pi} h_{pi}} \quad (30)$$

Dónde:

- $P_{pi}$ : Suma de las cargas verticales, sobre el piso i.
- $\Delta_{pi}$ : Deriva de piso i.
- $V_{pi}$ : Fuerza de corte sísmico de piso i.
- $h_{pi}$ : altura de piso i.

### 3.6.8.6. **Carga sísmica Reactiva**

Para la determinación de la carga sísmica reactiva, es necesario establecer el peso total de la estructura, en este caso del sistema del módulo de superadobe, es decir, la carga muerta junto con su sobre carga de cubierta y acabados (NEC-SE-DS, 2015).

### 3.6.9. **CONTROL DE DERIVAS**

La deriva de piso se define como “la deformación relativa que sufre un piso en particular por la acción de una fuerza horizontal” (Valencia, Valencia, & Ñamo, 2010, pág. 3), matemáticamente se determina a través de la diferencia entre el desplazamiento del piso superior menos el desplazamiento del piso inferior.

La (NEC-SE-DS, 2015), en su capítulo 6.3.9 señala que se debe controlar que el valor máximo de derivas no sobrepase el 75% del desplazamiento debido a la fuerza lateral y todo esto multiplicado por el coeficiente de reducción R del literal 3.6.8.5. del presente trabajo, esta deriva a su vez, no puede ser mayor a la establecida en el literal 3.6.7.3 igualmente de este trabajo.

En adición se indica la ecuación (31) que determina la deriva calculada:

$$\Delta_{Mi} = 0.75 R \Delta_D \quad (31)$$

Dónde:

- $\Delta_{Mi}$ : Deriva inelástica máxima.
- $\Delta_D$ : Desplazamiento debido a la fuerza lateral de diseño.
- R: Factor de reducción de resistencia.

### 3.7. ANÁLISIS LINEAL DEL SISTEMA

El análisis estructural, consiste en determinar las deflexiones o deformaciones en un punto de la estructura o sistema, así como también las fuerzas internas que resultan al aplicar fuerzas externas (Camba, José; Chacón, Francisco; Pérez, Francisco, 1982), para el caso de las estructuras en nuestra región, las fuerzas externas en general, son provenientes de los sismos.

El análisis lineal a través del método de elementos finitos, en muchos campos de la ingeniería da una muy buena aproximación de resultados, el análisis estructural no se aparta de este criterio, ahora bien, hay que tener en cuenta ciertas consideraciones para poder aplicar dicho análisis lineal (SOLIDWORKS, 2011), al tratarse de estructuras de pórticos se considera: el equilibrio de fuerzas internas y externas en todos los elementos de la estructura, la compatibilidad de deformaciones de todos los elementos estructurales y la relación fuerza-desplazamiento (Camba, José; Chacón, Francisco; Pérez, Francisco, 1982).

El equilibrio de las fuerzas internas y externas se debe interpretar como: los elementos que forman parte de la estructura (del sistema) se encuentran en equilibrio si todo el sistema está en equilibrio, pero en el sistema de superadobe los

elementos estructurales son muros conectados por enlazamiento entre ellos, por lo tanto, las fuerzas se transmiten, así como los momentos.

Para el proceso de análisis lineal se toma como posta, el uso de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, la cual es su capítulo de diseño sísmico (NEC-SE-DS, 2015) indica la posibilidad de tomar a un sistema de masa y rigidez sometido a una fuerza y linealizar su comportamiento, como en las figuras 3.39 y 3.40. del capítulo 3.6.8. de esta sección.

### **3.7.1. RANGO LINEAL DE LOS MATERIALES**

Ahora bien, en la realidad ningún material se comporta linealmente en su totalidad, durante la existencia de cargas externas aplicadas sobre dicho material, siempre sufrirá algún tipo de deformación permanente, por otra parte la composición de los materiales no son en un 100% puros, o sea del mismo material, pese a eso se considera que los materiales para el análisis lineal son isotrópicos, con el fin de entender y asumir que tienen un comportamiento similar en las diferentes direcciones (Gere & Timoshenko, Mecánica de Materiales , 1990) con estos precedentes, se puede estimar como a priori a estudios más profundos tanto para el sistema de superadobe convencional como para el sistema de superadobe propuesto y todas las posibles y futuras modificaciones o adecuaciones a una realidad constructiva local.

### **3.7.2. ELECCIÓN DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL SAP2000**

Para determinar el uso del software para abordar cada problema, siempre será necesario tener conocimiento del método de análisis en el que se base el programa a usar, se debe tener en cuenta las facilidades que brinde para el usuario, cuan amigable sea, y lo más importante la exactitud de las soluciones ya que de esos resultados el usuario hará sus interpretaciones.

En este contexto, el programa SAP2000 sirve como una gran herramienta, partiendo de que usa el método de elementos finitos, además usa la diferenciación en el uso de tres tipos básicos de elementos como son: *line elements*, *surface elements* y *solid elements*, esto infiere en que cada tipo de elemento tiene un uso y análisis diferente.

### 3.7.2.1. Tipos de elementos

#### 3.7.2.1.1. Line Elements

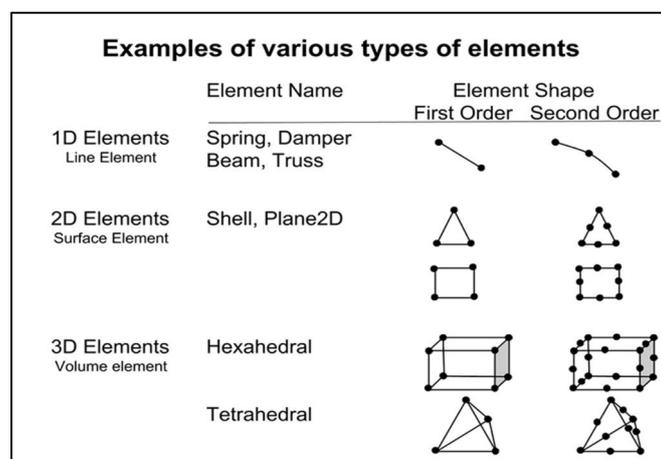
Los elementos “línea” pueden a su vez ser elementos “frame”, elementos “tendon” o elementos “cable”, los elementos frame son elementos que en sistemas estructurales representan a vigas y columnas, mientras que, los elementos tendon son los tensores y los elementos cable exactamente son eso, cables, estos elementos se establecen en una dimensión, tienen una condición de dos nodos y tres grados de libertad de traslación por nodo. (SAP2000, 2019)

#### 3.7.2.1.2. Surface Elements

Por otra parte, los elementos “superficie” se dividen en elementos “shell”, “plane” y “asolid”, estos elementos se determinan en dos dimensiones, en general pueden tener un mínimo de tres nodos y seis grados de libertad, tres de traslación y tres de rotación por nodo, son usados para superficies y se debe tener cuidado con el sentido de creación de dichos elementos (SAP2000, 2019).

#### 3.7.2.1.3. Solid Elements

Finalmente, los elementos “sólidos” son los elementos más similares al comportamiento de un elemento real, geoméricamente hablando, estos elementos se manejan en las tres dimensiones, resultan de un mínimo de seis lados, pero geoméricamente podrían generarse desde 5 lados, el programa se maneja por división de elementos de 6 lados, esto genera un mínimo de 8 nodos y cada nodo tiene 3 grados de libertad en traslación (SAP2000, 2019).



**Figura 3.41.** Ejemplo de cada tipo de elemento en el programa SAP2000.

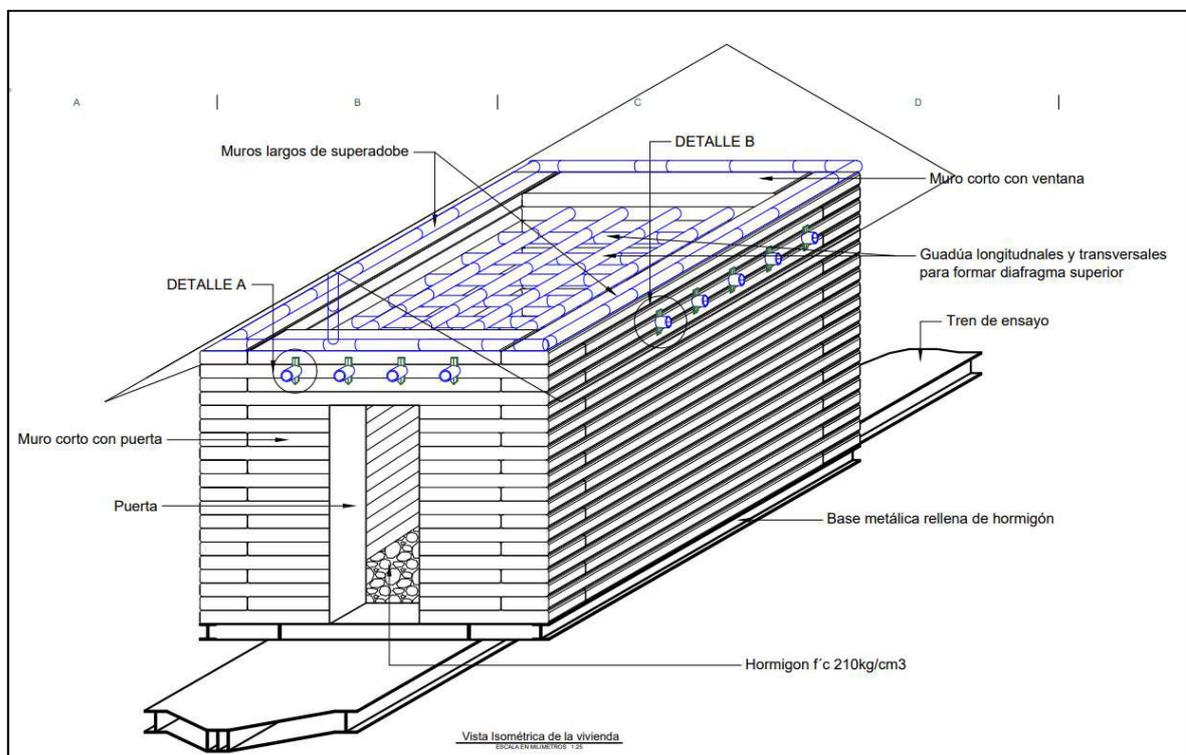
*Fuente:* (Quijano, 2021)

### 3.7.2.2. Diafragmas

El uso de un entrepiso de cubierta en los sistemas estructurales convencionales tanto de hormigón como de acero son extremadamente esenciales para integrar las paredes de forma apropiada y por ello son elementos de estudio muy profundizados. En este trabajo de investigación se llama al entrepiso de cubierta por analogía, un diafragma ya que es un elemento rígido indeformable.

#### 3.7.2.2.1. Diafragma de caña guadúa (GaK)

El sistema de superadobe convencional en general no requiere de diafragmas ya que su configuración ideal son domos y estos geoméricamente son estables, pero al realizar muros ortogonales como en el sistema propuesto se requiere de un diafragma que integre a los elementos muro; el diafragma que se pretende establecer es una malla de caña guadúa (GaK), la cual deberá ser anclada y sujeta a manera de empotramiento a cada elemento muro.



**Figura 3.42.** Entrepiso de cubierta plana con caña guadúa

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

## CAPÍTULO 4

### PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Los materiales usados en el proyecto son materiales elegidos de acuerdo a la técnica de construcción de superadobe convencional, teniendo en cuenta el requerimiento de que sean de fácil acceso, bajo costo y cumplan con el objetivo de la bioconstrucción, en este ámbito se estudió las propiedades del suelo, la mezcla suelo-cal, y la caña guadúa (*GaK*).

#### 4.1. PROPIEDADES DEL SUELO

##### 4.1.1. CLASIFICACIÓN SUCS DEL SUELO (PROCEDIMIENTO MANUAL-VISUAL)



**Figura 4.1.** Muestra de suelo tomada de la parroquia Calderón - Luz y Vida.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

Una primera forma de clasificar al suelo de manera simple y rápida es a través de la observación de: la graduación del suelo, su plasticidad y del contenido orgánico, con estas características a simple vista se puede clasificar al suelo como: suelo de partículas gruesas, suelo de partículas finas o suelos de contenido orgánico. (LEMSUR, 2014)

La primera fase consiste en describir las características físicas de la muestra de suelo, como el color y olor. Luego se debe tomar una porción de suelo en la mano, extenderla en la palma para determinar los porcentajes de partículas gruesas y partículas finas que constituyen a la muestra. (LEMSUR, 2014)

Como una clasificación preliminar, mediante un análisis visual del suelo que pasa previamente el tamiz 3", es decir, todas sus partículas son menores a los 7.5 cm de diámetro, una vez cerciorado que cumple esa característica, se puede determinar si la muestra de suelo es de partículas gruesas o partículas finas, entra en la clasificación de partículas gruesas cuando más de la mitad de partículas son distinguibles a simple vista, por otro lado, la muestra será de partículas finas, si más de la mitad de partículas no son distinguibles a simple vista y finalmente será un suelo orgánico o muy orgánico si se detecta materia orgánica o un olor a putrefacción junto con un color oscuro del suelo. (LEMSUR, 2014)

#### **4.1.2. CLASIFICACIÓN SUCS DEL SUELO (PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO)**

Como se mencionó en la sección anterior (sección 4.1.1.), se puede establecer una clasificación visual, pero una clasificación en laboratorio y bajo normas establecidas es necesaria para el estudio que se realiza en este trabajo. Es así que, al requerir una clasificación exacta del material, se debe cuantificar las características granulométricas y plásticas del material.

Para caracterizar una muestra de suelo siguiendo el "*Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)*", la muestra de suelo debe ser sometido a una serie de ensayos de laboratorio como son: granulometría a través de tamices, porcentaje de humedad, límite de plasticidad y límite líquido, los cuales están regidos a las respectivas normas ASTM para cada caso.

##### **4.1.2.1. Ensayo de granulometría por tamizado**



**Figura 4.2.** Tamices ordenados para la clasificación granulométrica del suelo.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

#### 4.1.2.1.1. Resumen

El objetivo en el ensayo es, indicar que distribución tiene las partículas que constituyen la muestra de suelo, de acuerdo a su tamaño, así clasificar al suelo de acuerdo al porcentaje en peso de partículas que cumplen con una determinada dimensión, haciendo uso de tamices estandarizados.

Para realizar el ensayo se usa la norma ASTM D2487-17, que determina la preparación de la muestra, y esta preparación consiste en: fraccionar la muestra por cuarteo y determinar el contenido de humedad natural, luego, tomar el peso de la muestra de suelo y lavar la muestra en la malla N°40 y N°200, con el objetivo de retirar los suelos finos, una vez retirados los suelos finos se retira la humedad, a través de un horno de temperatura constante que seca la muestra y se pesa para saber el porcentaje de peso de la muestra que pasó el tamiz N°200, si ese porcentaje es mayor al 50% se clasifica como suelo fino, en este caso se puede que determinar la granulometría por hidrómetro de ser necesario o directamente usar la carta de plasticidad, expuesta como figura N° 4 en la (ASTM D2487-17, 2017), además será necesario obtener dos límites, tanto el límite líquido como límite plástico cuyo procedimiento se muestra más adelante.

Para el caso en el que la muestra tenga más del 50% retenida en los tamices N°40 y N°200, se da el caso de que es un suelo grueso, puede clasificarse como arenas o gravas, por lo tanto, se lo debe separar en dos fracciones, si el porcentaje que pasa el tamiz N°4 es más del 50% en peso el suelo se clasificará como arena, si el porcentaje que no pasa el tamiz N°4 es mayor al 50% el suelo es considerado como gravas. (ASTM D2487-17, 2017)

El procedimiento para la granulometría es similar, tanto si la porción que, pasa el tamiz N°4 es mayor al 50% (arenas), como en el caso de que el porcentaje que no pasa el tamiz N°4 sea del 50% (grava), consiste en agitar una colocar de tamices y agitar la muestra de manera vertical y horizontal por un tiempo de 15 minutos, para luego pesar la fracción retenida en cada tamiz, si se retienen partículas en las aberturas de algún tamiz, dichas partículas no deben ser forzadas a pasar, más bien, con el uso de la brocha se deben retirar y ubicar en la porción que corresponden. (LEMSUR, 2014)

Los tamices a usar, para la fracción que corresponde a arenas son: N°4, N°10, N°20, N°40, N°100 y N°200 y una bandeja al final, mientras que, para la fracción de gravas los tamices a usar son: 4", 2", 1", 1/2", 3/8", N°4 y la bandeja, adicional en ambos casos luego de tamizar se debe comprobar que el porcentaje de pérdida sea menor a 1% del peso inicial. (LEMSUR, 2014)

#### 4.1.2.1.2. Equipo

- Balanza con aproximación de 0.01 g.
- Horno para secar a temperatura constante.
- Tamices requeridos bajo norma ASTM D421.
- Cepillo de alambre.
- Cápsulas.
- Brochas
- Franela.

#### 4.1.2.1.3. Cálculos

Para la granulometría ya sea para gravas o arenas, se registra los valores retenidos en cada tamiz, incluyendo el material de la bandeja se procede a verificar el error absoluto entre en peso inicial (antes del tamizado) y final (después del tamizado), si cumple con el error máximo del 1% se procede a calcular porcentajes retenidos en cada tamiz en base al peso, además, del porcentaje en peso acumulado y el porcentaje que pasa cada malla. (LEMSUR, 2014)

Finalizado esto, se grafica la curva granulométrica que, en la cual, el eje de las abscisas representa el diámetro de los tamices en escala logarítmica, mientras que, el eje ordenado se ubica el porcentaje que pasa en cada tamiz. (LEMSUR, 2014)

Cuando la fracción de muestra que pasa el tamiz N° 200 es menor al 5% se considera arenas o gravas limpias y la fracción que pasa el tamiz N°200 es superior al 12% sería arenas o gravas con finos. (ASTM D2487-17, 2017)

Si la fracción de material fino que pasa el tamiz N°200 se encuentra entre 5% al 2% es necesario determinar un "Coeficiente de Uniformidad  $C_u$ " y el "Coeficiente de Curvatura  $C_c$ " a través de las ecuaciones (32) y (33). (ASTM D2487-17, 2017):

$$Cu = \text{Coeficiente de uniformidad} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (32)$$

$$Cc = \text{Coeficiente de curvatura} = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}} \quad (33)$$

Donde:

- $D_{10}$ : Diámetro efectivo para el paso del 10% de peso de la muestra.
- $D_{30}$ : Diámetro efectivo para el paso del 30% de peso de la muestra.
- $D_{60}$ : Diámetro efectivo para el paso del 60% de peso de la muestra.

Además, si la fracción de muestra que pasa el tamiz N°200 es superior al 12% se deberá acudir a la carta de plasticidad. (ASTM D2487-17, 2017)

Con todos estos valores se debe acudir a la Tabla N°1 de la norma ASTM D2487-17, "Table 1 Soil Classification Chart", para establecer a que grupo de suelo pertenece, además de existir dificultad para determinar el valor del diámetro efectivo para el paso del 10% de peso de la muestra se puede usar una extrapolación. (ASTM D2487-17, 2017)

#### 4.1.2.2. Determinación del Límite Plástico



**Figura 4.3.** Materiales y muestra para prueba de límite plástico.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

#### 4.1.2.2.1. *Resumen*

El objetivo del ensayo es determinar de forma cualitativa el límite plasticidad, que se entiende por la cantidad de agua en la cual los suelos sufren el paso a un estado plástico de un estado semisólido, para este ensayo se usa la norma ASTM D4318.

Para este ensayo, se usa el porcentaje de suelos que pasa por el tamiz N°40 hasta obtener un mínimo de 150 g, luego se debe añadir agua para obtener una pasta homogénea con una distribución de humedad uniforme, para lograr eso se almacena la muestra en un recipiente sellado por al menos un día. (LEMSUR, 2014)

Humedecer la muestra hasta conseguir una pasta homogénea de suelo, hasta que pueda ser moldeada en la palma de la mano sin que la misma se pegue en las manos.

Amoldar en forma esférica de tal manera que la esfera tenga un diámetro de 1 cm aproximadamente. Luego moldear contra la superficie del vidrio para que se forme un rollo de espesor 3.2mm con unos 10mm de longitud con un peso máximo de 2g el cual debe presentar grietas mínimas al llegar al espesor deseado, se debe hacer tres rollos similares para determinar el límite líquido. (ASTM D4318-10e1, 2010)

Se puede secar o agregar agua para lograr que los rollos tengan un diámetro de 3.2mm de espesor, las grietas junto con el espesor deseado son el indicador de que la muestra está en el límite, finalmente pesar la muestras, los recipientes y dejar secar las muestras por 18 horas a 110 °C. (LEMSUR, 2014)

#### 4.1.2.2.2. *Equipo*

- Bandeja de vidrio plana.
- Recipientes.
- Espátula.
- Horno de secado de temperatura constante.
- Balanza con aproximación de 0.01 g.
- Piseta con agua.
- Alambre de 3.2 mm.

#### 4.1.2.2.3. Cálculos

El límite plástico, se calcula como el contenido de agua, por lo que es la relación entre la diferencia de suelo húmedo menos el suelo seco con respecto al suelo seco, expresado en porcentaje:

$$L_p = \frac{W_{\text{suelo hum+cáp}} - W_{\text{suelo seco+cápsula}}}{W_{\text{suelo seco+cápsula}} - W_{\text{cápsula}}} * 100 \quad (34)$$

Donde:

- $L_p$ : Límite plástico.
- $W_{\text{suelo hum+cap}}$ : Peso del suelo con humedad + peso de recipiente.
- $W_{\text{sueloseco+cápsula}}$ : Peso del suelo sin humedad + peso de recipiente.
- $W_{\text{cápsula}}$ : Peso del recipiente.

#### 4.1.2.3. Determinación del Límite Líquido



**Figura 4.4.** Instrumentos para el ensayo de límite líquido.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

##### 4.1.2.3.1. Resumen

Indicar el límite líquido de una muestra de suelo, a través del uso del dispositivo mecánico de Casagrande, el cual establece la fluencia de suelos tras un determinado número de golpes de manera normalizada.

Al igual que para el límite plástico se trabaja con la muestra que pasa el tamiz N° 40, la muestra debe ser humedecida uniformemente hasta obtener una pasta que no se pique en los dedos pero que sea moldeable en las manos, es necesario

hacer tanto el ensayo de límite líquido y el de límite plástico a la par, para establecer relaciones. (LEMSUR, 2014)

Como en todos los ensayos de laboratorio, se debe comprobar el estado óptimo de los instrumentos a usar, en este caso, específicamente del ranurador, y de la altura desde la que cae la copa del dispositivo mecánico de Casagrande. (LEMSUR, 2014)

El procedimiento se basa en ubicar una fracción de la mezcla homogénea de suelo, dentro de la copa cuando esté en estado de reposo, la mezcla se extiende con una espátula, se debe cuidar de que no existan burbujas de aire atrapado, luego con el uso del acanalador, dicha apertura debe separar por completo a la muestra que se encuentra en la copa. (ASTM D4318-10e1, 2010)

Se debe girar la manivela y la copa deberá caer a una intensidad de 2 golpes por cada segundo, hasta que la parte del fondo de la mezcla se vuelva a unir en al menos en 1.3 cm de longitud, se debe repetir el proceso preferiblemente con el incremento de agua de agua, hasta que se logre unir las dos partes de la mezcla con un número promedio de 25 golpes, es decir, dos ensayos por debajo de los 25 golpes y dos ensayos por arriba de los 25 golpes. (ASTM D4318-10e1, 2010).

Se debe cuidar que el suelo se una por fluidez y no por deslizamiento del mismo, si después del incremento de agua el suelo sigue deslizándose, el ensayo no es aplicable y no se puede obtener el límite líquido de dicho suelo. (LEMSUR, 2014)

#### 4.1.2.3.2. *Equipo*

- Dispositivo Mecánico calibrado (Copa de Casagrande).
- Acanalador ASTM para ensayo.
- Recipientes.
- Espátula.
- Piseta con agua.
- Franela o esponja.
- Horno de secado de temperatura constante.
- Balanza con aproximación de 0.01 g.

#### 4.1.2.3.3. Cálculos

Una vez obtenidos los datos, se trabajará en una escala aritmética en el eje ordenado que representa el contenido de agua y en el otro eje, el de las abscisas, en una escala logarítmica, se representará el número de golpes. El límite líquido se determina como la cantidad de agua de la muestra:

$$L_l = \frac{W_{\text{suelo hum+cáp}} - W_{\text{suelo seco+cápsula}}}{W_{\text{suelo seco+cápsula}} - W_{\text{cápsula}}} * 100 \quad (35)$$

Donde:

- $L_l$ : Límite líquido.
- $W_{\text{suelo hum+cap}}$ : Peso del suelo con humedad + peso de recipiente.
- $W_{\text{sueloseco+cápsula}}$ : Peso del suelo sin humedad + peso de recipiente.
- $W_{\text{cápsula}}$ : Peso de la cápsula

Se delinea una recta que aproxime de forma destacada los puntos establecidos en la gráfica del número de golpes frente al contenido de agua, y con esta recta se determina el límite líquido que corresponda a 25 golpes.

#### 4.1.2.4. Determinación del Contenido de Humedad



**Figura 4.5.** Peso de muestra, para determinación de contenido de humedad.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

#### 4.1.2.4.1. Resumen

El ensayo tiene el objetivo de determinar la cantidad de agua se encuentra en una muestra de suelo, con respecto a la misma muestra de suelo en estado total mente

seco en porcentaje, el ensayo es realizado junto con otros ensayos para estimar cualitativamente algunas características de los suelos. (LEMSUR, 2014)

La norma que establece este ensayo es la norma ASTM D 2216-10. Existen algunas maneras de realizar este ensayo, en este trabajo se implementará el método de secado al horno de temperatura constante, para el cual se requiere una cantidad suficiente de suelo que está en base al tamaño máximo de las partículas. (LEMSUR, 2014)

Una descripción completa de la muestra es muy necesaria, la cual debe contener las principales características físicas, para identificar de la mejor manera posible a la muestra, adicional el horno no puede variar la temperatura de 105 °C ya que de ser así el suelo variará sus propiedades debido a la pérdida de materia orgánica. (ASTMD2216, 2010)

Para el procedimiento como tal, se debe numerar y anotar el número de capsula junto con el peso en una hoja de registro. Si se trabaja con un suelo fino se debe colocar una cantidad mínima de 100 g de suelo húmedo, si el suelo es grueso se debe usar 500 g, tomar el peso del recipiente junto con el peso del suelo y registrarlo en la hoja, introducir las cápsulas al horno por 18 horas consecutivas, sin variar la temperatura del horno, finalmente retirar las cápsulas del horno y esperar a que las capsulas metálicas junto con la muestra enfríen para tomar la medida del peso de suelo seco en las cápsulas y registrar el peso en la hoja de registro. (ASTMD2216, 2010)

#### 4.1.2.4.2. *Equipo*

- Recipientes metálicos.
- Espátula.
- Franelas o esponjas.
- Horno de secado de temperatura constante.
- Balanza con aproximación de 0.01 g.

#### 4.1.2.4.3. *Cálculos*

El contenido de humedad viene dado por la relación entre el peso de agua y el peso de sólidos:

$$W\% = \frac{W_a}{W_{ss}} = \frac{W_{rh} - W_{rs}}{W_{rs} - W_r} * 100\% \quad (36)$$

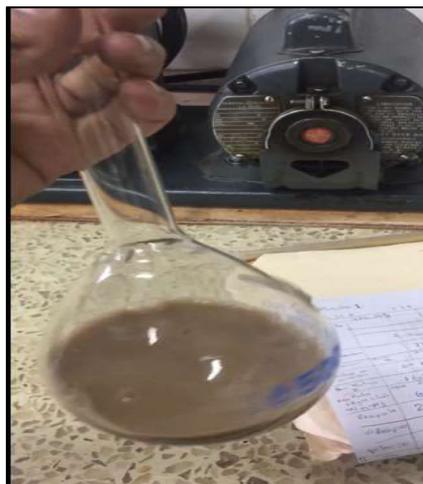
Donde:

- W%: Contenido de humedad.
- W<sub>a</sub>: Peso del agua.
- W<sub>ss</sub>: Peso del suelo seco.
- W<sub>rh</sub>: Peso del envase + Suelo Húmedo.
- W<sub>rs</sub>: Peso del envase + Suelo Seco.
- W<sub>r</sub>: Peso del envase.

#### 4.1.3. DENSIDAD DEL SUELO

La relación entre el peso específico del estado sólido (el suelo, sin considerar el contenido de agua y de aire) y el peso específico del agua destilada acorde a temperatura normal o ambiente en el rango de 15 °C a 30 °C a la presión de 1 atmósfera, se denomina densidad de sólidos de un material (LEMSUR, 2014). Para determinar el peso específico del agua a la temperatura ambiente correspondiente se puede usar la tabla N°2 de la norma (ASTM D854-14, 2014).

##### 4.1.3.1. Densidad de sólidos (método de reacomodo del suelo)



**Figura 4.6.** Picnómetro calibrado para ensayo de densidad de sólidos.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

#### 4.1.3.1.1. Resumen

Para determinar el peso específico (gravedad específica) del material mediante el método del reacomodo del suelo se usa la norma ASTM D854, para ello se debe revisar que todos los materiales estén calibrados y en óptimas condiciones de uso, en especial el matraz.

El ensayo se realiza con el suelo que pasa el tamiz N° 4, si el suelo es cohesivo se debe hacer con la humedad natural, caso contrario se acepta que el suelo sea seco en el horno previamente, el ensayo se hace por duplicado para verificar datos. (LEMSUR, 2014)

Básicamente el ensayo consiste en la comparación de la densidad de una sustancia con respecto a otra, bajo las mismas condiciones. (ASTM D854-14, 2014)

Tomar una cantidad de suelo de aproximadamente 60 g previamente seca por 18 horas a una temperatura constante de 105 °C, dejar enfriar a temperatura ambiente del laboratorio. Por otra parte, tomar el peso matraz calibrado a este matraz colocar 100 cm<sup>3</sup> de agua destilada y volver a pesar esta vez en conjunto, el matraz con el contenido de agua, anotar todo en una hoja de registro. (LEMSUR, 2014)

Colocar el embudo de vidrio en el matraz con agua y con mucho cuidado verter la muestra de suelo en el interior, evitando que el suelo se pegue en el cuello del matraz o a su vez que salpique el agua en el interior, al final con el uso de una Piseta se debe enjuagar el cuello para desprender el material adherido al cuello y hacer que descienda todo el material. (ASTM D854-14, 2014)

Luego, con una bomba de vacío y con mucho cuidado extraer todo el aire del interior de la mezcla suelo agua, durante aproximadamente de 10 a 15 minutos, para lo cual se puede girar suavemente el matraz para lograr extraer el aire en su totalidad. (ASTM D854-14, 2014)

Adicionar agua hasta unos 2 cm antes del distintivo de aforo del matraz, se lo debe hacer de tal forma que el agua que ingresa no genere burbujas en el interior, aplicar la bomba de vacío nuevamente para extraer todo el aire restante. (ASTM D854-14, 2014)

Secar el matraz por su parte exterior y completar el llenado del matraz con agua hasta la marca de aforo, para luego secar el interior del cuello, una vez seco se

procede a obtener el peso del conjunto (matraz-agua-suelo) y anotar en la hoja de registro. (LEMSUR, 2014)

Tomar la temperatura del interior del matraz, tanto en el fondo, en el medio como en la parte superior, si la temperatura varía en más de 0.5 °C se debe agitar el matraz. Se consulta la curva de calibración del matraz para obtener el peso del matraz al contener agua hasta el distintivo de aforo, a la temperatura determinada (LEMSUR, 2014).

#### 4.1.3.1.2. Equipo

- Balanza con precisión de 0.01 g.
- Horno de temperatura constante (110 °C±5° C) con ventilación.
- Picnómetro (Matraz calibrado).
- Termómetro con precisión de 0,1° C hasta 50° C.
- Bomba de vacío.
- Pipeta.
- Piseta.
- Embudo de vidrio.
- Cápsulas metálicas.
- Agua destilada.
- Espátula.
- Franela y esponja.

#### 4.1.3.1.3. Cálculos

El peso específico se determina con la relación de la densidad de la muestra y la densidad de agua a la temperatura de ensayo:

$$M_{\rho a, t} = M_{pc} + (V_p * \rho_{a, t}) \quad (37)$$

Donde:

- $M_{\rho a, t}$ : Masa del picnómetro más agua (a temperatura de ensayo) (g).
- $M_{pc}$ : Masa del picnómetro (g).
- $V_{pc}$ : Volumen del picnómetro hasta la marca de aforo (cm<sup>3</sup>).
- $\rho_{a, t}$ : Densidad del agua (a temperatura de ensayo) (g/cm<sup>3</sup>).

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_{a,t}} = \frac{M_{ss}}{(M_{\rho w,t} - (M_{\rho sa,t} - M_{ss}))} \quad (38)$$

Donde:

- $G_t$ : Gravedad específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).
- $\rho_s$ : Densidad del suelo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).
- $\rho_{a,t}$ : Densidad del agua (a temperatura de ensayo) ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).
- $M_{ss}$ : Masa del suelo seco (g).
- $M_{\rho sa,t}$ : Masa del picnómetro, agua y suelo (a temperatura de ensayo) (g).

$$G_{20^\circ\text{C}} = K * G_t \quad (39)$$

Donde:

- $K$ : Coeficiente de temperatura a  $20^\circ\text{C}$  obtenido de la tabla N° 2 de la (ASTM D854-14, 2014).
- $G_{20^\circ\text{C}}$ : Gravedad específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) del suelo a  $20^\circ\text{C}$ .

## 4.2. PROPIEDADES DEL SUELO Y DE LA MEZCLA SUELO-CAL

### 4.2.1. COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR

#### 4.2.1.1. Prueba Proctor Estándar



**Figura 4.7.** Muestra de suelo, al realizar prueba de Proctor estándar.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

#### 4.2.1.1.1. *Resumen*

El objetivo de este ensayo es definir la correspondencia entre la cantidad de agua óptimo y el peso unitario seco de la muestra, ya sea de la muestra de suelo de Calderón o de las diferentes combinaciones de muestras de suelo-cal a usar. La norma a usar para este ensayo es la norma ASTM D698-12-e2

Las propiedades o beneficios que se logran con una buena compactación son: aumentar la resistencia, disminuir la capacidad de deformación, disminuir la permeabilidad, disminuir la susceptibilidad a la erosión y disminuir los espacios.

En el ensayo se busca la humedad óptima del material (suelo o suelo-cal), que es cuando se obtiene el máximo peso unitario a una determinada humedad, esto se logra al aumentar el peso volumétrico a través de la aplicación repetida de cargas de impacto o amasado.

El ensayo se hace a través de la energía mecánica, al dejar caer un pistón de peso conocido sobre un molde circular con un volumen conocido, en el cual, se coloca en tres capas, cada capa es una porción de muestra equivalente a un tercio del volumen total del molde.

La muestra a trabajar es: para la muestra de suelo, se trabajará con el suelo que ha pasado el tamiz N° 4, es decir, arenas y las combinaciones de suelo-cal al 4%, 8% y 12%. Se requiere un peso de muestra o mezcla suelo cal aproximado de entre 10 kg a 12 kg. Todas las muestras de material deben ser humedecidas con una determinada cantidad de agua inicial, alrededor del 2% al 3%, el agua debe ser dispersada por todo el material, los porcentajes de agua van incrementando alrededor de un 3% a 5% o según se lo determine en cada ensayo.

El cilindro o molde, así como el pistón deben ser de dimensiones y pesos conocidos, el cilindro debe ser pesado sin el collarín, estos valores se deben apuntar en la hoja de registro.

El pistón apisona con 25 golpes uniformemente a cada capa de la muestra, el llenado del cilindro se hace en tres capas de muestra, con una distribución similar, se debe mover la muestra después de cada 25 golpes para dar uniformidad. Una vez que se ha llenado el molde hasta alcanzar la mitad de la altura del collarín y se ha apisonado eficazmente se debe retirar la muestra del suelo en exceso, también

se retira el collarín, se enraza al borde del cilindro, para luego determinar la cantidad de humedad de la muestra apisonada y el peso del volumen de la muestra más el peso del cilindro. (Braja, 2001)

Se agrega agua en porcentajes desde el 5% y se va a aumentado un 3% en cada nuevo ensayo, el número de ensayos requeridos son dos antes del máximo y dos después de haber alcanzado el máximo de humedad.

Luego se retira la muestra del cilindro, de esa muestra se debe determinar el contenido de humedad por duplicado, la muestra debe ser disgregada y separada por completo en la bandeja, se puede usar un martillo de hule, para agregar la siguiente cantidad de agua.

Este proceso se debe repetir hasta observar que en la hoja de registro se produce primero un incremento del peso de la muestra hasta que se reduzca drásticamente.

#### *4.2.1.1.2. Equipo*

- Bandejas metálicas grandes.
- Balanza con exactitud de 0.01 g.
- Horno de temperatura constante ( $110\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{ C}$ ), ventilado.
- Moldes de compactación con extensión y base.
- Martillo de compactación de 2.5 kg de peso
- Martillo con cabeza hule o caucho.
- Cápsulas metálicas y bandejas.
- Espátulas y enrazadores.

#### *4.2.1.1.3. Cálculos*

Se desarrolla una curva que relaciona en el eje de las abscisas el porcentaje de humedad y en el eje de las ordenadas la densidad o (peso específico seco) para cada porcentaje, de la cual el valor que se toma es el máximo de la parábola que define la humedad óptima y la densidad seca máxima.

Se puede determinar tanto el peso específico húmedo de compactación con la ecuación (40), el peso específico seco se obtiene a través de la ecuación (41) y el peso específico sin vacíos de aire con la ecuación (42):

$$\gamma = \frac{W_{sc}}{V_{(mol)}} \quad (40)$$

Donde:

- $\gamma$ : Peso específico húmedo de compactación ( $\text{g/cm}^3$ ).
- $W_{sc}$ : Peso del suelo compactado en el molde (g).
- $V_{(mol)}$ : Volumen del molde ( $\text{cm}^3$ ).

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{hc}}{1 + \frac{w(\%)}{100}} \quad (41)$$

Donde:

- $\gamma_d$ : Peso específico seco ( $\text{g/cm}^3$ ).
- $w$  (%): Porcentaje cantidad de agua (%).
- $\gamma_{hc}$ : Peso específico de humedad de compactación ( $\text{g/cm}^3$ ).

$$\gamma_{zat} = \frac{\gamma_w}{w + \frac{1}{G_{ss}}} \quad (42)$$

Donde:

- $\gamma_{zat}$ : Peso específico sin vacíos de aire ( $\text{g/cm}^3$ ).
- $\gamma_w$ : Peso específico del agua ( $\text{g/cm}^3$ ).
- $w$ : Contenido de agua (%).
- $G_{ss}$ : Densidad de sólidos del suelo (–).

#### 4.2.2. ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

Para el conocimiento de los esfuerzos cortantes de una muestra de suelo o de suelo-cal, existen varios tipos de ensayos, se resalta que el trabajo de los muros de la vivienda propuesta será en un inicio a carga vertical, durante su construcción.

#### 4.2.2.1. Ensayo de Compresión Simple



**Figura 4.8.** Ensayo a compresión simple de la muestra de suelo.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

##### 4.2.2.1.1. Resumen

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a carga axial, tanto de la muestra de suelo de Calderón como de las muestras de las mezclas de suelo-cal, a través del ensayo de compresión simple, para ello el ensayo se toma como guía la norma ASTM D2166-16.

El ensayo se basa en aplicar una fuerza para producir una deformación axial, en el cual se toman los valores del dial hasta la falla de la muestra y finalmente se determina el contenido de humedad. (ASTM D2166M-16, 2016)

Se trabaja con muestras alteradas o reconstituidas, por lo que un primer paso es elaborar las diferentes probetas de ensayo. A través del proceso de Proctor estándar se determina el contenido de humedad óptimo y la densidad, una vez que se moldea la muestra, ya sea para la muestra de suelo o para las mezclas de suelo-cal, con el porcentaje de humedad óptimo para cada caso, se recorta o retira los extremos perpendiculares al eje longitudinal de la muestra (tallado de la muestra) (ASTM D2166M-16, 2016)

Se talla las probetas hasta cumplir la especificación de la probeta a ensayar, es decir, que la altura de la probeta podrá ser entre 2 y 2.5 veces el diámetro:  $h$  (altura) =  $2 * \Phi$  (diámetro), el tamaño recomendado es que el diámetro sea de 35mm por lo tanto la altura será de 70mm aproximadamente, las medidas del diámetro se deben tomar en la parte inferior, media y superior de la probeta, así también, se debe medir

en tres regiones la altura y pesarla, anotar todos los datos en la hoja de registro (ASTM D2166M-16, 2016)

Se coloca la muestra en el dispositivo de carga, con sumo cuidado debe ser centrada en la base, se pone en contacto (con contacto) mínimo con la placa superior. Se establece la velocidad de ensayo. Se coloca el indicador de deformación y se establece en cero para iniciar el ensayo. Se comienza a aplicar la carga y se toma lecturas tanto de carga como de deformación, las lecturas deben hacerse aproximadamente durante 15 minutos o hasta que la muestra presente fallas visibles. (LEMSUR, 2014)

Finalmente se esquematiza la falla de la probeta o se toma fotografías de la misma, también se determina el contenido de humedad de la probeta.

#### 4.2.2.1.2. *Equipo*

- Balanza con precisión de 0.01 g.
- Horno de temperatura constante (110 °C±5° C), ventilado.
- Moldes de compactación con extensión y base.
- Martillo de compactación de 2.5 kg de peso.
- Cápsulas metálicas y bandejas.
- Tallador y cuchillo.
- Dispositivo de carga axial.
- Indicador de deformación.
- Cronómetro.

#### 4.2.2.1.3. *Cálculos*

Se presenta una curva que relaciona la deformación unitaria y el esfuerzo normal:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (43)$$

Donde:

- $\varepsilon$ : Deformación axial (--).
- $\Delta L$ : Variación de la longitud del espécimen (mm).
- $L_0$ : Longitud inicial del espécimen (mm).

$$A_{st} = \frac{A_0}{\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)} \quad (44)$$

Donde:

- $A_{st}$ : Área de sección transversal ( $\text{mm}^2$ )
- $A_0$ : Área de sección transversal inicial ( $\text{mm}^2$ )
- $\varepsilon$ : Deformación axial (--).

$$\sigma_c = \frac{P}{A_{st}} \quad (45)$$

Donde:

- $\sigma_c$ : Esfuerzo de compresión (kPa).
- $P$ : Carga aplicada (kN).
- $A_{st}$ : Área de la sección transversal ( $\text{mm}^2$ )

#### 4.2.3. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

El ensayo de corte directo es un ensayo muy simple en la práctica y provee de valores sobre la falla por corte del suelo, debido a que la falla a corte de un suelo se produce por una combinación de esfuerzos normales y tangenciales, se debe tener en cuenta este ensayo.

##### 4.2.3.1. Ensayo de Corte directo



**Figura 4.9.** Ensayo a corte directo de la muestra de suelo.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

#### 4.2.3.1.1. *Resumen*

El objetivo del ensayo es, definir la resistencia al corte de una muestra de suelo de Calderón y de las muestras de las mezclas de suelo-cal (4%, 8% y 12%), mediante el ensayo de corte directo al suelo. La norma que se toma como guía para este ensayo es la norma ASTM D3080 y ASTM D3080M-11

El procedimiento para la obtención de las muestras remoldadas, tanto para suelos alterados o para la mezcla-suelo cal, es a través del ensayo de Proctor estándar, en el cual se establece el contenido de humedad óptimo y la densidad correspondiente. Las dimensiones de las probetas son talladas de tal manera que la altura sea dos veces el diámetro, con un diámetro no mayor a los 35mm. (Braja, 2001)

Una vez que se haya determinado las dimensiones de la muestra, necesarias para que quepan en los anillos de corte, se determina el volumen y el área de sección, además se registró tanto el peso de la muestra como el peso de los anillos en la hoja de registro, se debe colocar la muestra dentro de los anillos, en el dispositivo (caja de corte), que posee un plano de falla horizontal y se establece la velocidad mínima de carga. (ASTM D3080-11, 2011)

A continuación, se debe colocar la carga vertical para generar el esfuerzo normal, el incremento del esfuerzo normal va desde los 0.5 kg/cm<sup>2</sup> a 1.0 kg/cm<sup>2</sup> y finalmente a 2.0 kg/cm<sup>2</sup>. Al iniciar el ensayo, ajustar la máquina de ensayo justo antes de que empiece el corte de la muestra, es decir, antes de que la máquina empiece a desplazar uno de los anillos respecto al otro, en ese momento poner en cero el dial de la lectura de deformación como de el de fuerza lateral. (LEMSUR, 2014)

Tomar registro del desplazamiento relativo de un anillo respecto al otro y también de la fuerza, la cual debe ser aplicada cuasi estáticamente.

Finalmente, la toma del contenido de humedad de la muestra ensayada es necesario también registrarla en la hoja de registro.

#### 4.2.3.1.2. *Equipo*

- Balanza con precisión de 0.01 g.
- Horno de temperatura constante (110 °C±5° C), ventilado.
- Moldes de compactación con extensión y base.

- Martillo de compactación de 2.5 kg de peso.
- Cápsulas metálicas y bandejas.
- Tallador y cuchillo.
- Dispositivo de carga axial y lateral.
- Pesas
- Indicador de deformación.

#### 4.2.3.1.3. Cálculos

Se presenta una curva que relaciona la deformación lateral y el esfuerzo corte en tres variantes del esfuerzo normal 0.5 kg/cm<sup>2</sup>, 1.0 kg/cm<sup>2</sup> y 2.0 kg/cm<sup>2</sup>, adicional se presenta la recta que relaciona el esfuerzo normal con el esfuerzo de corte:

$$D_p = \frac{D_{inf} + D_{med} + D_{sup}}{3} \quad (46)$$

Donde:

- $D_p$ : Diámetro promedio (mm).
- $D_{inf}$ : Diámetro inferior (mm).
- $D_{med}$ : Diámetro medio (mm).
- $D_{sup}$ : Diámetro superior (mm).

Como ya se dijo el ensayo consiste en determinar una envolvente de falla que tiene la forma de  $f(\tau) = c + \sigma \tan \Phi$ :

$$f(\tau) = c + \sigma \tan \varphi \quad (47)$$

Donde:

- $f(\tau)$ : Esfuerzo cortante (kg/cm<sup>2</sup>).
- $c$ : Cohesión del suelo (kg/cm<sup>2</sup>).
- $\sigma$ : Esfuerzo normal (kg/cm<sup>2</sup>).
- $\Phi$ : Ángulo de fricción interna (rad).

#### 4.2.4. ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL “UU”



**Figura 4.10.** Máquina de ensayo de compresión triaxial.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

##### 4.2.4.1. Ensayo estándar de compresión triaxial no consolidada no drenada (UU)

###### 4.2.4.1.1. Resumen

El objetivo del presente ensayo es definir la resistencia al esfuerzo cortante y la relación esfuerzo-deformación, tanto del suelo natural (Muestra de suelo de Calderón) como de las mezclas de suelo con las diferentes proporciones de hidróxido de calcio a usar. La norma que rige este ensayo es la norma ASTM D2850-15.

La utilidad del ensayo es de gran aporte a las obras de ingeniería por los datos que arroja y es uno de los métodos más fiables, el esfuerzo cortante es “la resistencia interna que ofrece la masa de suelo por área unitaria para resistir la falla al deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él”. (Salas & LanammeUCR, 2011)

Consiste en tallar una muestra cilíndrica, revestirla con látex y ensayarla bajo condiciones donde no se permite el drenaje del agua que se concentra en los poros, la compresión se realiza en una cámara, el ensayo es rápido de tal manera que la consolidación no puede ocurrir y el drenaje de la muestra es cero. (Salas & LanammeUCR, 2011)

Un ensayo sin consolidación ni drenaje (UU), es aplicable cuando se asume que las cargas son aplicadas a gran rapidez y la presión de agua no se disipa. (Salas & LanammeUCR, 2011)

Para iniciar el ensayo, al igual que para el ensayo de corte directo o el ensayo de carga axial, se debe tallar las muestras, bajo el criterio de humedad óptima y densidad correspondiente a esa humedad óptima, tras realizar el ensayo de Proctor estándar. (ASTM D2850-15, 2015)

Las probetas deben ser talladas con las dimensiones de un diámetro similar a 35mm y una altura correspondiente a 2 veces o 2.5 veces como máximo, se debe anotar en la hoja de registro la identificación de cada probeta, es necesario tallar tres muestras muy similares para tipo de muestra de suelo o muestra de combinación de suelo-cal. En la hoja de registro además se debe anotar de las dimensiones y características de las probetas, el contenido de humedad y el volumen de las mismas. (ASTM D2850-15, 2015)

Para iniciar el ensayo la muestra debe colocada en el interior de una banda de látex de características conocidas. El espécimen puede ser sometido a saturación o drenaje, para lo cual es necesario el uso de discos porosos, los cuales son colocados en la parte superior y en la parte conectando así el sistema de saturación o drenaje al espécimen.

Las presiones que actúan en este tipo de pruebas pueden ser variadas, en las tres orientaciones: "X", "Y" y "Z", las presiones que actúan sobre el ejemplar de suelo, permiten efectuar mediciones sobre las propiedades del suelo en forma completa. Muchos autores llaman a los esfuerzos principales como: esfuerzo mayor ( $\sigma_1$ ), esfuerzo intermedio ( $\sigma_2$ ) y esfuerzo mínimo ( $\sigma_3$ ). (Salas & LanammeUCR, 2011)

Se aplica un esfuerzo axial en primera instancia, y una vez calibrado se aplica el esfuerzo lateral, es decir, se llena la cámara con líquido de confinamiento y se da presión al fluido, así se genera los tres esfuerzos antes mencionados.

Se pesa toda la muestra antes y después del ensayo para comprobar el contenido de humedad y tomar una fotografía con el antes y después para constatar el tipo de falla. (LEMSUR, 2014)

#### 4.2.4.1.2. Equipo

- Balanza con exactitud de 0.01 g.
- Horno de temperatura constante (110 °C±5° C), ventilado.
- Cápsulas metálicas y bandejas.
- Espátulas y enrazadores.
- Panel triaxial.
- Equipo automático de cambio de volumen.
- Prensa triaxial.
- Cámara triaxial.
- Transductores y Dataloger.
- Equipo secundario.

#### 4.2.4.1.3. Cálculos

Se desarrolla una curva que relaciona en el eje de las abscisas a la deformación axial en porcentaje y en el eje ordenado el esfuerzo desviador:

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_i} \quad (48)$$

Donde:

- $\epsilon$ : Deformación axial para la carga axial dada.
- $\Delta H$ : Cambio de altura de espécimen como lea el indicador de la deformación.
- $H_i$ : Altura inicial del ejemplar de prueba, sin tomar cualquier cambio en la longitud antes de la carga.

$$A = \frac{A_0}{1 - \epsilon} \quad (49)$$

Donde:

- $A$ : Promedio del área de sección transversal del espécimen.
- $A_0$ : Promedio inicial del área de sección transversal del espécimen.
- $\epsilon$ : Deformación axial para la carga axial dada.

$$D = D_0 \left(1 - \frac{\Delta H}{H_i}\right) \quad (50)$$

Donde

- D: Promedio del diámetro de sección transversal del espécimen.
- D<sub>0</sub>: Promedio inicial del diámetro de sección transversal del espécimen.
- ΔH: Cambio de altura de espécimen como lea el indicador de la deformación.
- H<sub>i</sub>: Altura inicial del ejemplar de prueba menos cualquier cambio en la longitud antes de la carga.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A} \quad (51)$$

Donde:

- $\sigma_1 - \sigma_3$ : Diferencia de esfuerzos principales (esfuerzo desviador)
- P: Medida de la carga axial aplicada.
- A: Promedio del área de sección transversal del espécimen.

#### 4.3. PROPIEDADES DE LA CAÑA GUADÚA (*GaK*)



**Figura 4.11.** Caña guadúa (*GaK*) usada para los diferentes ensayos.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

La caña *guadúa* como cualquier producto, en este caso, planta, de la naturaleza no tiene la posibilidad de tener una réplica igual a otra en un 100% como ocurren con

productos manufacturados como el acero, pero por ello se estandarizan ciertos parámetros, que dan una buena aproximación de las propiedades que un grupo o especie, que cumplan con un tratamiento previo o una selección específica y con ello se puede hablar de propiedades de un material, tanto físicas o mecánicas. (Herrera & Viteri, 2018)

#### 4.3.1. CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA CAÑA GUADÚA (*GaK*)



**Figura 4.12.** Caña guadúa (*GaK*) antes de ser cortada a medida para ensayo de contenido de humedad.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

##### 4.3.1.1. Resumen

El objetivo de este ensayo es definir el contenido de humedad de la caña guadúa (*GaK*), para lo cual, se basa en la diferencia de pesos con y sin humedad respecto a su peso in situ, para ello se toman mediciones hasta comprobar una diferencia de peso de 0.01g entre dos medidas consecutivas. La norma a usar para guía es la norma NTC5525.

El ensayo se realiza en conjunto con otros ensayos como el ensayo de densidad o después de ensayos mecánicos. Se deben cortar pedazos prismáticos de 2.5 cm de ancho por 2.5 cm de alto, el espesor es equivalente al espesor de la pared, además, el contenido de humedad debe ser determinado después de cada ensayo. (NTC5525, 2007)

Se toma el peso de cada probeta con una exactitud de 0.01g y se anota en una hoja de registro que identifique correctamente a cada probeta. En el horno se

colocan tres probetas por cada muestra para corroborar valores, la temperatura del horno debe ser constante y debe ser similar a 103 °C. (ISO 22157:2019(E), 2019)

Retirar las muestras luego de 24 horas de secado, pesar y volver a introducir las probetas al horno para retirarlas al paso de 2 horas y volver a tomar el peso de las probetas, este proceso se debe repetir hasta que la diferencia de pesos entre dos pesos consecutivos sea menor a 0.01g. (NTC5525, 2007)

#### 4.3.1.2. Equipo

- Balanza con precisión de 0.01 g.
- Horno de temperatura constante (103 °C±2° C), ventilado.
- Cápsulas metálicas y bandejas.

#### 4.3.1.3. Cálculos

A partir de la pérdida de masa, se determina el contenido de humedad, que será el valor de la media aritmética de los resultados individuales de cada probeta:

$$C_oH_u = \frac{m_i - m_{ps}}{m_{ps}} \times 100 \quad (52)$$

Donde

- $C_oH_u$ : Contenido de humedad (%).
- $m_i$ : Masa inicial, antes del secado (g).
- $m_{ps}$ : Masa de la probeta después del secado (g).

#### 4.3.2. DENSIDAD DE LA CAÑA GUADÚA (*GaK*)



**Figura 4.13.** Probetas de caña guadúa (*GaK*) para ensayo de densidad.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

#### 4.3.2.1. Resumen

El objetivo de este ensayo es definir la densidad a partir de la masa anhidra y el volumen húmedo de la caña guadúa (*GaK*). Este ensayo se hace conjuntamente con el ensayo de contenido de humedad, de hecho, se usa las mismas probetas y la misma hoja de registro.

Se debe determinar el volumen en condición húmeda, para lo cual se verifica las dimensiones de cada probeta, con la exactitud de 0.1 mm, con la medida de las tres dimensiones se calcula el volumen de las diferentes probetas. Se requiere determinar el contenido de humedad.

Se determina entonces un volumen y un peso inicial de cada probeta, una vez que ha terminado de secar cada probeta, con el ensayo de contenido de humedad se vuelve a tomar mediciones de las dimensiones de cada prisma y se calcula nuevamente el volumen. (NTC5525, 2007)

Finalmente se determina la relación entre el peso de la probeta y su respectivo volumen. Se puede determinar la densidad anhidra, que se refiere a la densidad tomada con la masa y el contenido de humedad de la probeta. (NTC5525, 2007)

#### 4.3.2.2. Equipo

- Balanza con exactitud de 0.01 g.
- Horno de temperatura constante (110 °C±5° C), ventilado.
- Cápsulas metálicas y bandejas.
- Instrumentos de medición

#### 4.3.2.3. Cálculos

A partir de la correspondencia entre la masa y el volumen se determina la densidad:

$$\rho_{den} = \frac{m_{sec}}{V_{hum}} \times 10^6 \quad (53)$$

Donde

- $\rho_{den}$ : Densidad ( $\text{kg/m}^3$ ).
- $m_{sec}$ : Masa seca en el horno (g).
- $V_{hum}$ : Volumen húmedo de la probeta ( $\text{mm}^3$ ).

### 4.3.3. COMPRESIÓN EN LA CAÑA GUADÚA (*GaK*)



**Figura 4.14.** Ensayo de compresión a la caña guadúa (*GaK*)

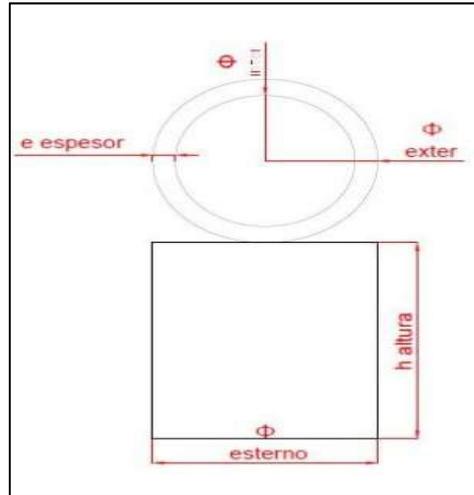
*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

#### 4.3.3.1. Resumen

El objetivo del ensayo es definir el esfuerzo de compresión axial de la caña guadúa (*GaK*), para ello se toma como guía la norma NTC5525.

En resumen se coloca un pedazo de caña guadúa (*GaK*) entre un cabezal móvil y un lector de deformación, el ensayo se hace a velocidad constante, y se registrar el mayor número posible de datos, hasta la falla de este. (NTC5525, 2007)

Para ello, se deben tomar medidas del diámetro externo e interno de cada probeta, la probeta debe ser cortada a una longitud igual al diámetro, por lo tanto la toma del diámetro es de importancia. (NTC5525, 2007)



**Figura 4.15.** Toma de datos para probetas de caña guadúa (GaK). Ensayo de compresión.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

Las probetas para este ensayo deben ser sin nudos, un mínimo de dos probetas por muestra, además las superficies de las probetas deben ser completamente perpendiculares a la pared externa de la probeta. (NTC5525, 2007)

Se requiere de una máquina adecuada, por lo que el uso de una pletina de la máquina debe ser de forma esférica, para lograr que la carga se distribuya uniformemente, además el uso de cera para reducir la fricción entre las pletinas y la probeta es necesario. (NTC5525, 2007)

El uso de deformímetros eléctricos es esencial, Colocar los medidores de deformación o Strain Gauges de forma fija. La aplicación de la carga sobre la probeta debe ser a la velocidad de 0.01 m/s, y debe ser de manera constante. (NTC5525, 2007)

Se debe procurar tomar la mayor cantidad de lecturas, en especial de la fase de ruptura para formar una curva esfuerzo deformación. (NTC5525, 2007)

#### 4.3.3.2. Equipo

- Balanza con precisión de 0.01 g.
- Horno de temperatura constante ( $102\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ), ventilado.
- Cápsulas metálicas y bandejas.
- Sierra de corte.
- Medidores de deformación.
- Máquina de ensayo a compresión.

#### 4.3.3.3. Cálculos

Se desarrolla una curva que relaciona en el eje de las abscisas a la deformación axial y en el eje ordenado el esfuerzo último:

$$\sigma_{\text{último}} = \frac{F_{\text{última}}}{A_{st}} \quad (54)$$

Donde:

- $\sigma_{\text{último}}$ : Esfuerzo último de compresión (MPa).
- $F_{\text{última}}$ : Carga máxima a la que falla la probeta (N).
- $A_{st}$ : Área de la sección transversal ( $\text{mm}^2$ ).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (55)$$

Donde:

- E: Módulo de elasticidad.
- $\sigma_{\text{ult}}$ : Esfuerzo último de compresión (MPa).
- $\epsilon$ : Deformación axial para la carga axial dada.

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (56)$$

Donde

- $\epsilon$ : Deformación axial para la carga axial dada.
- $\Delta H$ : Cambio de altura de espécimen como lea el indicador de la deformación.
- $H_0$ : Altura inicial del espécimen de prueba menos cualquier cambio en la longitud antes de la carga.

$$A = \frac{A_0}{1 - \epsilon} \quad (57)$$

Donde:

- A: Promedio del área de sección transversal del espécimen.
- A<sub>0</sub>: Promedio inicial del área de sección transversal del espécimen.
- $\epsilon$ : Deformación axial para la carga axial dada.

#### 4.3.4. TRACCIÓN EN LA CAÑA GUADÚA (*GaK*)



**Figura 4.16.** Ensayo a tracción de la caña guadúa (*GaK*)

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

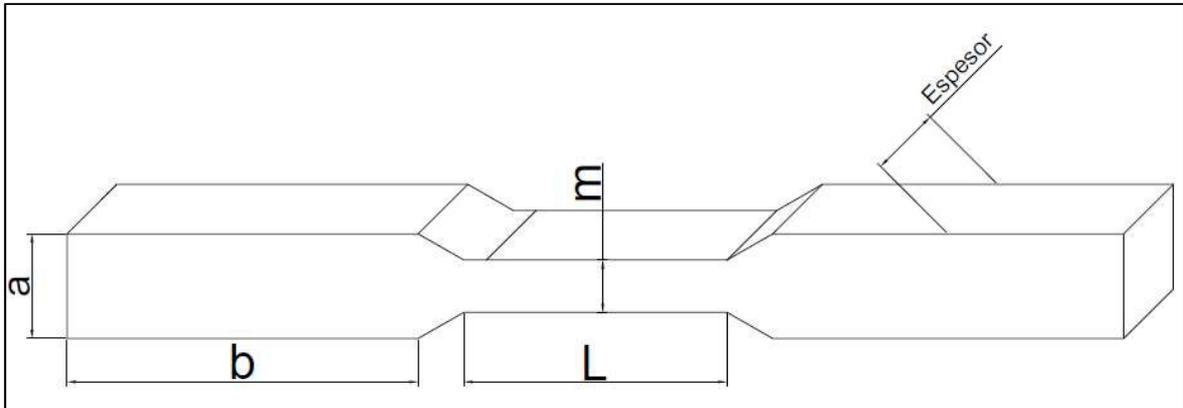
##### 4.3.4.1. Resumen

El objetivo del ensayo es definir el esfuerzo de tracción axial paralela a la fibra de la caña guadúa (*GaK*). Para lo cual se toma como guía la norma NTC555.

El ensayo se puede resumir de la siguiente manera: se coloca un pedazo de caña guadúa (*GaK*) entre un cabezal móvil que tire de un extremo de la probeta y otro fijo, un lector de deformación o desplazamiento es necesario, el ensayo se hace a velocidad constante, y se debe registrar todos los datos posibles hasta la falla de este. (NTC5525, 2007)

Para la probeta para el ensayo de tensión, paralela a la fibra se debe usar probetas que presenten un nudo en el centro. Se deben tomar medidas de toda la probeta, teniendo en cuenta que la parte de la probeta que se va a ensayar puede medir

entre unos 50 o 100 mm, haciendo centro en un nudo, para formar la probeta se debe tomar en cuenta la figura 4.17., las medidas de las probetas deben hacerse con una exactitud de 0.1 mm. (NTC5525, 2007)



**Figura 4.17.** Toma de datos para probetas de caña guadúa (GaK). Ensayo de tensión.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

La dirección de las fibras de la probeta debe ser paralela al eje longitudinal, la sección transversal en cualquier sección de la probeta debe ser rectangular, con un espesor igual al espesor del lugar de extracción de la probeta. (NTC5525, 2007)

Se deben garantizar que la falla se produzca en el centro, para ello los extremos de las probetas deben poseer una mayor resistencia que la parte central, y que se minimice los esfuerzos en el área de tracción, adicional se debe constatar que los sujetadores de la probeta se coloquen a una distancia segura, lejos de la porción de ensayo. (NTC5525, 2007)

Aplicar carga de tensión a la velocidad de 0.01 m/s, y debe ser de manera constante. Tomar la mayor cantidad de lecturas de carga-deformación, en especial de la fase de ruptura para formar una curva esfuerzo deformación, si la falla se llegara a producir fuera de la porción de ensayo, se debe repetir el ensayo. (NTC5525, 2007).

#### 4.3.4.2. Equipo

- Balanza con precisión de 0.01 g.
- Horno de temperatura constante ( $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ventilado.
- Cápsulas metálicas y bandejas.
- Sierra de corte.

- Máquina de ensayo a tracción.

#### 4.3.4.3. Cálculos

Se desarrolla una curva que relaciona en el eje de las abscisas a la deformación axial y en el eje ordenado el esfuerzo último:

$$\sigma_{\text{último}} = \frac{F_{\text{última}}}{A_{st}} \quad (58)$$

Donde:

- $\sigma_{\text{último}}$ : Esfuerzo último de compresión (MPa).
- $F_{\text{última}}$ : Carga máxima a la que falla la probeta (N).
- $A_{st}$ : Área de la sección transversal (mm<sup>2</sup>).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (59)$$

Donde:

- $\epsilon$ : Deformación axial para la carga axial dada.
- $\sigma_{\text{ult}}$ : Esfuerzo último de compresión (M Pa).
- E: Módulo de elasticidad.

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_{ini}} \quad (60)$$

Donde:

- $\epsilon$ : Deformación axial para la carga axial dada.
- $\Delta H$ : Cambio de altura de espécimen como lea el indicador de la deformación.
- $H_{ini}$ : Altura inicial del espécimen de prueba menos cualquier cambio en la longitud antes de la carga.

$$l = l_0 \left(1 - \frac{\Delta H}{H}\right) \quad (61)$$

Donde:

- $l$ : Longitud promedio de sección transversal de la probeta.
- $l_0$ : Promedio inicial de la longitud de sección transversal del espécimen.
- $\Delta H$ : Cambio de altura de espécimen como lea el indicador de la deformación.
- $H_{ini}$ : Altura inicial de la probeta para prueba sin tomar en cuenta cualquier cambio en la longitud antes de la carga.

$$m = m_0 \left(1 - \frac{\Delta H}{H}\right) \quad (62)$$

Donde:

- $m$ : Promedio del espesor de sección transversal del espécimen.
- $m_0$ : Promedio inicial del espesor de sección transversal del espécimen.
- $\Delta H$ : Cambio de altura de espécimen como lea el indicador de la deformación.
- $H_0$ : Altura inicial del espécimen de prueba menos cualquier cambio en la longitud antes de la carga.

#### 4.3.5. CORTE EN LA CAÑA GUADÚA ( $GaK$ )



**Figura 4.18.** Placas para ensayo de corte a la caña guadúa ( $GaK$ ).

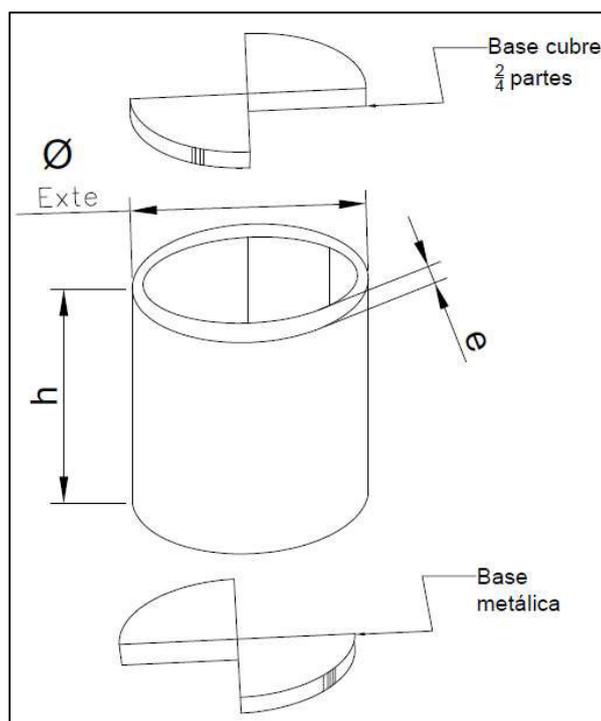
*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

#### 4.3.5.1. Resumen

El ensayo se usa para determinar el esfuerzo de corte paralelo a la fibra de la caña guadúa (*GaK*). La norma guía es la norma NTC5525.

Se coloca una probeta de caña guadúa (*GaK*), que aproximadamente su longitud sea similar al diámetro externo, entre un cabezal móvil con un total de dos apoyos, uno superior y uno inferior, en cada sección de la caña guadúa (*GaK*), los apoyos o soportes deben cubrir dos cuartos de sección transversal no continua de la caña guadúa (*GaK*), el ensayo se hace a velocidad constante, y se debe registrar todos los datos posibles hasta la falla de la probeta. (NTC5525, 2007)

Para lo cual se selecciona dos probetas de la parte de los entre nudos. Se toman medidas de toda la probeta, teniendo en cuenta que la probeta se debe apoyar sobre bases que cubran dos cuartas partes de la sección transversal, para colocar las placas sobre la probeta se puede usar de referencia la figura 4.19. (NTC5525, 2007)



**Figura 4.19.** Toma de datos para probetas de caña guadúa (*GaK*). Ensayo de corte.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

La sección de corte transversal debe ser completamente perpendicular a las fibras longitudinales, las medidas tanto del espesor como de la altura se deben tomar en cuatro lugares equidistantes, anotar los valores en una hoja de registro.

Colocar las placas sobre los cabezales, en el centro de las placas, cuidando que cada sección de placa cubra una sección similar de la caña guadúa (*GaK*). Aplicar carga de 1 kN a la velocidad de 0.01 mm/s, y debe ser de manera constante, detener el cabezal y acomodar la probeta completamente en el centro de los cuartos de soporte. (NTC5525, 2007)

Avanzar con la aplicación de la carga vertical a la velocidad de 0.01 mm/s. Tomar la mayor cantidad de lecturas, en especial de la fase de ruptura para formar una curva esfuerzo-desplazamiento. (NTC5525, 2007)

#### 4.3.5.2. Equipo

- Balanza con precisión de 0.01 g.
- Horno de temperatura constante (110 °C±5° C), ventilado.
- Cápsulas metálicas y bandejas.
- Sierra de corte.
- Medidores de deformación.
- Máquina de ensayo a corte.

#### 4.3.5.3. Cálculos

Se desarrolla una curva que relaciona en el eje de las abscisas a la deflexión en el punto medio y en el eje ordenado la carga:

$$\tau_{ult} = \frac{F_{ult}}{\sum(t \times L)} \quad (63)$$

- $\zeta_{ult}$ : Resistencia última de corte (MPa).
- $F_{ult}$ : Carga máxima aplicada a la probeta (N).
- $\sum(t \times L)$ : Suma de los cuatro productos de t x L (mm<sup>2</sup>).
- L: Longitud de la caña guadúa (*GaK*) (mm).
- t: Espesor de la pared (mm).

### 4.3.6. FLEXIÓN EN LA CAÑA GUADÚA (*GaK*)



Figura 4.20. Ensayo a flexión de la caña guadúa (*GaK*)

Fuente: Obtenido por Mejía y Rivera

#### 4.3.6.1. Resumen

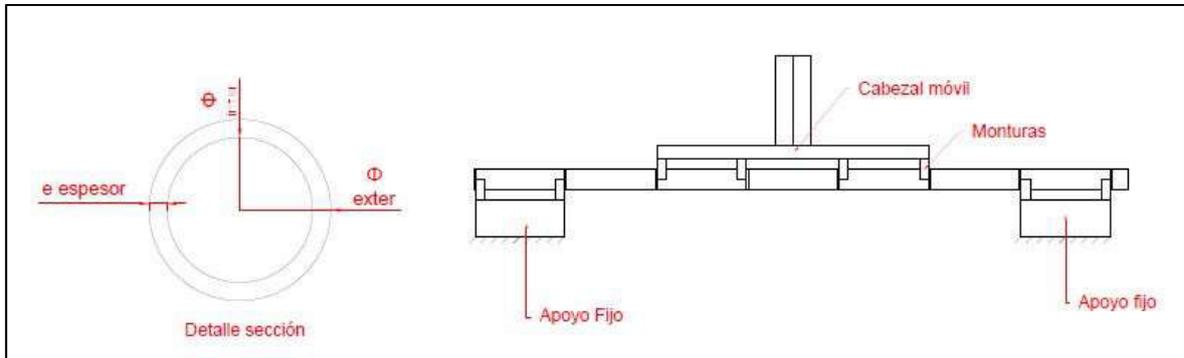
El objetivo de este ensayo es definir el esfuerzo de flexión de la caña guadúa (*GaK*). Para ello se toma como referencia a la norma NTC 5525

El ensayo consiste en colocar un tramo de caña guadúa (*GaK*), de aproximadamente treinta veces el diámetro externo, entre un cabezal móvil con un total de cuatro apoyos, los apoyos deben poseer la curvatura del perímetro de la caña guadúa (*GaK*). Se aplica carga uniformemente distribuida en los cuatro puntos de apoyo, mientras un lector de deformación registra la deflexión, el ensayo se hace a velocidad constante, y se debe registrar todos los datos posibles hasta la falla la probeta. (NTC5525, 2007)

Las probetas a ensayar no deben presentar rajaduras ni defectos visibles, el espacio libre del tramo de caña guadúa (*GaK*) para lograr el ensayo correctamente debe ser equivalente a 30 veces el diámetro externo, adicional, la probeta debe tener una longitud extra para garantizar que después de cada apoyo final existe un nudo final.

Lo más recomendable es tomar medidas de toda la probeta, teniendo en cuenta que la probeta se debe apoyar sobre rodillos móviles y evitar colocar los apoyos en

los nudos de la probeta, para ubicar la probeta de manera correcta se puede considerar la figura 4.21. (NTC5525, 2007)



**Figura 4.21.** Toma de datos para probetas de caña guadúa (GaK). Ensayo a flexión.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

Una vez que se determine los puntos de apoyo y se los marque en la probeta, esta se debe colocar y dejar que repose sobre su propia posición, a continuación, se debe colocar la carga uniformemente repartida sobre la probeta, entonces se permite un nuevo reacomodo de la probeta.

Se coloca medidores de deformación, en el centro de la caña guadúa (GaK). Para aplicar la carga de flexión se lo debe hacer a una rapidez de 0.5 mm/s, y debe ser de manera constante, el ensayo termina al fallar la probeta, adicional, se debe indicar el tipo de falla que se tuvo y cualquier observación adicional. Tomar la mayor cantidad de lecturas, en especial de la fase de ruptura para formar una curva esfuerzo deformación. (NTC5525, 2007)

#### 4.3.6.2. Equipo

- Balanza con precisión de 0.01 g.
- Horno de temperatura constante ( $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ventilado.
- Cápsulas metálicas y bandejas.
- Sierra de corte.
- Medidores de deformación.
- Máquina de ensayo a flexión.
- Apoyos con forma cónica

#### 4.3.6.3. Cálculos

Se desarrolla una curva que relaciona en el eje de las abscisas a la deflexión en el punto medio y en el eje ordenado la carga:

$$I_{Mom} = \frac{\pi}{64} * [D_{iex}^4 - (D_{iex} - 2 t_{par}^2)] \quad (64)$$

Donde:

- $I_{Mom}$ : Momento de Inercia ( $mm^4$ ).
- $D_{iex}$ : Diámetro externo (mm).
- $t_{par}$ : Espesor de la pared (mm).

$$\sigma_{ult} = F * L * \frac{D}{6} / I_b \quad (65)$$

Donde:

- $\sigma_{ult}$ : Esfuerzo último de compresión (M Pa).
- F: Carga máxima aplicada a la probeta (N).
- D: Diámetro externo (mm).
- L: Luz de la caña guadúa (GaK) (mm).
- $I_b$ : Momento de Inercia ( $mm^4$ )

$$E = \frac{23 * F * L^3}{1296 * \delta * I_b} \quad (66)$$

Donde:

- E: Módulo de elasticidad.
- F: Carga máxima aplicada a la probeta (N).
- $\delta$ : Deflexión en el punto medio de la luz (mm).
- L: Luz de la caña guadúa (GaK) (mm).
- $I_b$ : Momento de Inercia ( $mm^4$ ).

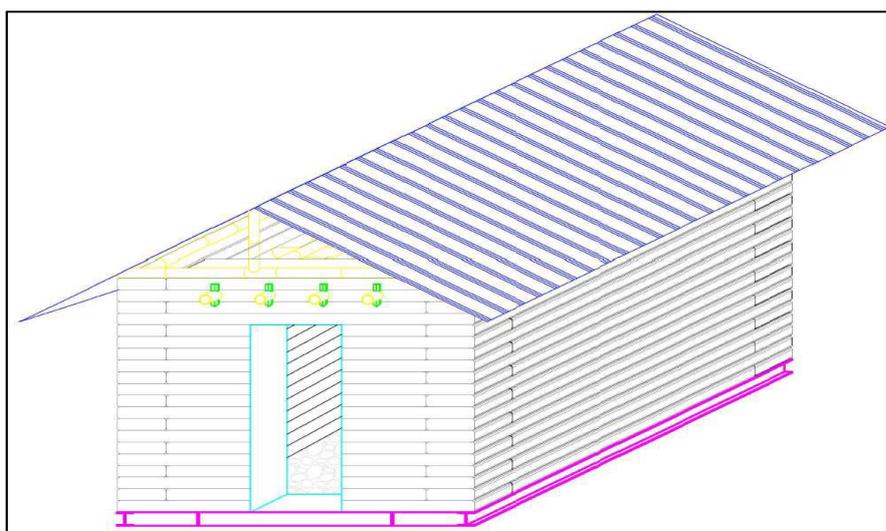
## CAPÍTULO 5

### ELABORACIÓN DEL MODELO DEL SISTEMA

#### 5.1. DISEÑO DEL SISTEMA DE VIVIENDA DE SUPERADOBE PROPUESTO

La modelación computacional del sistema se establece a partir del diseño de un módulo del sistema propuesto, en base a la bioconstrucción de superadobe, el módulo de cuatro muros que funcionan como paredes, es reforzado verticalmente con estacas de caña guadúa (*GaK*), usando una mezcla de suelo-cal al 4% en peso.

Los planos que se adjuntan en el Anexo 1, muestran el diseño de arquitectura y de estructura para un módulo del sistema de superadobe reforzado, este sistema es una alternativa nueva y sustentable por lo que el campo de investigación en cuanto al análisis estructural del sistema puede ser altamente explotada en investigaciones y proyectos experimentales, por ejemplo, el mejoramiento de las juntas de muros o sistemas con mayor longitudes, menor espesor en los muros y mayores alturas a las adoptadas en esta investigación pueden ser analizadas, logrando así, establecer mejoras en el sistema y tener un campo de construcción en tierra sostenible y seguro, también, se pueden probar diferentes materiales y adecuaciones dependiendo el enfoque que se pretenda dar a cada investigación.



**Figura 5.1.** Vista esquemática arquitectónica del sistema de superadobe propuesto.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

### 5.1.1. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE VIVIENDA

El sistema se dispone como un módulo de uso para una sección de vivienda, de dimensiones 3,40m de largo por 3,30m de ancho y 2.60m de altura aproximadamente, en la cual debe poseer una puerta de medidas normales y una ventana, la ubicación de estas aberturas son analizadas en las siguientes combinaciones:

**Tabla 5.1. Datos para establecer el sentido con mayor rigidez del sistema de superadobe.**

Dirección	L=3,30 m	L=3,30 m	L=3,40 m	L=3,40 m
X	Puerta	Ventana		
Y	Puerta		Ventana	
X			Puerta	Ventana
Y		Ventana	Puerta	

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Establecer la ubicación de puertas y ventanas es necesario, ya que la rigidez de la estructura es una de las principales propiedades que interfieren en la determinación de períodos, para lo cual, se procede a determinar la rigidez en los cuatro casos, con las siguientes ecuaciones, teniendo en cuenta que los muros se tomarán como prismas rectangulares:

$$J = J_G + m * d^2 \quad (67)$$

Donde:

- J: Momento de inercia de masa (kg\*m<sup>2</sup>).
- J<sub>G</sub>: Centro de gravedad del prisma.
- m: Masa del prisma (kg).
- d<sup>2</sup>: distancia entre J<sub>G</sub> y J (mm<sup>3</sup>).

La rigidez del prisma rectangular puede verse expresada como una variación de la rigidez de una columna con una dimensión desproporcionada siendo esta:

$$K = 12 * \frac{E * I}{L^3} \quad (68)$$

Donde:

- K: Rigidez del prisma respecto a su base (N/m).
- E: Módulo de elasticidad del material ( $\sigma/\epsilon$ ).
- I: Inercia del prisma ( $m^4$ ).
- L: Longitud perpendicular a la inercia (m).

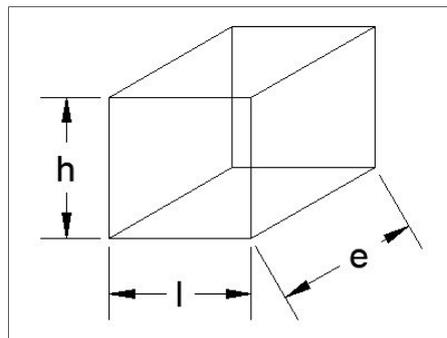
Para el módulo de elasticidad se toman los valores de referencia a ensayos que se hicieron al material, que compone a los muros en un 99.80%, es decir, la muestra de suelo-cal, dicho valor es de 224.974 GPa y en comparación frente a otros estudios como los de (Romero & Julca, 2020) quienes bajo estudios y otras referencias determinan un valor de entre 170 GPa y 200 GPa es aceptable.

La inercia del prisma se calcula en la base por lo cual se usará la siguiente ecuación:

$$I_x = \frac{1}{12} * m * (h^2 + e^2) \quad (69)$$

$$I_y = \frac{1}{12} * m * (h^2 + e^2) \quad (70)$$

$$I_z = \frac{1}{12} * m * (l^2 + e^2) \quad (71)$$



**Figura 5.2.** Configuración de un prisma rectangular para el cálculo del momento de inercia.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Donde:

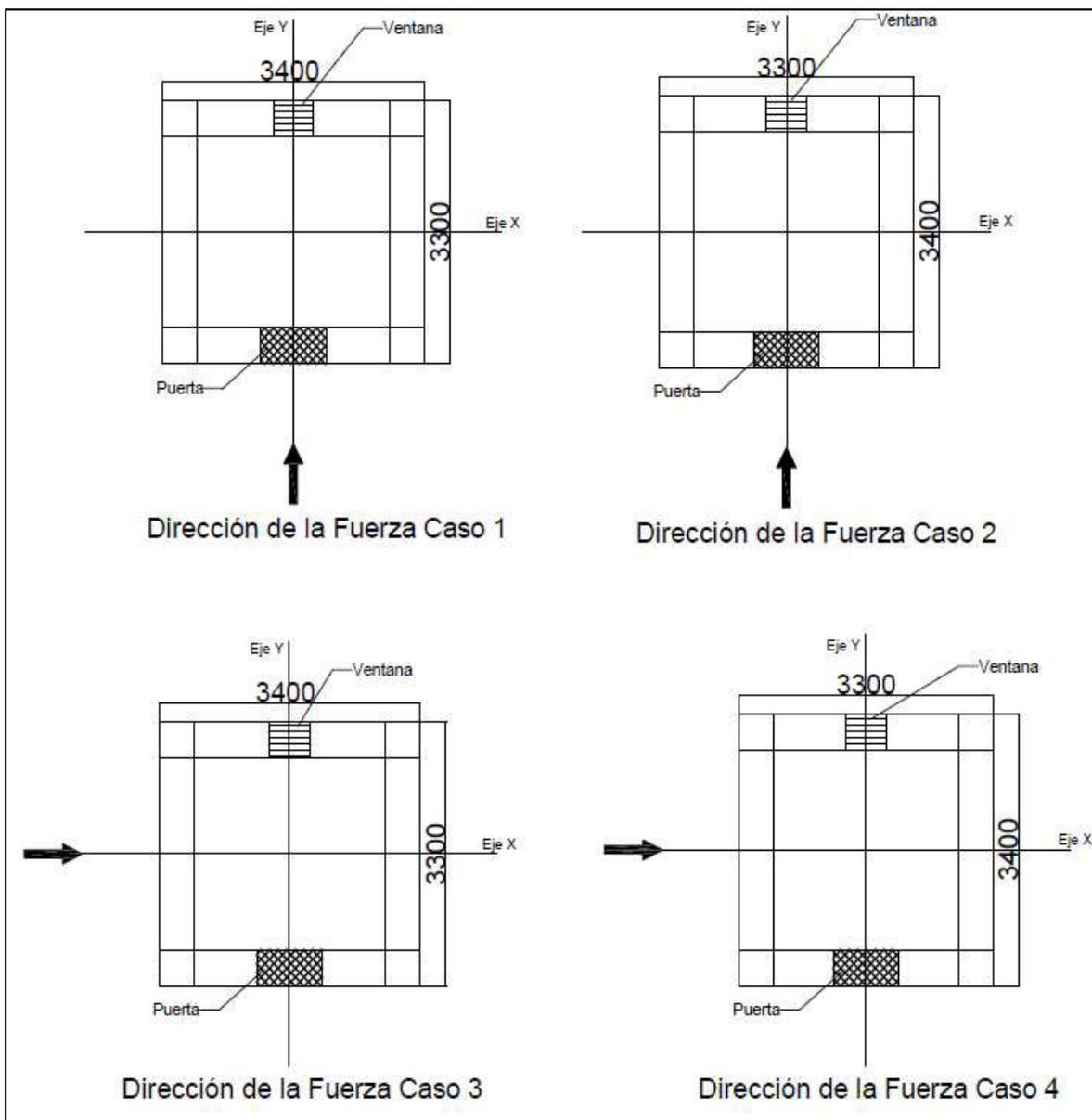
- $I_x, I_y, I_z$ : Momento de inercia del prisma ( $m^4$ ).
- $m$ : masa del prisma (m).
- $l$ : longitud (m).
- $e$ : espesor (m).
- $h$ : altura (m).

Con las fórmulas indicadas y las consideraciones mencionadas anteriormente se determina la tabla 5.2., en la cual se presenta los valores de la rigidez en cada dirección y en cada caso, para así, analizar la orientación del sistema con menor rigidez, ya que evidentemente, si el sistema resiste con la menor rigidez, se da por aceptado que la orientación con mayor rigidez también lo hará.

**Tabla 5.2. Determinación del sentido menos rígido del sistema propuesto, teniendo en cuenta la condición de muros como prismas.**

<b>Determinación del Sentido de aplicación de la fuerza (movimiento) ante el sentido con menor rigidez</b>			
<b>Descripción:</b>	<b>Rigidez en X [N/m]</b>	<b>Rigidez en Y [N/m]</b>	<b>Rigidez Total [N/m]</b>
<b>Caso 1 - Fuerza Sentido X, Dirección larga con aberturas</b>	9.34E+11	2.02E+11	1.14E+12
<b>Caso 2 - Fuerza Sentido X, Dirección corta con aberturas</b>	8.89E+11	2.02E+11	1.09E+12
<b>Caso 3 - Fuerza Sentido Y, Dirección larga con aberturas</b>	4.05E+11	1.18E+12	1.59E+12
<b>Caso 4 - Fuerza Sentido Y, Dirección corta con aberturas</b>	4.05E+11	1.23E+12	1.63E+12

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 5.3.** Configuración del sistema, teniendo en cuenta la dirección de la fuerza en el sentido de menor rigidez.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

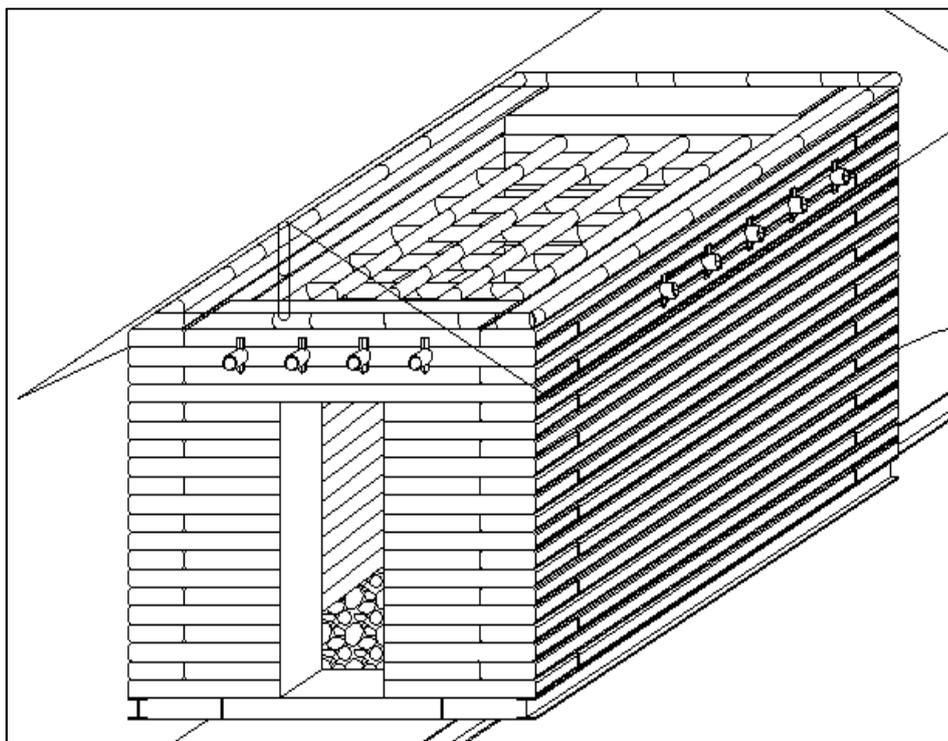
### 5.1.2. DIMENSIONES, CANTIDADES Y VOLÚMENES DEL PROTOTIPO

Las dimensiones del sistema a modelar se especifican en la tabla 5.3.:

**Tabla 5.3. Dimensiones de muros y aberturas de puerta y ventana.**

Dimensiones de los elementos y muros			
Elemento	Long. (m)	Altura (m)	Espesor (m)
Esquinas	0.45	2.60	0.45
Muro izquierdo	2.50	2.60	0.45
Muro derecho	2.50	2.60	0.45
Muro Puerta	2.40	2.60	0.45
Muro Ventana	2.40	2.60	0.45
Puerta	0.85	2.08	0.45
Ventana	0.52	0.52	0.45

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



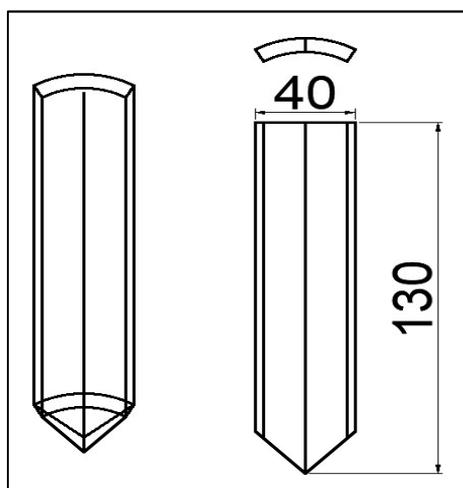
**Figura 5.4.** Vista esquemática de la configuración del sistema de superadobe.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 5.4. Dimensiones del refuerzo vertical de caña guadúa (GaK).**

<b>Dimensiones del refuerzo vertical de caña guadúa (GaK)</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Long. (m)</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Espesor (m)</b>
Esquinas	0.04	0.13	0.01
Muros	0.04	0.13	0.01

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 5.5. Dimensión del refuerzo vertical de caña guadúa (GaK).**

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Todas estas dimensiones están reflejadas en los planos del Anexo 1.

Para determinar el volumen de cada muro se muestra la tabla 5.5.:

**Tabla 5.5. Volumen de muros y refuerzo vertical en cada elemento del sistema propuesto.**

Estructura de Suelo-Cal	Elemento	Cant.	Vol 1 (m <sup>3</sup> )	Vol 2. (m <sup>3</sup> )	Vol 5. (m <sup>3</sup> )
	Esquinas	4	0.53	2.11	2.10
	Muro izquierdo	1	2.93	2.93	2.92
	Muro derecho	1	2.93	2.93	2.92
	Muro Puerta	1	2.81	2.01	2.01
	Muro Ventana	1	2.81	2.69	2.68
	Puerta	1	0.80		
	Ventana	1	0.12		
			Total	12.66	12.63
Refuerzo Vertical de GaK	Elemento	Cant Elem.	Cant. Ref	Vol 3(m <sup>3</sup> )	Vol 4. (m <sup>3</sup> )
	Esquinas	4	52	0.00005	0.0108
	Muro izquierdo	1	88	0.00005	0.0046
	Muro derecho	1	88	0.00005	0.0046
	Muro Puerta	1	65	0.00005	0.0034
	Muro Ventana	1	96	0.00005	0.0050
				Total	0.0283

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Un resumen de estos valores para una comparación más evidente se indica en la tabla 5.6.:

**Tabla 5.6. Volumen de material en el sistema propuesto.**

Elementos	Vol (m <sup>3</sup> )	% Vol
Muros de Suelo Cal	12.627	99.78%
Refuerzo de caña (GaK)	0.028	0.22%
TOTAL	12.655	100.00%

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

## **5.2. ELEMENTOS PARA UN FUTURO ENSAYO FÍSICO**

Como ya se mencionó anteriormente, se desea que esta investigación dé apertura a nuevas investigaciones, por esto, se presenta el siguiente manual:

### **5.2.1. MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE VIVIENDA DE SUPERADOBE Y REFUERZO VERTICAL DE CAÑA GUADÚA (*GaK*)**

Se presenta los pasos o procedimientos de elaboración del sistema de superadobe, diseñado con los cambios propuestos, es decir, a partir de una mezcla de suelo con cal hidratada y refuerzo vertical de estacas de caña guadúa (*GaK*):

#### **5.2.1.1. Planificación:**

Para empezar, un diseño arquitectónico bien detallado es el primer paso, así como para todo buen proyecto, ya que a partir de ahí se puede ver la factibilidad de usar los distintos materiales, técnicas o combinaciones de sistemas, siempre con estudios de respaldo.

El sistema debe poseer una buena ventilación y accesibilidad, en tanto que la ubicación de puertas y ventanas de manera objetiva y correcta es indispensable para cualquier proyecto, hacen necesarias, se debe tener en cuenta que cada muro solo puede poseer una abertura ya sea para puerta o ventana, como lo indica la técnica de (DomoTerra, 2016).

La caña guadúa (*GaK*) debe pertenecer al mismo sector, para garantizar que cumpla las mismas propiedades, debe ser mantenida de entre 15 a 30 días en un lugar fresco, lejos de la humedad y de largas exposiciones al sol, también, se puede acudir a la (NEC-SE-GUADÚA, 2016) en la cual se especifica los métodos de secado y almacenamiento.

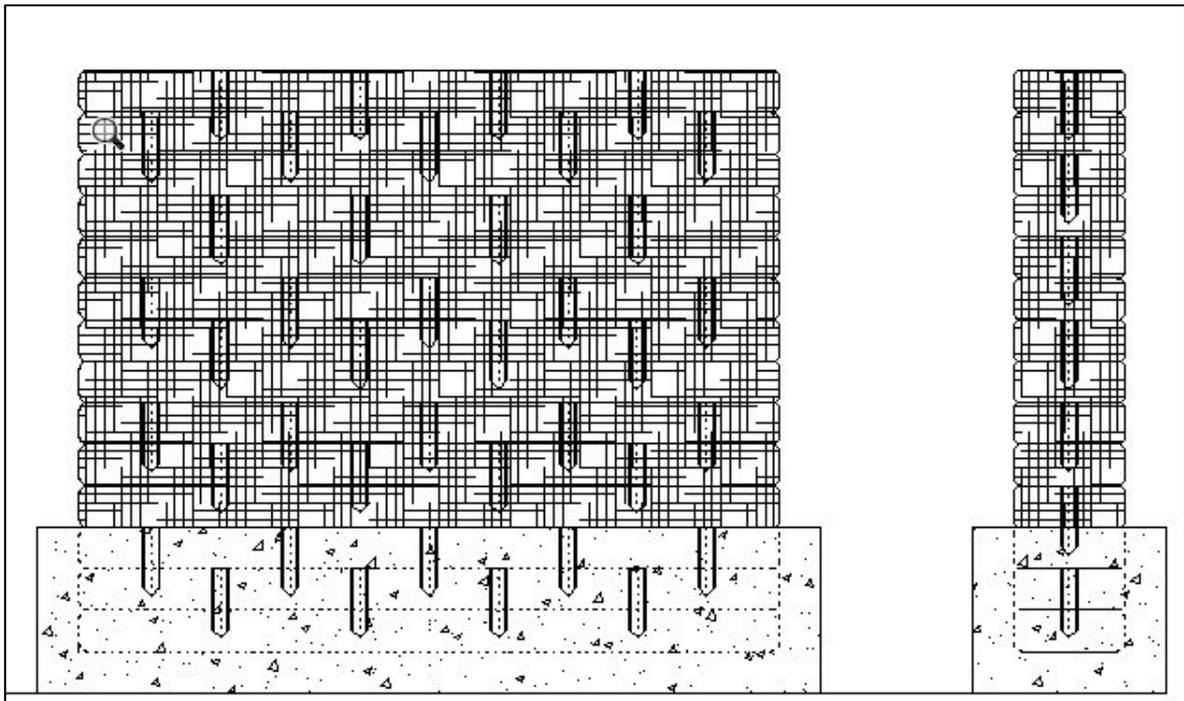
El uso de sacos (costales) de materiales biodegradables no es obligatorio, pero es una gran ventaja por su facilidad de deterioro y retiro una vez finalizada la construcción, y ayuda a que la construcción sea más amigable con el medio ambiente.

### 5.2.1.2. Construcción de la cimentación:

Se debe asegurar que el sistema tenga empotrado en su totalidad a los muros, para ello es necesario una cimentación de hormigón ciclópeo, con una altura mínimo de 30 cm sobre el nivel del terreno

Esta cimentación deberá tener el estudio de respaldo, sobre la calidad del suelo en el que se va a cimentar, como beneficio, el suelo removido puede ser usado para formar la mezcla de suelo con el material aglutinante ya sea cal o cemento, preferiblemente cal, para los muros.

Se puede realizar un encajonamiento de las primeras hiladas de superadobe para garantizar la estabilidad del muro, si se desea, otra alternativa es usar estacas desde la conexión cimentación-muro o a su vez usar contrafuertes, aunque no son necesarios para el sistema rectangular.



**Figura 5.6.** Vista frontal y lateral de la cimentación por encajonamiento en hormigón, de las tres primeras hiladas, para la configuración del sistema de superadobe.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

#### **5.2.1.3. Construcción de los muros:**

Los muros se construyen de forma muy similar a la técnica de Nader Khalili, es decir, hilada por hilada, siendo apisonada hasta asegurar que la mezcla esté bien compactada, esto es, cuando la mezcla deja de expulsar agua al ser apisonada, esto sucede, luego de los 15 a 20 golpes de un pisón de aproximadamente 30 kg, entre hilada e hilada se insertan las estacas de caña guadúa (*GaK*), para el sistema propuesto.

Los muros deben tener un ancho mínimo de 0.30 m y un máximo de 0.60 m, debido al peso que se genera para su construcción, la altura de las hiladas debe estar entre 10 a 15 cm una vez ya apisonadas.

Después del período de fraguado y consolidación del sistema los sacos de polipropileno o del material que se haya escogido para trabajar deben ser retirados de las caras de los muros, una buena técnica es quemándolos o halándolos, se requiere que sean retirados para poder dar acabados a los muros.

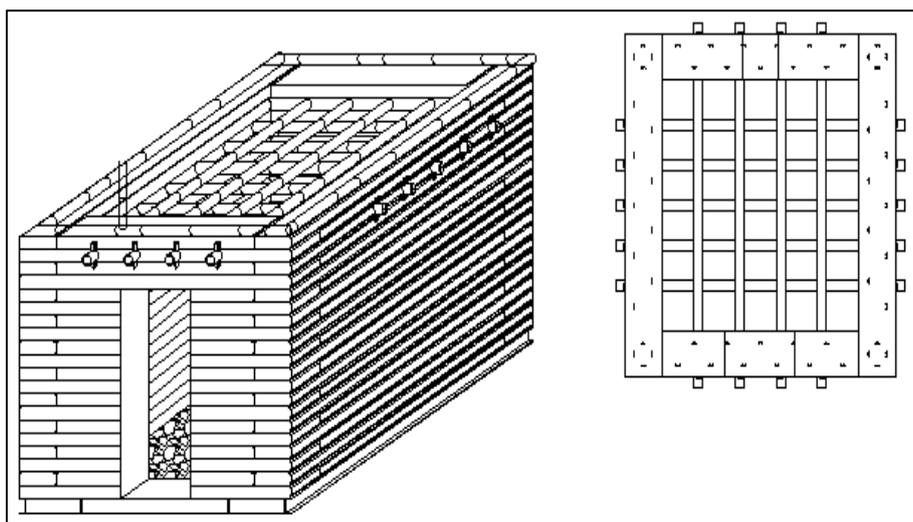
#### **5.2.1.4. Instalaciones y acabados:**

Las instalaciones hidrosanitarias y eléctricas son fácilmente adecuadas con la previsión de su uso y deben ser previamente planificadas en los planos.

Los acabados no se limitan a nada, pero se debe tener en cuenta que siempre será mejor usar acabados naturales como pigmentos naturales o la misma mezcla suelo-aglutinante, para que los muros puedan expulsar su humedad natural.

#### **5.2.1.5. Diafragma, loseta o cubierta:**

Se puede tener un acabado en loseta con vigas acopladas a los muros, las cuales deberían ser analizadas en una siguiente investigación y puede ser una alternativa para el acoplamiento de los muros mediante un diafragma rígido, otra alternativa es usar acabados de media agua o agua completa, usando un tejido de caña guadúa (*GaK*), para formar dicho diafragma.



**Figura 5.7.** Vista superior de diafragma de caña guadúa (*GaK*), para la configuración del sistema de superadobe.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

### 5.3. MODELO EN SAP2000 DEL SISTEMA DE SUPERADOBE.

Esta sección se enfoca en la elaboración de un módulo del sistema de superadobe propuesto, es en base al análisis de los materiales que conforman la estructura final, para lo cual, en el capítulo cuatro se presentan los diferentes ensayos realizados a los diferentes materiales, mientras que, en el capítulo 6 se indican los valores de los ensayos formulados en el capítulo 4, y finalmente, en la sección de “Anexos” se puede verificar los valores de los ensayos realizados en laboratorio LEMSUR de la EPN.

En este capítulo, se elige las propiedades adecuadas, mínimas y necesarias para que el diseño del sistema se encuentre bajo los parámetros que se requieren, para ello el programa solicita la determinación de: El módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, el coeficiente de expansión térmica y finalmente el módulo de corte, que el programa determina bajo la definición del mismo.

#### 5.3.1. CREACIÓN DEL MATERIAL SUELO-CAL.

Una vez que se finalizan los ensayos del capítulo 4, corroborados en los diferentes Anexos, y se determinan los resultados en el capítulo 6, para las proporciones de

mezcla de suelo cal (4%, 8% y 12%); se determina que la proporción indicada de adición de cal, para la mezcla que presenta las mejores condiciones es, suelo-cal al 4% en peso de la muestra. Esta muestra presenta las siguientes características y propiedades:

#### 5.3.1.1. Peso por unidad de volumen

El peso por unidad de volumen o peso específico se determina a través de los diferentes ensayos realizados a las diferentes combinaciones de suelo cal, que se presentan el capítulo 4, en la sección 4.2, junto con los resultados del capítulo 6 y la verificación a cada anexo correspondiente.

**Tabla 5.7. Resumen de pesos específicos y densidades promedio para las diferentes muestras de suelo-cal.**

<b>Peso por Unidad de Volumen</b>		
<b>Muestra</b>	$\gamma$ densidad promedio <b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	$\gamma$ peso específico <b>(kN/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Suelo</b>	1.718	16.853
<b>Suelo-Cal 4%</b>	1.756	17.226
<b>Suelo-Cal 8%</b>	1.747	17.138
<b>Suelo-Cal 12%</b>	1.695	16.628

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Para lo cual, el valor de 17.226 kN/m<sup>3</sup>, es tomado como valor del peso por unidad de volumen, que corresponde a la combinación de suelo- cal en 4% del porcentaje en peso.

#### 5.3.1.2. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad (E), que ya se definió como la constante de proporcionalidad en “*la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria*” (Gere & Timoshenko, Mecánica de Materiales , 1990), para la mezcla suelo-cal al 4% de peso en cal, presenta un valor de 102.527 GPa que en comparación con, el módulo de elasticidad del suelo normal, de la muestra a través del ensayo de compresión simple, trabajada en este proyecto, es de 26.165 GPa, por lo que presenta un mejoramiento de 3.91 veces, con ello se determina que el aporte de la cal a la creación de muros de superadobe es de gran ayuda, dicho esto, el valor a usar es de 102.527 GPa. En la tabla 5.8. se puede observar que las diferentes

proporciones de suelo cal dan como resultado diferentes valores de módulo de elasticidad en los ensayos tanto de compresión simple y en el ensayo Triaxial “UU”.

**Tabla 5.8. Resumen de valores para el módulo de Elasticidad en diferentes probetas ensayadas a compresión simple y en ensayo Triaxial “UU”**

<b>Tomado de: Curvas Esfuerzo - Deformación en el rango entre 20% al 60% de la deformación unitaria</b>		
	<b>E, Para el esfuerzo del ensayo de Compresión Simple</b>	<b>E Para el esfuerzo desviador del ensayo Triaxial UU</b>
	<b>(kPa)</b>	<b>(kPa)</b>
Suelo Natural	26165	15819
Suelo + Cal 4%	224974	102527
Suelo + Cal 8%	84132	48863
Suelo + Cal 12%	71558	67431

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

### 5.3.1.3. Coeficiente de Poisson

Como ya se definió, este coeficiente relaciona las deformaciones transversales con las longitudinales, para el caso de las cuatro combinaciones de suelo-cal, da un valor de 0.01, como se observa en los resultados del capítulo 6.1.2.7., el cual será usado en el programa SAP2000.

### 5.3.1.4. Coeficiente térmico

En el capítulo 6.1.2.9., se establece que, debido al espesor de los muros y la relación mínima que existe entre el porcentaje de peso del suelo frente el peso de cal, la cantidad de cal es inferior y se toma el valor promedio de  $10.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  característico del suelo y que a su vez es muy similar al valor tradicional del hormigón.

### 5.3.1.5. Módulo de corte

El programa calcula automáticamente el valor de este módulo, a través de la ecuación (9) descrita en el capítulo 3.5.5., en la cual, usa los valores de los resultados de diferentes ensayos, tanto para la obtención del coeficiente Poisson y

el módulo de Elasticidad, y así el programa determina 50.76 GPa como el valor del módulo de Corte.

### **5.3.2. CREACIÓN DEL MATERIAL CAÑA GUADÚA (*GaK*).**

Finalizados los ensayos a las diferentes probetas de caña guadúa (*GaK*), se determina que este material presenta las siguientes características y propiedades:

#### **5.3.2.1. Peso por unidad de volumen**

El peso por unidad de volumen o peso específico se determina a través de los diferentes ensayos realizados a las diferentes probetas de caña guadúa (*GaK*), que se presentan el capítulo 4.3., y los resultados presentados en el capítulo 6.1.3.1.

Para lo cual se toma el promedio de las dos probetas, siendo: 0.565 g/cm<sup>3</sup> equivalente a 5542.65 N/m<sup>3</sup>. Este valor es el peso por unidad de volumen para la caña guadúa (*GaK*).

#### **5.3.2.2. Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad (E), para este material presenta un valor de 9.73 GPa para la compresión, un valor de 27.35 GPa para la tracción, 6.62 GPa para la flexión y un esfuerzo máximo de corte de 4.03 MPa, por lo cual se toma el valor de 9.73 GPa para la caña guadúa (*GaK*) que trabajará en el diafragma de la cubierta, en el modelo del programa SAP2000, y el valor de 6.62 GPa para el material usado como refuerzo vertical de caña guadúa (*GaK*) en los muros de superadobe.

#### **5.3.2.3. Coeficiente de Poisson**

Para la caña guadúa (*GaK*), el coeficiente de Poisson se asume con el valor de 0.01, según la tabla 6.21., debido a que se requiere un estudio más específico del material, o a su vez un cúmulo más grande de muestras para determinar dicho valor, por lo que se toma como aceptable el valor 0.01, para este trabajo específicamente, pero se debe tener presente que se requiere mayor investigación en cuanto a esta propiedad, dicho valor es usado en el programa SAP2000.

#### **5.3.2.4. Coeficiente térmico**

Como se menciona el capítulo 6.1.2.9., la relación en volumen que tienen estos dos materiales, el material de suelo-cal frente a la caña guadúa (*GaK*), usado para la elaboración de los muros, es de apenas 99.8% a 0.2%. Pese a ello se adopta que el coeficiente de expansión térmica para la caña guadúa (*GaK*), es similar al de la

madera, cuyo material tiene un coeficiente de expansión térmica de  $5.4 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  a una temperatura ambiente de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### **5.3.2.5. Módulo de corte**

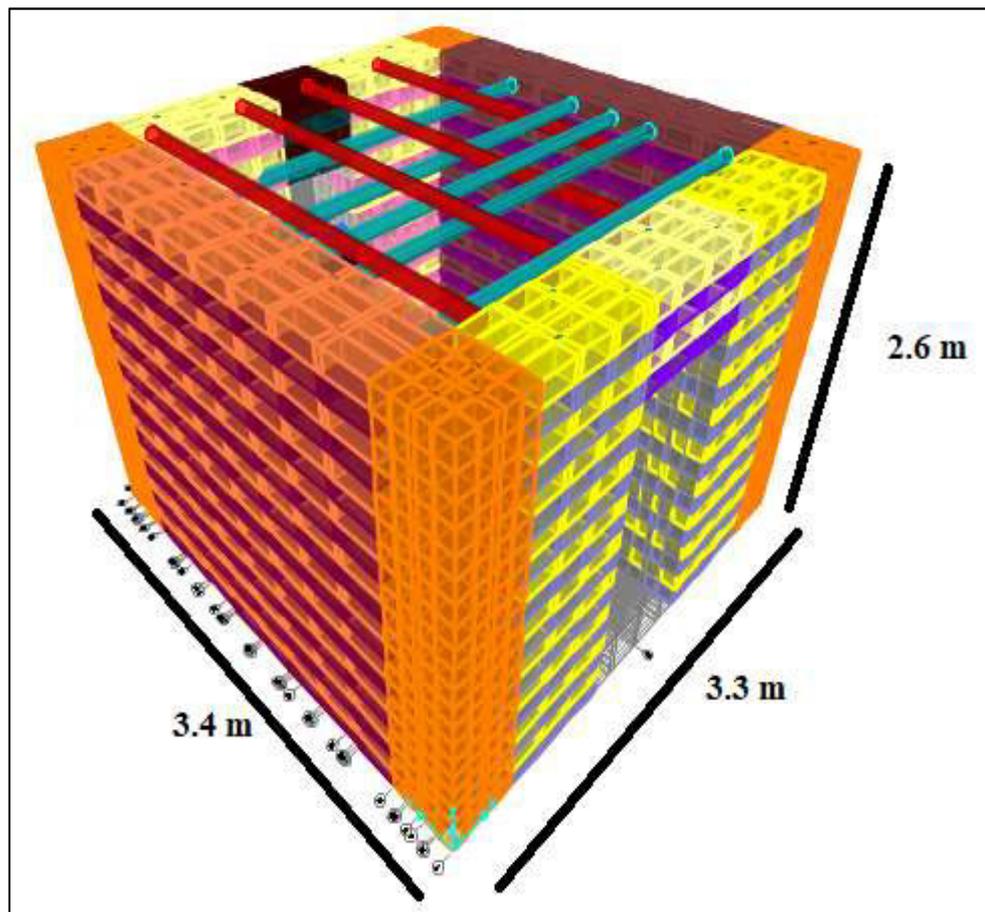
El programa calcula automáticamente el valor de este módulo, a través de la ecuación (9) descrita en el capítulo 3.5.5., en el cual se usa los valores antes determinados y que dieron como resultados en los diferentes ensayos, el programa determina un valor de 3.28 kPa para el caso de la caña guadúa (*GaK*) que actúa como refuerzo vertical y 4.817 GPa para de la caña guadúa (*GaK*) que actúa en el diafragma superior.

#### **5.3.3. CONSTRUCCIÓN DE MATERIALES EXTRAS O DE APOYO.**

Se debe incorporar elementos que no son representativos dentro del sistema de superadobe, pero que también forman parte, estos elementos son los dinteles de las puertas y ventanas, los cuales en el sistema dado por (DomoTerra, 2016), son de madera, pero esta madera debe ser muy rígida, y en un principio actúan como una especie de encofrado para soportar el peso del superadobe en esos sectores, para luego convertirse en una membrana que finalmente puede ser retirados o no.

En el modelo computacional de superadobe propuesto, se presenta el enfoque de que el superadobe adquiere la resistencia necesaria, para lo cual, en el modelo se dispone ubicar un elemento "*shell*", para que actúe como membrana, caracterizado con las propiedades del superadobe. Además, se opta por usar un material con las mismas características que el superadobe propuesto, para no generar esfuerzos diferentes al combinar más materiales al sistema propuesto.

### 5.3.4. ELABORACIÓN EN LA INTERFAZ DEL PROGRAMA



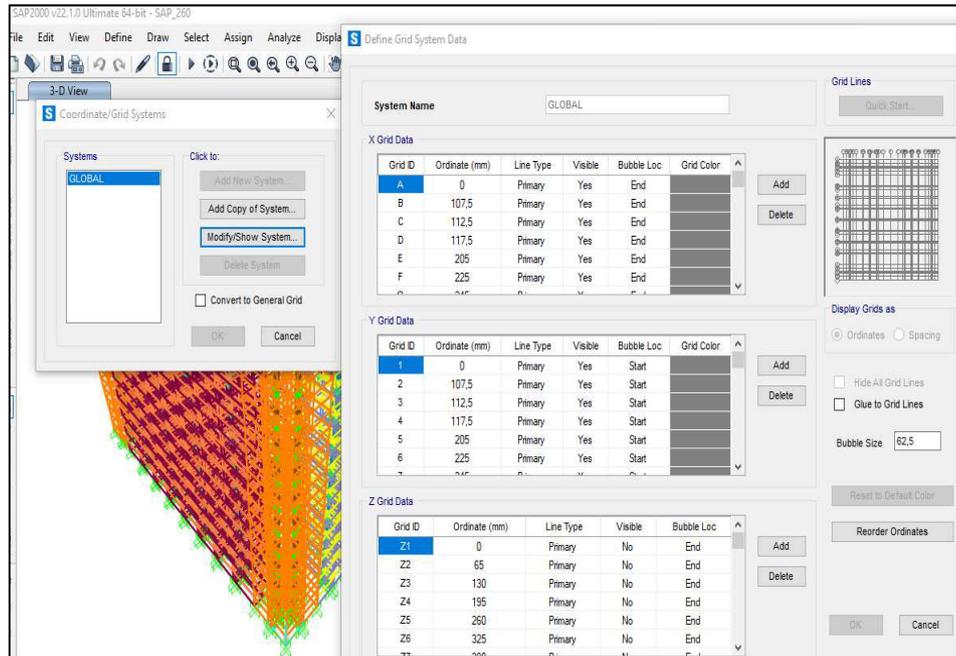
**Figura 5.8.** Dimensiones del sistema de superadobe propuesto.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Una vez instalado el programa de SAP2000 V22.1.0 Ultimate, los pasos a continuación describen el diseño de un módulo de superadobe con refuerzo de vertical de estacas de caña guadúa y un diafragma de caña guadúa (*GaK*), usado de enlace superior entre los muros:

#### 5.3.4.1. Preparación del “grid systems” o malla

El primer paso es la creación de un sistema de ejes de coordenadas, acordes a las necesidades de los planos establecidos, en este sistema de ejes se indica el espaciamiento en las tres dimensiones como se indica en la figura 5.9., también se debe establecer las unidades a utilizar, se toma las unidades del Sistema Internacional (SI), pero estas pueden ser cambiadas con facilidad según se requiera.

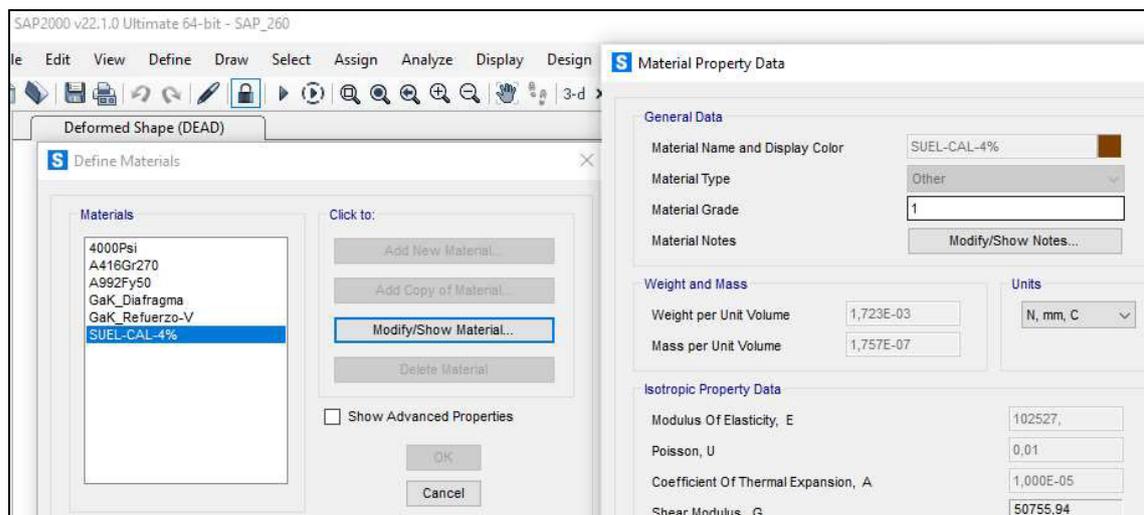


**Figura 5.9.** Configuración del “grid system” para la elaboración del sistema.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

### 5.3.4.2. Definición de los materiales.

La creación de los materiales se realiza con las características determinadas tanto en el capítulo 4 y en el capítulo 5.3.1. para el superadobe y 5.3.2. para el refuerzo vertical el diafragma de caña guadúa (GaK), en la figura 5.10. se muestran los valores ingresados para el material suelo-cal al 4%:

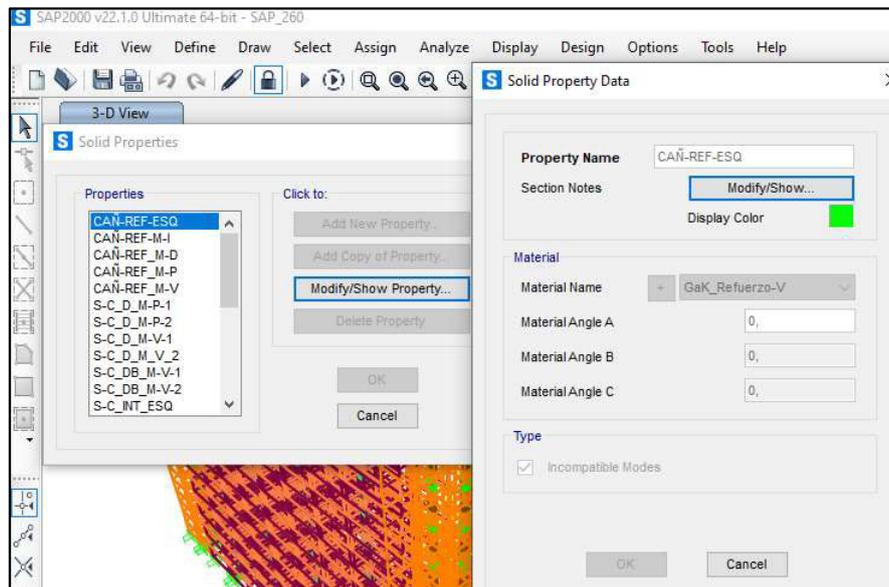


**Figura 5.10.** Configuración de los materiales para la elaboración del sistema.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

### 5.3.4.3. Definición de los elementos

Para un mejor análisis, se elabora el modelo de elementos finitos, por lo que los elementos sólidos son discretizados, estos elementos sólidos presentan una forma más real del sistema planteado, tras una serie de pasos que va desde la creación de elementos área para llegar elementos sólidos, se obtiene los materiales como se muestra en la figura 5.11.:



**Figura 5.11.** Definición de elementos sólidos en la elaboración del sistema.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

### 5.3.4.4. Determinación de las secciones de corte.

Debido a que se usa elementos sólidos, se debe ubicar secciones de corte, las cuales son usadas para analizar los elementos en esa sección transversal de corte, y así revisar las fuerzas internas, dichas secciones se las ubica en los lugares que se puede comprometer el sistema, en uniones (esquinas) así también cerca de los dinteles y en el centro de los muros, consideradas secciones de importancia, debido a la acumulación de esfuerzos. Estas secciones se las realiza con la herramienta de “*section cuts*”, y pueden ser secciones de análisis o secciones de diseño, como se observa en la figura 5.12.:

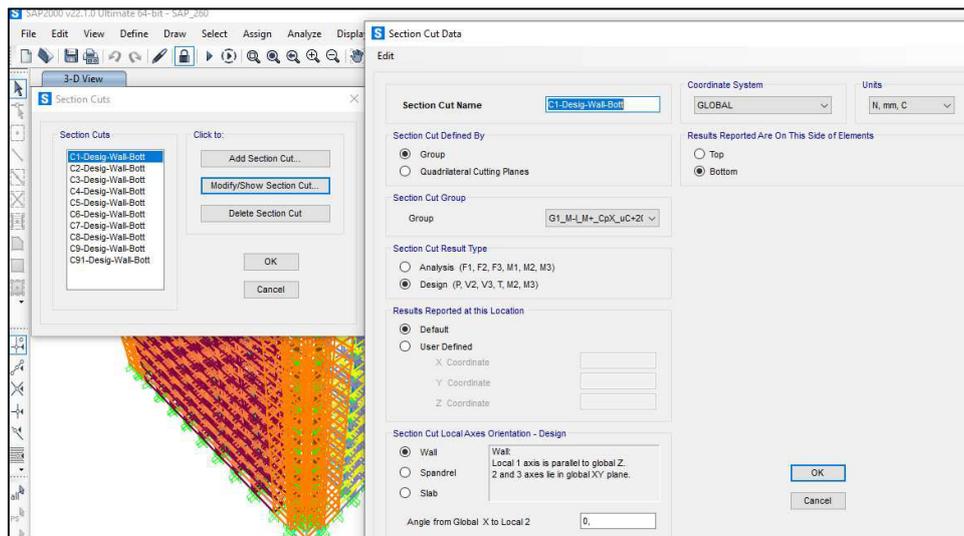


Figura 5.12. Determinación de las secciones de corte en el sistema.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

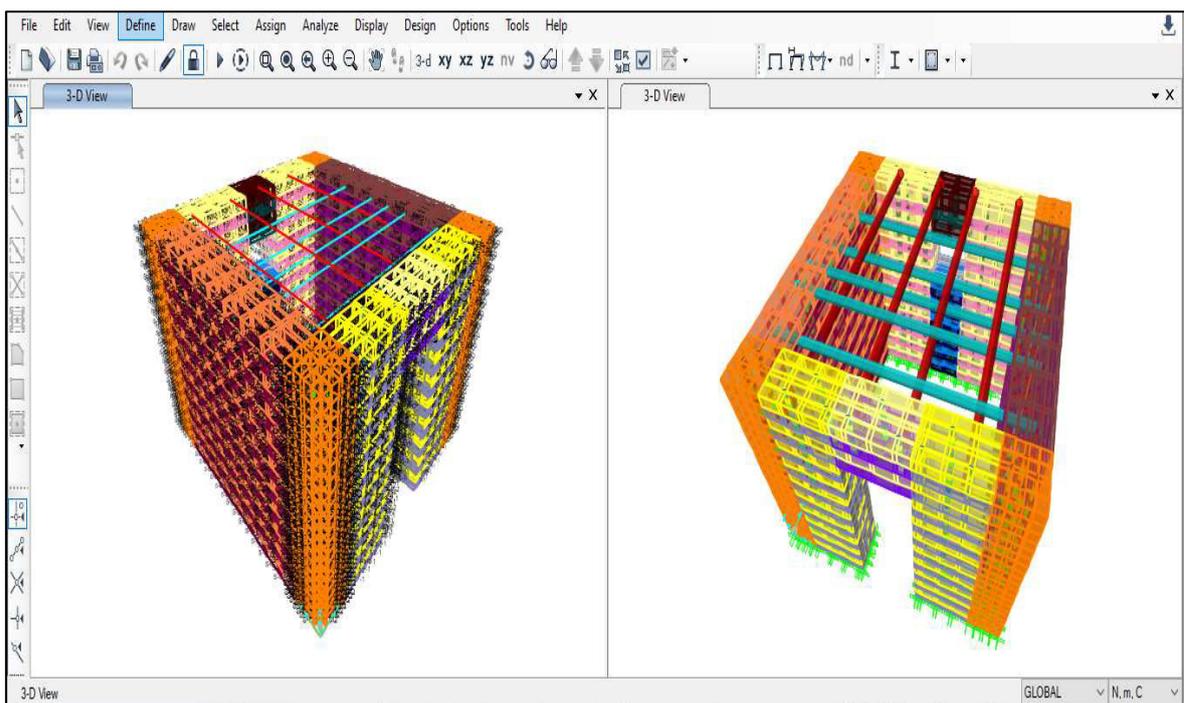


Figura 5.13. Modelo computacional de elementos sólidos para análisis del sistema de superadobe propuesto.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

#### 5.3.4.5. Determinación y colocación de las cargas.

En este punto es necesario identificar todas las fuerzas que actuarán en el sistema y cuál será su sentido de acción, así se tiene según la (NEC-SE-DS, 2015), cargas

muertas, cargas vivas, cargas accidentales (sismo, viento y granizo), como ya se vio en el capítulo 3.6.1. La aplicación de estas cargas tiene un criterio diferente para cada una de ellas, por lo tanto:

#### 5.3.4.5.1. Cargas muertas

El peso propio de la estructura puede ser considerado por el programa o a su vez determinado con el peso específico del material, también es necesario tener en cuenta el peso de la cubierta, el cual se detalla en la tabla 5.9., así como el peso de los muros. Con la ayuda de Excel se muestran los valores en la tabla 5.10.:

**Tabla 5.9. Estimación de la carga muerta de la cubierta (sobre carga muerta) repartida en el sistema**

<b>Peso de carga muerta por cubierta</b>						
<b>Peso de Caña guadúa (GaK)</b>	<b>Peso Específico</b>	<b>Área de sección</b>	<b>Longitud</b>	<b>Volumen</b>	<b>Peso Total</b>	<b>Peso sobre muros</b>
	<b>N/m<sup>2</sup></b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>m</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>N</b>	<b>N/m<sup>2</sup></b>
	5785.841	0.0094	85.3	0.80	4651.05	771.32
<b>Peso de Teja Española</b>	<b>Peso</b>	<b>Longitud X</b>	<b>Longitud Y</b>	<b>Área</b>	<b>Peso</b>	<b>Peso</b>
	<b>N/m<sup>2</sup></b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>N</b>	<b>N/m<sup>2</sup></b>
	119.682	4.2	4.3	18.06	2161.46	358.45
<b>Peso total de sobre carga muerta por cubierta:</b>						<b>1129.77</b>

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

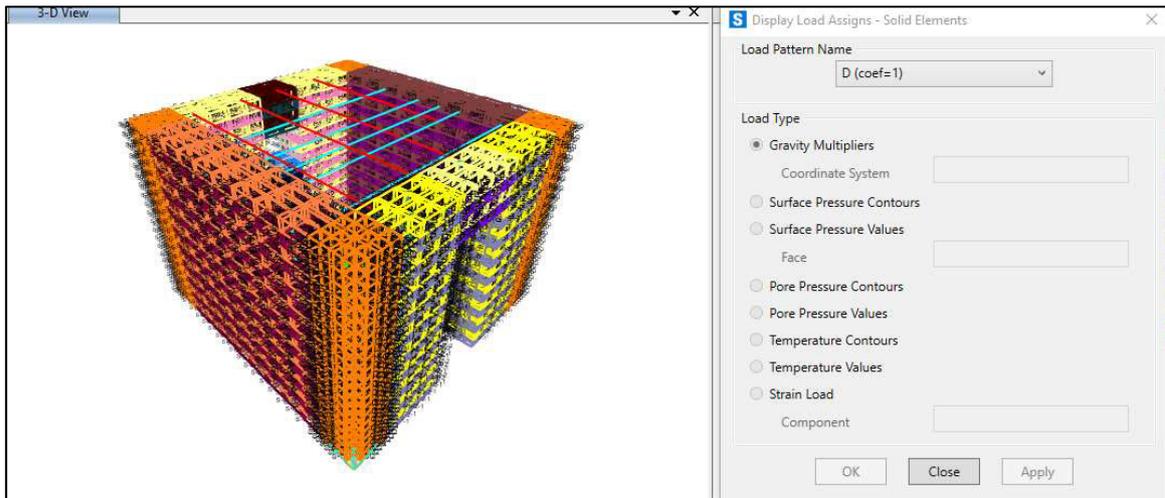
**Tabla 5.10. Estimación de la carga muerta de los muros (peso propio) repartida en el sistema**

<b>Cálculo del peso (carga muerta) del sistema para cada hilada y por elemento</b>					
<b>Elemento</b>	<b>Peso (N)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área tot. (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Peso por área (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Peso por área por fila (N/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Esquinas</b>	36278.7	0.2025	0.81	44788.5	2357.3
<b>Muro izquierdo</b>	50387.1	1.125	1.125	44788.5	2357.3
<b>Muro derecho</b>	50387.1	1.125	1.125	44788.5	2357.3
<b>Muro Puerta</b>	34666.3	1.08	1.08	32098.5	1689.4
<b>Muro Ventana</b>	46286.4	1.08	1.08	42857.8	2255.7

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

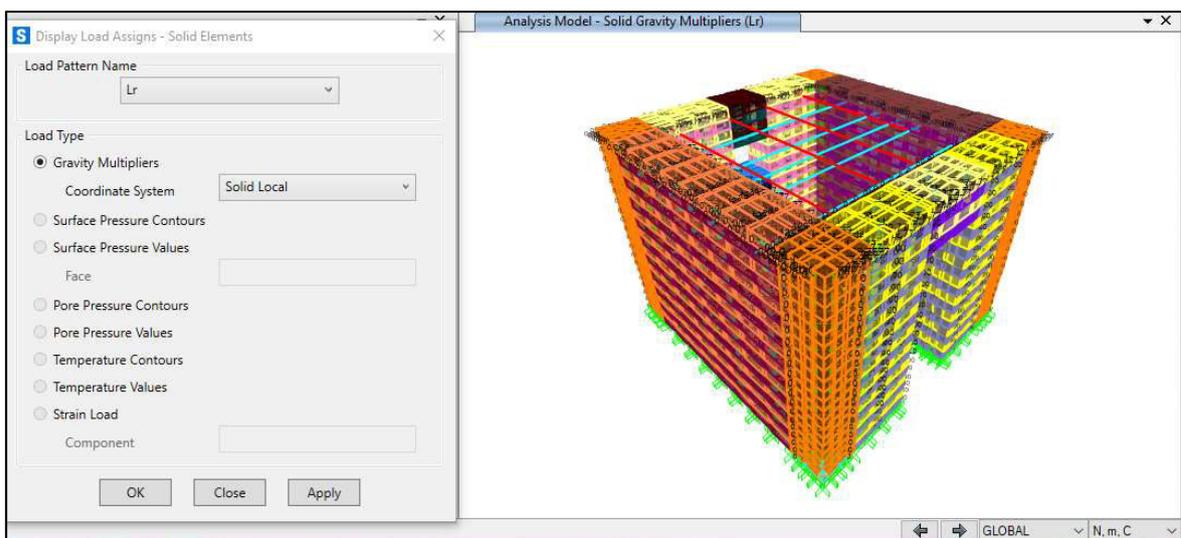
En la figura 5.14 se muestra la aplicación de la carga global de peso propio D, cuyo coeficiente es de 1, ya que el programa toma en cuenta el peso propio de los elementos.

Mientras que, en la figura 5.15 se muestra la aplicación de sobrecarga o carga de cubierta Lr, que no es considerada en el programa, repartida en la primera hilada.



**Figura 5.14.** Aplicación de la carga muerta D.

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera

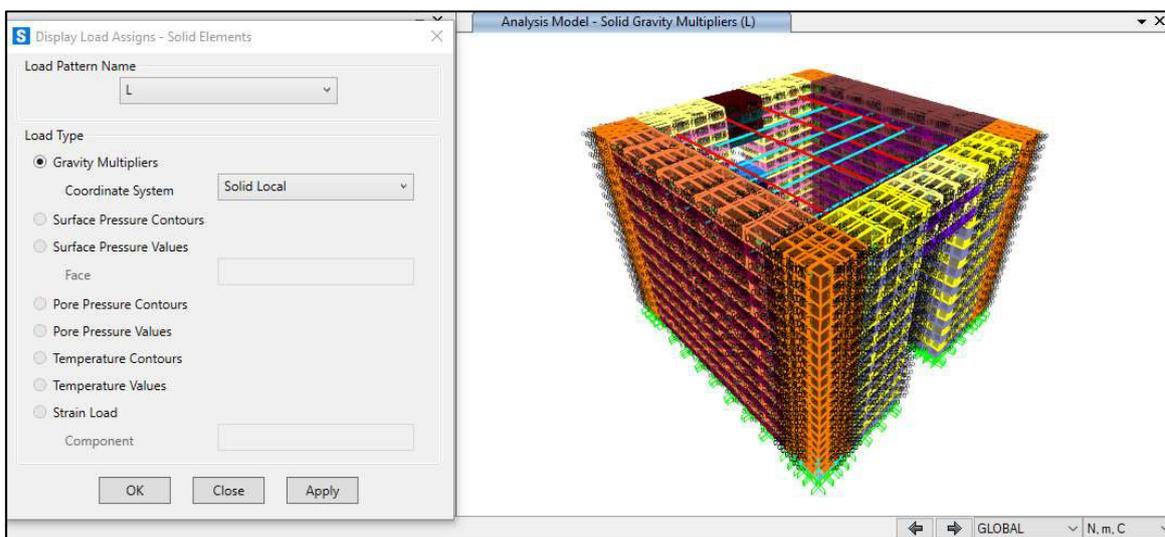


**Figura 5.15.** Aplicación de la carga de cubierta Lr.

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera

### 5.3.4.5.2. Cargas Vivas

La carga viva para este sistema, al ser solo de un piso, no interfiere directamente, pero la (NEC-SE-DS, 2015) establece que es necesario un valor de  $200 \text{ kg/m}^2$ , similar a  $1962 \text{ N/m}^2$ , esta carga debe ser tomada en cuenta como un valor mínimo para las combinaciones de carga como se indicó en el numeral 3.6.1.1.2. En la figura 5.16. se puede apreciar la aplicación de la carga viva sobre los muros, esto debido a que en la construcción del sistema las personas caminarán sobre los muros.



**Figura 5.16.** Aplicación de la carga viva L.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

### 5.3.4.5.3. Cargas por viento

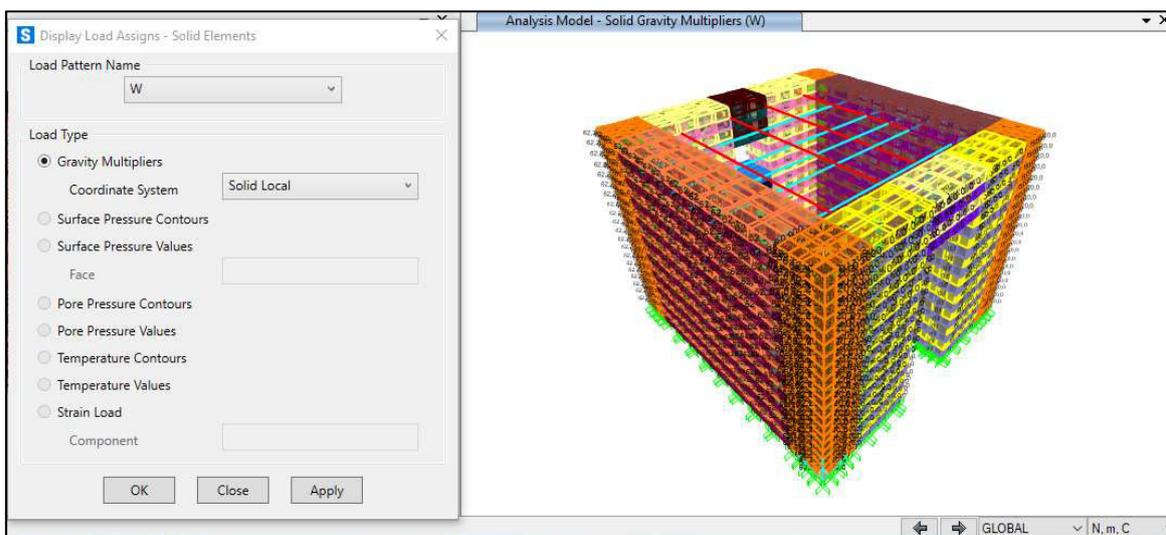
Se considera la (NEC-SE-CG, 2015) como se indica en el capítulo 3.6.1.1.3., para determinar los coeficientes para la carga por viento, para ello se usa la ecuación (10), con la cual, el valor de la presión del viento tiene el valor de  $62.11 \text{ N/m}^2$ , como se indica en la tabla 5.11.:

**Tabla 5.11. Determinación de la carga por viento en el sistema**

Carga por viento		
$P = 1/2 \rho V_b^2 c_e c_f$		
$V_b = V * \sigma$		
V =	10	m/s
$\sigma$ =	0.91	--
$\rho$ =	1.25	kg/m <sup>3</sup>
$V_b^2$ =	9.1	m/s
$c_e$ =	0.8	--
$c_f$ =	1.5	--
P =	62.1075	N/m <sup>2</sup>

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

La aplicación de la carga de viento es mínima en comparación a cargas como la del sismo o el peso propio, en la figura 5.17. se presenta la aplicación de la carga de viento W.



**Figura 5.17.** Aplicación de la carga de viento L.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

#### 5.3.4.5.4. Cargas por granizo

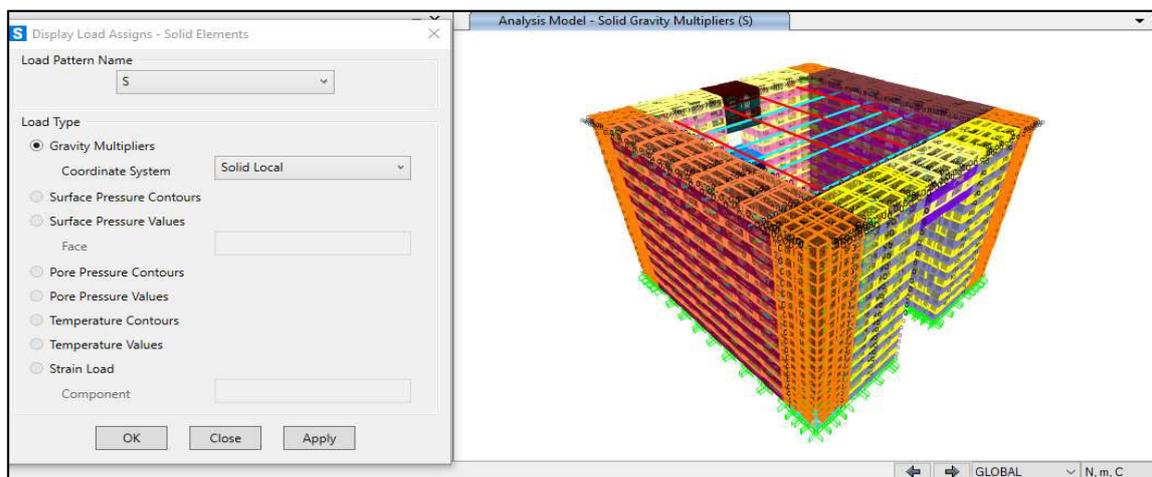
Teniendo en cuenta la ecuación (12) que es tomada de la (NEC-SE-CG, 2015) en su capítulo 3.2.5., se determina que el valor de carga por granizo es de 100 N/m<sup>2</sup>, ya que la pendiente de la cubierta es de 30°.

**Tabla 5.12. Determinación de la carga por granizo en el sistema**

<b>Carga por granizo</b>		
<b><math>S = \rho_s H_s</math></b>		
$\rho_s =$	1000	kg/m <sup>3</sup>
$H_s =$	0.1	m
<b>S =</b>	<b>100</b>	<b>N/m<sup>2</sup></b>

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

La figura 5.18, muestra la aplicación de la carga por granizo S, sobre el sistema.

**Figura 5.18.** Aplicación de la carga de granizo S.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

#### 5.3.4.5.5. Cargas de sismo

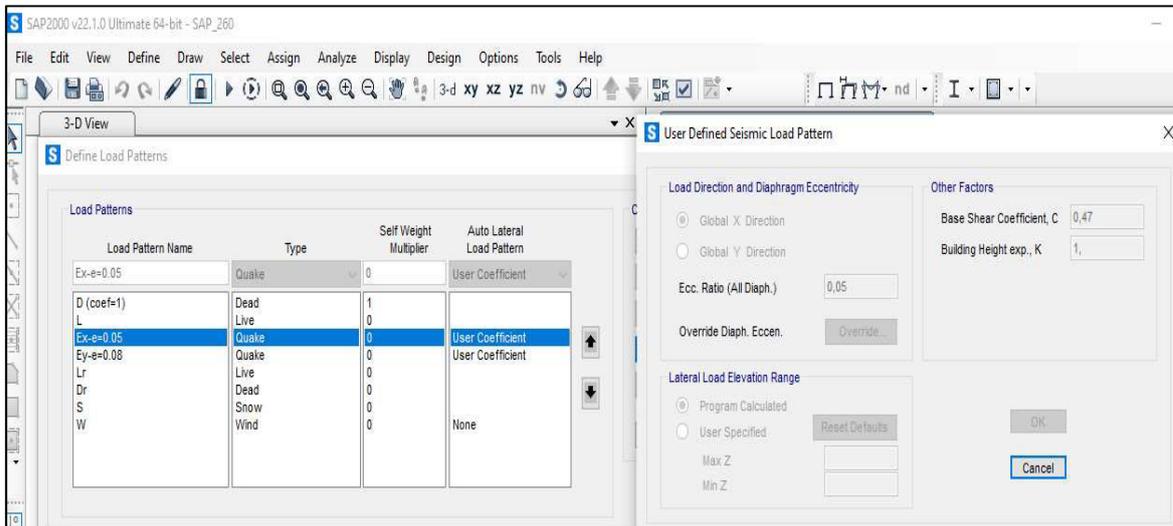
Las fuerzas sísmicas son determinadas en base a la (NEC-SE-DS, 2015) y sus combinaciones como se estipula en el capítulo 3.6.6., la tabla 5.13. da un resumen de la fuerza sísmica.

**Tabla 5.13. Determinación de la carga por sismo en el sistema**

<b>Resumen de Fuerzas Horizontales</b>		
Fuerza sentido X	10.98	Ton
Fuerza sentido Y	11.80	Ton
Fuerza Horizontal	15.59	Ton
<b>Resumen de Fuerza Verticales</b>		
Fuerza sentido Vertical	10.40	Ton
<b>Resumen de Fuerza Verticales</b>		
Fuerza Sísmica	25.99	Ton

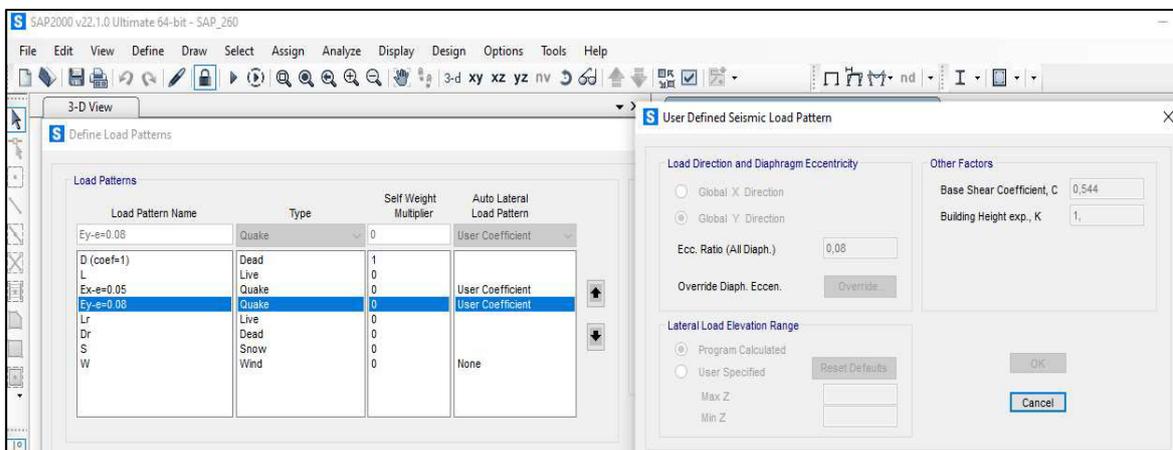
*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

La figura 5.19 y la figura 5.20, muestra la aplicación de las cargas de sismo a través de la interfaz de la del programa SAP2000-V22, en el sentido “X” y en el sentido “Y” respectivamente.



**Figura 5.19.** Aplicación de la carga sísmica, sentido X.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



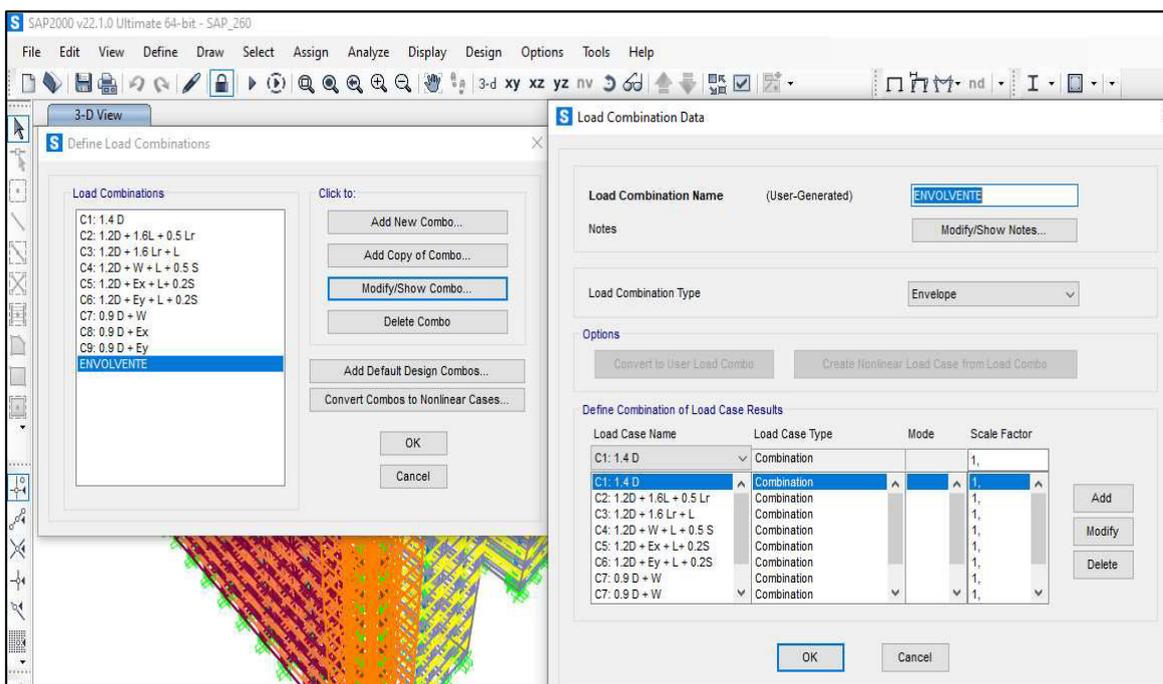
**Figura 5.20.** Aplicación de la carga sísmica, sentido Y.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

#### 5.3.4.5.6. Combinaciones de carga

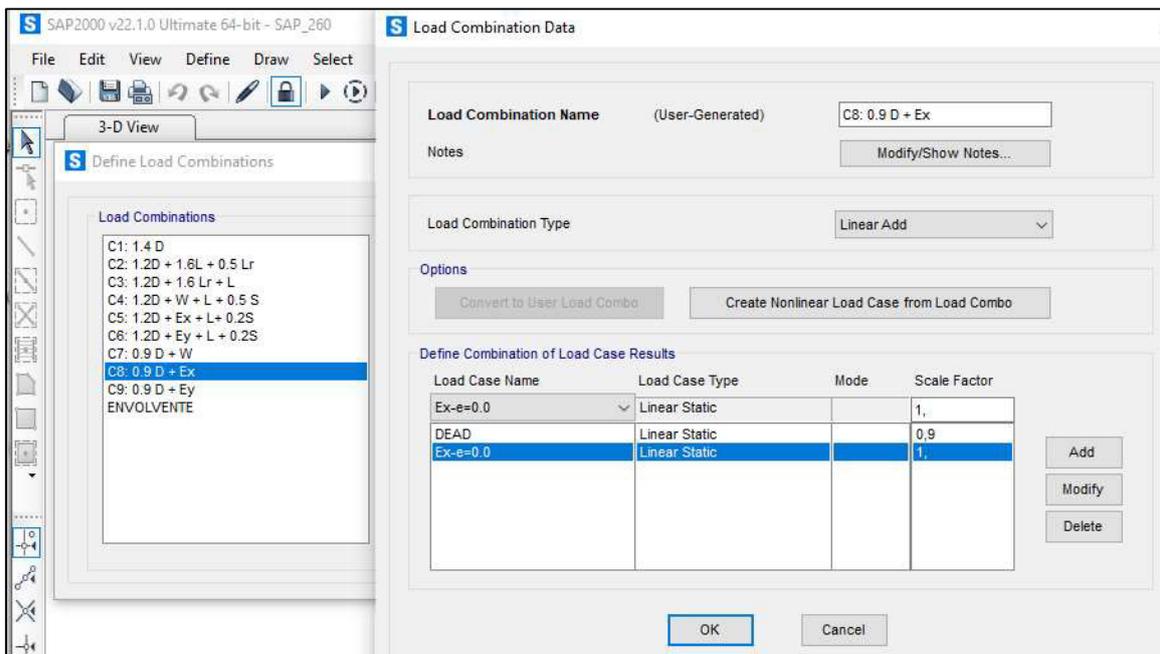
Las combinaciones de carga se las establece de acuerdo a la sección 3.6.1.2. de este trabajo, además se adiciona una combinación, de nominada envolvente, que

precisamente adopta a todas las combinaciones, para determinar la situación más desfavorable del sistema en cada combinación.



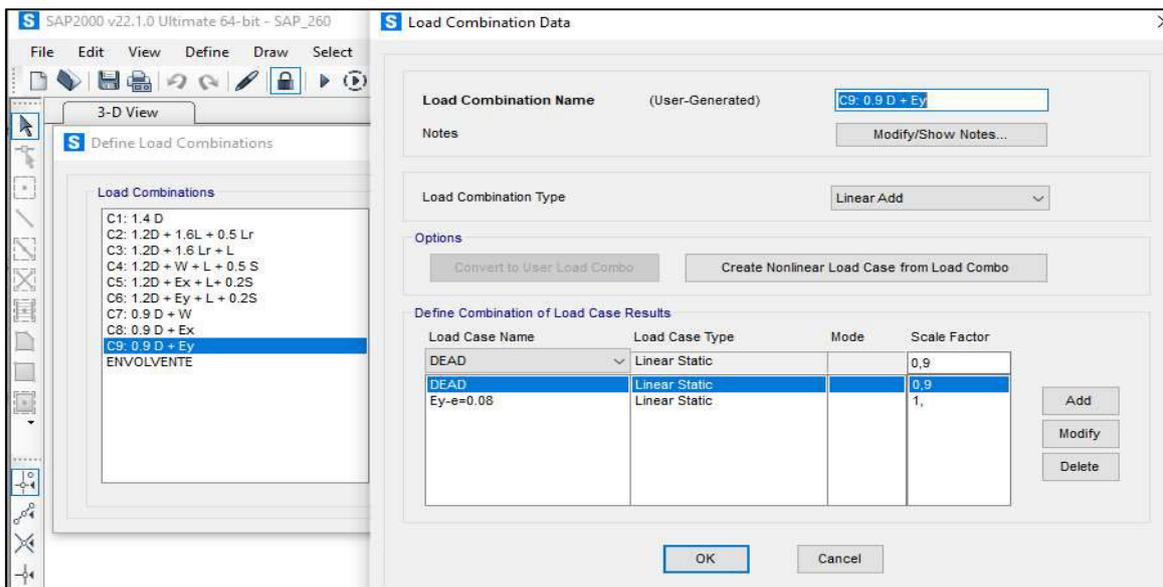
**Figura 5.21.** Creación de combinaciones de carga para el análisis del sistema.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 5.22.** Creación de combinaciones de sismo en sentido X par el análisis del sistema.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

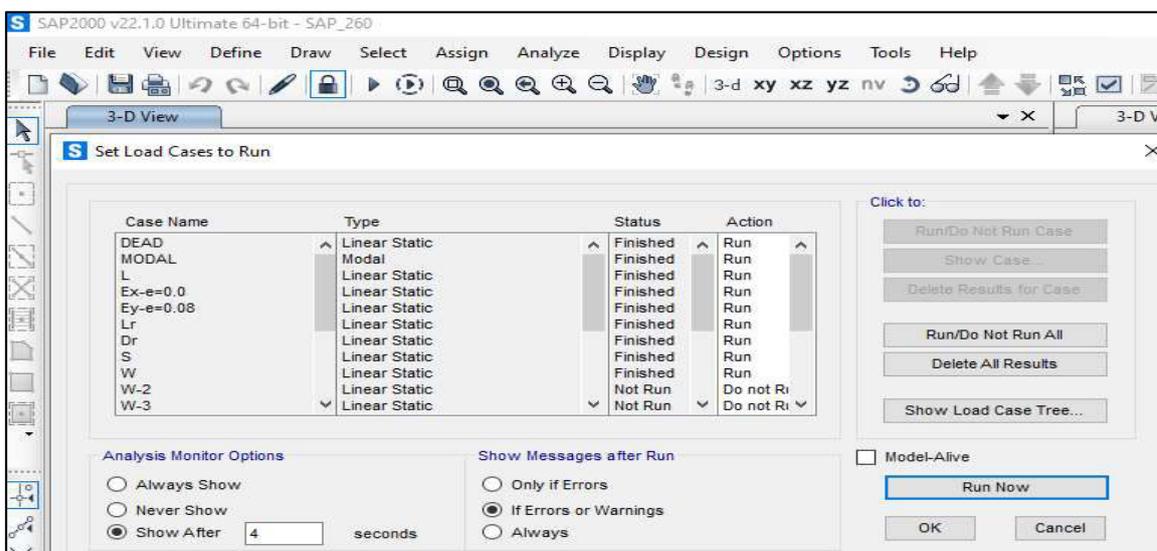


**Figura 5.23.** Creación de combinaciones de sismo en sentido Y para el análisis del sistema.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

#### 5.3.4.5.7. Ejecución del modelo.

El modelo computacional del sistema se analiza tanto las combinaciones establecidas, como un caso “modal”, que cubre los modos y períodos de vibración del sistema.



**Figura 5.24.** Ejecución de análisis del sistema ante diferentes estados de carga.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

## 5.4. APLICACIÓN DE LA NEC-15 AL SISTEMA

### 5.4.1. FACTOR DE ZONA Z

Como se observó en el capítulo 3.6.3.1. el factor Z determina la zona sísmica, para este punto, pese a que los materiales como el suelo, son de la región sierra (Quito) y el refuerzo vertical, la caña guadúa (*GaK*), de la región litoral (Esmeraldas), se considera como el sitio de emplazamiento corresponda a una zona sísmica VI, con caracterización de peligro sísmico muy alta y con ello se acepta el valor de  $Z = 0.5$ .

### 5.4.2. TIPO DE PERFIL DE SUELO

En el capítulo 3.6.3.3. se establece diferentes tipos de perfil de suelo, en este caso se considera un perfil de suelo tipo E, ya que éste tipo de suelo representa a suelos de arcillas blandas y por esas características sería un suelo con mucho cuidado para cualquier tipo de obra civil, esto se hace para posicionar al sistema en el suelo de cimentación de mayor complejidad para sistemas estructurales.

#### 5.4.2.1. Determinación del valor de $\eta$

Como se mencionó en el capítulo 3.6.4.2. el valor del PGA puede ser relacionado con el valor de Z y de esta relación se produce el  $\eta$ , que, a su vez, al relacionarse con la figura 3.35. de la sección 3.6.4., se obtiene los siguientes valores:

**Tabla 5.14. Relación de  $S_a$  y el Z a través del mapa do zonas sísmicas.**

$\eta = S_a / PGA$		
$\eta$	PGA ~ Z	$S_a$
1.80	0.51	0.92
2.48	0.40	0.99
2.60	0.15	0.39

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

De la tabla 5.14. se puede determinar que la mayor aceleración  $S_a$ , se obtiene cuando el factor  $\eta$  equivale a 2.48, y este el valor se acepta.

#### 5.4.2.2. Factor r

Este valor está relacionado directamente con el tipo de suelo, en el caso de suelos tipo E, como el asumido, el valor es de 1.50.

### 5.4.3. COEFICIENTES DE PERFIL DE SUELO

Para estos coeficientes basta con identificar el Factor Z y el tipo de perfil de suelo en las figuras del capítulo 3.6.3.4., para luego relacionarlas entre sí, así se

establece que las diferentes combinaciones de los coeficientes de perfil de suelo, castigan o benefician las amplificaciones de aceleración, desplazamiento y la no linealidad del suelo. Quedando los valores de los factores así:  $F_a = 0.85$ ;  $F_d = 1.50$  y  $F_s = 2.00$ .

#### 5.4.4. ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN ACELERACIONES

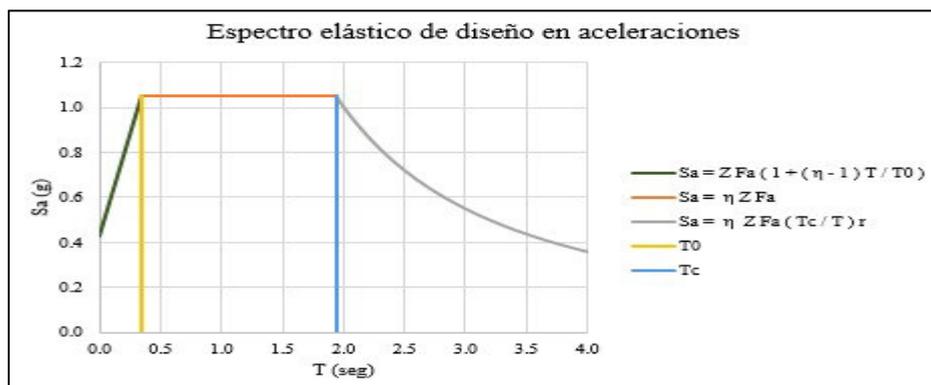
Una vez determinado los valores de los coeficientes se puede obtener el espectro elástico de diseño en aceleración y en desplazamiento.

Para lo cual se presenta la tabla 5.15. con el resumen de valores y la gráfica en la figura 5.25. del espectro elástico de diseño en aceleraciones:

**Tabla 5.15. Resumen de Coeficientes para elaboración del espectro de diseño en aceleración y determinación de límites de los períodos**

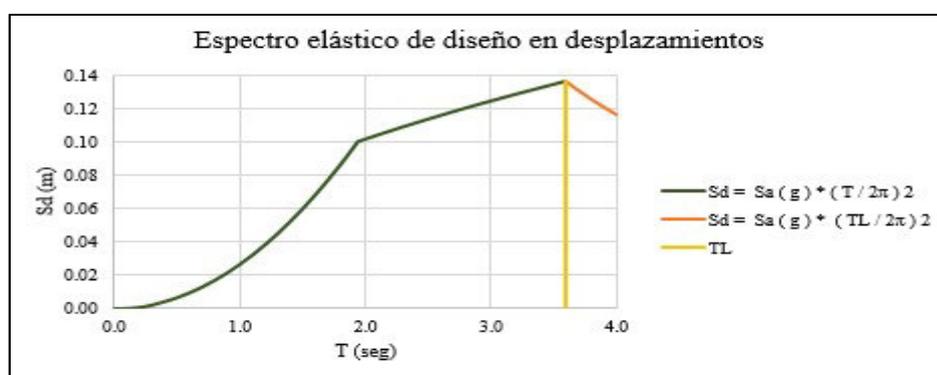
<b>Espectro elástico de diseño en aceleraciones y desplazamientos</b>		
Perfil de Suelo	E	$IP > 20$ ; $w \geq 40\%$ ^ $S_u < 50\text{kPa}$
Valor Factor Z	0.50	Peligro sísmico muy alto
Coefficiente $F_a$	0.85	Ampliación de aceleración
Coefficiente $F_d$	1.50	Ampliación de desplazamiento
Coefficiente $F_s$	2.00	Comportamiento no Lineal del suelo
$\eta = S_a / \text{PGA}$	2.48	PGA es equivalente a Z
r	1.50	Valor en base al Perfil del Suelo
$T_0$	0.353	$T_0 = 0.10 F_s F_d / F_a$
$T_c$	1.941	$T_c = 0.55 F_s F_d / F_a$
$T_L$	3.600	$T_L = 2.4 F_d < 4$

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 5.25.** Espectro elástico de diseño en aceleraciones.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 5.26.** Espectro elástico de diseño en desplazamientos.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

#### 5.4.5. APLICACIÓN DEL MÉTODO DBF

Como se indica en el capítulo 3.6.8.4., se debe determinar el valor del cortante basal, para lo cual se requieren varios términos de la ecuación (23) cuyos valores se indican a continuación:

##### 5.4.5.1. Factor de Importancia I

En el capítulo 3.6.7.1. se define este factor, por lo cual, debido a las características del sistema se toma como 1 el valor de I.

##### 5.4.5.2. Período de vibración $T_a$

El período de vibración se calcula con las ecuaciones (24), (25) y (26), el resumen de esos valores se los detalla en la tabla 5.16., en la cual se indica el valor del período en cada sentido de dirección de la fuerza.

**Tabla 5.16. Resumen de los períodos en las dos direcciones.**

<b>Período de vibración <math>T_a</math></b>		
	<b>Fuerza Sentido X</b>	<b>Fuerza Sentido Y</b>
<b><math>T_a</math> (s) =</b>	0.069	0.025
<b><math>h_n</math> (m) =</b>	2.600	2.600
<b><math>\alpha</math> =</b>	1.000	1.000
<b><math>C_t</math> =</b>	0.027	0.009
<b><math>C_w</math> =</b>	18.361	2.311
<b><math>A_B</math> (m<sup>2</sup>) =</b>	11.22	11.22
<b><math>n_w</math> =</b>	2.00	5.00
<b><math>h_{wi}</math> (m) =</b>	5.20	11.96
<b><math>A_{wi}</math> (m<sup>2</sup>) =</b>	3.06	1.78
<b><math>L_{wi}</math> (m) =</b>	6.80	3.95

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

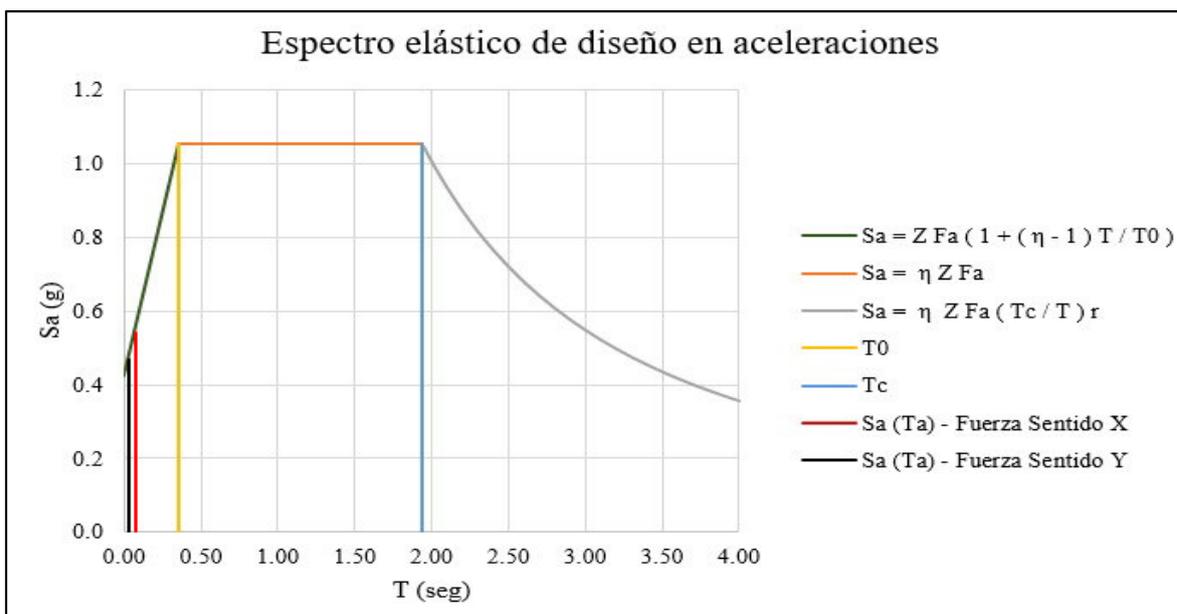
#### 5.4.5.3. Espectro de aceleración $S_a$

El espectro de aceleración  $S_a$ , que es una función del tiempo  $T_a$  (período) se lo obtiene como se indica en el capítulo 3.6.4.1. y de la figura 5.25., para ello se muestran la tabla 5.17. y la figura 5.27.:

**Tabla 5.17. Valores de la  $S_a$  con respecto a períodos  $T_a$ , en dos direcciones.**

<b><math>S_a(T_a)</math></b>		
<b>Sentido</b>	<b><math>T_a</math> (s)</b>	<b><math>S_a</math> (g)</b>
<b>X</b>	0.069	0.470
<b>Y</b>	0.025	0.540

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 5.27.** Espectro elástico de diseño en aceleraciones, indica la ubicación de los períodos  $T_a$  para cada dirección.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

#### 5.4.5.4. Factor de reducción $R$

El valor del factor de reducción  $R$  para el sistema es de 1, esto debido a que el sistema es muy rígido y no presenta mayor ductilidad.

##### 5.4.5.4.1. Factores de reducción $\Phi_P$ y $\Phi_E$

Como se indicó en el capítulo 3.6.8.1.1. el diseño del sistema es muy regular, tanto en planta como en elevación, por lo que se establece que  $\Phi_P = 1$  y  $\Phi_E = 1$ .

#### 5.4.5.5. Carga sísmica reactiva

El peso reactivo o carga sísmica reactiva está definida por todo el peso de la estructura, el cual se detalla en la tabla 5.18., y da como resultado un peso total de 21.69 ton.

**Tabla 5.18. Peso total del sistema (carga muerta y sobrecarga).**

<b>Peso Total del Sistema</b>			
	Volumen	Peso específico	Peso
	m <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>	N
Superadobe	11.95	17226.36	205855.00
Refuerzo vertical de caña guadúa ( <i>GaK</i> )	0.024	5785.841	138.86
Caña <i>guadúa</i> ( <i>GaK</i> ) en cubierta	0.8	5785.841	4628.67
Teja Española	--	--	2161.46
	Peso total en	N	212783.99
	Peso total en	kg	21690.52
	Peso total en	Ton	21.69

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

En la tabla 5.19. se presenta un resumen del diseño basado en fuerzas, con el cual se determina que el valor del corte Basal V, que es de 15.59 Ton, una vez aplicada la ecuación (22) del capítulo 3.6.6.

**Tabla 5.19. Resumen de valores para determina el Corte Basal V.**

<b>Resumen de DBF</b>			
Período del Programa SAP2000	0.00384	Período para el 1 <sup>er</sup> modo	
Factor de Importancia I	1.0000	Todas las estructuras	
Período de vibración $T_a$ (s)	Sentido X	0.0670	Períodos muy cortos
	Sentido Y	0.0250	
Espectro de aceleración $S_a$ ( $T_a$ )	Sentido X	0.4700	Cerca de 1/2 de g
	Sentido Y	0.5440	
Factor de Reducción R	1	Un valor que no reduce	
Factor de Planta $\Phi_P$	1	Regular en Planta	
Factor de Planta $\Phi_E$	1	Regular en elevación	
Carga sísmica reactiva (Ton)	21.69	Peso total del sistema	
Coeficiente c sentido X	0.470	W	
Coeficiente c sentido Y	0.544	W	
Corte Basal V sentido X	10.19	Ton	
Corte Basal V sentido Y	11.80	Ton	
Corte Basal V	15.59	Ton	

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Adicional a estos valores se debe considerar el valor de " $k_r$ ", que está relacionado con el valor del período como se mostró en la tabla 3.1. de la sección 3.6.6.5.1., ya que es un parámetro que el programa SAP2000-V22 requiere para realizar la

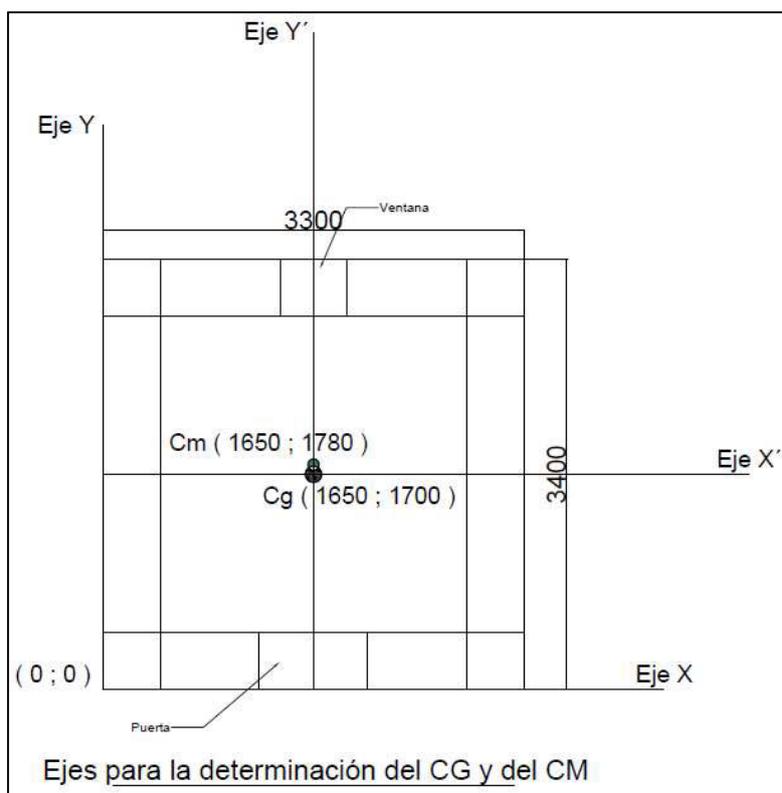
distribución de las fuerzas horizontales, quedando este valor en 1, ya que el período del sistema propuesto es inferior a 0.5 s.

Y finalmente también se debe calcular el valor  $e$ , que es la excentricidad existente entre el centro de masas con el centro de geométrico como se indica en el capítulo 3.6.8.5.2, por lo que se presenta la tabla 5.20.:

**Tabla 5.20. Determinación del centro de masa y centro geométrico.**

Centro de Geométrico [m]	
Cg X	Cg Y
1.65	1.7
Centro de Masas [m]	
Cm X	Cm Y
1.65	1.78

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera.



**Figura 5.28.** Ubicación de centro geométrico y de centro de masa del sistema.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

## **CAPÍTULO 6**

### **ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

#### **6.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS MATERIALES**

##### **6.1.1. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y MECÁNICOS DEL SUELO.**

Como se mencionó en el capítulo 4.1., la clasificación manual visual, se da a partir de la determinación de tres grupos básicos, suelo fino, arenas o gravas, una vez que se define a que grupo pertenece la muestra de suelo, se determina una clasificación más específica, denominada clasificación SUCS, para ello se usan cuatro ensayos, los cuales son: granulometría, límite plástico, límite líquido y contenido de humedad.

###### **6.1.1.1. Resultado de la clasificación SUCS.**

En el primer ensayo, la granulometría, se determina que es una muestra de suelo que pertenece a arenas limosas SM, tanto el límite de plasticidad como el límite líquido son imposibles de determinar y por ende el índice de plasticidad, ya que al tratarse de una arena esto no es posible, además el Coeficiente de Uniformidad ( $C_u$ ) y el Coeficiente de Curvatura ( $C_c$ ) no se determinan.

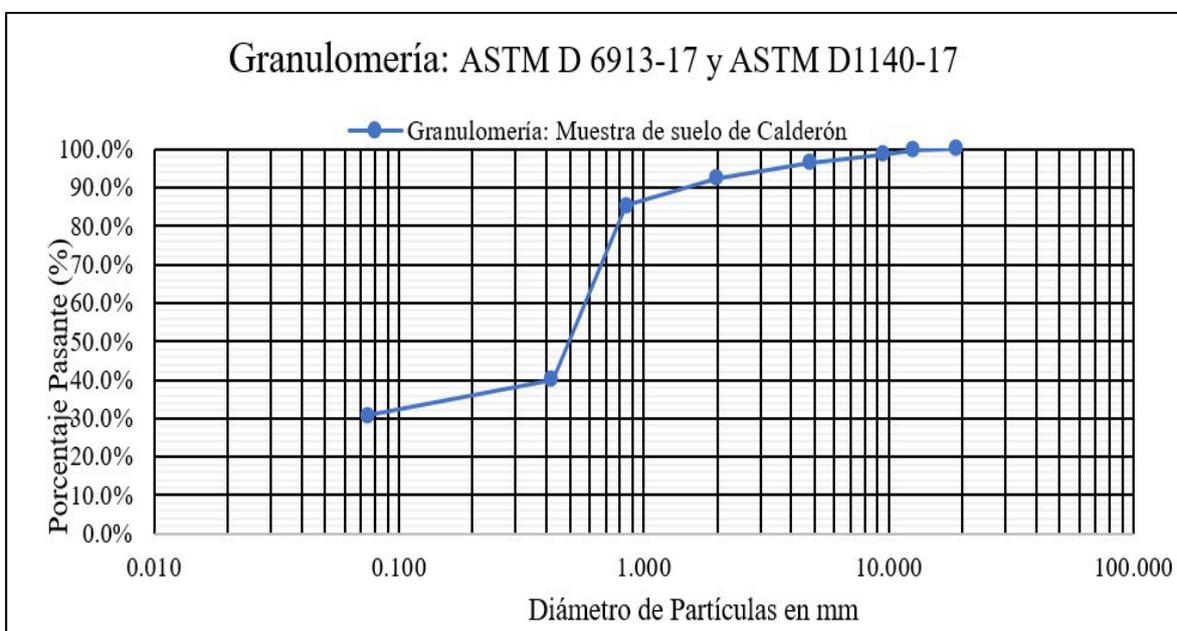
La fracción de suelo que pasa el tamiz N° 200 es superior al 12%, mientras que al trabajar con la porción de suelo que pasa el tamiz N° 4, al llevar a la carta de plasticidad tras el intento de determinar el límite de plasticidad, el límite líquido y a su vez el índice de plasticidad, se determina que es una arena no plástica con contenido de limos. Se presenta la curva de granulometría en la figura 6.1.

Adicional, el contenido de humedad de la muestra es de 3.75% aproximadamente, como se aprecia en la tabla 6.1.

**Tabla 6.1. Determinación de humedad natural del suelo. Norma ASTM D 2216**

Contenido de Humedad - Normas: INEN 690 - ASTM D 2216							
Muestra de suelo del sector de Calderón							
Ensayo N°	Recipiente N°	Peso Cap W3 (g)	Peso Cap + Suelo Hum W1 (g)	Peso Cap + Suelo Sec W2 (g)	Peso Suelo Seco Ws (g)	Peso Agua Ww (g)	Contenido Humedad W%
1	M 29	9.520	62.480	60.530	51.010	1.950	3.823%
2	L 82	10.430	72.180	69.980	59.550	2.200	3.694%

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera

**Figura 6.1.** Curva granulométrica para la muestra de suelo.

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera

Los resultados oficiales del laboratorio del LEMSUR de la EPN para este ensayo se presentan como Anexo 2.

#### 6.1.1.2. Resultado del ensayo de densidad.

El ensayo de densidad se realizó por duplicado, a través del picnómetro en el cual se obtuvieron valores muy similares, se analizaron dos probetas de la misma muestra de suelo de Calderón.

Los valores de la densidad para la muestra de suelo, a una temperatura 20 °C que es una temperatura promedio para la ciudad de Quito, es de 2.542 gr/cm<sup>3</sup> y 2.575 gr/cm<sup>3</sup>, entonces un valor promedio de la densidad para la muestra de suelo es de

2.559 gr/cm<sup>3</sup> aproximadamente, los valores para la determinación se adjuntan en las tablas 6.2., 6.3. y 6.4.

**Tabla 6.2. Determinación de densidad del suelo. Norma ASTM D 854-14**

ASTM D 854-14 - Masa del picnómetro y agua a la Temperatura de ensayo						
NÚMERO DE ENSAYO	Nº de Picnómetro	Temperatura de Ensayo	Masa del Picnómetro	Volumen del Picnómetro	Densidad del agua	Masa del Picnómetro + agua
	--	° C	M <sub>p</sub> (g)	V <sub>p</sub> (cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>w,t</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	M <sub>pw,t</sub> =
1	HS-V-D025	18.750	159.43	500.00	0.99846	658.66
2	HS-V-D026	18.500	159.32	500.00	0.99850	658.57

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.3. Determinación de gravedad específica en muestra de suelo, datos previos.**

ASTM D 854-14 - Gravedad específica a la temperatura de ensayo						
NÚMERO DE ENSAYO	# de Picnómetro	Masa del Suelo Seco	Masa del Picnómetro + agua+suelo	Densidad del suelo	Gravedad específica	Gravedad específica
	--	M <sub>s</sub> (g)	M <sub>pw,t</sub>	ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	M <sub>pw,t</sub>	M <sub>pw,t</sub>
1	HS-V-D025	58.930	694.400	1.400	2.541	1.402
2	HS-V-D026	59.600	695.020	1.400	2.575	1.402

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.4. Determinación de la gravedad específica de la muestra de suelo a la temperatura ambiente de 20 °C.**

ASTM D 854-14 - Gravedad específica del suelo a 20 °C				
NÚMERO DE ENSAYO	# de Picnómetro	Gravedad específica	Coefficiente de Temp. 20 °C	Gravedad específica
	--	$M_{pw,t}$	K	$M_{20\text{ °C}}$
<b>1</b>	HS-V-D025	2.541	1.00025	2.542
<b>2</b>	HS-V-D026	2.575	1.00030	2.575

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

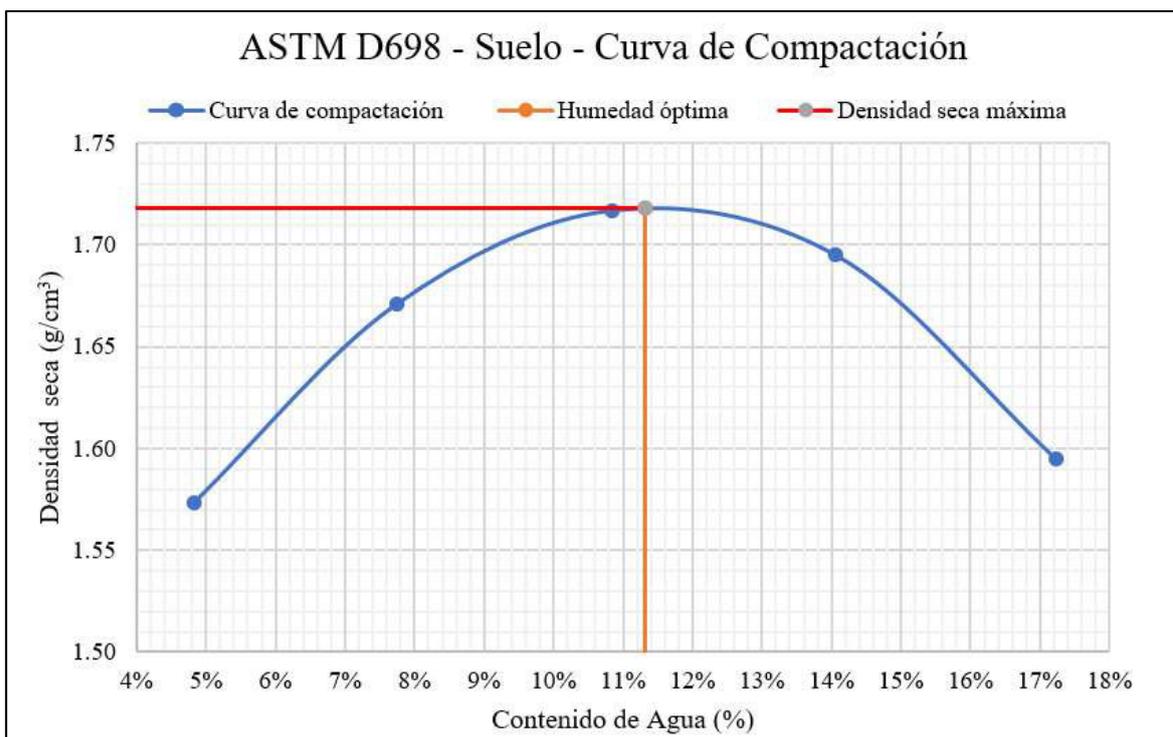
Los resultados oficiales de los ensayos del LEMSUR de la EPN tanto a la muestra de suelo como a la muestra de arena se presentan en el Anexo 3.

#### **6.1.1.3. Resultado del ensayo de compactación.**

Con el fin de aumentar el peso específico del suelo, es decir, densificar el suelo a través de la remoción de aire se procede a compactarlo, para ello existen varios métodos, se adopta el método de Proctor estándar, por facilidad de trabajo y con ello mejorar la resistencia del suelo y la capacidad de carga además de minimizar asentamientos. (Braja, 2001)

Este ensayo da resultados de la densidad expresada en  $\text{g/cm}^3$  y la humedad promedio que se requiere para obtener la humedad óptima para dar la mayor densidad a la muestra.

Los valores de humedad óptima son aproximadamente 11.31% para una densidad seca de  $1.718 \text{ g/cm}^3$



**Figura 6.2.** Grafica de curva de compactación. Muestra de suelo.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Los resultados oficiales del laboratorio del LEMSUR de la EPN para este ensayo se presentan como Anexo 4.

#### **6.1.1.4. Resultados del ensayo de compresión simple.**

El ensayo de compresión simple en suelos o compresión no confinada, es el ensayo que permite tener una muy buena aproximación de la fuerza que soporta el suelo por unidad de área, y así estimar si existe mejoría del suelo al mezclarla con la cal, y que porcentaje puede ser el más recomendado, pero para ello es necesario saber que fuerza vertical soporta el suelo como tal, para el caso del suelo es de 305.0 kPa aproximadamente y presenta una deformación de 1.318%, con un porcentaje de humedad del 11.83% y con un peso específico de 1.69 g/cm<sup>3</sup> para una muestra de suelo re moldeada de suelo seco, a través del ensayo de Proctor estándar.

**Tabla 6.5. Promedio de dimensiones de especímenes para ensayos de la muestra de suelo.**

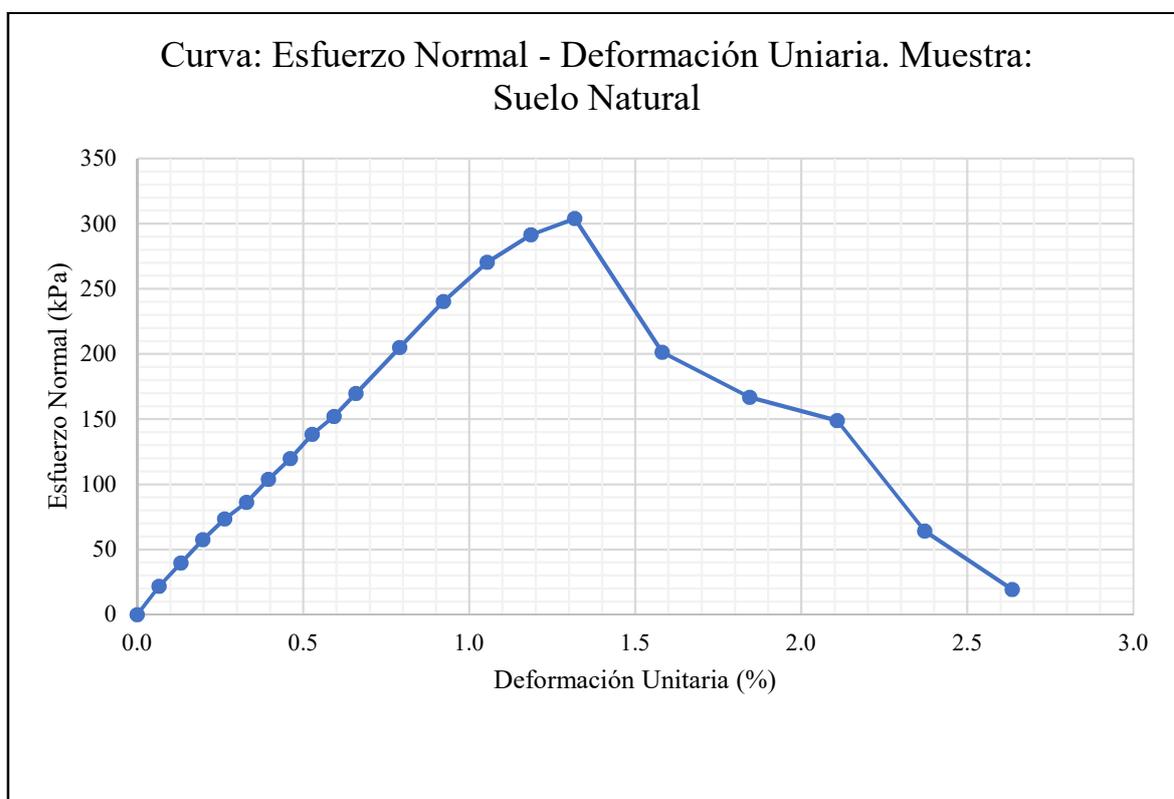
ASTM D2166M-16	
Dimensiones del espécimen	
Diámetro $\phi$ (mm) =	35.80
Longitud $L_0$ (mm) =	75.90
Área $A_0$ (mm <sup>2</sup> ) =	1006.59

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.6. Datos del ensayo de contenido de humedad para muestra de suelo.**

ASTM D2166M-16	
Contenido de Humedad	
N <sup>o</sup> Capsula	LB
W capsula (g) =	18.825
Wcap +sue hume (g)=	143.92
Wcap +sue seca (g) =	128.70
W% (--)=	11.83%

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 6.3.** Curva de esfuerzo vs deformación, para la muestra de suelo.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Los valores determinados en el ensayo de laboratorio en el laboratorio del LEMSUR de la EPN se presentan como Anexo 5.

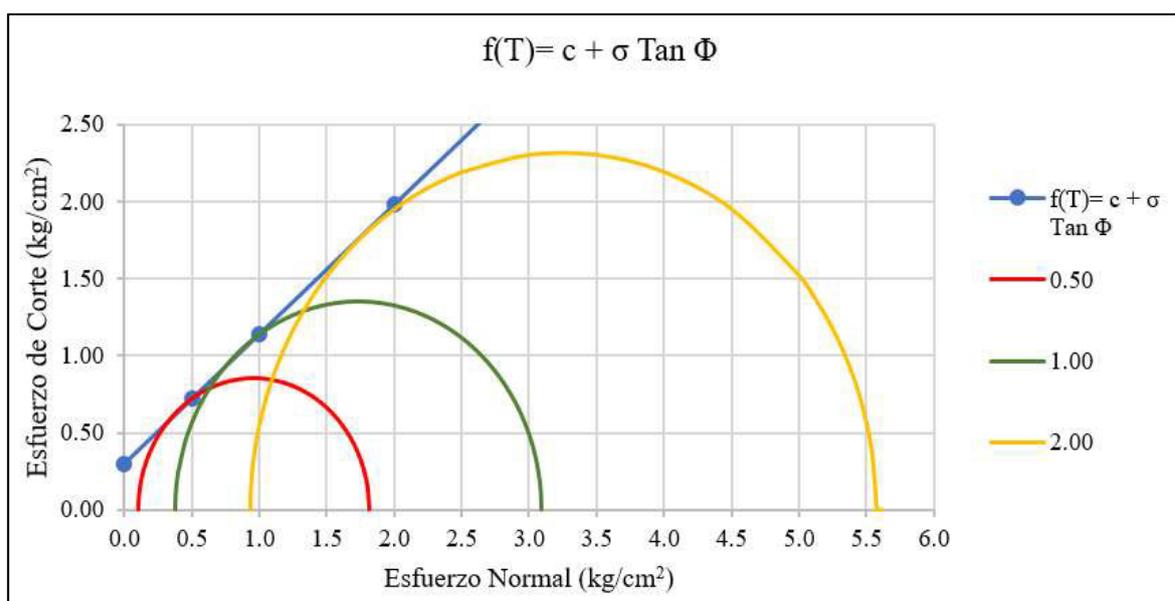
#### 6.1.1.5. Resultados del ensayo de corte directo.

En los ensayos realizados en el LEMSUR de la EPN, se determina la cohesión del suelo natural, con un valor de  $0.3 \text{ kg/cm}^2$  y un ángulo de fricción interna de  $40.03^\circ$ , es un valor determinado para las arenas de granos angulares.

**Tabla 6.7. Datos del ensayo de contenido de Esfuerzo Normal ante el Esfuerzo Cortante para la muestra de suelo.**

$c \text{ (kg/cm}^2\text{)} =$	0.3
$\Phi \text{ (}^\circ\text{)} =$	40.03
$\Phi \text{ (rad)} =$	0.699
$f(T) = c + \sigma \text{ Tan } \Phi$	
<b>ESFUERZO NORMAL</b>	<b>ESFUERZO CORTANTE</b>
<b>(kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>(kg/cm<sup>2</sup>)</b>
0.0	0.30
0.5	0.72
1.0	1.14
2.0	1.98
3.0	2.82

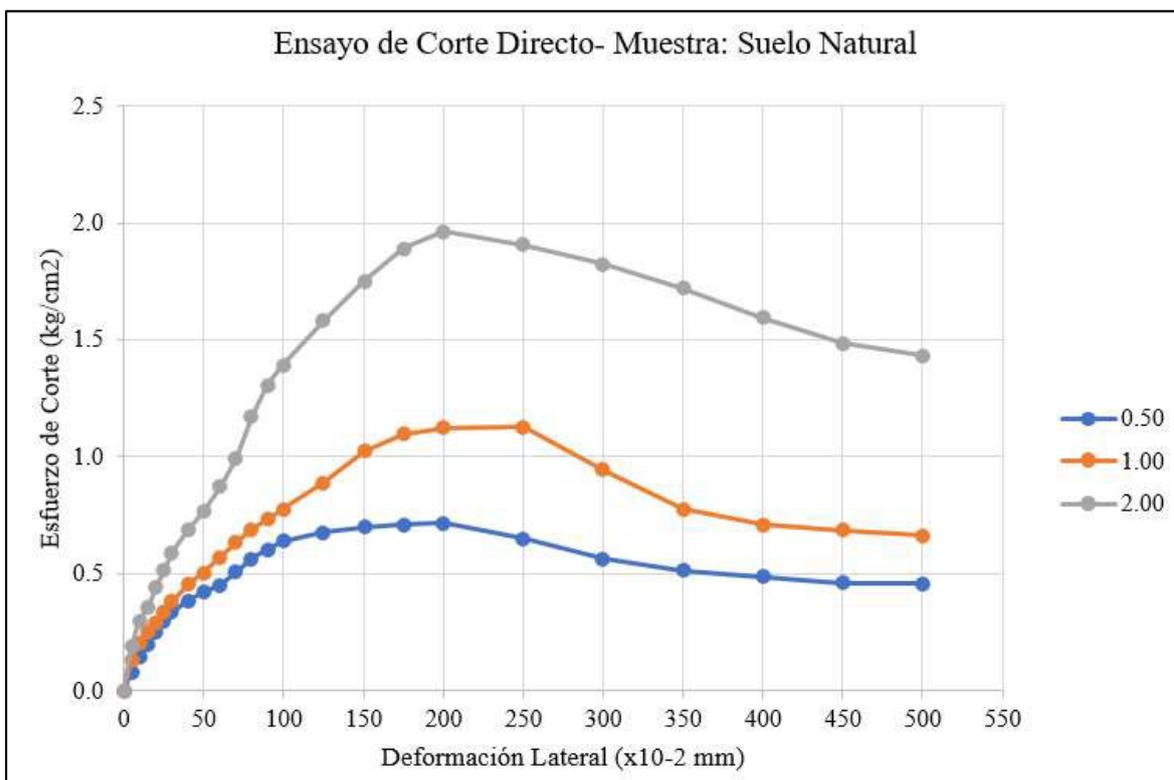
Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 6.4.** Envolvente de falla del esfuerzo de corte en función del esfuerzo normal, para la muestra de suelo a través del ensayo de corte directo.

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera

Además, se observa que al aplicar el ensayo para un esfuerzo normal de  $2 \text{ kg/cm}^2$  se da un mayor valor del esfuerzo de corte  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  ante una deformación lateral de  $2.0 \text{ mm}$ .



**Figura 6.5.** Curva de esfuerzo frente a la deformación lateral, para la muestra de suelo a través del ensayo de corte directo.

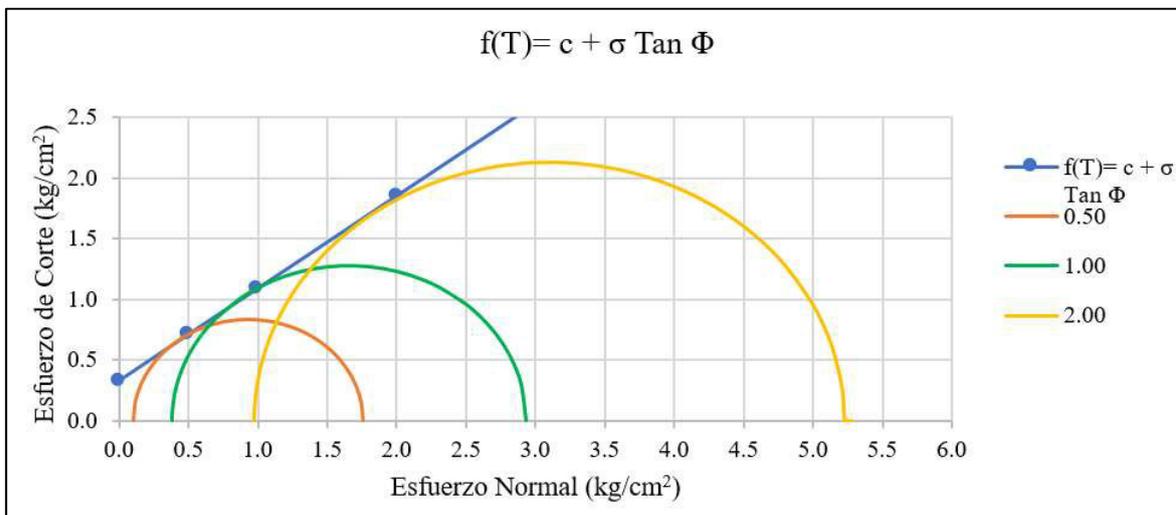
*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

El resultado del ensayo a corte directo de la muestra de suelo natural realizado en el laboratorio del LEMSUR de la EPN se adjuntan como Anexo 6.

#### 6.1.1.6. Resultados del ensayo de compresión triaxial, no consolidado, no drenado.

El ensayo de compresión triaxial, como se indicó en el capítulo 4, es un ensayo más confiable que el ensayo de corte directo, ya que tiene como virtud que es un ensayo en el cual se aplican fuerzas en las tres direcciones ("X", "Y" y "Z"), este ensayo puede ser muy apreciado para el estudio de taludes y cimentaciones, en este caso, se optó por este ensayo, ya que se pretende establecer los parámetros más cercanos a la realidad del sistema, y como ya se mencionó, primero se debe verificar en qué condiciones está el suelo natural, para luego pasar a ver las mejoras que se den al combinar con un porcentaje de cal al suelo.

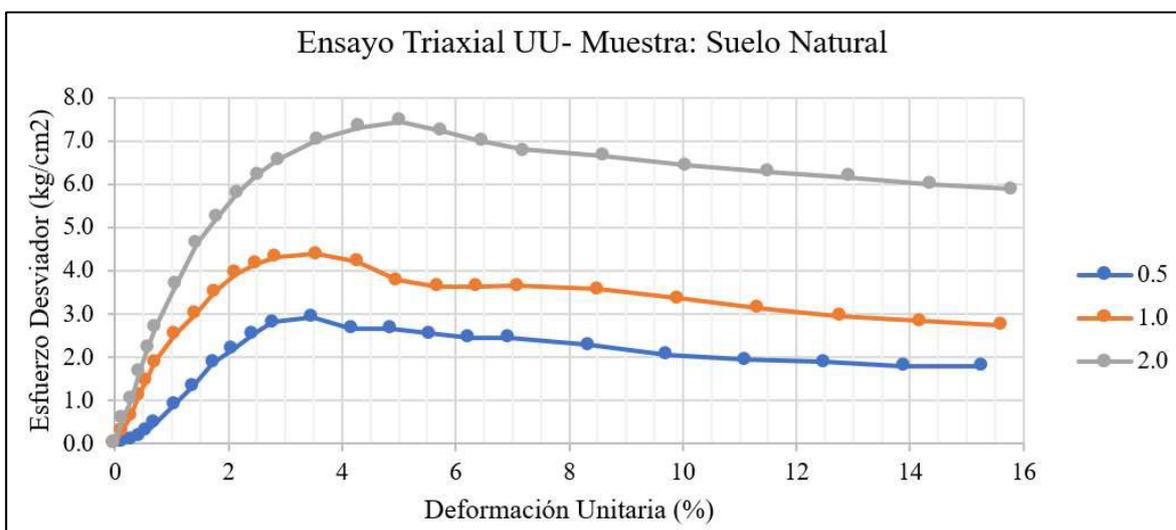
En la figura 6.6. se observa que el valor de la cohesión es de  $0.33 \text{ kg/cm}^2$  y tiene un ángulo de fricción interna de  $37.23^\circ$ .



**Figura 6.6.** Envolvente de falla del esfuerzo de corte en función del esfuerzo normal, para la muestra de suelo a través del ensayo Triaxial UU.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Al igual que en el ensayo de corte directo se observa que al aplicar un esfuerzo lateral de  $2 \text{ kg/cm}^2$  se obtiene un esfuerzo desviador máximo o una diferencia de esfuerzos máximos de  $7.45 \text{ kg/cm}^2$  para una deformación unitaria del 5%.



**Figura 6.7.** Curva esfuerzo desviador frente la deformación unitaria, para la muestra de suelo a través del ensayo Triaxial UU.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Los valores determinados en el ensayo de laboratorio en el laboratorio del LEMSUR de la EPN se presentan como Anexo 7.

### 6.1.2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y MECÁNICOS DE LA MEZCLA SUELO - CAL.

A través del estudio realizado se decide realizar el mejoramiento del suelo con tres porcentajes de hidróxido de cal: 4%, 8% y 12% del peso a usar, y así determinar un rango de porcentaje de hidróxido de calcio que sea aceptable y presente mejoras significativas a la mezcla suelo-cal.

#### 6.1.2.1. Resultado del ensayo de compactación.

El ensayo de compactación a través del método de Proctor Estándar da como resultado la densidad seca en  $\text{g/cm}^3$ , al obtener la humedad óptima para la cual la muestra suelo-cal soporta la mayor cantidad de cargas, en este contexto se presentan los ensayos de Proctor Estándar realizados a las muestras de suelo con cal en un porcentaje de 4%, 8% y 12% como se mencionó en el capítulo 3, se tomó estos valores basados en estudios anteriores de mejoramiento de suelos a base de cal, también hay que mencionar que debido a que se trata de un suelo arenoso los valores de densidad seca para cada combinación de interés son:

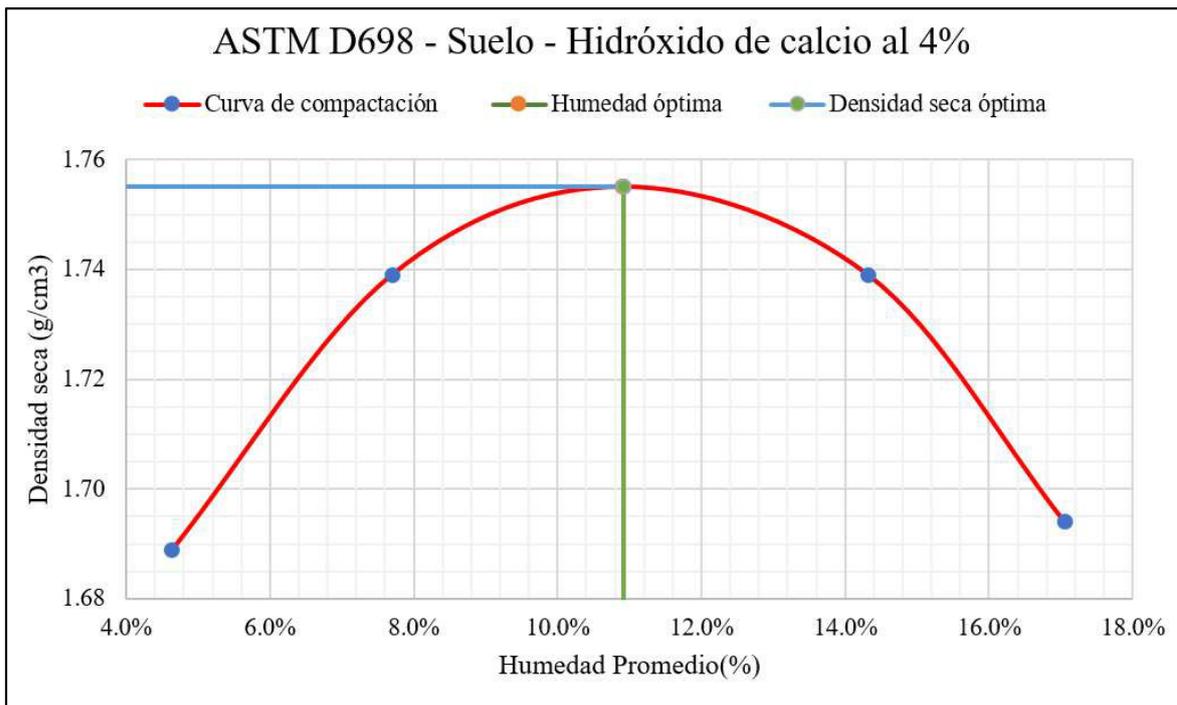
**Tabla 6.8. Resumen de valores de densidad para las mezclas de suelo-cal, en los ensayos de compactación.**

Tipo de Muestra	Densidad Seca ( $\text{gr/cm}^3$ )	Humedad Promedio (%)
Suelo + Cal 4%	1.756	11.00
Suelo + Cal 8%	1.747	11.60
Suelo + Cal 12%	1.695	12.24

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Con ello se verifica que la muestra de suelo con cal al 4.0% tiene la mayor densidad.

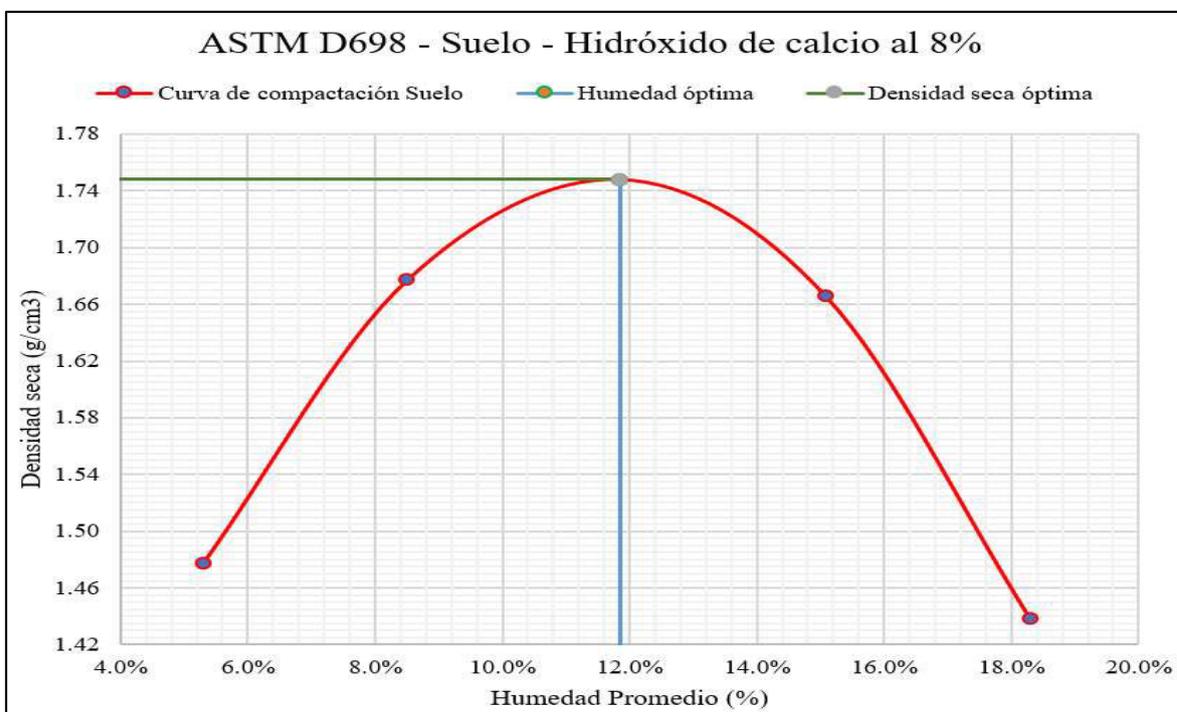
La humedad promedio para la mezcla de suelo cal al 4.0% es de 11.0% y presenta una densidad de  $1.756 \text{ g/cm}^3$ .



**Figura 6.8.** Curva de compactación de la mezcla suelo-cal al 4.0% en peso.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

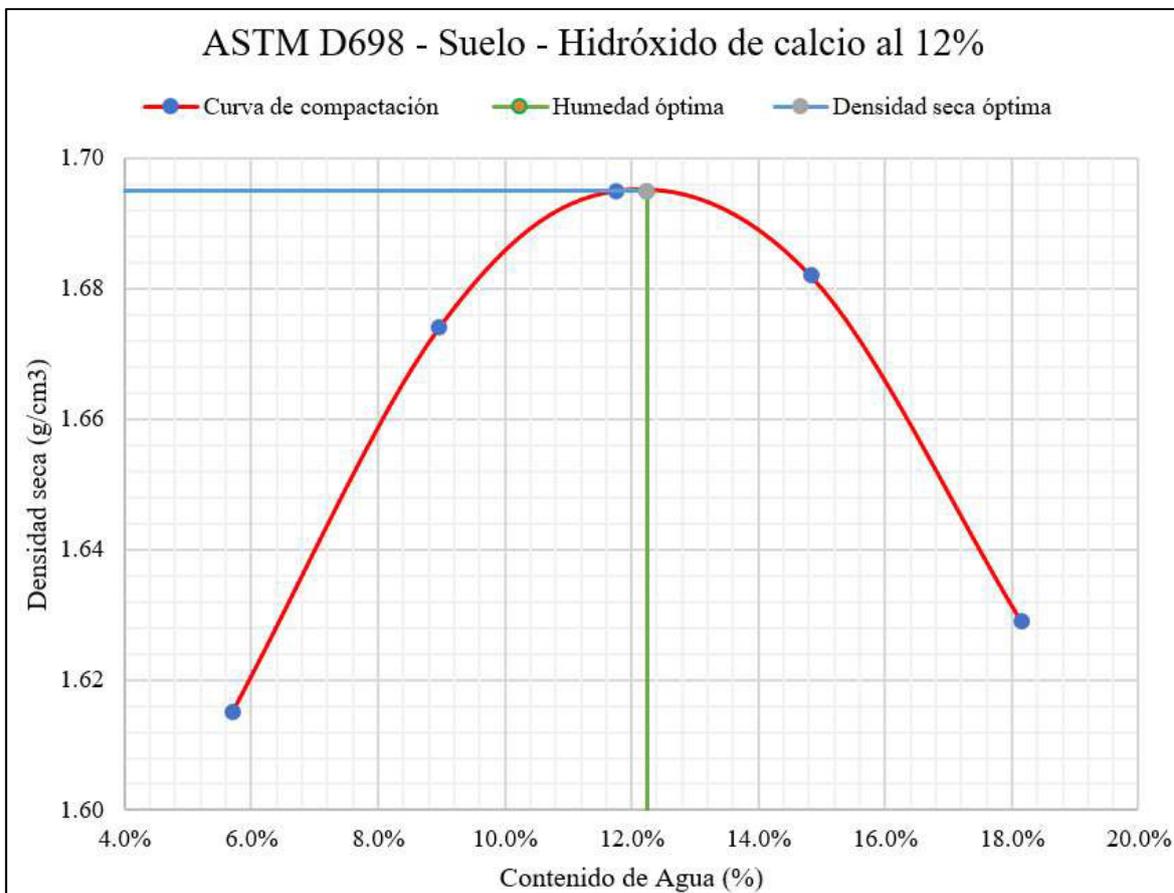
La humedad promedio para la mezcla de suelo cal al 8.0% es de 11.6% y presenta una densidad de 1.747 g/cm<sup>3</sup>.



**Figura 6.9.** Curva de compactación de la mezcla suelo-cal al 8.0% en peso.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

La humedad promedio para la mezcla de suelo cal al 12.0% es de 12.24% y presenta una densidad de 1.695 g/cm<sup>3</sup>.



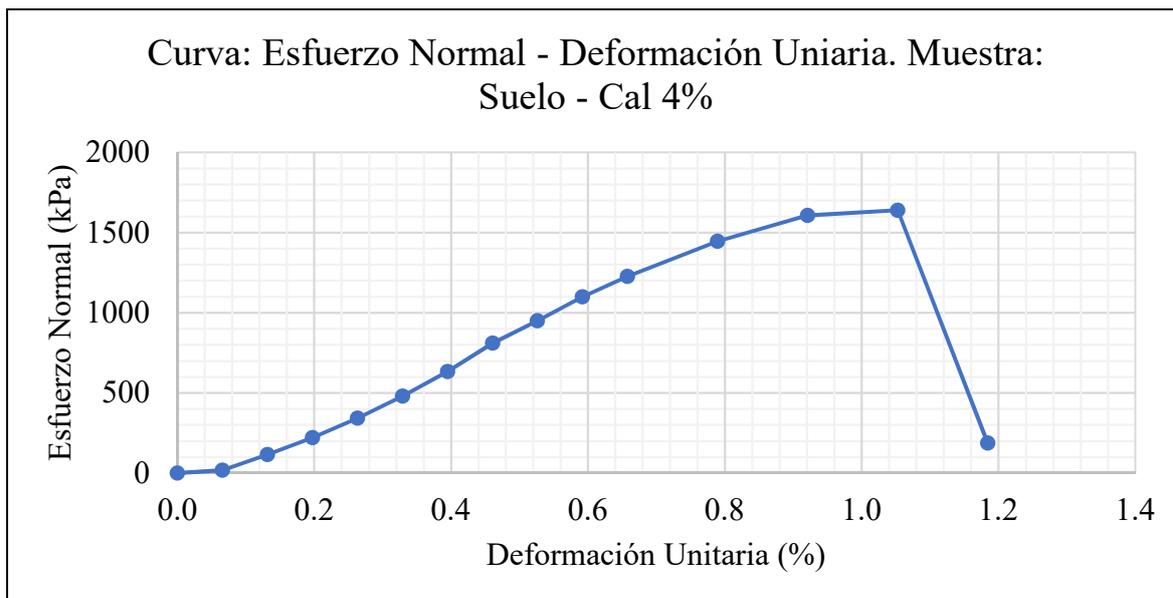
**Figura 6.10.** Curva de compactación de la mezcla suelo-cal al 12.0% en peso.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Los valores determinados en el ensayo de laboratorio en el laboratorio del LEMSUR de la EPN se presentan como Anexo 8.

#### 6.1.2.2. Resultados del ensayo de compresión simple.

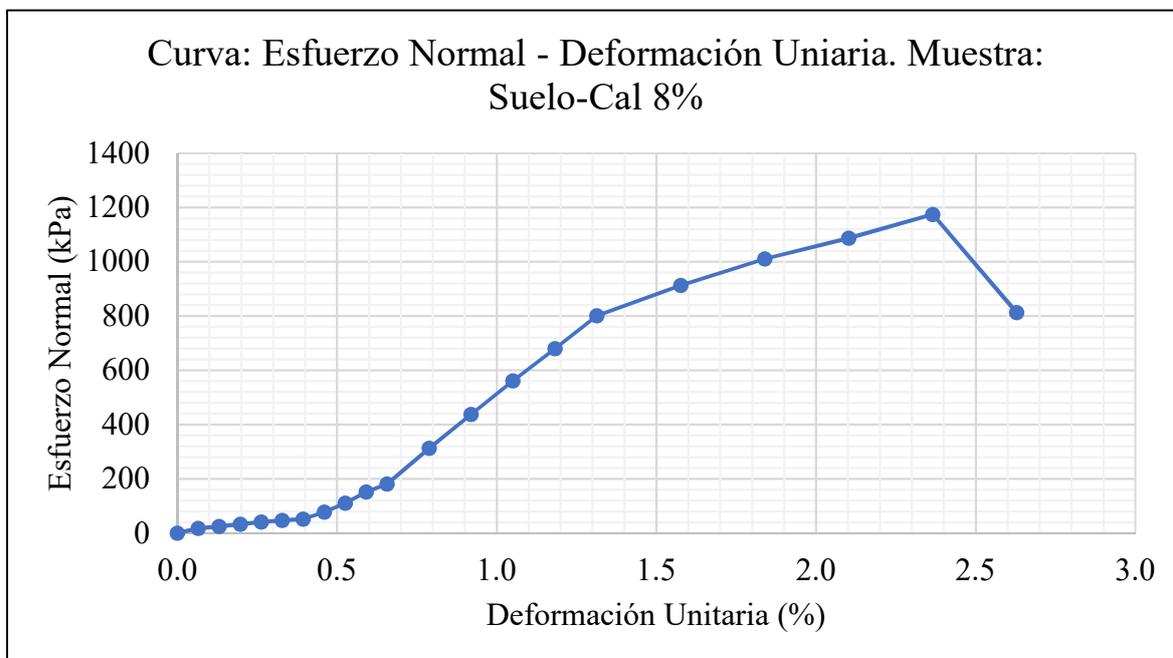
Al colocar un porcentaje de peso en cal equivalente al 4%, el valor del esfuerzo normal aumenta considerablemente hasta los 1650 kPa, y el porcentaje de deformación se reduce en comparación a la muestra de suelo natural, es decir, se puede deformar menos, pero resiste una mayor capacidad de carga, ya que es un suelo más rígido, esto se presenta en la figura 6.11.



**Figura 6.11.** Curva de esfuerzo normal frente a la deformación unitaria de mezcla suelo-cal al 4% de porcentaje en peso.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

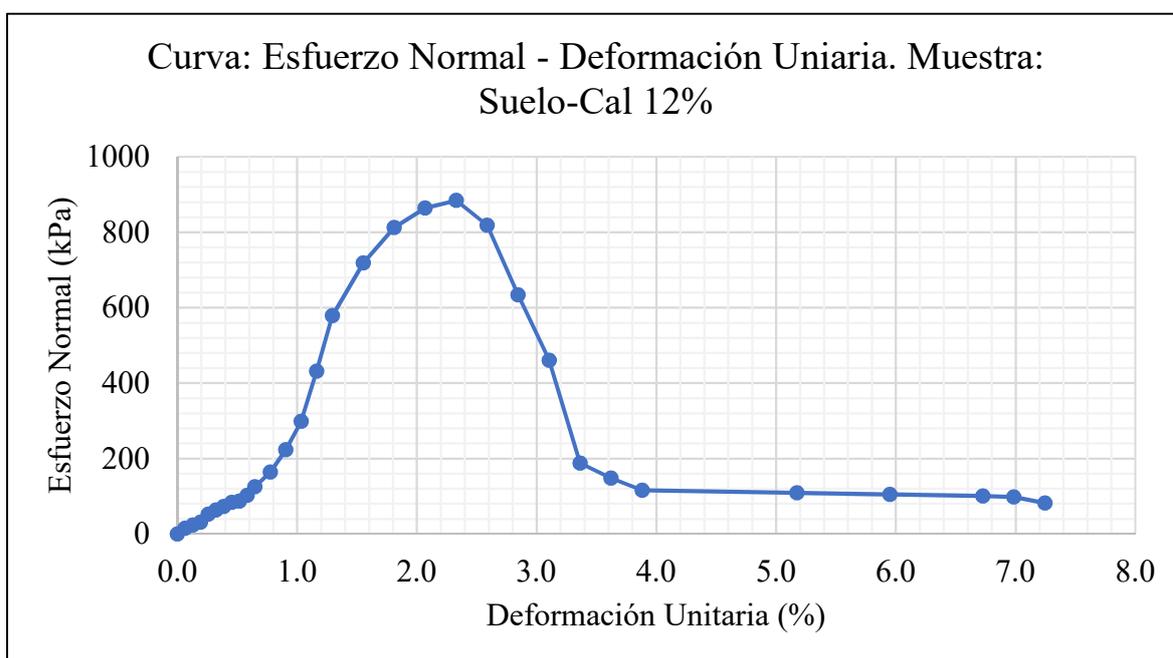
Mientras se aumenta el porcentaje de peso en cal a 8%, no se aumenta el valor del esfuerzo normal, este se reduce a 1190 kPa, pero el porcentaje de deformación aumenta, es decir, se puede deformar más ya que es un suelo menos rígido que el anterior, el porcentaje de deformación unitaria es del 2.4%.



**Figura 6.12.** Curva de esfuerzo normal frente a la deformación unitaria de mezcla suelo-cal al 8% de porcentaje en peso.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

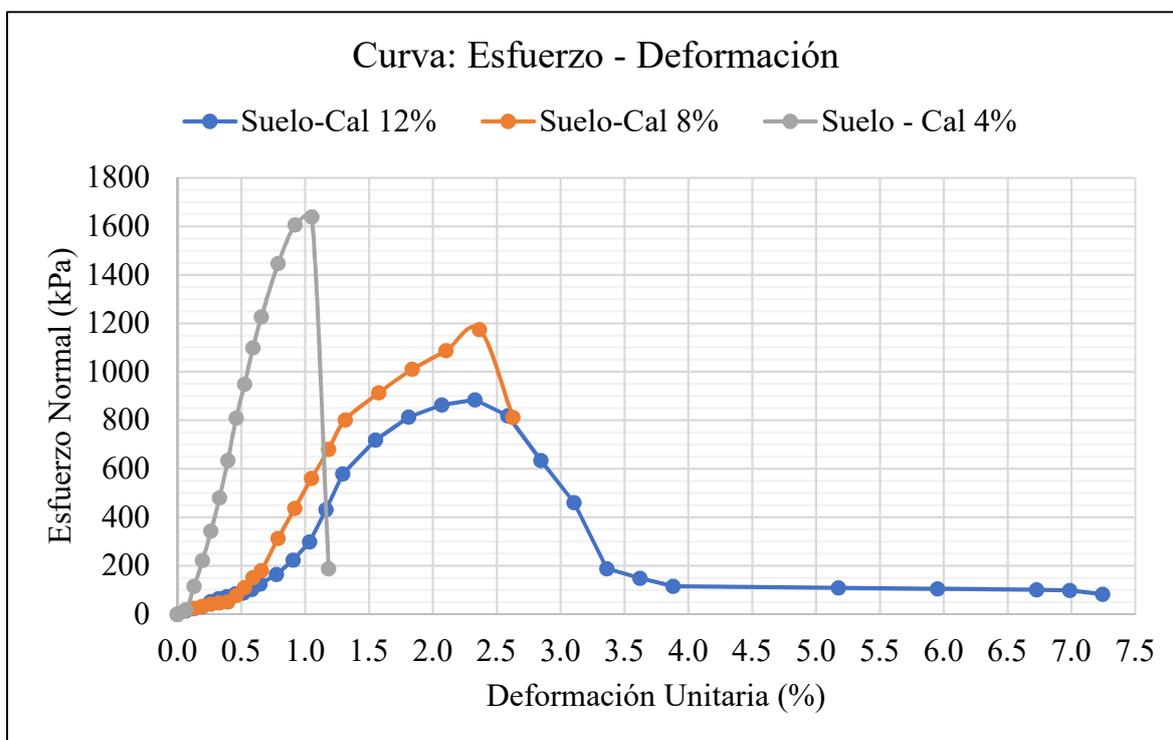
Finalmente, al realizar el ensayo con un porcentaje de cal al 12% en peso de la muestra, el suelo soporta menos el esfuerzo normal, apenas 900 kPa y la deformación es de 2.3%, es decir, la mezcla de suelo-cal es más frágil que si se agregara un 8% de hidróxido de cal en peso.



**Figura 6.13.** Curva de esfuerzo normal frente a la deformación unitaria de mezcla suelo-cal al 12% de porcentaje en peso.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

En la gráfica 6.14. se puede observar el comportamiento de las tres mezclas de suelo cal es similar, pero la mezcla suelo cal al 4% presenta una resistencia mucho mayor a las otras dos mezclas de suelo cal.



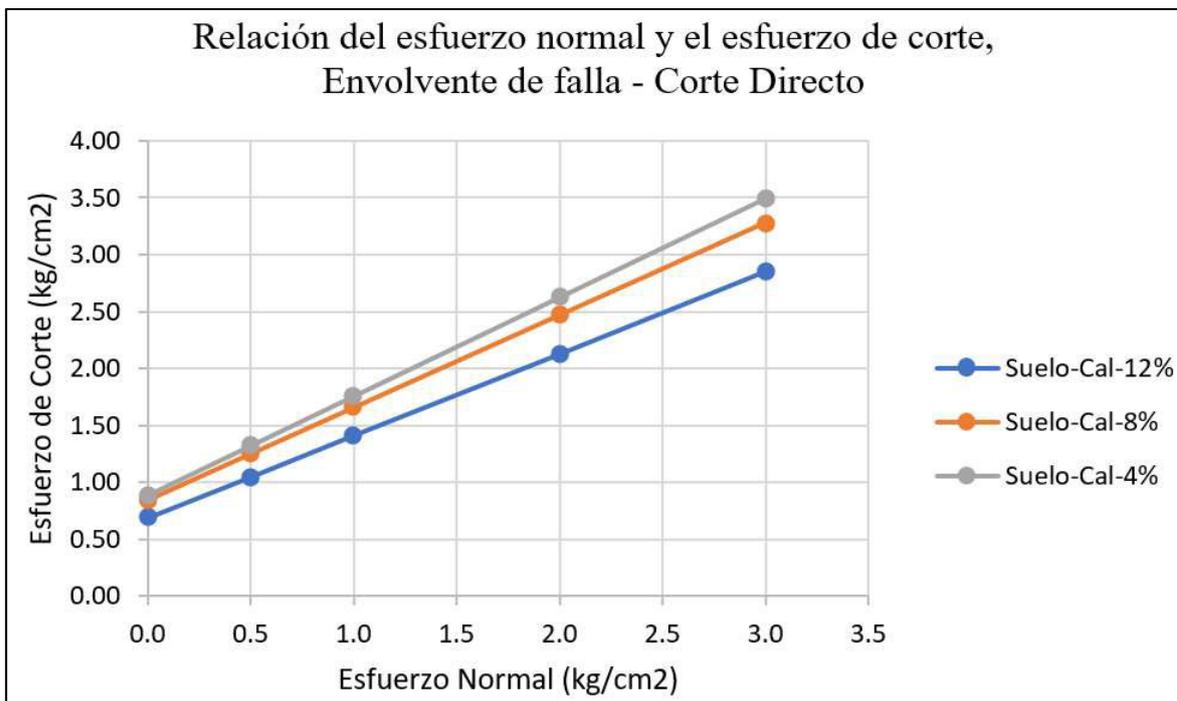
**Figura 6.14.** Curvas de esfuerzo normal frente a la deformación unitaria de las mezclas suelo-cal.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Los valores determinados en el ensayo de laboratorio en el laboratorio del LEMSUR de la EPN se presentan como Anexo 9-A, Anexo 9-B y Anexo 9-C.

### 6.1.2.3. Resultados del ensayo de corte directo.

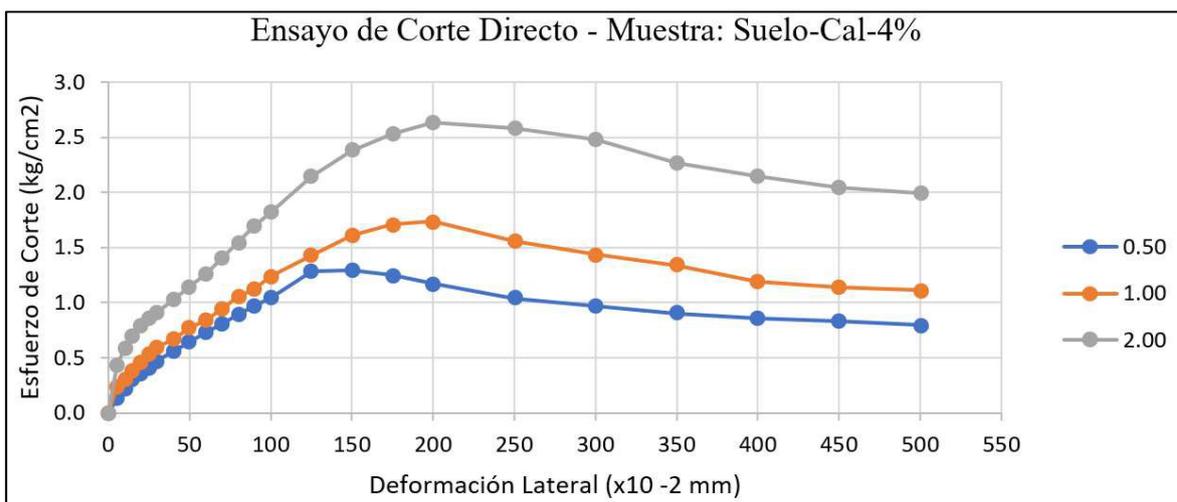
La figura 6.15. presenta un resumen de las envolventes de falla para cada combinación de suelo-cal.



**Figura 6.15.** Envolturas de falla para las diferentes mezclas de suelo cal y suelo natural por el ensayo de corte directo.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

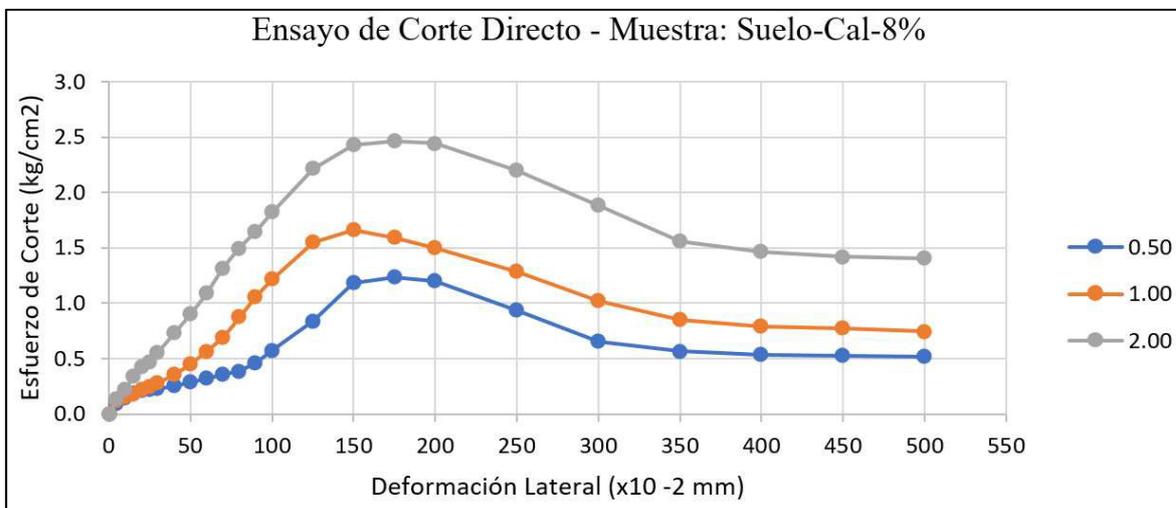
El esfuerzo normal de  $2 \text{ kg/cm}^2$  produce el mayor esfuerzo de corte que es de  $2.637 \text{ kg/cm}^2$ , esto representa una deformación lateral de  $2.0 \text{ mm}$  para la muestra de la mezcla suelo cal al 4% en peso como se ve en la figura 6.16.:



**Figura 6.16.** Curvas de esfuerzo de corte frente a deformación lateral. Mezcla suelo cal al 4%. Diferentes esfuerzos laterales por el ensayo de corte directo.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

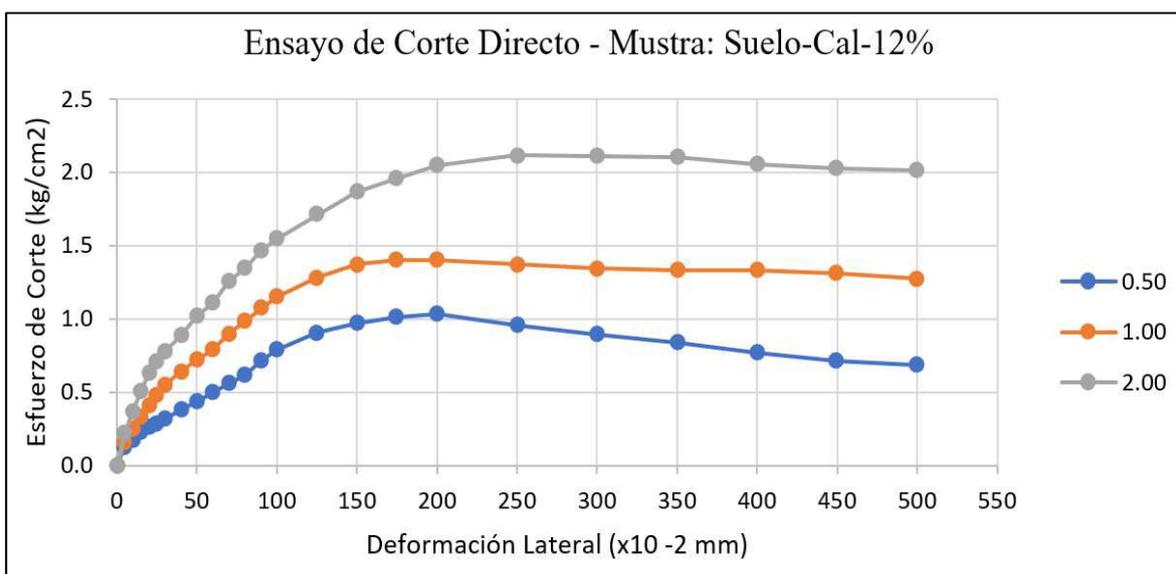
En la muestra de la mezcla suelo cal al 8% en peso también el esfuerzo normal de 2 kg/cm<sup>2</sup> produce el mayor esfuerzo de corte que es de 2.466 kg/cm<sup>2</sup>, esto representa una deformación lateral de 1.75 mm, como se ve en la figura 6.17.:



**Figura 6.17.** Curvas de esfuerzo de corte frente a deformación lateral Mezcla suelo cal al 8%. Diferentes esfuerzos laterales por el ensayo de corte directo.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Finalmente, en la muestra de la mezcla suelo cal al 12% en peso también el esfuerzo normal de 2.0 kg/cm<sup>2</sup> produce el mayor esfuerzo de corte que es de 2.12 kg/cm<sup>2</sup>, esto representa una deformación lateral de 2.5mm como se ve en la figura 6.18.:

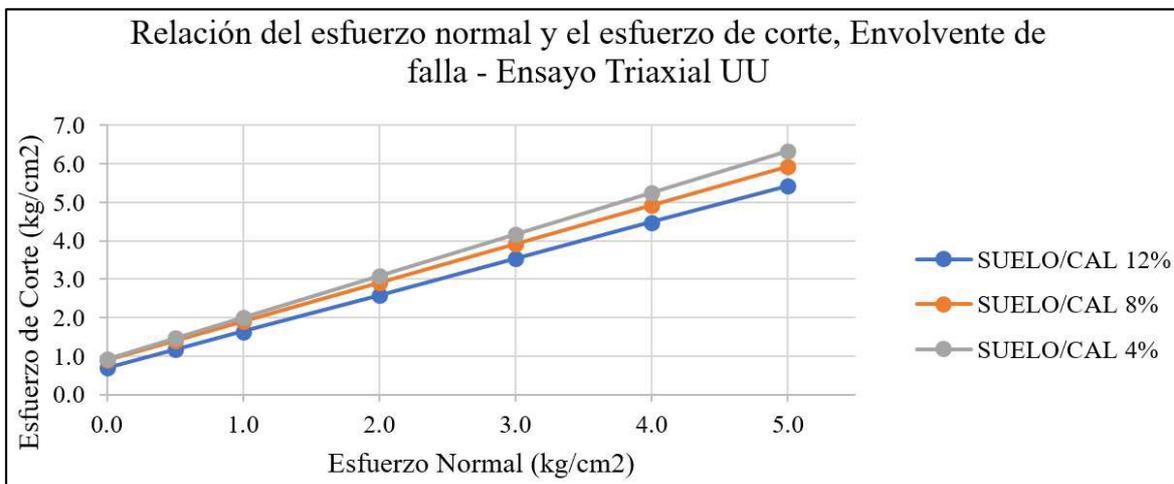


**Figura 6.18.** Curvas de esfuerzo de corte frente a deformación lateral de mezcla suelo cal al 12%. Diferentes esfuerzos laterales por el ensayo de corte directo.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Los valores determinados en el ensayo de laboratorio en el laboratorio del LEMSUR de la EPN se presentan como Anexo 10-A, Anexo 10-B y Anexo 10-C.

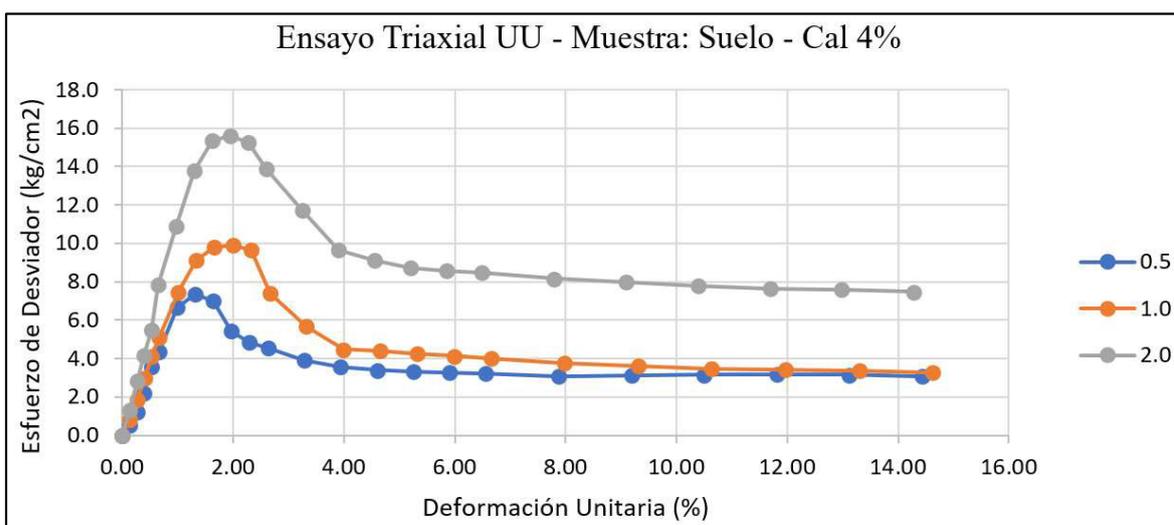
#### 6.1.2.4. Resultado de la prueba de compresión Triaxial UU.



**Figura 6.19.** Envolventes de falla para las diferentes mezclas de suelo cal por el ensayo de Triaxial UU.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

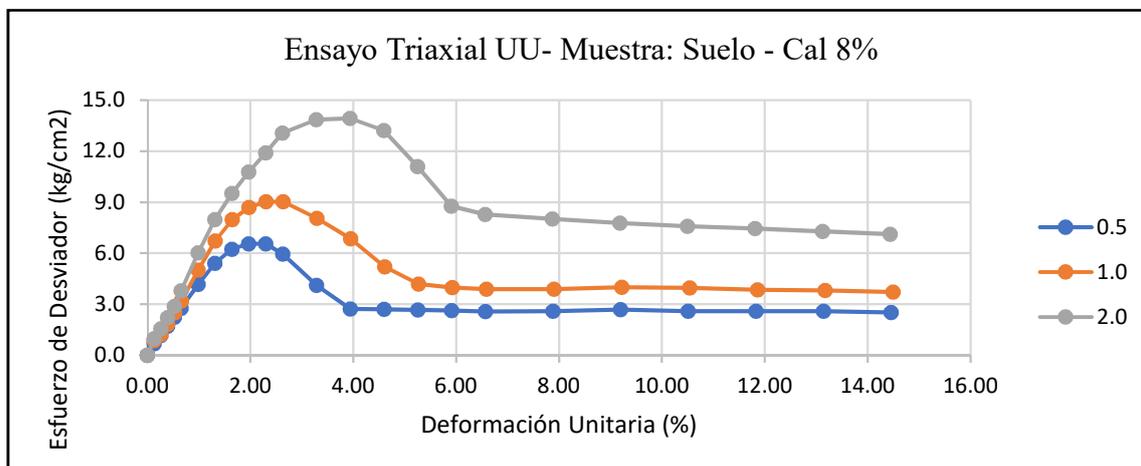
Como se observa en la figura 6.19., el ensayo de Triaxial UU, el porcentaje de mezcla suelo cal al 4%, presenta una gran resistencia a los esfuerzos cortantes, pero esto implica que el suelo se comporte de una manera rígida, el valor del esfuerzo desviador es de 15.80 kg/cm<sup>2</sup> y una deformación unitaria de 1.9%, se determina un valor de cohesión de 0.93 kg/cm<sup>2</sup> y un ángulo de fricción interna de 47.2°.



**Figura 6.20.** Curvas de esfuerzo de corte frente a la deformación lateral de mezcla de suelo cal al 4% a diferentes esfuerzos laterales por el ensayo Triaxial UU.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

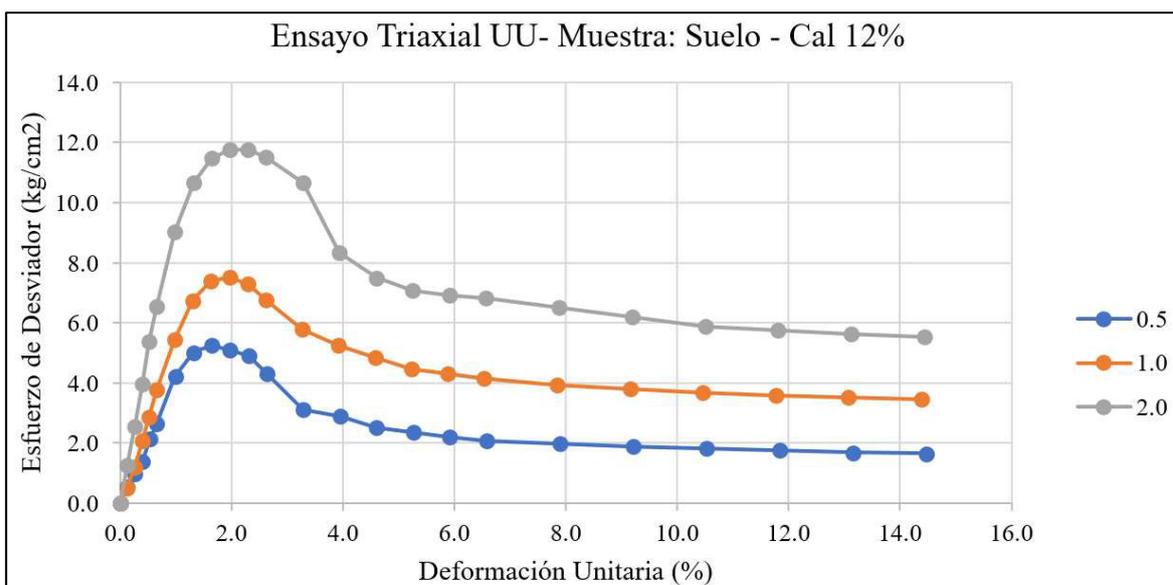
Para la muestra de suelo cal al 8%, se obtuvo un valor de  $14.0 \text{ kg/cm}^2$  con lo cual la muestra alcanza una deformación unitaria del 4% al aplicar un esfuerzo normal de  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ , se determina un valor de cohesión de  $0.89 \text{ kg/cm}^2$  y un ángulo de fricción interna de  $45.29^\circ$ .



**Figura 6.21.** Curvas de esfuerzo de corte frente a la deformación lateral de mezcla de suelo cal al 8% a diferentes esfuerzos laterales por el ensayo Triaxial UU.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Para la muestra de suelo cal al 12%, se obtuvo un valor de  $12.0 \text{ kg/cm}^2$  con lo cual la muestra alcanza una deformación unitaria del 2% al aplicar un esfuerzo normal de  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ , se determina un valor de cohesión de  $0.69 \text{ kg/cm}^2$  y un ángulo de fricción interna de  $43.47^\circ$ .



**Figura 6.22.** Curvas de esfuerzo de corte frente a la deformación lateral de mezcla de suelo cal al 12% a diferentes esfuerzos laterales por el ensayo Triaxial UU.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Los valores determinados en el ensayo de laboratorio en el laboratorio del LEMSUR de la EPN se presentan como Anexo 11-A, Anexo 11-B y Anexo 11-C.

#### 6.1.2.5. Determinación del valor del peso específico por unidad de volumen

El peso específico por unidad de volumen o simplemente el peso específico se determinan como complemento de cada ensayo realizado, a su vez, las diferentes muestras de suelo fueron reutilizadas para la elaboración de nuevas probetas, por lo que se presenta la tabla 6.9., que es un resumen de dichos valores así:

**Tabla 6.9. Ensayo de Compresión Simple en Suelos D2166M-16; D854-14**

Ensayo de Compresión Simple en Suelos ASTM D2166/D2166M-16; D854-14				
Muestra	$\gamma$ húmedo (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma$ húmedo (N/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ seco (N/m <sup>3</sup> )
Suelo-Cal 4%	1.90	1.71	18632.64	16769.37
Suelo-Cal 8%	1.89	1.7	18534.57	16671.31
Suelo-Cal 12%	1.85	1.65	18142.30	16180.97

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.10. Ensayo de Corte Directo en Suelos ASTM D3080-11**

Ensayo de Corte Directo - ASTM D3080-11					
Muestra	$\gamma$ densidad			$\gamma$ densidad promedio (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma$ peso específico (N/m <sup>3</sup> )
	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )		
Suelo-Cal 4%	1.87	1.87	1.86	1.8667	18305.75
Suelo-Cal 8%	1.93	1.94	1.93	1.9333	18959.53
Suelo-Cal 12%	1.85	1.85	1.84	1.8467	18109.62

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.11. Ensayo de Compresión Triaxial UU en Suelos ASTM D2850-15**

Ensayo Triaxial UU - ASTM D2850-15		
Muestra	$\gamma$ densidad promedio (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma$ peso específico (N/m <sup>3</sup> )
Suelo-Cal 4%	1.89	18534.57
Suelo-Cal 8%	1.94	19024.90
Suelo-Cal 12%	1.85	18142.30

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

#### 6.1.2.6. Determinación del valor del módulo de elasticidad.

El valor del módulo de elasticidad se presenta como la relación entre un esfuerzo perpendicular y la deformación que se genere al aplicar dicho esfuerzo.

Para lo cual se tiene dos ensayos en los cuales se puede adquirir dichos valores, que son: el ensayo de compresión simple y el ensayo de Triaxial UU, en ambos casos se obtiene una carga sobre un área (esfuerzo) y una deformación consecuente, después de analizados los ensayos se obtuvo un valor de 102527 kPa para el ensayo triaxial UU y de casi el doble en el ensayo de compresión simple.

**Tabla 6.12. Resumen de valores para el módulo de Elasticidad de las probetas ensayadas tanto a compresión simple y a ensayo Triaxial**

<b>Tomado de: Curvas Esfuerzo - Deformación en el rango entre 20% al 60% de la deformación unitaria</b>		
	<b>E, Para el esfuerzo del ensayo de Compresión Simple</b>	<b>E Para el esfuerzo desviador del ensayo Triaxial UU</b>
	<b>(kPa)</b>	<b>(kPa)</b>
<b>Suelo Natural</b>	26165	15819
<b>Suelo + Cal 4%</b>	224974	102527
<b>Suelo + Cal 8%</b>	84132	48863
<b>Suelo + Cal 12%</b>	71558	67431

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

#### 6.1.2.7. Determinación del valor de la relación de Poisson.

El valor de la relación de Poisson se obtiene al relacionar las deformaciones unitarias transversales con las deformaciones unitarias longitudinales, al realizar el ensayo de compresión simple y el de compresión triaxial se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 6.13. Resumen de valores para determinar el coeficiente de Poisson de las diferentes probetas ensayadas tanto en el ensayo de compresión simple. Parte 1.**

<b>Relación: Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria. Determinación del valor de Poisson - Ensayo de Compresión Simple</b>				
<b>Muestra:</b>	<b>Lectura</b>	<b>Carga</b>	<b>Deformación Longitudinal</b>	<b>Def. Unitaria Longitudinal</b>
	<b>(kN)</b>	<b>(kg)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>
<b>Suelo</b>	0.310	31.611	1.000	0.013
<b>Suelo + Cal 4%</b>	1.670	170.086	0.800	0.011
<b>Suelo + Cal 8%</b>	1.040	106.253	1.400	0.018
<b>Suelo + Cal 12%</b>	0.979	99.829	1.800	0.023

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.14. Resumen de valores para determinar el coeficiente de Poisson de las diferentes probetas ensayadas en el ensayo de compresión simple. Parte 2.**

<b>Relación: Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria. Determinación del valor de Poisson - Ensayo de Compresión Simple</b>					
<b>Muestra:</b>	<b>Área Corregida</b>	<b>Diámetro corregido</b>	<b>Deformación Transversal</b>	<b>Def. Unitaria Transversal</b>	<b>Coef. Poisson U</b>
	<b>(cm<sup>2</sup>)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm/mm)</b>
<b>Suelo</b>	10.067	0.358	2.36E-05	6.59E-05	0.002
<b>Suelo + Cal 4%</b>	10.067	0.358	1.88E-05	5.26E-05	0.01
<b>Suelo + Cal 8%</b>	10.124	0.359	3.30E-05	9.20E-05	0.01
<b>Suelo + Cal 12%</b>	10.813	0.371	4.32E-05	1.16E-04	0.01

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Por lo tanto, el valor a usar en la relación de Poisson para la mezcla suelo-cal es de 0.01.

### 3.1.1.9. Determinación del valor de expansión térmica.

Debido al espesor de los muros y la relación mínima en peso de suelo cal, tan solo el 4% del peso de la muestra es cal, se asume que el coeficiente de expansión térmica sea tomado como el valor del suelo, para ello se toma como referencia a (Torrent, 2020), quien da un rango de valores para suelos y rocas desde  $12.48 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  hasta  $8.42 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , por lo que el valor medio es de  $10.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  que es muy similar al valor tradicional del hormigón, y teniendo en consideración que los muros por cuestiones constructivas y siguiendo el manual de (CalEarth, 1999) no deben tener longitudes mayores a los 4.0 m y espesores no menores a los 0.30 m, por lo que sus comportamientos de expansión térmica no son de gran consideración.

### 3.1.1.10. Determinación del valor del módulo de corte.

El valor del módulo de corte se obtiene a través de la ecuación (9) del capítulo 3.5.5. el cual obtiene un valor de 50.765 GPa.

## 6.1.3. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y MECÁNICOS DE LA CAÑA GUADÚA (*GaK*).

### 6.1.3.1. Resultado del ensayo de contenido de humedad y de densidad.

Los dos ensayos van relacionados, son muy simples de realizar, y por sus resultados se pueden analizar en conjunto.

El contenido de humedad para la probeta 1 es de 10.7% y un peso por unidad de volumen de  $0.59 \text{ gr/cm}^3$ , como se observa en la tabla 6.15.:

**Tabla 6.15. Contenido de humedad de caña guadúa (*GaK*). Probeta 1. Norma NTC 5525.**

NTC 5525 - Probeta 1			
Contenido de Humedad			
Longitud: 10.8 (mm)	Área: 112.32	(mm <sup>2</sup> )	
Ancho: 10.4 (mm)	Volumen: 1179.36	(mm <sup>3</sup> )	
Espesor: 10.5 (mm)	Humedad Natural: 10.7%	(%)	
Masa Inicial: 65.0 (gr)	Peso Volumétrico Natural: 0.59	(g/cm <sup>3</sup> )	
Masa Final: 58.7 (gr)			

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

El contenido de humedad para la probeta 2 es de 11.0% y un peso por unidad de volumen de 0.54 gr/cm<sup>3</sup>, como se observa en la tabla 6.16.:

**Tabla 6.16. Contenido de humedad de caña guadúa (GaK). Probeta 2. Norma NTC 5525.**

NTC 5525 - Probeta 2			
Contenido de Humedad			
Longitud: 10.8 (mm)	Área: 112.32	(mm <sup>2</sup> )	
Ancho: 10.4 (mm)	Volumen: 1179.36	(mm <sup>3</sup> )	
Espesor: 10.5 (mm)	Humedad Natural: 11.0%	(%)	
Masa Inicial: 66.6 (gr)	Peso Volumétrico Natural: 0.54	(g/cm <sup>3</sup> )	
Masa Final: 60.0 (gr)			

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

En los anexos se presentan imágenes de los ensayos, pero no informe como tal, ya que viene por añadidura el realizar este tipo de ensayos en cada uno de las pruebas para definir de las propiedades físicas, se adjunta estos resultados en como Anexo 12 – A y Anexo 12 – B.

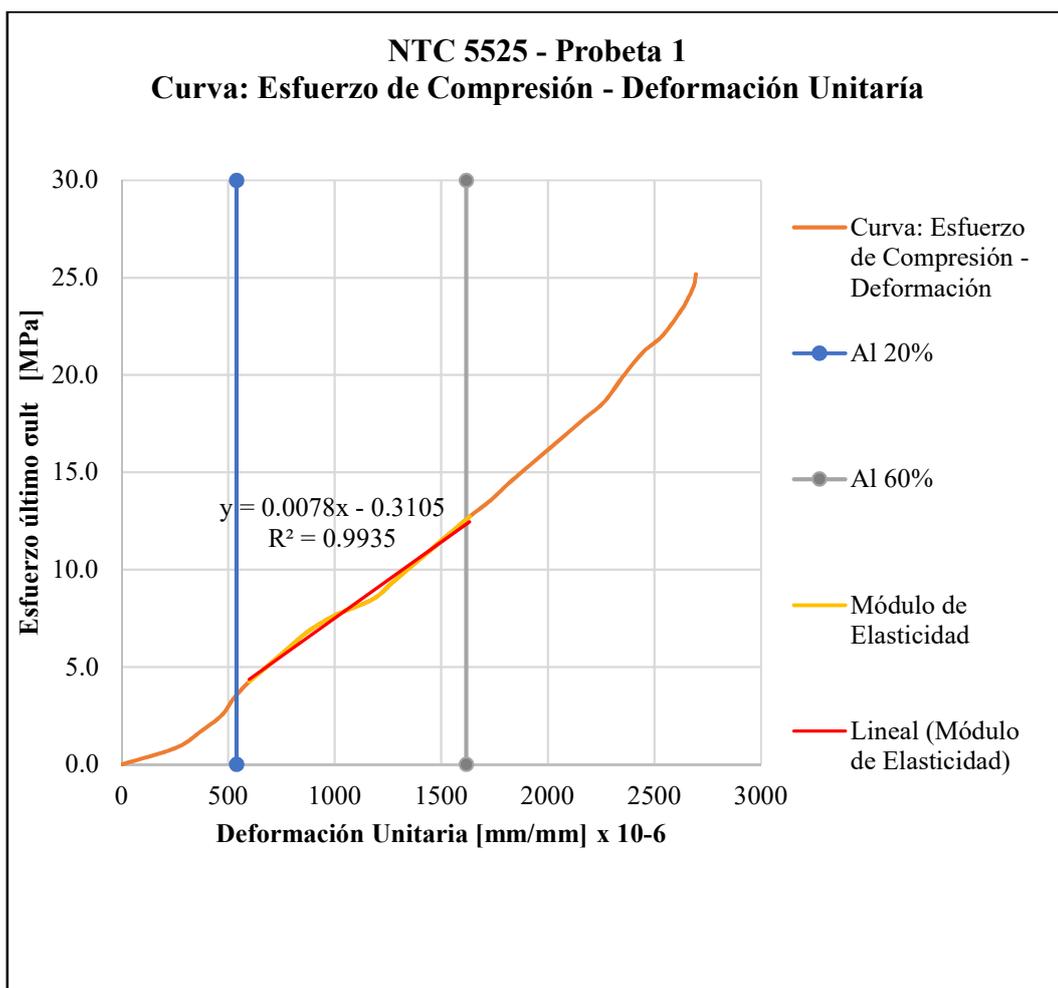
### 6.1.3.2. Resultado de la prueba de compresión.

Para la probeta 1, el valor del módulo de elasticidad a compresión es de 9.37 GPa para una carga máxima de 148.55 kN y presenta un esfuerzo máximo a compresión de 25.181 MPa, en un área de sección transversal de 5883.32 mm<sup>2</sup>.

**Tabla 6.17. Datos de ensayo de compresión de caña guadúa (GaK). Probeta 1.**

NTC 5525 - Probeta 1			
Curva: Esfuerzo de Compresión- Deformación			
Diámetro Externo: 108.3 (mm)	Área: 5883.32	(mm <sup>2</sup> )	
Diámetro Interno: 65.1 (mm)	Volumen: 676405.69	(mm <sup>3</sup> )	
Espesor: 43.2 (mm)	Módulo de Elasticidad: 9.37	(Gpa)	
Longitud Total: 114.97 (mm)	Carga Máxima: 148.55	(kN)	
Peso: --- (gr)	Esfuerzo Máximo de Compresión: 25.181	(MPa)	

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 6.23.** Curva de esfuerzo último frente a la deformación unitaria para el ensayo a compresión de la caña guadúa (*GaK*). Probeta 1.

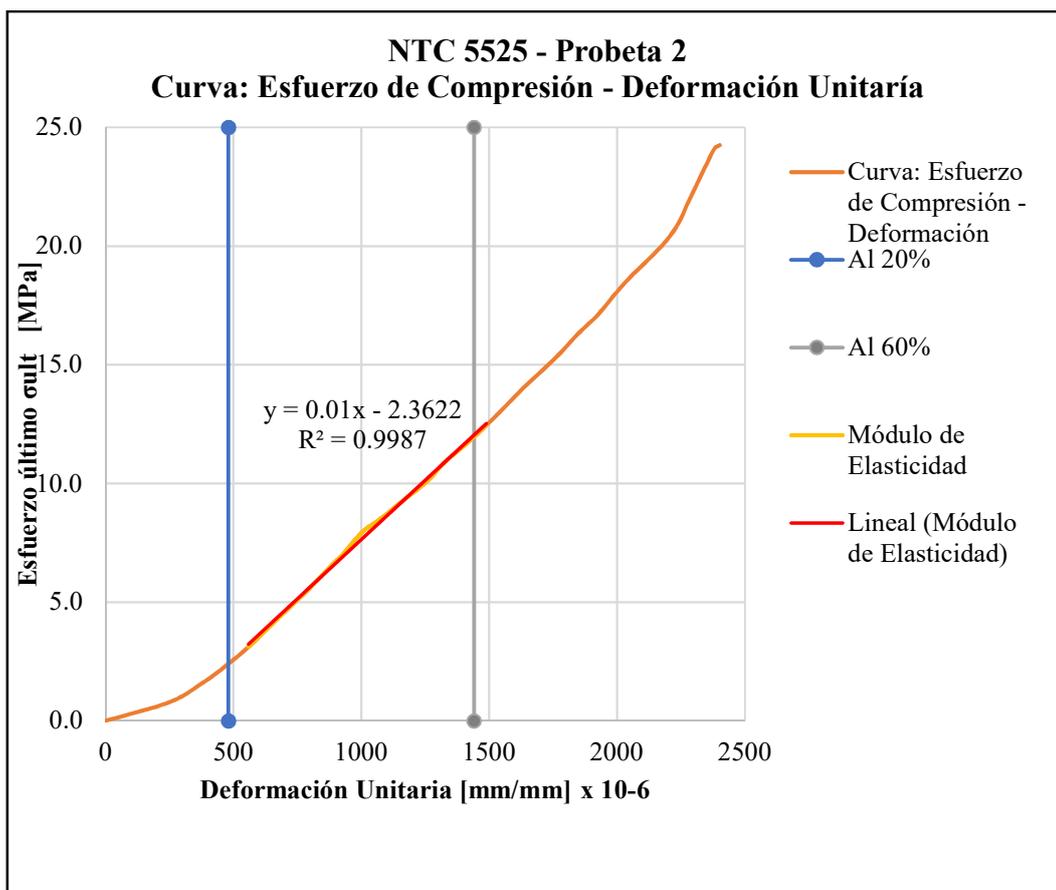
*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Para la probeta 2, el valor del módulo de elasticidad a compresión es de 10.10 GPa para una carga máxima de 156.0 kN y presenta un esfuerzo máximo a compresión de 24.257 MPa, en un área de sección transversal de 6415.79 mm<sup>2</sup>.

**Tabla 6.18. Datos de ensayo de compresión de caña guadúa (*GaK*). Probeta 2.**

<b>NTC 5525 - Probeta 2</b>			
<b>Curva: Esfuerzo de Compresión- Deformación</b>			
Diámetro Externo:	113.57 (mm)	Área:	6415.79 (mm <sup>2</sup> )
Diámetro Interno:	68.77 (mm)	Volumen:	725625.36 (mm <sup>3</sup> )
Espesor:	44.8 (mm)	Módulo de Elasticidad:	10.10 (Gpa)
Longitud Total:	113.1 (mm)	Carga Máxima:	156.00 (kN)
Peso:	---	Esfuerzo Máximo de Compresión:	24.257 (MPa)

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 6.24.** Curva de esfuerzo último frente a la deformación unitaria para el ensayo a compresión de la caña guadúa (GaK). Probeta 2.

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera

Al relacionar los valores de las dos probetas, se obtiene un valor promedio de módulo de elasticidad a compresión de 9.73 GPa, a una carga máxima promedio de 152.275 kN, para un esfuerzo máximo de compresión promedio de 24.719 MPa, se presentan los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio del LEMSUR de la EPN como Anexo 13-A y Anexo 13-B.

#### 6.1.3.2.1. Resultado de la prueba de compresión para determinar el coeficiente de Poisson.

Al igual que para el material de suelo cal, el espesor de los muros y la relación mínima en volumen del refuerzo vertical frente al volumen de suelo cal, tan solo el 0.20% del volumen de los muros por m<sup>3</sup>, se asume que el coeficiente de expansión térmica sea tomado como el valor típico de la madera de roble, haciendo referencia

a (VAXA, 2007), quien da un valor de  $5.4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  a una temperatura ambiente de  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Es necesario indicar que la caña guadúa (*GaK*), tiene además una baja conductividad térmica, para (Martínez, 2015) las fibras perpendiculares una vez secas de la caña guadúa (*GaK*) tienen una conductividad térmica de  $0.088 \text{ kcal/m}^*\text{h}^*\text{ } ^\circ\text{C}$  y en el sentido paralelo unas  $0.143 \text{ kcal/m}^*\text{h}^*\text{ } ^\circ\text{C}$ , siendo así un material de muy baja conductividad térmica.

El coeficiente de Poisson que relaciona la deformación unitaria trasversal con la deformación unitaria longitudinal, es determinado a partir de los datos obtenidos del ensayo de compresión simple, las siguientes tablas indican el resumen de valores obtenidos:

**Tabla 6.19. Datos de ensayo compresión-deformación caña guadúa (*GaK*).  
Determinación de Coeficiente de Poisson. Parte 1.**

NTC 5525 - Esfuerzo de Compresión- Deformación - determinación del Coeficiente de Poisson – Parte 1							
	Probeta 1	Probeta 2			Probeta 1	Probeta 2	
<b>Diámetro Externo:</b>	108.3	113.57	(mm)	<b>Área:</b>	5883.32	6415.79	(mm <sup>2</sup> )
<b>Diámetro Interno:</b>	65.1	68.77	(mm)	<b>Volumen:</b>	676405.69	725625.36	(mm <sup>3</sup> )
<b>Espesor:</b>	43.2	44.8	(mm)	<b>Módulo de Elasticidad:</b>	9.37	10.1	(GPa)
<b>Longitud Total:</b>	114.97	113.1	(mm)	<b>Carga Máxima:</b>	0.00	2402.00	(kN)
<b>Peso:</b>	---	---	(gr)	<b>Esfuerzo Máximo de Compresión:</b>	0.000	24.102	(MPa)

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.20. Datos de ensayo compresión-deformación caña guadúa (GaK).  
Determinación de Coeficiente de Poisson. Parte 2.**

NTC 5525 - Esfuerzo de Compresión- Deformación - determinación del Coeficiente de Poisson – Parte 2						
	Carga	Deformación	Esfuerzo	Área de Sección	Variación de D ext'	Variación de d int'
	(kN)	(mm/mm *10 <sup>-6</sup> )	(MPa)	(mm <sup>2</sup> )	(mm)	(mm)
<b>Probeta 1</b>	148.55	2694.70	25.18	5899.22	108.59	64.93
<b>Probeta 2</b>	156.00	2402.00	24.26	6431.23	113.84	68.61

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.21. Datos de ensayo compresión-deformación caña guadúa (GaK).  
Determinación de Coeficiente de Poisson. Parte 3**

NTC 5525 - Esfuerzo de Compresión- Deformación - determinación del Coeficiente de Poisson – Parte 3							
	Deformación D	Deformación Unitaria D	Deformación d	Def. Unitaria d	Def. Unitaria Longitudinal	Coef. Poisson D-L	Coef. Poisson d-L
	(mm)	(mm/mm)	(mm)	(mm/mm)	(mm/mm)	(mm/mm)	(mm/mm)
<b>Probeta 1</b>	0.29	0.0027	0.17	0.0027	2.34E-05	0.01	0.01
<b>Probeta 2</b>	0.27	0.0024	0.16	0.0024	2.12E-05	0.01	0.01

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Como se observa, para las dos probetas ensayadas el coeficiente de Poisson tienen una relación de 0.01, este valor es necesario para el proceso de modelación.

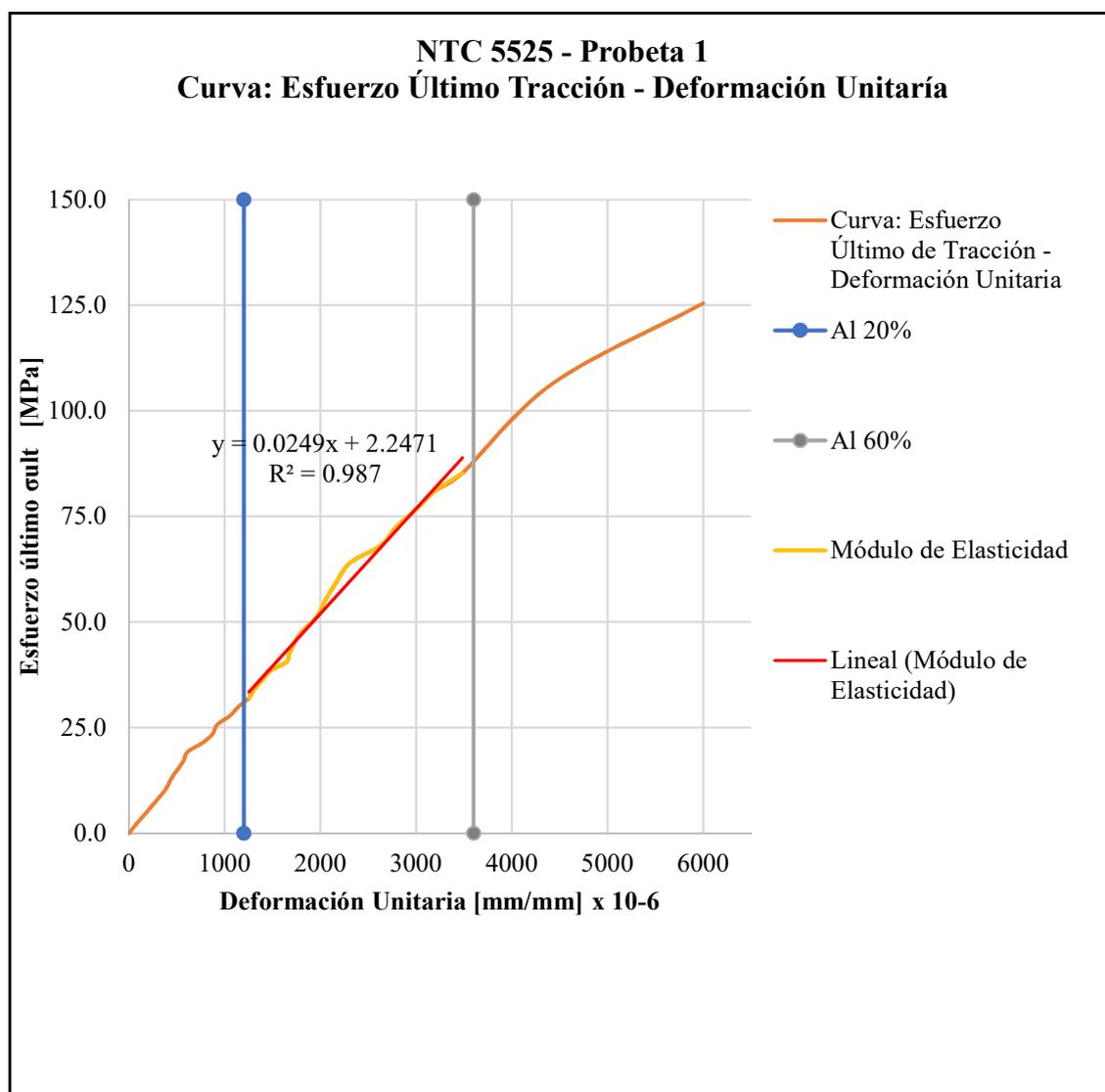
### 6.1.3.3. Resultado de la prueba de tracción.

Para la probeta 1, el valor del módulo de elasticidad a tensión es de 25.0 GPa para una carga máxima de 29.0 kN y presenta un esfuerzo máximo a tensión de 125.473 MPa, en un área de sección transversal de 233.7 mm<sup>2</sup>.

**Tabla 6.22. Datos ensayo de tracción para caña guadúa (GaK). Probeta 1.**

NTC 5525 - Probeta 1	
Curva: Esfuerzo de Último de Tracción - Deformación Unitaria	
Ancho (E): 22.8 (mm)	Área: 233.70 (mm <sup>2</sup> )
Espesor (esp): 10.25 (mm)	Humedad Natural: 10.70 (%)
Longitud Total: 281.55 (mm)	Peso Volumétrico Natural: 0.59 (gr/cm <sup>3</sup> )
Longitud Sec. Reducida (L): 100.05 (mm)	Carga Máxima de Tensión: 29.50 (kN)
Longitud Sec. Agarre (B): 90.75 (mm)	Esfuerzo Máximo de Tensión: 125.473 (MPa)
Ancho Sec. Agarre (A): 39.25 (mm)	Módulo de Elasticidad: 25 (GPa)

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 6.25.** Curva esfuerzo último frente a la deformación en el ensayo de tracción de la caña guadúa (GaK). Probeta 1.

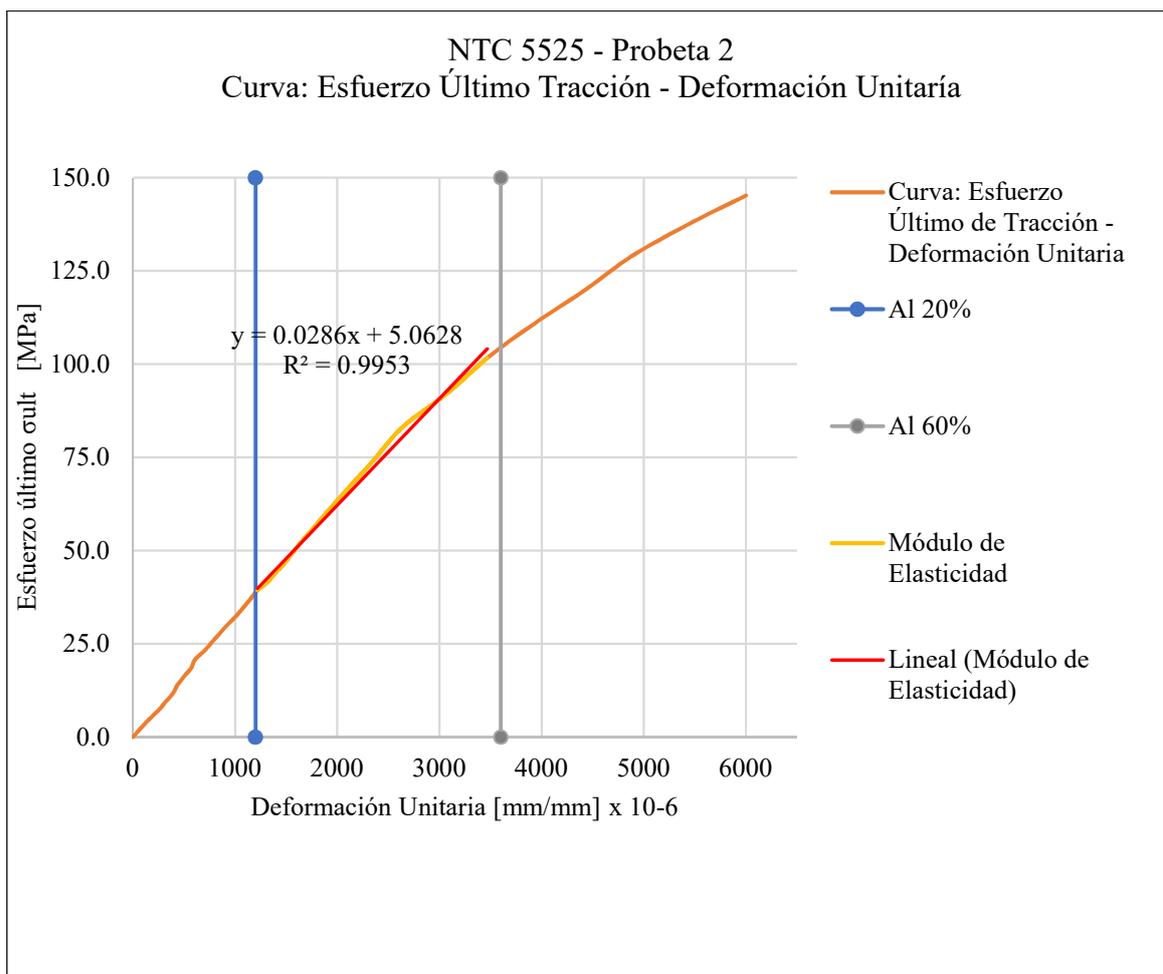
Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera

Para la probeta 2, el valor del módulo de elasticidad a tensión es de 29.70 GPa para una carga máxima de 31.50 kN y presenta un esfuerzo máximo a tensión de 145.204 MPa, en un área de sección transversal de 215.64 mm<sup>2</sup>.

**Tabla 6.23. Datos ensayo de tracción para caña guadúa (GaK). Probeta 2.**

NTC 5525 - Probeta 2	
Curva: Esfuerzo de Último de Tracción - Deformación Unitaria	
Ancho (E): 21.35 (mm)	Área: 215.64 (mm <sup>2</sup> )
Espesor (esp): 10.1 (mm)	Humedad Natural: 11.00 (%)
Longitud Total: 285 (mm)	Peso Volumétrico Natural: 0.54 (gr/cm <sup>3</sup> )
Longitud Sec. Reducida (L): 99.7 (mm)	Carga Máxima de Tensión: 31.50 (kN)
Longitud Sec. Agarre (B): 92.65 (mm)	Esfuerzo Máximo de Tensión: 145.204 (MPa)
Ancho Sec. Agarre (A): 36.85 (mm)	Módulo de Elasticidad: 29.7 (GPa)

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 6.26.** Curva esfuerzo último frente a la deformación unitaria en el ensayo de tracción de la caña guadúa (GaK). Probeta 2.

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera

Al relacionar los valores de las dos probetas, se obtiene un valor promedio de módulo de elasticidad en tensión de 27.35 GPa, una carga máxima promedio de 30.5 kN, para un esfuerzo máximo de tracción promedio de 135.34 MPa, se adjuntan los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio del LEMSUR de la EPN como Anexo12-A y Anexo 12-B.

#### 6.1.3.4. Resultado de la prueba de corte.

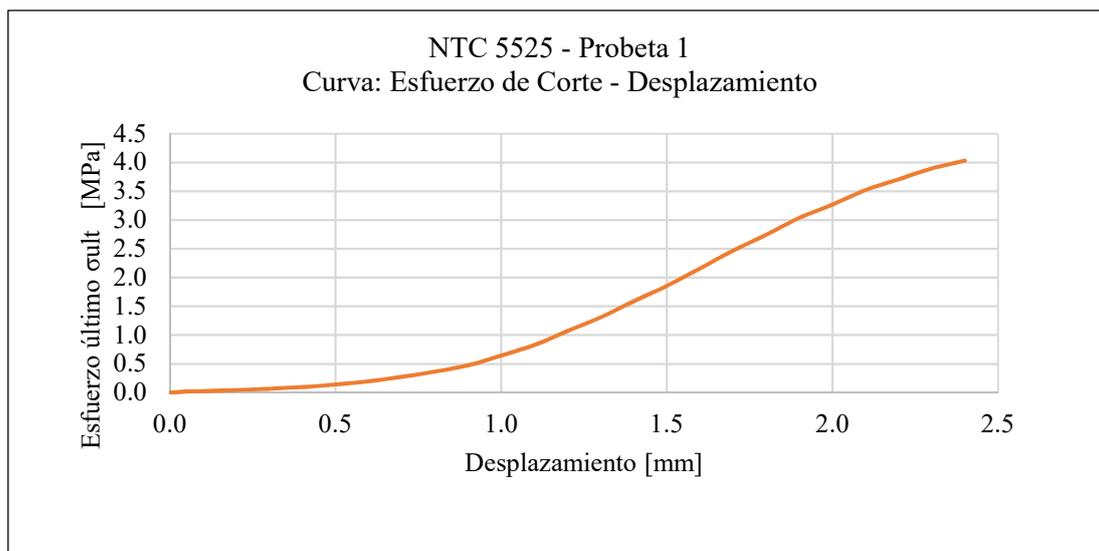
El ensayo a corte de la caña guadúa (*GaK*), determina el esfuerzo límite a corte que resiste la probeta, se presentan las tablas 6.24. y 6.25. y las figuras 6.27. y 6.28. y se determina el Esfuerzo de corte máximo.

Para la probeta 1, el valor de carga máxima es de 19.78 kN y presenta un esfuerzo máximo de corte de 4.03 MPa, en una sección de área de 4907.50 mm<sup>2</sup>.

**Tabla 6.24. Datos ensayo de corte para caña guadúa (*GaK*). Probeta 1.**

NTC 5525 - Probeta 1					
Curva: Esfuerzo de Corte - Desplazamiento					
Espesor 1:	11.20	(mm)	Longitud 1:	110.50	(mm)
Espesor 2:	11.50	(mm)	Longitud 2:	110.60	(mm)
Espesor 3:	11.50	(mm)	Longitud 3:	112.00	(mm)
Espesor 4:	10.00	(mm)	Longitud 4:	111.00	(mm)
Diámetro exterior:	112.33	(mm)	Esfuerzo Máximo de Corte:	4.03	(MPa)
Área:	4907.50	(mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima:	19.78	(kN)

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 6.27.** Curva esfuerzo último frente al desplazamiento en el ensayo de tracción de la caña guadúa (*GaK*). Probeta 1.

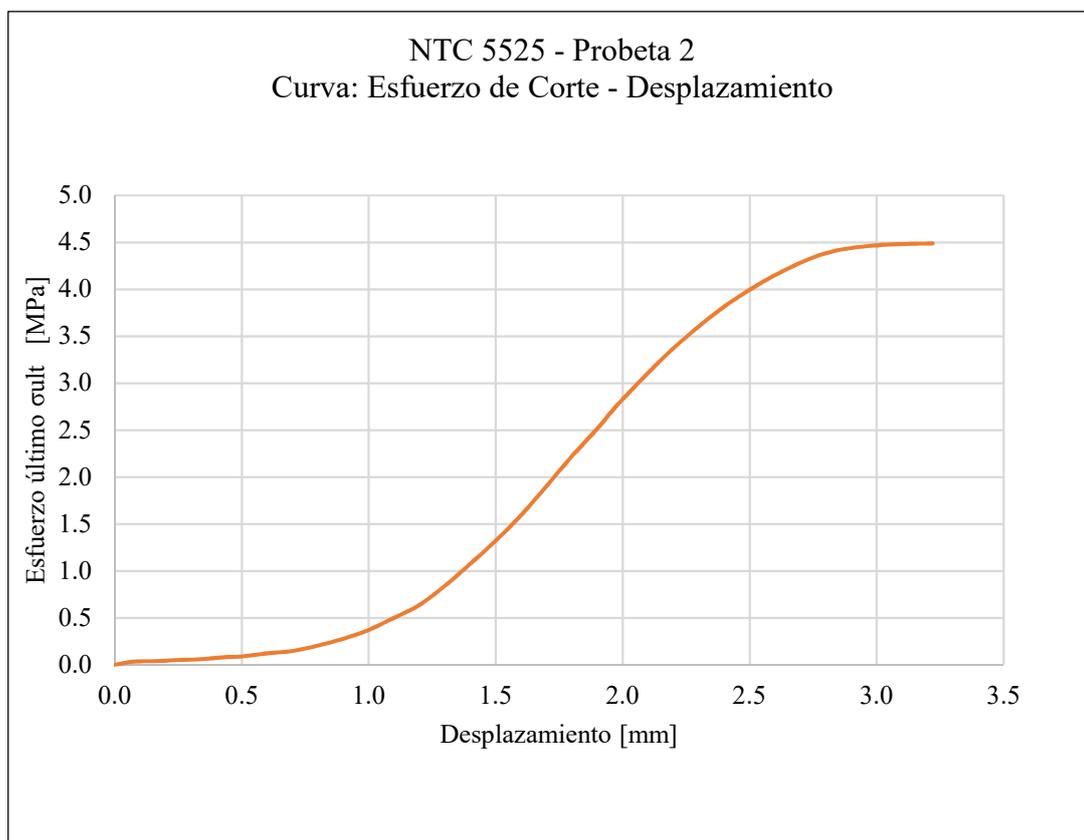
*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

Para la probeta 2, el valor de carga máxima es de 21.70 kN y presenta un esfuerzo máximo de corte de 4.49 MPa, en una sección de área de 4834.7 mm<sup>2</sup>.

**Tabla 6.25. Datos ensayo de corte para caña guadúa (GaK). Probeta 2.**

NTC 5525 - Probeta 2					
Curva: Esfuerzo de Corte - Desplazamiento					
Espesor 1:	10.50	(mm)	Longitud 1:	118.20	(mm)
Espesor 2:	10.50	(mm)	Longitud 2:	119.20	(mm)
Espesor 3:	10.00	(mm)	Longitud 3:	117.20	(mm)
Espesor 4:	10.00	(mm)	Longitud 4:	117.00	(mm)
Diámetro exterior:	111.33	(mm)	Esfuerzo Máximo de Corte:	4.49	(MPa)
Área:	4834.70	(mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima:	21.70	(kN)

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 6.28.** Curva esfuerzo último frente al desplazamiento en el ensayo de tracción de la caña guadúa (GaK). Probeta 2.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

Por lo cual, se obtiene un valor promedio de esfuerzo máximo de corte de 4.26 kPa, una carga máxima promedio de 20.74 kN, se presentan los valores de los ensayos hechos en el laboratorio del LEMSUR de la EPN como Anexo 14-A y Anexo 14-B.

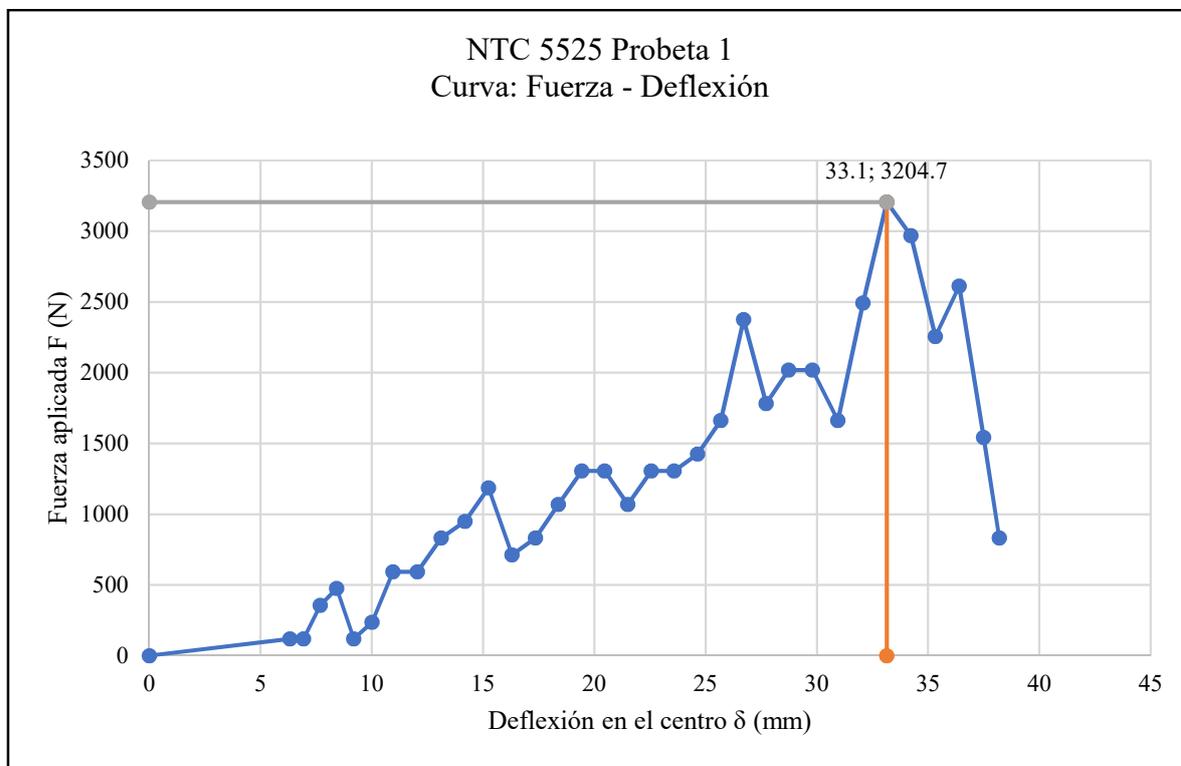
### 6.1.3.5. Resultado de la prueba de flexión.

Para la probeta 1, el valor del módulo de elasticidad a flexión es de 8.12 GPa para una carga máxima de 3.21 kN y presenta un esfuerzo máximo a flexión de 14.25 MPa, en una sección de área transversal de 3523.99 mm<sup>2</sup>.

**Tabla 6.26. Datos ensayo de flexión para caña guadúa (GaK). Probeta 1.**

NTC 5525 - Probeta 1		
Curva: Esfuerzo de Flexión - Desplazamiento		
Diámetro externo:	108.3	$\Phi_{ext}$ (mm)
Diámetro interno:	85.1	$\Phi_{int}$ (mm)
Longitud:	3326.5	L (mm)
Espesor:	10.2	t (mm)
Área de sección:	3523.99	A (mm <sup>2</sup> )
Momento de Inercia:	6752802.38	I <sub>b</sub> (mm <sup>4</sup> )
Esfuerzo Último Calculado:	14.25	$\sigma_{ult}$ (MPa)
Módulo de elasticidad:	8.12	E (GPa)
Deflexión Máxima:	38.20	$\delta$ (mm)
Carga Máxima:	3204.72	F (N)

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 6.29.** Curva Fuerza aplicada frente vs deformación en el centro en el ensayo de tracción de la caña guadúa (GaK). Probeta 1

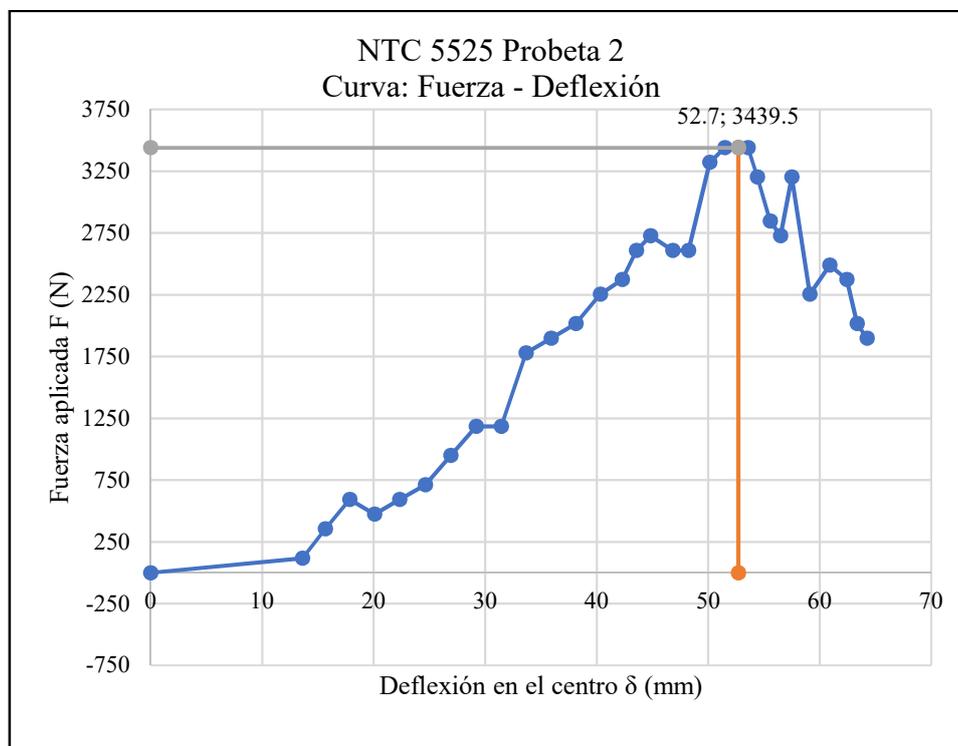
Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera

Para la probeta 2, el valor del módulo de elasticidad a flexión es de 5.10 GPa para una carga máxima de 3.44 kN y presenta un esfuerzo máximo a flexión de 14.0625 MPa, en una sección de área transversal de 3941.15 mm<sup>2</sup>.

**Tabla 6.27. Datos ensayo de flexión para caña guadúa (GaK). Probeta 2.**

NTC 5525 - Probeta 2		
Curva: Esfuerzo de Flexión - Desplazamiento		
Diámetro externo:	113.57	$\Phi_{ext}$ (mm)
Diámetro interno:	88.77	$\Phi_{int}$ (mm)
Longitud:	3526.5	L (mm)
Espesor:	10.8	t (mm)
Área de sección:	3941.15	A (mm <sup>2</sup> )
Momento de Inercia:	8166288.42	I <sub>b</sub> (mm <sup>4</sup> )
Esfuerzo Último Calculado:	14.06	$\sigma_{ult}$ (MPa)
Módulo de elasticidad:	5.103	E (GPa)
Deflexión Máxima:	64.23	$\delta$ (mm)
Carga Máxima:	3439.52	F (N)

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 6.30.** Curva fuerza aplica frente a la deflexión en el centro en el ensayo de tracción de la caña guadúa (GaK). Probeta 2.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

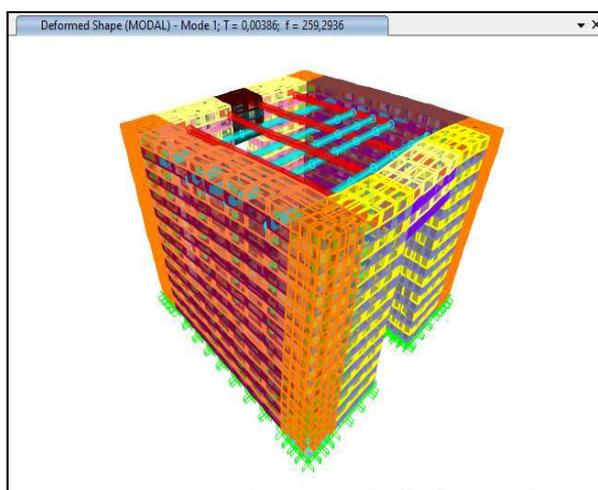
Por lo cual, se puede tener un valor promedio de módulo de elasticidad en flexión de 6.62 GPa, a una carga máxima promedio de 3.33 kN, para un esfuerzo máximo de flexión promedio de 14.16 MPa.

## 6.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO COMPUTACIONAL.

Para una mejor apreciación del modelo y debido a la capacidad de procesamiento del ordenador en el que se desarrolló el análisis (Intel Core i7-4700 MQ, con 2.40 GHz de memoria RAM y 6.64Gb de espacio de almacenamiento disponible), del sistema, la subdivisión de elementos (discretización) se desarrolla de acuerdo a la necesidad de verificar valores en secciones corte definidas y que se consideran puntos de posibles fallas, como son: esquinas y uniones de muros, aberturas de puertas y dinteles.

### 6.2.1. DETALLES Y OBSERVACIONES DEL MODELO

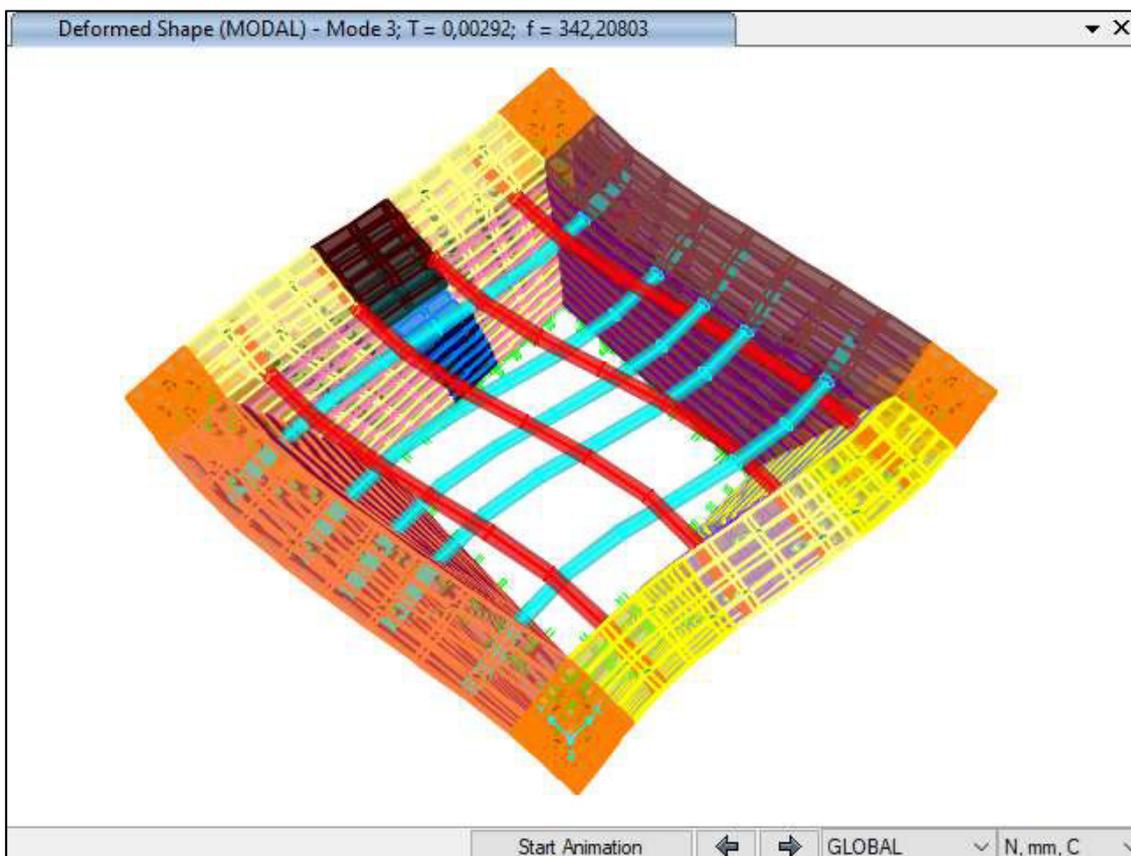
El modelo se comporta de manera aceptable (favorable), ya que en el primer modo de vibración se desplaza completamente en el sentido x, para el segundo modo tiene variaciones de desplazamientos en los dos sentidos y en el tercer modo tiene una rotación en sentido horario y anti horario, provocando que las cuatro esquinas presenten desplazamientos relativos similares.



**Figura 6.31.** Desplazamiento en sentido “X” en el primer periodo, del sistema de superadobe con refuerzo de estacas caña guadúa (*GaK*).

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

El diafragma conformado por elementos de caña guadúa (*GaK*), se mueve en conjunto con los muros, por lo que el objetivo, de que sea un elemento de amarre para las cuatro paredes, si se cumple.



**Figura 6.32.** Desplazamiento de muros en el tercer periodo, diafragma amarra los muros del sistema de superadobe con refuerzo de estacas caña guadúa (*GaK*).

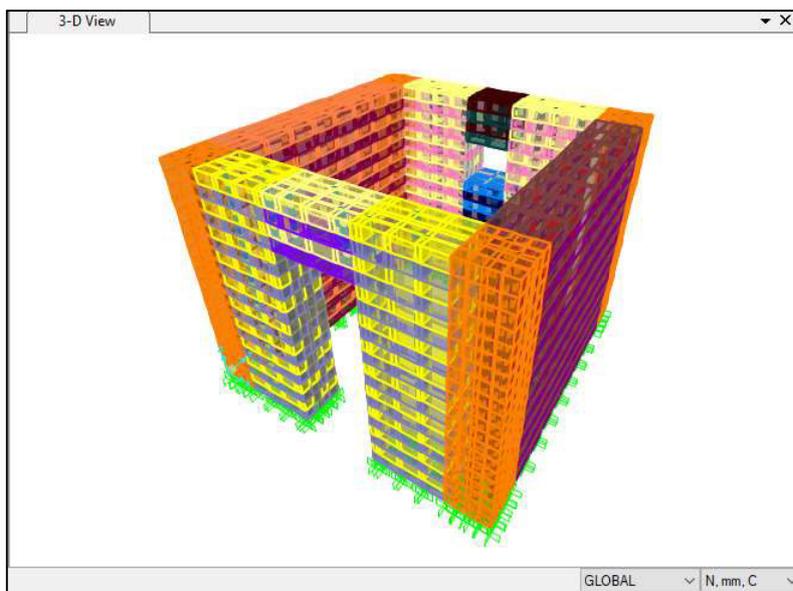
*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

No se presenta una gran concentración de esfuerzos en dinteles de puertas o ventanas y tampoco en las esquinas, donde se amarran los muros entre sí.

Para facilidad de comprobación, se decide ir un poco más allá en el presente trabajo y se realiza tres modelos con variantes en el porcentaje de refuerzo vertical usado.

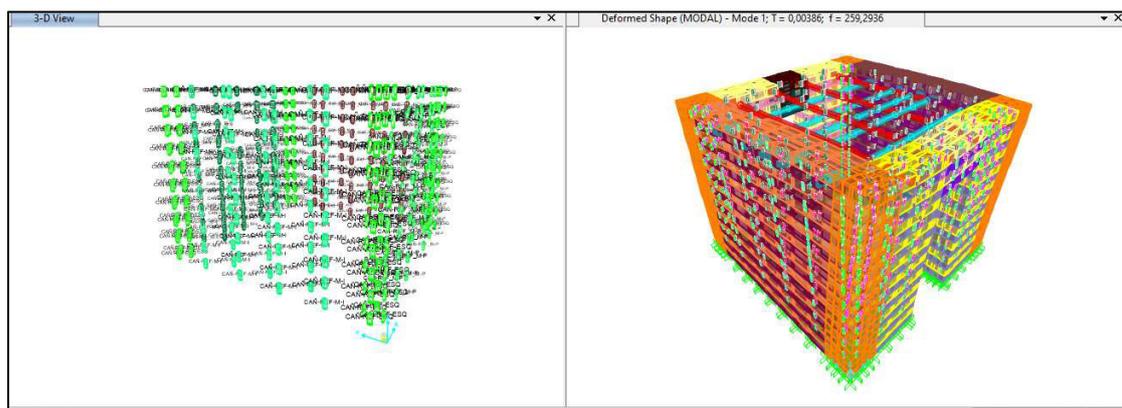
El modelo se comporta de forma similar en los tres análisis realizados, estos tres modelos son: un sistema en el cual el refuerzo de caña vertical sea nulo, se podría entender como un sistema de superadobe tradicional, el segundo modelo consiste

en el sistema propuesto con refuerzo de estacas de caña guadúa (*GaK*) y un último modelo en el que se idealiza un refuerzo longitudinal total a modo de pinchos que refuerza en toda la longitud, a todo el muro desde la base hasta la cumbre.



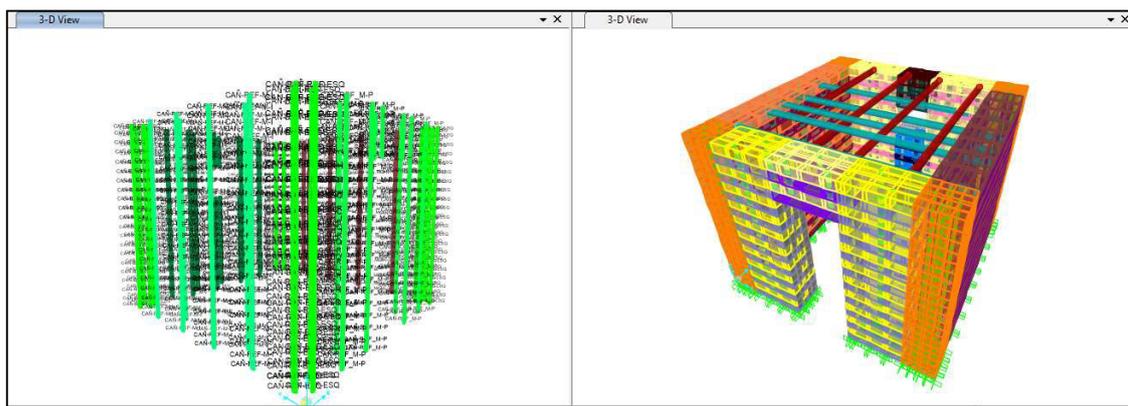
**Figura 6.33.** Sistema de superdoble sin refuerzo alguno (sistema convencional de superdoble).

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera



**Figura 6.34.** Sistema de superdoble con refuerzo de estacas caña guadúa (*GaK*).

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera



**Figura 6.35.** Sistema de superdoble con refuerzo de pinchos caña guadúa (GaK).

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

## 6.2.2. CORTANTE BASAL

S Auto Seismic - User Coefficient									
File View Edit Format-Filter-Sort Select Options									
Units: As Noted									
Filter:									
	LoadPat Text	Dir Text	PercentEcc Unitless	EccOverride	UserZ Yes/No	C Unitless	K Unitless	WeightUsed	Base Shear Tonf
▶	Ex-e=0.05	X	0,05	No	No	0,47	1	21,7221	10,2094
	Ey-e=0.08	Y	0,08	No	No	0,544	1	21,7221	11,8168

**Figura 6.36.** Valores del Corte Basal calculado a través del programa SAP2000.

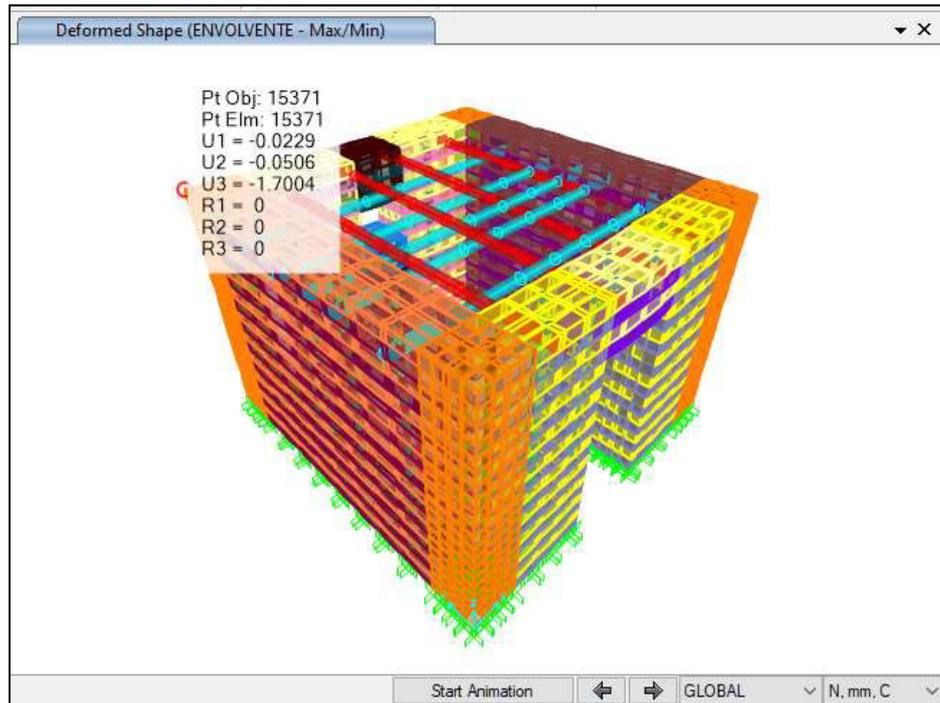
*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

El corte basal del sistema determinado en el programa es muy similar tanto en el sentido en “X” como en el sentido “Y”, al valor de las fuerzas horizontales determinadas manualmente a través de la norma (NEC-SE-DS, 2015) presentado en la tabla 5.13. de la sección 5.3.4.5.5.

Con lo cual se puede establecer un valor de 10.2094 Ton en el sentido “X” y de 11.8168 Ton en el sentido “Y”.

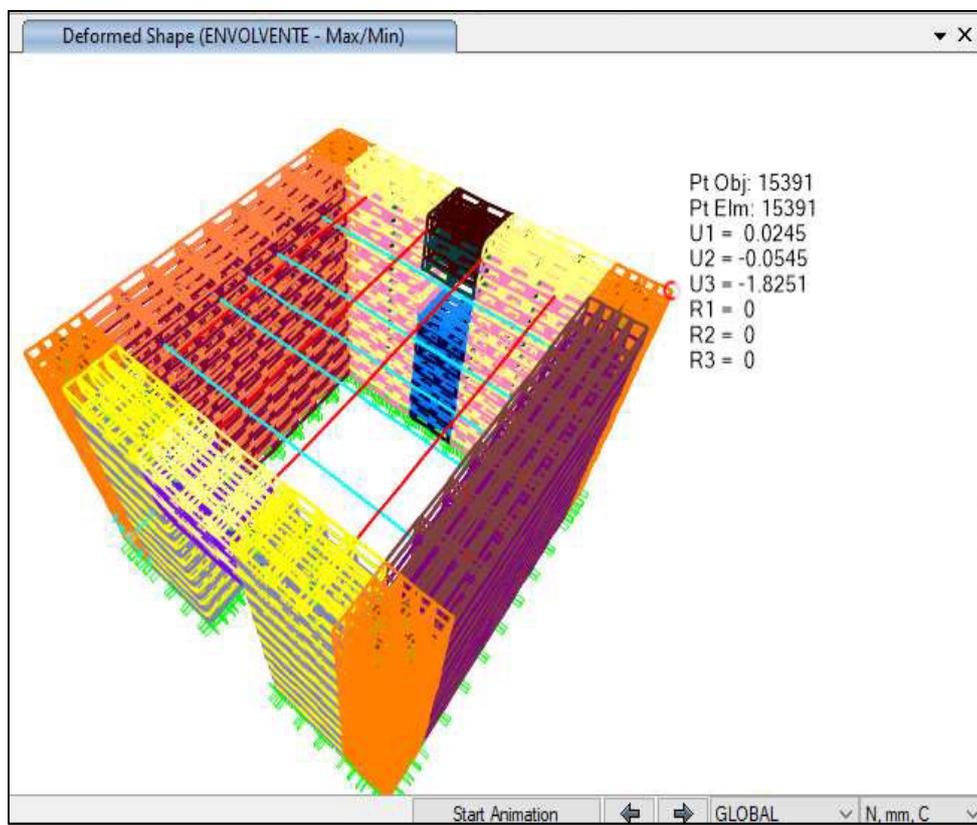
## 6.2.3. DESPLAZAMIENTOS

Se presentan los valores de desplazamientos en los bordes superiores de cada esquina, ya que son puntos de importancia de análisis, estos valores son pequeños y se presentan en las tres dimensiones “X”, “Y” y “Z” respectivamente corresponde a U1, U2 y U3. Estos valores se encuentran en mm.



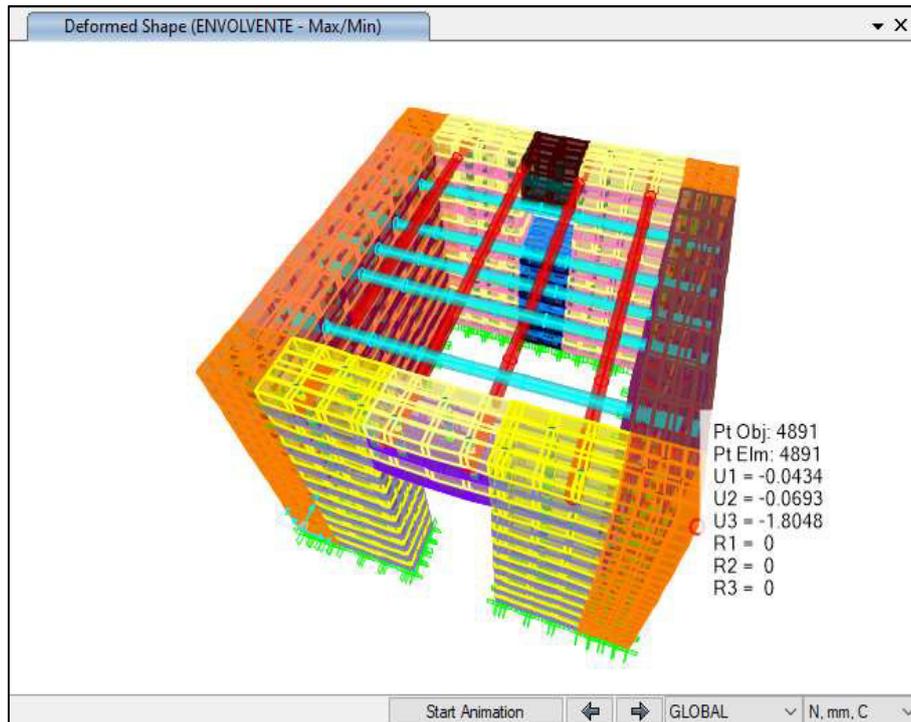
**Figura 6.37.** Valores de deformación en esquina superior izquierda de la parte posterior del sistema.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera



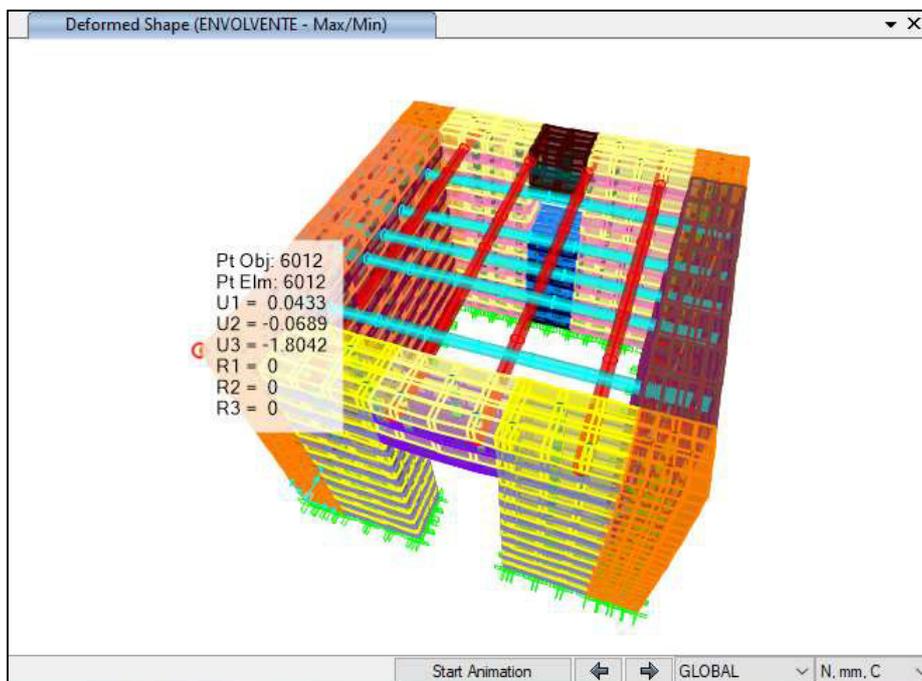
**Figura 6.38.** Valores de deformación en esquina superior derecha de la parte posterior del sistema.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera



**Figura 6.39.** Valores de deformación en esquina superior derecha de la parte delantera del sistema.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

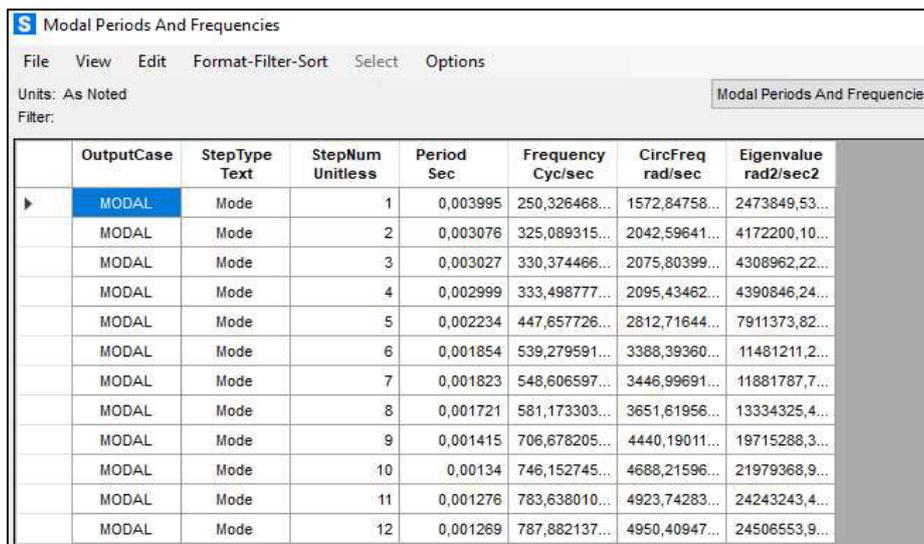


**Figura 6.40.** Valores de deformación en esquina superior izquierda de la parte delantera del sistema.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

## 6.2.4. PERÍODOS DE VIBRACIÓN DEL SISTEMA

Los períodos del sistema, obtenidos del modelo propuesto de superadobe con refuerzo vertical de caña guadúa se muestran en la figura 6.41., en la que se observa los doce modos de vibración del sistema en el cual el primer período tiene un valor de 0.003995 segundos y el último de 0.001269 segundos.



	OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	Frequency Cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad2/sec2
▶	MODAL	Mode	1	0,003995	250,326468...	1572,84758...	2473849,53...
	MODAL	Mode	2	0,003076	325,089315...	2042,59641...	4172200,10...
	MODAL	Mode	3	0,003027	330,374466...	2075,80399...	4308962,22...
	MODAL	Mode	4	0,002999	333,498777...	2095,43462...	4390846,24...
	MODAL	Mode	5	0,002234	447,657726...	2812,71644...	7911373,82...
	MODAL	Mode	6	0,001854	539,279591...	3388,39360...	11481211,2...
	MODAL	Mode	7	0,001823	548,606597...	3446,99691...	11881787,7...
	MODAL	Mode	8	0,001721	581,173303...	3651,61956...	13334325,4...
	MODAL	Mode	9	0,001415	706,678205...	4440,19011...	19715288,3...
	MODAL	Mode	10	0,00134	746,152745...	4688,21596...	21979368,9...
	MODAL	Mode	11	0,001276	783,638010...	4923,74283...	24243243,4...
	MODAL	Mode	12	0,001269	787,882137...	4950,40947...	24506553,9...

**Figura 6.41.** Valores de períodos del sistema de superadobe reforzado, determinados por el programa SAP2000.

*Fuente:* Obtenido por Mejía y Rivera

## 6.2.5. CONTROL DE DERIVAS DEL SISTEMA

### 6.2.5.1. Distribución vertical de las fuerzas sísmicas

El sistema propuesto consta de un solo nivel, con lo cual, al aplicar la ecuación (28) de la sección 3.6.8.5.1. del presente trabajo y propuesta por la (NEC-SE-DS, 2015), en el cual, se determina el desplazamiento de cada piso o nivel para la determinación de la fuerza sísmica por nivel, al ser un sistema de un solo nivel, cae en la redundancia de ser el mismo valor.

### 6.2.5.2. P-Δ Efectos de segundo orden y Qi Índice de estabilidad

Al usar la ecuación (29) de las sección 3.6.8.5.3 y propuesta por la (NEC-SE-DS, 2015), se obtiene la tabla 6.28.

**Tabla 6.28. Factor de efectos P-Delta ( $\Delta$ ) e índice  $Q_{ie}$ .**

<b>Factor <math>f_{P-\Delta}</math> e Índice <math>Q_{ie}</math></b>	
<b><math>P_{ie}</math> (Ton)=</b>	21.69
<b><math>\Delta_{pi}</math> (mm)=</b>	0.155
<b><math>V_{pi}</math> (Ton)=</b>	15.59
<b><math>h_{pi}</math> (mm)=</b>	2600
<b><math>Q_{ie}</math> =</b>	0.00008
<b><math>f_{P-\Delta}</math> =</b>	1.0001

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Con los valores de peso, derivas, cortante basal y altura de piso se obtiene un índice  $Q_{ie} = 0.00008$ , el cual es mucho menor a 0.3 y de acuerdo con la (NEC-SE-DS, 2015), esto implica que el sistema es estable.

La tabla 6.29., muestra las derivas de piso, que al tratarse de un solo nivel son iguales a los desplazamientos.

**Tabla 6.29. Resumen de derivas máximas para el sistema de superado con refuerzo de estacas de caña guadúa (GaK).**

<b>Resumen de derivas para el sistema de superadobe con refuerzo de vertical de estacas de caña guadúa (GaK)</b>		
<b><math>\Delta</math> (X)</b>	<b><math>\Delta</math> (Y)</b>	<b><math>\Delta</math> (Z)</b>
<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>
0.118	-0.155	-2.405

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

### 6.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

#### 6.3.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS, MEJORAMIENTO DEL SUELO AL AÑADIR CAL

##### 6.3.1.1. Mejoramiento del suelo al combinarlo con hidróxido de cal, respecto a la compactación, contenido de humedad y densidad óptima.

La muestra de suelo tomada del sector de Calderón, ubicado en el norte de la ciudad de Quito, tras los ensayos realizados, en los cuales uno de ellos es la clasificación SUCS, se determina que el material es una arena con contenido de limos (SM), por lo cual, a la muestra SM se añadió cal hidratada o hidróxido de cal  $[Ca(OH)_2]$ , en las proporciones de 4%, 8% y 12%, para de este modo llegar a mejorar sus propiedades, estos porcentajes de adición de cal hacen que cada muestra suelo cal presente diferentes cambios en sus propiedades, por lo que es necesario compararlos entre sí, para determinar la cantidad de cal óptima para aprovechar de mejor manera la arena limosa junto con la mejor adición de cal. Los siguientes cuadros y gráficas muestran las mejoras que tuvo el suelo al ser mezclado con cal hidratada, respecto a las propiedades de densidad y humedad promedio para una mejor compactación:

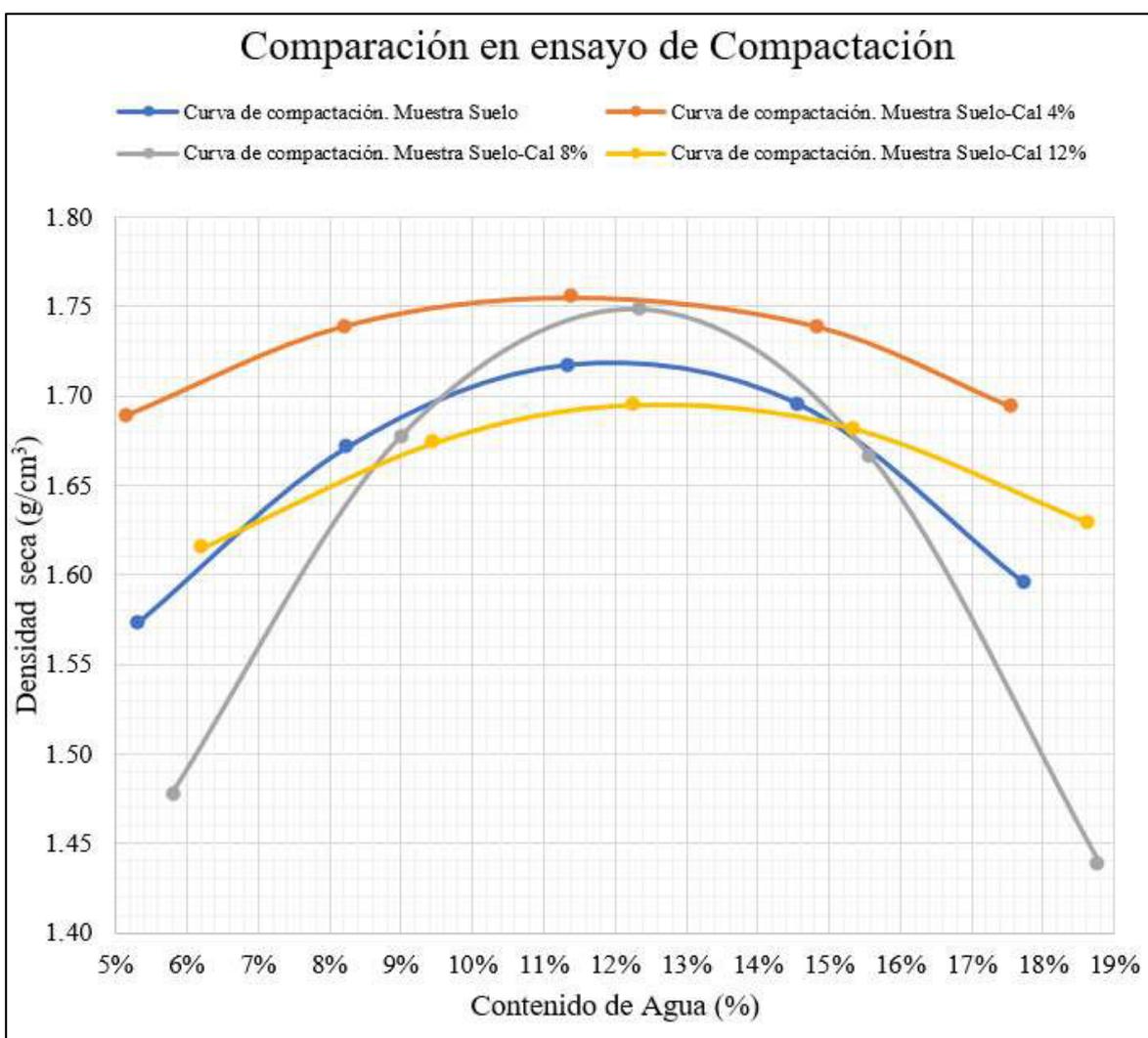
**Tabla 6.30. Comparación de valores de densidad del suelo ante las combinaciones de suelo-cal, a través del ensayo de compactación.**

Tipo de Muestra	Densidad Seca ( $gr/cm^3$ )	Humedad Promedio (%)
Suelo Natural	1.719	11.3
Suelo + Cal 4%	1.756	11.0
Suelo + Cal 8%	1.747	11.6
Suelo + Cal 12%	1.695	12.24

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

En la tabla 6.30. se observa que efectivamente el suelo aumenta su densidad, con ello se tiene un suelo más homogéneo, por ende, la mezcla se comportará de una manera más similar y a su vez el contenido de humedad disminuye, eliminando así espacios de agua, que al llegar a evaporarse se convertirían en espacios de vacíos, afectando así a los muros o a cualquier elemento en el que se emplee la muestra de suelo cal.

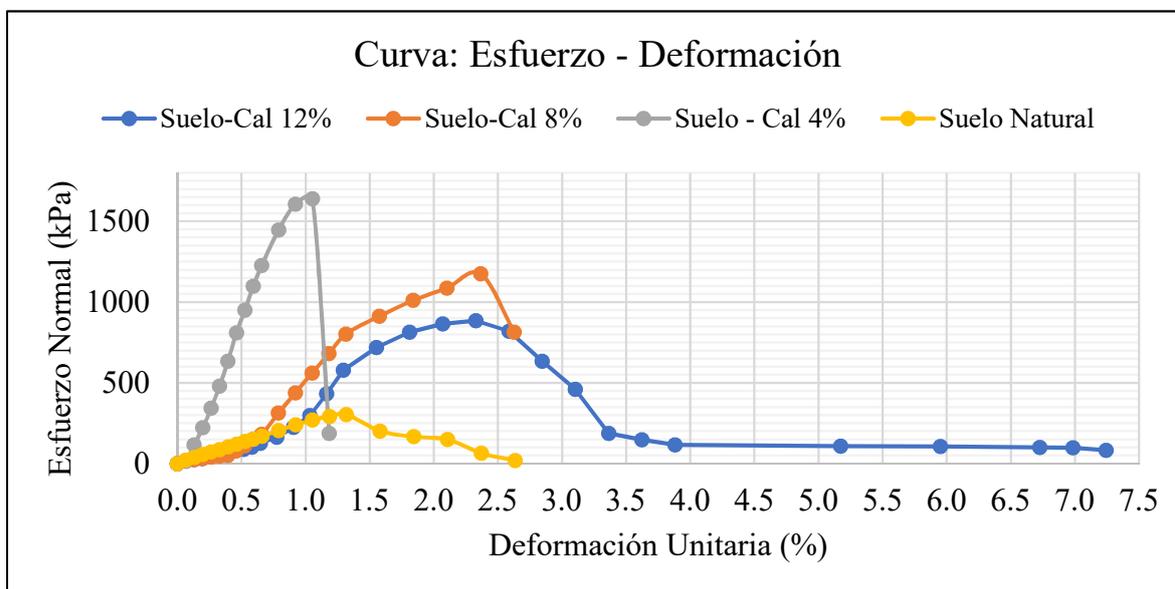
En la figura 6.42., se observa que efectivamente la curva de compactación para la muestra suelo cal al 4% presenta una mayor densidad, con menor contenido de humedad, lo que la convierte en la mezcla idónea respecto a este ensayo, para la construcción del superadobe.



**Figura 6.42.** Curva de compactación de las mezclas de suelo-cal y suelo natural.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

### 6.3.1.2. Mejoramiento del suelo al combinarlo con hidróxido de cal, respecto al ensayo de compresión simple



**Figura 6.43.** Curvas de esfuerzo normal frente a la deformación unitaria de las mezclas suelo-cal y suelo natural.

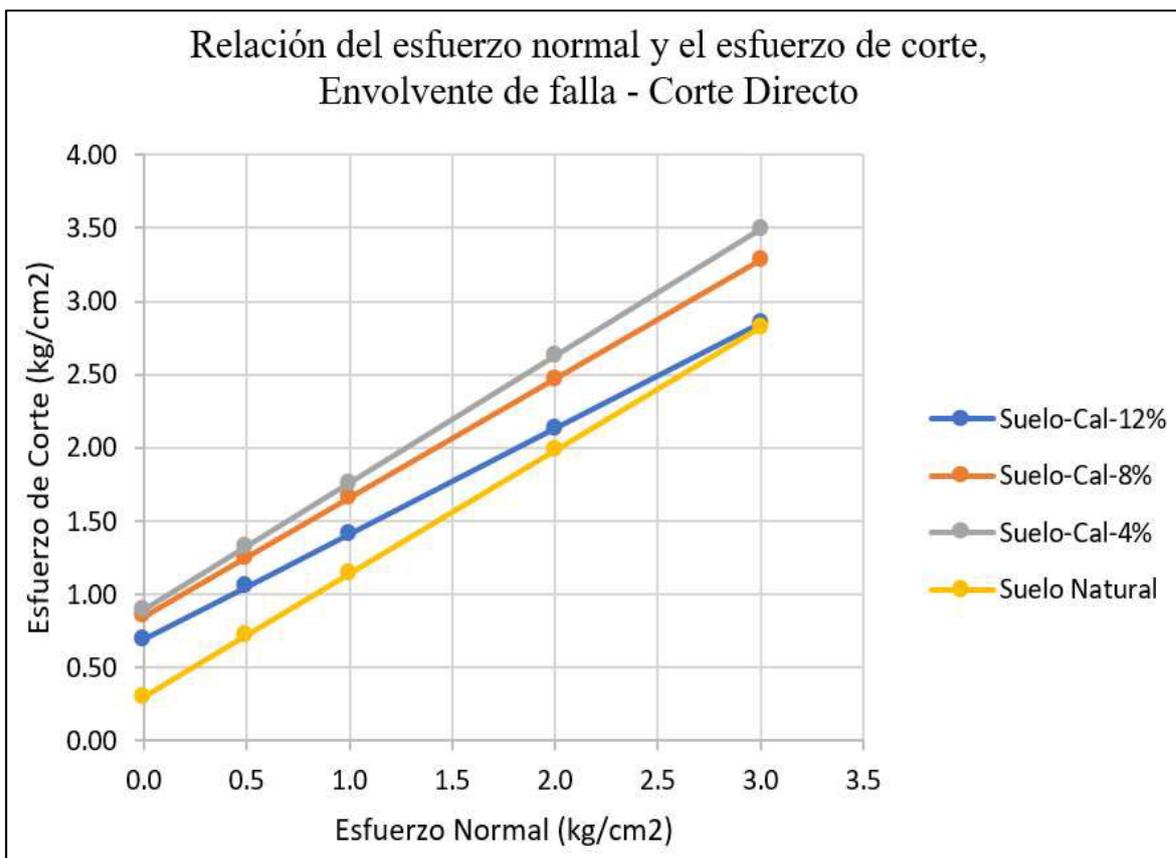
*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Como se observa en la figura 6.43., existe un evidente incremento de la resistencia al comparar cualquier muestra de suelo-cal con la muestra de suelo natural, a simple vista, se puede considerar que el suelo natural apenas resiste un esfuerzo de 200 kPa y la muestra de suelo-cal al 4% resiste 8 veces más.

### 6.3.1.3. Mejoramiento del suelo al combinarlo con hidróxido de cal, respecto al ensayo de corte directo

La figura 6.44. presenta el resumen de las envolventes de falla, para cada combinación de suelo-cal y para la muestra de suelo natural, mediante el ensayo de corte directo.

En la cual se observa que: el mejoramiento del suelo al combinarlo con hidróxido de cal es evidente, ahora dentro de las tres combinaciones, el usar cal al 4% en peso de la muestra le da un mayor valor de resistencia ante el esfuerzo de corte.



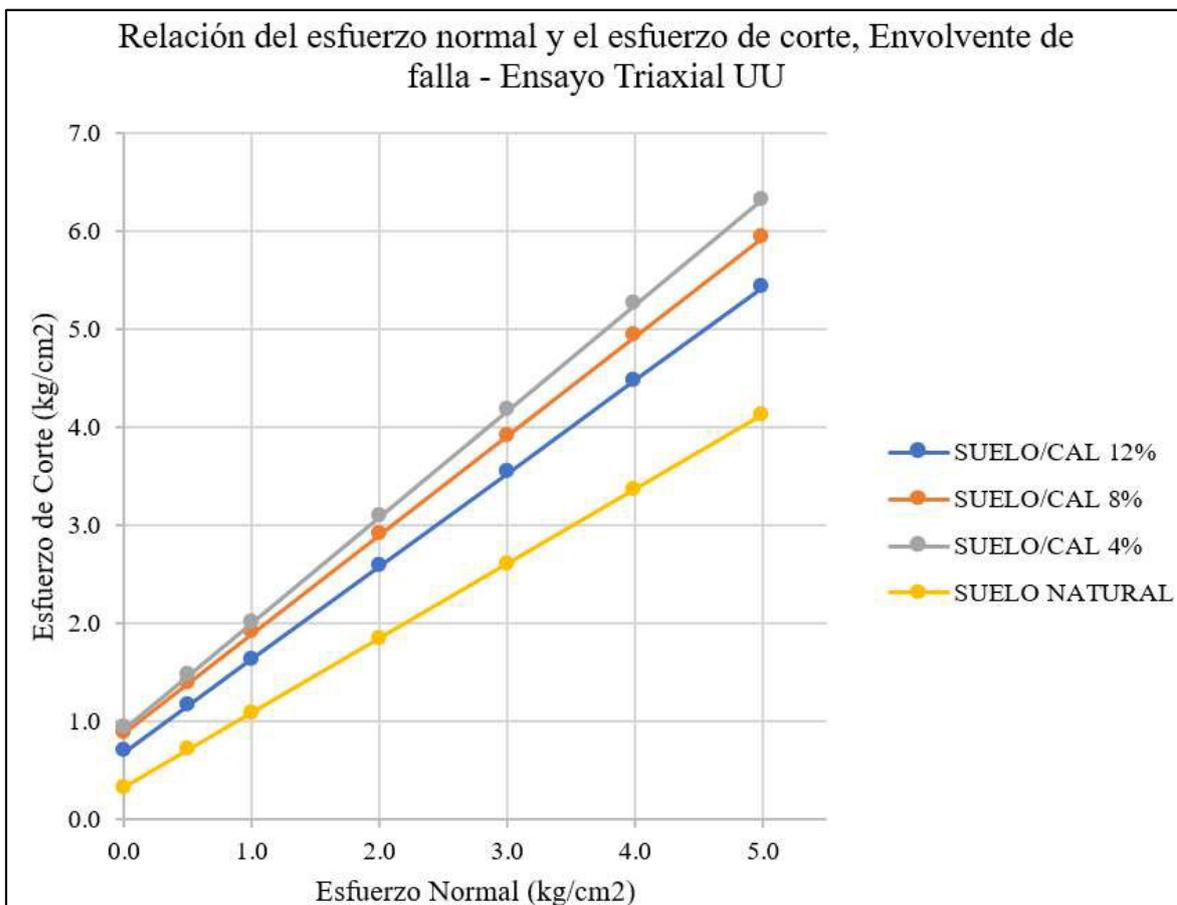
**Figura 6.44.** Envoltentes de falla para las diferentes mezclas de suelo cal y suelo natural por el ensayo de corte directo.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

#### 6.3.1.4. Mejoramiento del suelo al combinarlo con hidróxido de cal, respecto al ensayo de compresión triaxial UU

La figura 6.45., presenta el resumen de las envolventes de falla para cada combinación de suelo-cal y para la muestra de suelo natural, que se obtuvieron a través del ensayo de compresión triaxial UU.

En la cual se observa que: el mejoramiento del suelo al combinarlo con hidróxido de cal es evidente, y se verifica que tanto a través del ensayo de corte directo como el ensayo triaxial no drenado no consolidado, el usar cal al 4% en peso de la muestra le da un mayor valor de resistencia ante el esfuerzo de corte y un esfuerzo normal.



**Figura 6.45.** Envoltentes de falla para las diferentes mezclas de suelo cal y suelo natural por el ensayo Triaxial UU.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

### 6.3.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA CAÑA GUADÚA CON TRABAJOS SIMILARES

En la actualidad, existen muchos valores referenciales respecto a los valores estimados de la caña guadúa, tanto en las propiedades mecánicas como en las propiedades físicas, por consiguiente, se muestra en primer lugar la tabla 6.31., que es un resumen de las propiedades obtenidas al realizar este trabajo, seguidamente, se presenta la tabla 6.32., que similarmente, es un compendio de valores respecto a las propiedades físicas y mecánicas de la caña guadúa (GaK) realizado en el mismo laboratorio LEMSUR de la EPN.

**Tabla 6.31. Resumen de valores para las propiedades de la caña guadúa (GaK), a través de los diferentes ensayos realizados en este trabajo**

<b>Resumen de valores promedio de las propiedades de la Caña guadúa (GaK)</b>	
<b>Propiedades físicas</b>	
Contenido de Humedad (%) =	10.85
Peso volumétrico (g/cm <sup>3</sup> ) =	0.565
<b>Propiedades mecánicas</b>	
Esfuerzo último a compresión (MPa) =	24.719
Esfuerzo último a tensión (MPa) =	135.339
Esfuerzo último a corte (MPa) =	4.26
Esfuerzo último a flexión (MPa) =	14.155
Módulo de Elasticidad de Compresión (GPa) =	9.735
Módulo de Elasticidad de Tensión (GPa) =	27.35
Módulo de Elasticidad de Flexión (GPa) =	6.615

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.32. Resumen de valores para las propiedades de la caña guadúa (GaK), a través de los diferentes ensayos realizados anteriormente en el laboratorio LEMSUR de la EPN.**

<b>Resumen de valores promedio de las propiedades de la Caña guadúa (GaK) determinados por Herrera y Viteri</b>	
<b>Propiedades físicas</b>	
Contenido de Humedad (%) =	16.6
Peso volumétrico (g/cm <sup>3</sup> ) =	0.66
<b>Propiedades mecánicas</b>	
Esfuerzo último a compresión (MPa) =	38.85
Esfuerzo último a tensión (MPa) =	76.52
Esfuerzo último a corte (MPa) =	2.08
Esfuerzo último a flexión (MPa) =	71.79
Módulo de Elasticidad de Compresión (GPa) =	15.25
Módulo de Elasticidad de Tensión (GPa) =	12.02
Módulo de Elasticidad de Flexión (GPa) =	15.82

*Fuente:* (Herrera & Viteri, 2018)

También se muestra la figura 6.46., que corresponde a la tabla del Apéndice N°6 de la (NEC-SE-GUADÚA, 2016), en la cual se presentan un resumen de valores promedio de un compendio de datos tomados de informes realizados por diferentes autores ecuatorianos.

TABLA COMPARATIVA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE GUADÚA										
FUENTE	DOCUMENTO	Obtención de las propiedades mecánicas y estructurales de la Caña Guadua angustifolia Kunth del Ecuador.	Diseño de puentes peatonales utilizando caña guadua como elemento de construcción	Optimización de Unión en Guadua ante Sollicitación de Fuerza Sísmica	Uniones Estructurales con Bambú (Guadua Angustifolia).	Metodología de Diseño de Estructuras en Guadua Angustifolia como Material Estructural por el Método de Esfuerzos Admisibles.	El Uso de la Guadua como Madera Alternativa para la Construcción y su Aplicación en la Elaboración de Tablas para Enostrado	Uso de la Caña guadua en la Vivienda Modular.	Diseño de un Modelo de Vivienda Ecológica con Bambú para la Zona Rural de Yantzaza	Propiedades Físico-Mecánicas de la Guadua Angustifolia Kunth y Aplicación al Diseño de Baterías Sanitarias del IASA II
	AUTOR	Ing. Pedro Córdova	Ing. Kathia Vásquez Miranda/José R. Marín	Raúl Prieto Alzate	Ing. Sergio Gutiérrez	Ing. Coori Takeuchi	Ing. Industrial Ángel Murtagul	Arq. José Andrés Mendoza Castro / Arq. José Napoleón Rosales Saloedo	Ing. Luis Caiva	Ing. Jorge Alberto Cobos Fiechter / Ing. Xavier Antonio León Rodríguez
	UNIVERSIDAD	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. UCSG	Universidad de las Fuerzas Armadas. ESPE	Univ. Industrial de Santander	Universidad Nacional de Ingeniería	Universidad Nacional de Colombia	Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL	Universidad de Cuenca	Universidad de Loja	Universidad de las Fuerzas Armadas. ESPE
VARIABLE	PAIS-FECHA DIMENSIONES	Ecuador-2014	Ecuador-2006	Colombia-2004	Perú-2010	Colombia-2011	Ecuador-2011	Ecuador-2014	Ecuador-2016	Ecuador-2007
Resistencia última a la compresión de la caña guadua	$\sigma_k = \text{MPa}$	37,76	21,78	42,94	44,37	20,30	69,68	70,92	43,01	48,38
Módulo de Elasticidad de compresión	$E_k = \text{GPa}$	14,35								
Resistencia última a la tensión de la caña guadua	$\sigma_k = \text{MPa}$	117,60		161,47	107,69	40,70	258,49		52,46	242,43
Módulo de Elasticidad de tensión	$E_k = \text{GPa}$	8,31								
Resistencia última a la flexión de la caña guadua	$\sigma_k = \text{MPa}$	45,85				37,40	172,70	33,31	17,16	34,98
Módulo de Elasticidad de tensión	$E_k = \text{GPa}$	12,16								10,36
Resistencia última al esfuerzo cortante de la caña guadua	$\tau_k = \text{Mpa}$	7,17		6,76	6,41	3,50	6,76		6,74	5,46

**Figura 6.46.** Tabla del Apéndice N° 6 de la Norma ecuatoriana de la construcción-Guadúa, que presenta valores de ensayos realizados a la caña guadúa ( $GaK$ )

*Fuente:* (NEC-SE-GUADÚA, 2016)

Finalmente, se presenta una lista de tablas las cuales corresponden a diferentes autores extranjeros, que han realizado trabajos similares, en los cuales se determina valores de las propiedades físicas y mecánicas muy cercanos a los obtenidos en este trabajo.

**Tabla 6.33.** Resumen de valores para la determinación del contenido de humedad de la caña guadúa ( $GaK$ ), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.

Título	Contenido de humedad		
	Lugar/Fecha	Autor (es)	Valor (%)
“Resistencia y elasticidad a la flexión de la guadua angustifolia kunth de Pitalito, Huila”	Colombia, 23 de abril del 2018	(Sapuyes, Osorio, & Takeuchi, 2018)	10.20
“Caracterización física y mecánica de la guadua rolliza de la especie angustifolia kunth mediante procesamiento digital de imágenes”	Colombia 2015	(Brand, Ruiz, & Lozano, 2015)	12.00

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.34. Resumen de valores para la determinación de la densidad de la caña guadúa (*GaK*), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.**

<b>Densidad</b>			
<b>Título</b>	<b>Fecha</b>	<b>Autor (es)</b>	<b>Valor (g/cm<sup>3</sup>)</b>
“Caracterización de la Guadúa <i>Angustifolia</i> Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-10”	Colombia Noviembre del 2012	(Cely, Hernández, & Gutierrez, 2012)	0.68

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.35. Resumen de valores para la determinación del esfuerzo máximo en compresión de la caña guadúa (*GaK*), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.**

<b>Esfuerzo máximo en Compresión</b>			
<b>Título</b>	<b>Fecha</b>	<b>Autor (es)</b>	<b>Valor (MPa)</b>
“Caracterización de la Guadúa <i>Angustifolia</i> Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-10”	Colombia Noviembre del 2012	(Cely, Hernández, & Gutierrez, 2012)	39.65
“Análisis de las propiedades mecánicas de la guadua <i>Angustifolia</i> mediante técnicas estadísticas y redes neuronales”	Colombia 2013	(Rojas, 2003)	32.87
“Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la guadua <i>angustifolia</i> kunth originaria de Armenia Quindío”	Colombia 2018	(Moreno & Cendales, 2018)	31.23

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.36. Resumen de valores para la determinación del esfuerzo máximo en tracción de la caña guadúa (*GaK*), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.**

<b>Esfuerzo máximo en Tracción</b>			
<b>Título</b>	<b>Fecha</b>	<b>Autor (es)</b>	<b>Valor (MPa)</b>
“Caracterización de la Guadúa <i>Angustifolia</i> Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-10”	Colombia Noviembre del 2012	(Cely, Hernández, & Gutierrez, 2012)	135.30

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.37. Resumen de valores para la determinación del esfuerzo máximo en flexión de la caña guadúa (*GaK*), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.**

<b>Esfuerzo máximo en Flexión</b>			
<b>Título</b>	<b>Fecha</b>	<b>Autor (es)</b>	<b>Valor (MPa)</b>
"Resistencia y elasticidad a la flexión de la guadúa <i>angustifolia</i> kunth de Pitalito, Huila"	Colombia 23 de abril del 2018	(Sapuyes, Osorio, & Takeuchi, 2018)	13.65
"Determinación experimental de valores característicos de resistencia para Guadúa <i>Angustifolia</i> "	Colombia 2010	(Luna, Lozano, & Takeuchi, 2013)	12.46
"Determinación de los valores de esfuerzos admisibles del bambú Guadúa <i>Angustifolia</i> Kunth de Tolima."	Colombia 2013	(Ardila, 2013)	10.19

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.38. Resumen de valores para la determinación del esfuerzo máximo de corte de la caña guadúa (*GaK*), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.**

<b>Esfuerzo máximo a Corte</b>			
<b>Título</b>	<b>Fecha</b>	<b>Autor (es)</b>	<b>Valor (MPa)</b>
“Análisis de las propiedades mecánicas de la guadua <i>Angustifolia</i> mediante técnicas estadísticas y redes neuronales”	Colombia 2013	(Rojas, 2003)	5.85
“Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la guadua <i>angustifolia kunth</i> originaria de armenia Quindío”	Colombia 2018	(Moreno & Cendales, 2018)	5.61

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.39. Resumen de valores para la determinación del módulo de elasticidad en compresión de la caña guadúa (*GaK*), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.**

<b>Módulo de Elasticidad en Compresión</b>			
<b>Título</b>	<b>Fecha</b>	<b>Autor (es)</b>	<b>Valor (GPa)</b>
“Caracterización de la Guadúa <i>Angustifolia Kunth</i> cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-10”	Colombia Noviembre del 2012	(Cely, Hernández, & Gutierrez, 2012)	10.23
“Análisis de las propiedades mecánicas de la guadua <i>Angustifolia</i> mediante técnicas estadísticas y redes neuronales”	2013	(Rojas, 2003)	9.08

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.40. Resumen de valores para la determinación del módulo de elasticidad en tracción de la caña guadúa (*GaK*), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.**

<b>Módulo de Elasticidad en Tracción</b>			
<b>Título</b>	<b>Fecha</b>	<b>Autor (es)</b>	<b>Valor (GPa)</b>
“Caracterización de la Guadúa Angustifolia Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-10”	Colombia Noviembre del 2012	(Cely, Hernández, & Gutierrez, 2012)	16.92

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

**Tabla 6.41. Resumen de valores para la determinación del módulo de elasticidad en flexión de la caña guadúa (*GaK*), a través de los diferentes ensayos realizados por diferentes autores.**

<b>Esfuerzo máximo en Flexión</b>			
<b>Título</b>	<b>Fecha</b>	<b>Autor (es)</b>	<b>Valor (MPa)</b>
“Resistencia y elasticidad a la flexión de la guadua angustifolia kunth de Pitalito, Huila”	Colombia 23 de abril del 2018	(Sapuyes, Osorio, & Takeuchi, 2018)	9.50
“Caracterización física y mecánica de la guadua rolliza de la especie angustifolia kunth mediante procesamiento digital de imágenes”	Colombia 2015	(Brand, Ruiz, & Lozano, 2015)	9.50

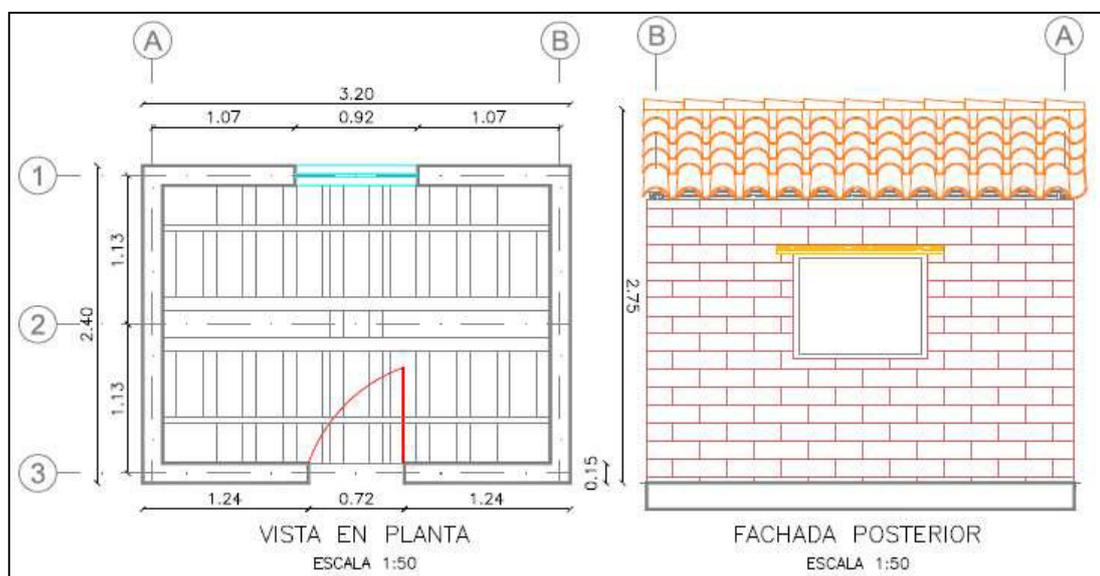
*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

### 6.3.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO COMPUTACIONAL CON TRABAJOS SIMILARES

El presente trabajo es completamente innovador, en cuanto se ha revisado la mayor cantidad de bibliografía posible sobre superadobe, pero eso no lo deslinda de ser una construcción con tierra, por lo cual, se puede relacionar este sistema con sistemas de adobe o tapial, se toma como referencia el trabajo de (Bonilla & Ramos, 2013), en el cual se propone un sistema de una vivienda de medidas similares en construcción de adobe, reforzada externamente con un enchapado de varilla metálica de 0.4 mm @151x15 cm, por lo que se considera una comparación prometedora y factible entre los dos sistemas.

A continuación, se hace una breve descripción del sistema propuesto por (Bonilla & Ramos, 2013):

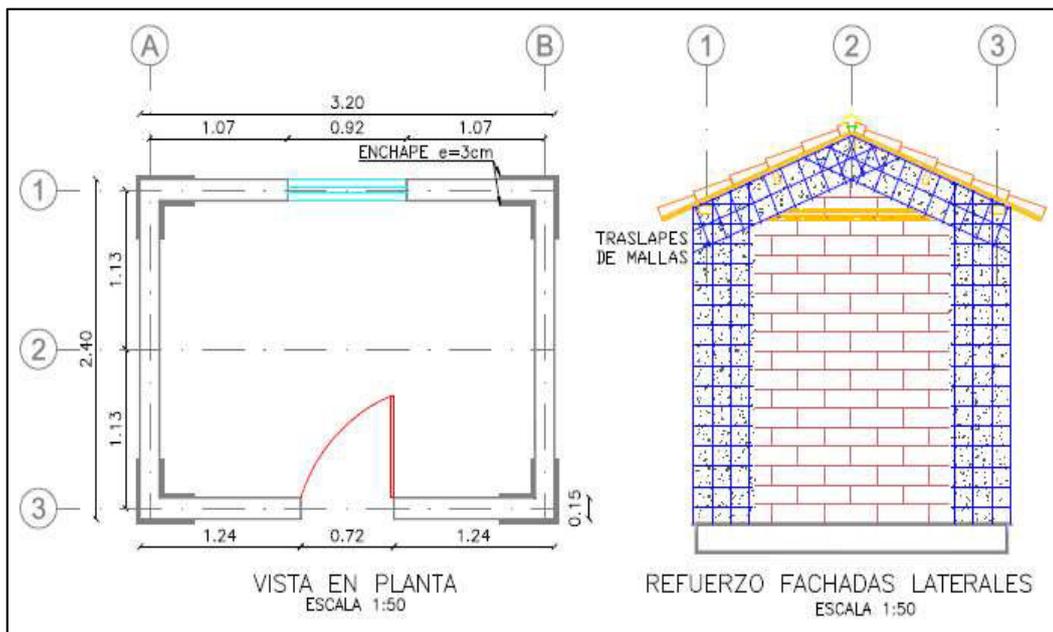
El sistema posee las siguientes dimensiones: 3.2 m en el sentido "X" y 2.4 m en el sentido "Y", además posee dos aberturas, que son destinadas para una ventana y una puerta y la altura final es 2.75 m.



**Figura 6.47.** Dimensiones del sistema de adobe propuesto por (Bonilla & Ramos, 2013).  
Vista en planta y posterior.

*Fuente:* (Bonilla & Ramos, 2013)

El reforzamiento de enchape del sistema tiene una configuración mostrada en la figura 6.48.



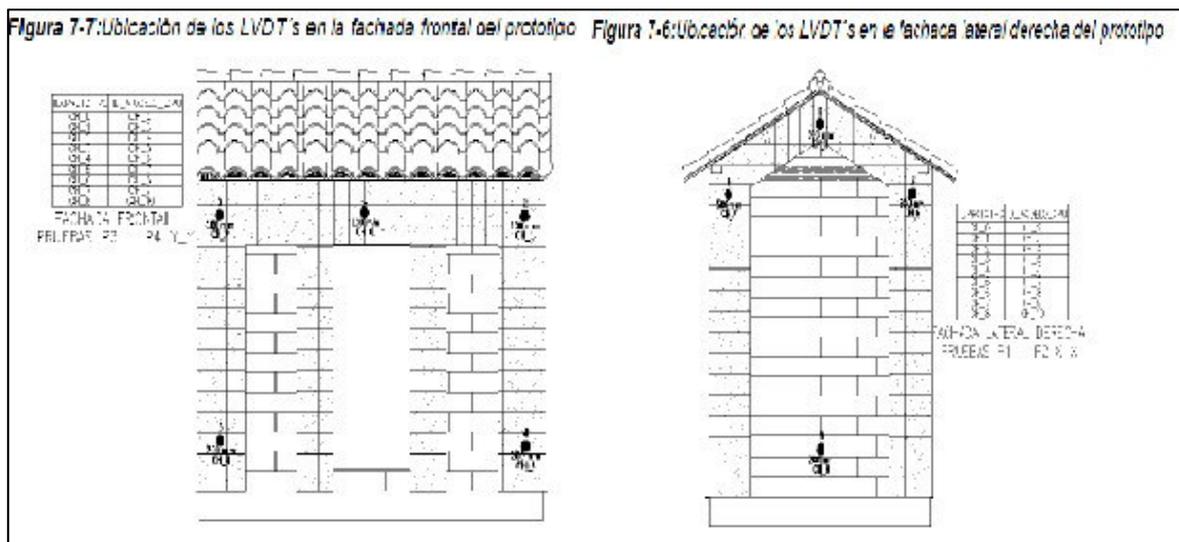
**Figura 6.48.** Dimensiones del sistema de adobe propuesto por (Bonilla & Ramos, 2013).  
Vista en planta y lateral.

*Fuente:* (Bonilla & Ramos, 2013)

Además, posee un cortante basal similar al 40% del peso de la estructura, pero el peso de la misma, es de la mitad del peso propuesto en este trabajo, es decir, el sistema de (Bonilla & Ramos, 2013) pesa aproximadamente de 10 Ton.

A la par, (Bonilla & Ramos, 2013) realizan el ensayo de materiales correspondiente a cada componente de su sistema y del reforzamiento, tanto al suelo, a la madera y al adobe. Por cuanto los valores que se pueden comparar por separado, es decir, como material de construcción del sistema, únicamente es la resistencia a la compresión simple, para lo cual en su trabajo determinan un valor de 10,43 kN para el uso de ladrillos de adobe como valor máximo de carga, mientras que, como se mostró en la sección 6.1.3.2., la carga máxima de resistencia del superadobe es de 152.23 kN, es decir, el superadobe en relación al adobe tiene una mejora de 14.5 veces en cuanto a la resistencia de cargas verticales, al compararlo como material individual.

Finalmente, determinan puntos considerados vulnerables en los cuales disponen medidores de deformación LVDT, como muestra la figura 6.49., para realizar el ensayo pertinente.



**Figura 6.49.** Ubicación de medidores de deformación LVDT en el sistema de (Bonilla & Ramos, 2013)

*Fuente:* (Bonilla & Ramos, 2013)

Con lo cual, se muestra la tabla 6.42., un resumen de deformaciones del sistema de adobe con reforzamiento de enchape, detallado en el trabajo de (Bonilla & Ramos, 2013), al ensayar el modelo a carga lateral en el sentido “X”.

**Tabla 6.42.** Resumen de valores de desplazamiento obtenido en el sistema de adobe reforzado de (Bonilla & Ramos, 2013), en el sentido X-X

Deflexión en el Sentido X-X para el sistema de (Bonilla & Ramos, 2013)									
Chanel de LVDT - Valor de desplazamiento en mm									
Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Punto 1</b>	1.39	0.68	0.29	0.21	0.06	0.92	0.42	0.08	0.02
<b>Punto 2</b>	2.26	0.12	1.58	0.27	0.07	0.31	1.28	0.07	0.02
<b>Punto 3</b>	0.40	0.43	0.16	0.04	0.06	0.36	0.20	0.51	0.00
<b>Punto 4</b>	0.29	0.02	0.26	0.03	0.03	0.64	0.04	1.18	0.01

*Fuente:* (Bonilla & Ramos, 2013)

Al comparar los valores de la tabla 6.42., con los valores del sistema de superadobe propuesto que presenta desplazamientos máximos y mínimos cuyos valores se muestra en la tabla 6.43., se obtiene que el valor mayor de deflexión para el sistema propuesto por (Bonilla & Ramos, 2013) es de 2.26 mm en el sentido “X”, mientras que para el sistema propuesto en este trabajo (superadobe con refuerzo vertical de

caña guadúa *GaK*) el desplazamiento máximo en sentido horizontal ya sea en “X” o “Y” es de 0.155 mm, y solo en el sentido “Z” tiene un desplazamiento 2.405 mm.

**Tabla 6.43. Resumen de valores de desplazamiento máximos y mínimos para el sistema de superadobe propuesto, tanto en el sentido “X”, como en el sentido “Y” y en el sentido “Z”.**

Resumen de valores de desplazamiento máximos y mínimos para sistema de superadobe con refuerzo de vertical de estacas de caña guadúa ( <i>GaK</i> )									
	U1	U2	U3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
	mm	mm	mm	Rad	Rad	Rad	°	°	°
<b>Max</b>	0.118	0.017	0.003	0.0002	0.0024	0.0003	0.013	0.136	0.020
<b>Min</b>	-0.117	-0.155	-2.405	-0.0003	-0.0024	-0.0003	-0.018	-0.136	-0.020

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

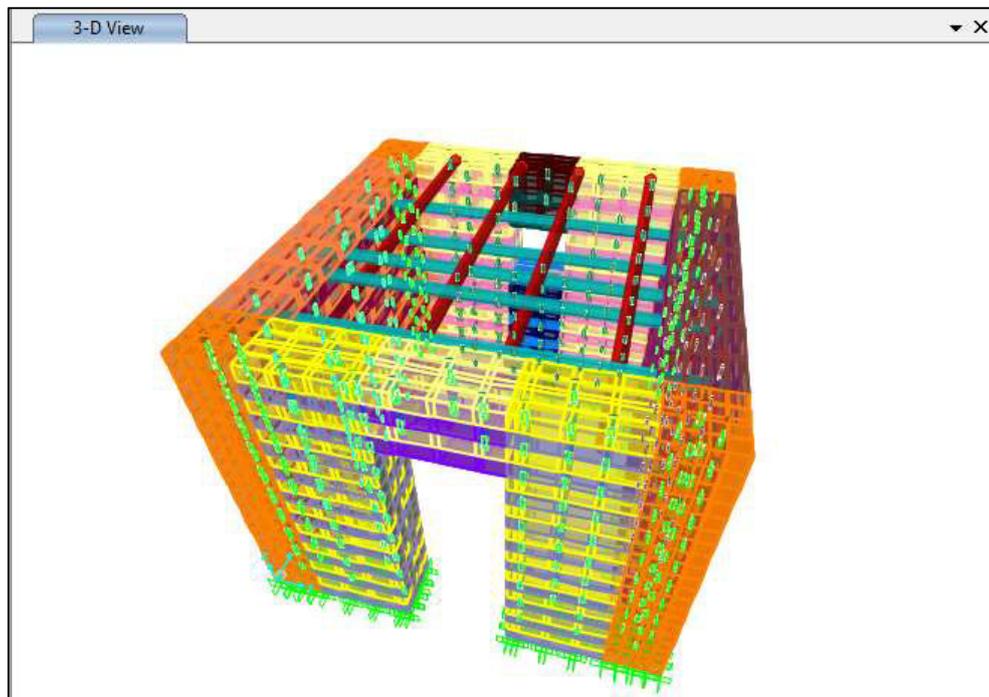
Otra forma de comparar el sistema propuesto, es decir, el diseño que usa refuerzo vertical de estacas de caña guadúa (*GaK*), que en adelante se lo denomina como “*diseño con refuerzo de estacas*”, para ser diferenciado, es a través de la comparación de dos diseños más, uno será con mayor refuerzo y otro con menor refuerzo, para lo cual se describen los otros dos diseños.

El segundo diseño, es un diseño sin refuerzo de caña guadúa (*GaK*), que a continuación se lo denomina “*diseño sin refuerzo*”, este diseño, se puede considerar equivalente al sistema de superadobe convencional.

Un tercer diseño, que es necesario, consta de mayor cantidad de refuerzo de caña guadúa (*GaK*), en adelante se lo denomina como “*diseño con refuerzo de pinchos*”, y consta de refuerzo vertical en toda la longitud vertical, es decir, un refuerzo a manera de pinchos que cubren por completo a los muros de superadobe en su plano vertical.

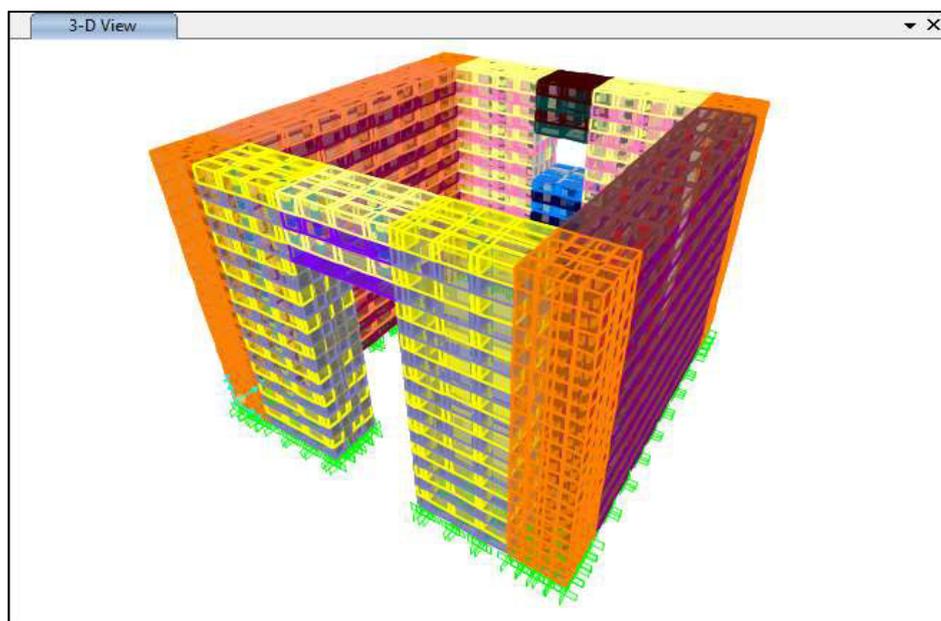
A continuación, se presenta la figura 6.50., que es un esquema del primer modelo en forma tridimensional, sistema de superadobe con refuerzo vertical de estacas de caña guadúa (*GaK*), “*diseño con refuerzo de estacas*”, los otros dos modelos, tanto el “*diseño sin refuerzo*” vertical mostrado en la figura 6.51., y el “*diseño con refuerzo de pinchos*” en toda la longitud vertical del muro mostrado en la figura

6.52., son elaborados a partir de los mismos materiales que el modelo inicial, y se consideran las mismas secciones de corte para el análisis y determinación de fuerzas.



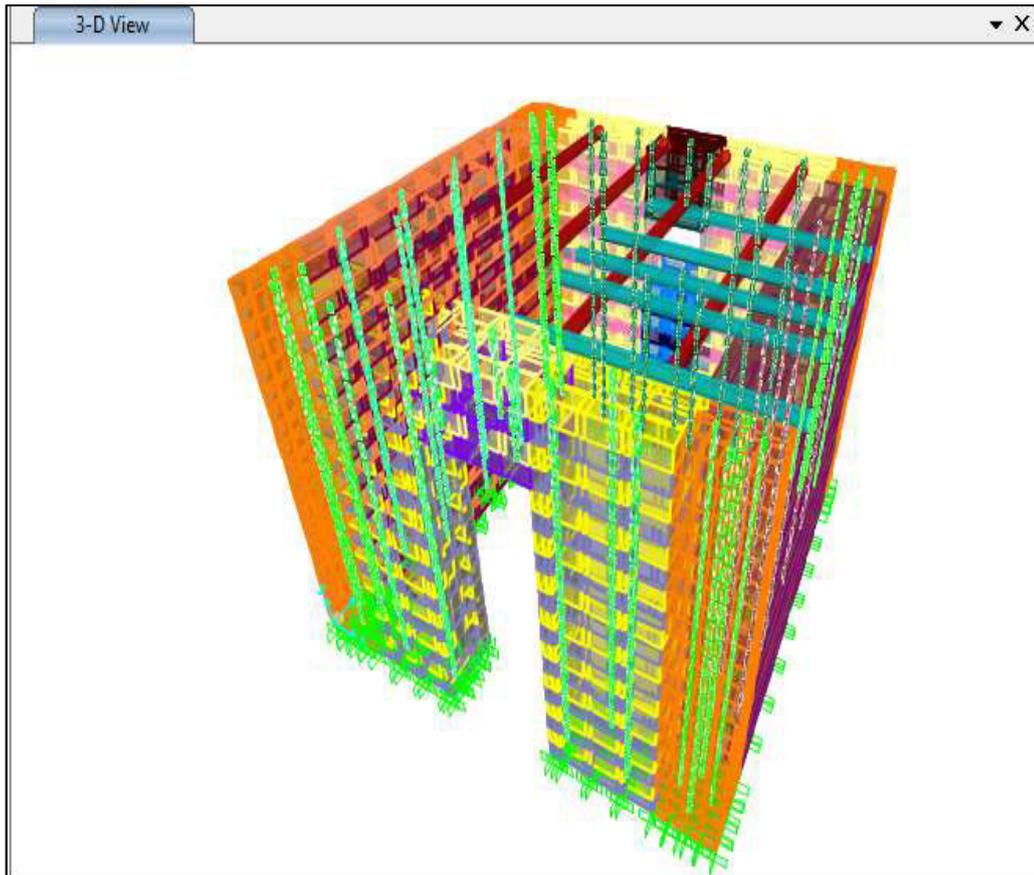
**Figura 6.50.** Sistema propuesto de superadobe con refuerzo vertical de estacas de caña guadúa (GaK)

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 6.51.** Sistema de superadobe convencional, sin refuerzo de caña guadúa (GaK) y sin diafragma.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera



**Figura 6.52.** Sistema de superadobe con refuerzo vertical de pinchos de caña guadúa (GaK), en toda la longitud vertical de los muros

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

Después del análisis de los tres modelos, se puede determinar algunas comparaciones en lo que respecta a los períodos de cada modelo, los modos de vibración, las deformaciones o desplazamientos y reacciones en la base.

En este contexto, se presentan dos cuadros comparativos, el primero, la tabla 6.44., en el que se compara los desplazamientos máximos y mínimos de cada modelo, llegando a determinar que: el mayor desplazamiento en el sentido “Z” se produce en el sistema de mayor refuerzo, pero en los sentidos “X” y “Y” el sistema propuesto presenta una gran ventaja en cuanto al sistema sin refuerzo, y al compararlo con el sistema con refuerzo extra, pese a que el sistema de refuerzo extra mejora el comportamiento del sistema propuesto, no lo hace en un gran porcentaje.

**Tabla 6.44. Resumen de valores de desplazamiento máximos y mínimos para los sistemas: *diseño sin refuerzo*, *diseño con refuerzo de estacas* y *diseño con refuerzo de pinchos*, en los tres sentidos “X”, “Y” y “Z”**

<b>Comparación de los tres modelos de superadobe establecidos</b>									
<b>Resumen de valores de desplazamiento máximos y mínimos para el <i>diseño sin refuerzo</i>, sistema similar al superadobe convencional</b>									
	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>
	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>Rad</b>	<b>Rad</b>	<b>Rad</b>	<b>°</b>	<b>°</b>	<b>°</b>
<b>Max</b>	0.093	0.008	0.002	0.0005	0.0022	0.0004	0.091	0.394	0.063
<b>Min</b>	-0.092	-0.089	-2.060	-0.0004	-0.0022	-0.0004	-0.070	-0.394	-0.063
<b>Resumen de valores de desplazamiento máximos y mínimos para el <i>diseño con refuerzo de estacas</i> de caña guadúa (GaK)</b>									
	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>
	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>Rad</b>	<b>Rad</b>	<b>Rad</b>	<b>°</b>	<b>°</b>	<b>°</b>
<b>Max</b>	0.110	0.016	0.002	0.0002	0.0022	0.0003	0.039	0.398	0.059
<b>Min</b>	-0.109	-0.145	-2.241	-0.0003	-0.0022	-0.0003	-0.052	-0.398	-0.059
<b>Resumen de valores de desplazamiento máximos y mínimos para el <i>diseño con refuerzo de pinchos</i> de caña guadúa (GaK), sistema con mayor refuerzo al propuesto</b>									
	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>
	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>Rad</b>	<b>Rad</b>	<b>Rad</b>	<b>°</b>	<b>°</b>	<b>°</b>
<b>Max</b>	0.114	0.016	0.003	0.0003	0.0022	0.0003	0.041	0.398	0.0544
<b>Min</b>	-0.113	-0.153	-2.259	-0.0003	-0.0022	-0.0003	-0.054	-0.398	-0.0544

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera

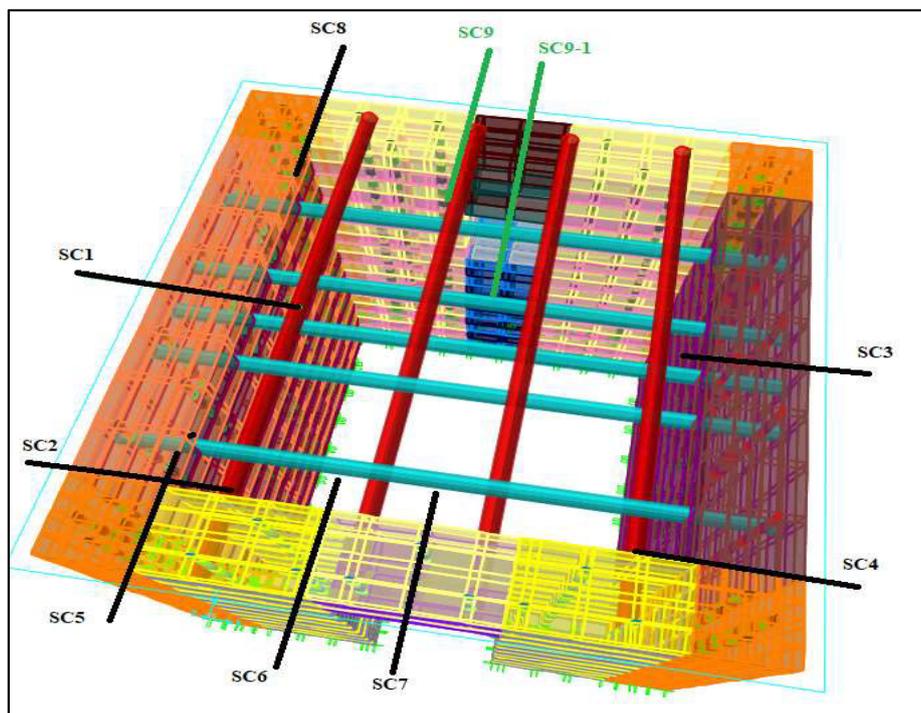
La tabla 6.45., por otra parte, presenta un resumen de los valores obtenidos de los períodos y modos de vibración, así también las reacciones en la base, en la cual se observa que el “*diseño con estacas de caña*” guadúa (GaK) presenta un mejoramiento significativo respecto al “*diseño sin refuerzo*” y pese a que el “*diseño con refuerzo de pinchos*” mejora esos valores, no lo hace significativamente.

Tabla 6.45. Resumen de valores de períodos, modos de vibración, desplazamientos en las esquinas superiores y reacciones en la base, para: *diseño sin refuerzo, diseño con refuerzo de estacas y diseño con refuerzo de pinchos*, en los tres sentidos “X”, “Y” y “Z”

<b>Comparación de tres modelos de refuerzo vertical diferente aplicado en el sistema de superadobe</b>					
<b>Tipo de refuerzo en el modelo</b>		<b>Suelo-Cal al 4%</b>	<b>Suelo-Cal al 4% + Refuerzo vertical de estacas</b>	<b>Suelo-Cal al 4% + Refuerzo vertical de pinchos</b>	
<b>Períodos T (s)</b>	1er	0.00264	0.003857	0.004026	
	2do	0.00237	0.00297	0.003042	
	3er	0.00224	0.002922	0.002988	
<b>Modos de vibración</b>	1er	Sentido X	Sentido X	Sentido X	
	2do	Sentido X-Y	Sentido X-Y	Sentido X-Y	
	3er	Sentido $\theta$	Sentido $\theta$	Sentido $\theta$	
<b>Desplazamientos Envolvente (mm)</b>	<b>MI-MV</b>	UX	-0.0216	-0.0229	-0.0217
		UY	-0.0446	-0.0506	-0.0519
		UZ	-1.7216	-1.7004	-1.699
	<b>MD-MV</b>	UX	0.0219	0.0228	0.0217
		UY	-0.0445	-0.0508	-0.0522
		UZ	-1.7216	-1.7004	-1.6989
	<b>MD-MP</b>	UX	-0.0386	-0.0434	-0.0476
		UY	-0.443	-0.0693	-0.07
		UZ	-1.8251	-1.8048	-1.8006
	<b>MI-MP</b>	UX	0.0386	0.0433	0.0476
		UY	-0.044	-0.0689	-0.0696
		UZ	-1.8245	-1.8042	-1.7999
<b>Radios de participación modal</b>	UX	97.97%	97.94%	98.41%	
	UY	96.44%	97.24%	96.39%	
	UZ	97.93%	96.24%	92.70%	
<b>Reacciones en la Base (MN)</b>	FX	-0.10	-0.10	-0.10	
	FY	0.18	0.18	0.18	
	FZ	690.45	689.57	688.70	
<b>Reacciones de Momentos en la Base (MN-m)</b>	MX	1226.11	1224.56	1223.03	
	MY	-1139.27	-1137.82	-1136.38	
	MZ	0.37	0.38	0.38	

Fuente: Elaborado por Mejía y Rivera

En la figura 6.53., se identifica las secciones de corte, éstas secciones presentan las fuerzas internas que presentan o soportan internamente los elementos en conjunto, de cada uno de los tres modelos de superadobe, como se aprecia en la imagen se escoge lugares como dinteles, esquinas, juntas de muros y las secciones medias de los muros, para establecer valores tanto de fuerza axial, fuerza cortante, momentos flectores y momentos de torsión. Para ello se determina en el sistema global que el sentido “Z” es equivalente al eje 3, el sentido “X” es paralelo al eje 1 y finalmente el eje “Y” o sentido “Y” es paralelo al eje 2. Por otra parte, si se toma como referencia cada elemento, es decir, ejes locales se debe considerar que el eje “Z” o sentido “Z” es equivalente al eje 3 y es de color azul, el eje X” o sentido “X” es paralelo al eje 1 y es de color rojo y finalmente el eje “Y” o sentido “Y” es paralelo al eje 2 y es de color verde.

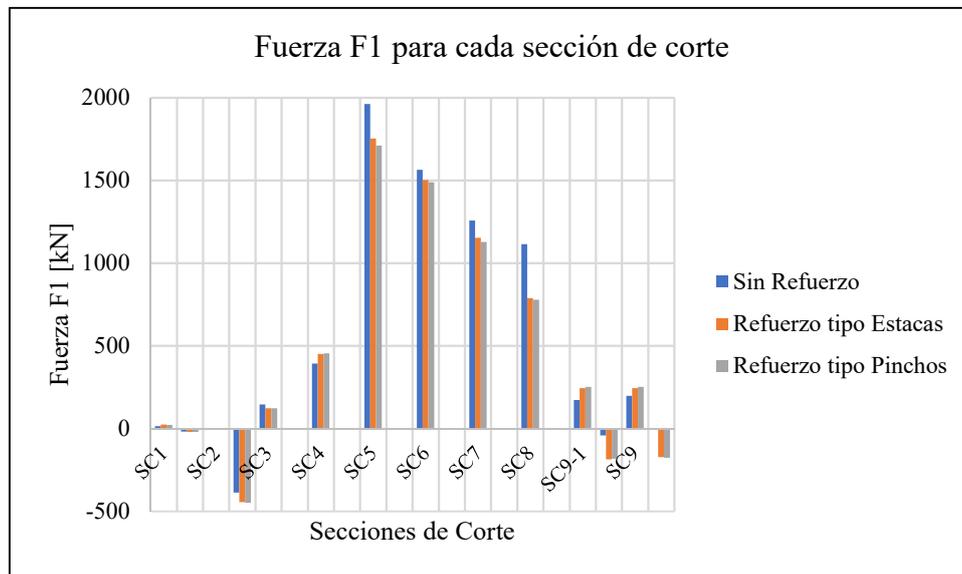


**Figura 6.53.** Secciones de corte para determinación de fuerzas en elementos de cada modelo de sistema de superadobe.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

La figura 6.54., muestra la fuerza  $F_1$  en la dirección 1, sentido “X”, en cada sección de corte y por lo tanto corresponde a la fuerza de corte para las secciones SC1 hasta la sección SC4, mientras que, para las secciones de corte SC5 hasta la

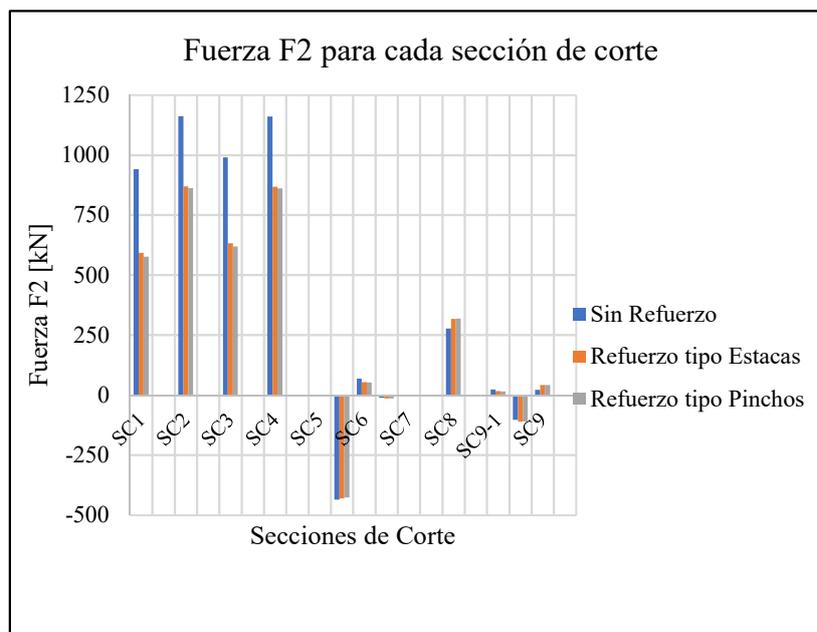
sección de corte SC8, que presentan los mayores valores fuerza en sentido “X”, que corresponden a fuerzas.



**Figura 6.54.** Valores de la Fuerza F1 para las secciones de corte, en cada modelo de sistema de superadobe.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

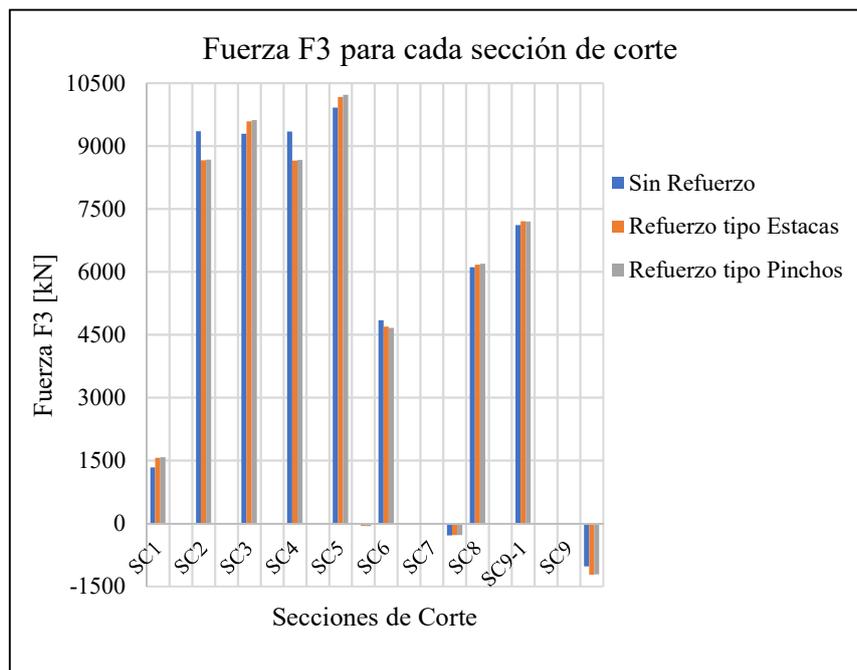
Para la fuerza F2, se observa en la figura 6.55., que los valores desde la sección SC1 hasta la sección SC4 presentan los mayores de valores de fuerza en dirección 2, es decir, son valores de fuerzas axiales para esas secciones de corte.



**Figura 6.55.** Valores de Fuerza F2, en las secciones de corte, en cada modelo de sistema de superadobe.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

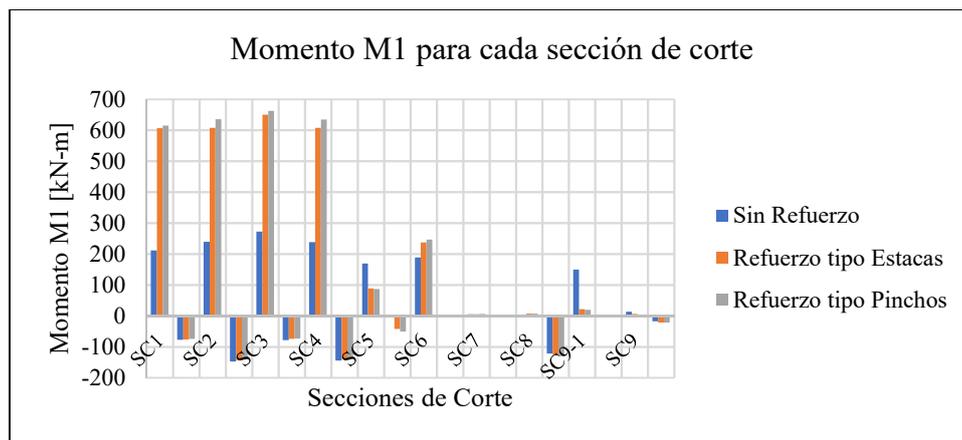
Para la fuerza F3, se observa en la figura 6.56., que los valores desde la sección SC2 hasta la sección SC6 presentan los mayores valores de fuerza en dirección 3, es decir, son valores de fuerzas cortante vertical, al igual que para las secciones de corte SC8 y SC9-1.



**Figura 6.56.** Valores de Fuerza F3, en las secciones de corte, en cada modelo de sistema de superdoble.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

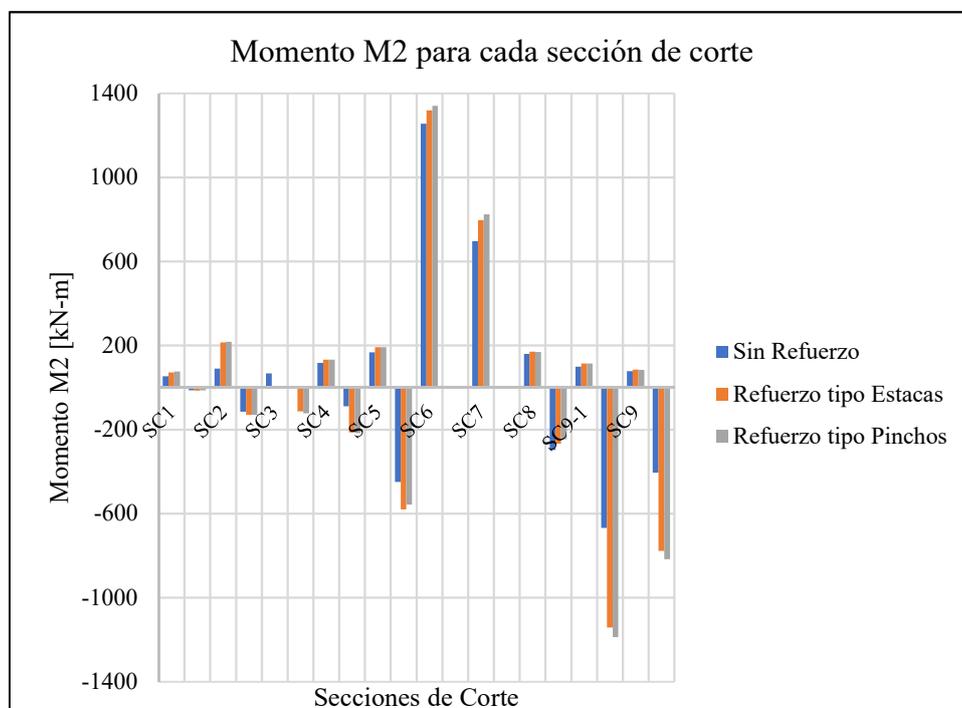
La figura 6.57., muestra el momento M1, alrededor de la dirección 1, sentido “x”, siguiendo la regla de la mano derecha, en cada sección de corte y por lo tanto corresponde a al momento generado en el plano “YZ”, desde las secciones de corte SC1 hasta la sección de corte SC4 presentan los mayores valores de Momento M1 para esos casos de secciones de corte.



**Figura 6.57.** Valores de Momento M1, en las secciones de corte, en cada modelo de sistema de superadobe.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

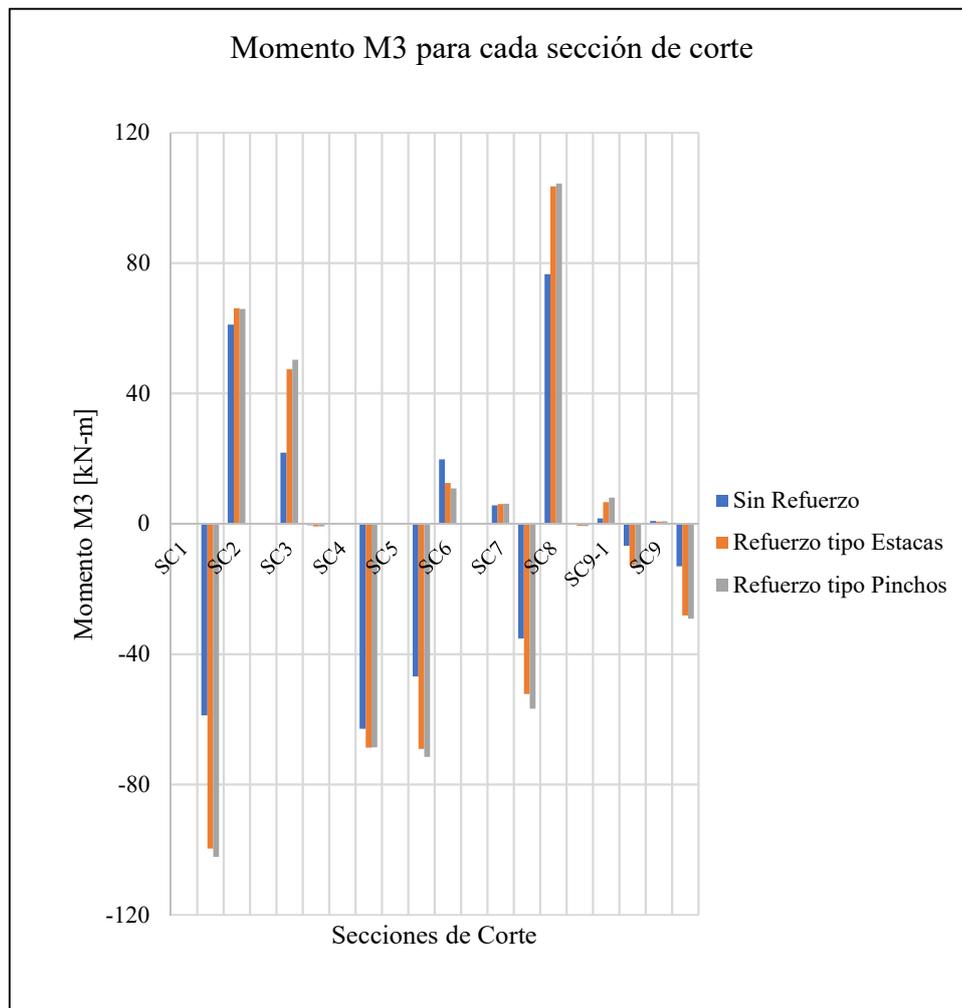
La figura 6.58., muestra el momento M2, alrededor de la dirección 2, sentido “Y”, siguiendo la regla de la mano derecha, en cada sección de corte y por lo tanto corresponde a al momento generado en el plano “XZ”, desde las secciones de corte SC6, SC7 que son los dinteles de la puerta y las secciones SC9 y SC9-1 que son las secciones de corte en los dinteles de la ventana, presentan los mayores valores de Momento M2 para esas secciones de corte.



**Figura 6.58.** Valores de Momento M2, en las secciones de corte, en cada modelo de sistema de superadobe.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

La figura 6.59., muestra el momento M3, alrededor de la dirección 3, sentido “Z”, siguiendo la regla de la mano derecha, en cada sección de corte y por lo tanto corresponde a al momento generado en el plano “XY”, las secciones de corte SC1 y SC8 que corresponden a las secciones de corte en la mitad del muro y en la juna de muros con la ventana, presentan los mayores valores de Momento M3 para esas secciones de corte.



**Figura 6.59.** Valores de Momento M3, en las secciones de corte, en cada modelo de sistema de superadobe.

*Fuente:* Elaborado por Mejía y Rivera

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1. CONCLUSIONES

- Al establecer el tipo de suelo de la muestra, extraída del sector de Calderón, a través de la Clasificación SUCS, realizada en el laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de suelos y Rocas de la Escuela Politécnica Nacional, se logró determinar que se trata de un suelo tipo SM, arena limosa, la cual posee nula plasticidad. Además, se determina otras propiedades como la densidad a través del método de reacomodo del suelo.
- A través de la bibliografía revisada, se logra establecer que las proporciones requeridas de cal para la estabilización del suelo y el mejoramiento de sus propiedades como: resistencia a la compresión, una mayor resistencia ante esfuerzos normales y una mayor densidad, deben ser combinaciones en peso de suelo-cal desde un 4% hasta un 12%, con lo cual se establece que las combinaciones analizadas sean con un porcentaje de 4%, 8% y 12% de adición de cal en peso.
- El ensayo de compactación, a través del ensayo de Proctor Estándar, se hizo tanto para la muestra de suelo de Calderón como para las combinaciones de suelo con cal en los tres diferentes porcentajes, así se llega a determinar la mejor opción para la elaboración del superadobe, que es la mezcla de suelo cal al 4%, ya que presenta una mayor densidad con un contenido de agua menor incluso al contenido de humedad del suelo natural. En referencia al suelo se observa que eleva la densidad de la muestra de suelo de 1.719 g/cm<sup>3</sup> a 1.756 g/cm<sup>3</sup>, es decir, un incremento de la densidad en un 2.15% y se reduce la cantidad de humedad del 11.3% al 11.0%, es decir, la muestra de suelo cal al 4% de peso en cal, es un 0.3% más seca que la muestra de suelo natural.

- El ensayo de compresión simple, se lo realiza para tener un valor aproximado del porcentaje de deformación que presentará el suelo ante el esfuerzo que produce una carga axial (paralela a la gravedad), para el suelo natural el valor del mayor esfuerzo es de 300.0 kPa y a este valor presenta una deformación de 1.3% aproximadamente, un valor bajo, esto se debe a que es una arena, pero al ir mejorándola con la adición de cal, se observa que al agregar un 4.0% del peso de la muestra en cal, el valor del esfuerzo normal que resiste la probeta antes de llegar a la falla es de 1650.0 kPa y presenta una deformación de apenas 1.1%, es decir el suelo se vuelve muy rígido, incluso es mucho más rígido que las muestras de suelo en las que se añadió una mayor cantidad de cal.
- Otro ensayo realizado para comparar y verificar el mejoramiento del suelo al agregar cal hidratada es el ensayo de corte directo, Los valores del esfuerzo cortante obtenidos en ese ensayo están en función de: el esfuerzo normal, de la cohesión del suelo y del ángulo de fricción interna. Una envolvente de falla define el límite de falla sobre el cual el suelo resistirá a la combinación de un esfuerzo normal y un esfuerzo cortante, así se puede observar que las envolventes de falla para el suelo natural y las mezclas de suelo-cal al 4% , al 8% y al 12% en peso tienen ángulos de fricción interna de: 40.03°, 40.96°, 39.01° y 35.75° respectivamente, adicional a esto, la gráfica de la envolvente de la mezcla suelo-cal al 4% corta con la ordenada en un valor de 0.89 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que para la muestra de suelo natural, suelos cal al 8% y suelo cal al 12%, el corte con la ordenada apenas es de 0.30 kg/cm<sup>2</sup>, 0.85 kg/cm<sup>2</sup> y 0.69 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, estos valores corresponden al coeficiente de fricción interna "c", se observa que los valores son relativamente cercanos entre las mezclas de suelo-cal al 4% y la mezcla suelo-cal al 8% en peso. Y finalmente, cabe indicar que la menor pendiente de la envolvente de falla presenta la muestra de suelo-cal al 12%.
- Finalmente se llevó a cabo el Ensayo Triaxial no consolidado, no drenado "UU" por sus siglas en inglés. En el cual se conoce que la envolvente de

falla, que es la línea o curva en la cual indica el límite máximo de combinación de esfuerzos, tanto esfuerzo normal como esfuerzo cortante, que el suelo es capaz de resistir antes de su rotura, se presenta con valores más adecuados para la mezcla de suelo cal al 4% en peso, luego la mezcla de suelo cal al 8%, seguida por la mezcla de suelo cal al 12% y finalmente el suelo natural, que sufrirá una falla debido a la combinación de esfuerzos normal y tangencial muy por debajo de cualquiera de los valores de resistencia cortante de las tres combinaciones de suelo cal.

- Las propiedades de materiales, en especial cuando son materiales no convencionales, como la caña guadúa (*GaK*), son muy relativas, pese a que Ecuador tiene plantaciones de caña guadúa, su aprovechamiento no es considerado el indicado, las propiedades de este material son variantes, pero se establecen rangos de valores aceptados, existe un gran compendio de estudios realizados en torno a este material, se debe empezar a dar uso a materiales propios de nuestra región y usar todas las fortalezas de dicho material, como la humanidad ha hecho siempre con los materiales a su alcance.
- El primer ensayo realizado a la caña guadúa, es el ensayo de contenido de humedad conjuntamente con el ensayo de densidad, en los cuales se determina que el contenido de humedad o humedad natural de la caña guadúa (*GaK*) es de 10.85%, en cuanto que para la densidad la caña guadúa (*GaK*) presenta un valor de  $0.565 \text{ g/cm}^3$ , que al ser comparados con otros estudios como los de (Herrera & Viteri, 2018), (Sapuyes, Osorio, & Takeuchi, 2018), (Brand, Ruiz, & Lozano, 2015) se concluye que los valores son muy similares a los determinados en el desarrollo de este trabajo.
- El segundo ensayo, es el de compresión en la caña guadúa (*GaK*), el cual, determina el esfuerzo límite a compresión que resiste la probeta, además matemáticamente la pendiente de la línea que se genera en la relación esfuerzo deformación, es el valor del módulo de elasticidad en compresión para dicho material, en este contexto se presentaron las tablas 6.17. y 6.18

y las figuras 6.23., 6.24., además, se determina el Módulo de Elasticidad a compresión, a través de la pendiente de la ecuación de la recta en cada figura y se obtiene un módulo de elasticidad de 9.735 GPa, este valor al ser comparado con los valor de (Herrera & Viteri, 2018) y la (NEC-SE-GUADÚA, 2016), es inferior, pero autores como (Cely, Hernández, & Gutierrez, 2012) y (Rojas, 2003) coinciden con el valor obtenido en este trabajo.

- El siguiente ensayo realizado, es el ensayo de tracción de la caña guadúa (*GaK*), en el cual se determina el esfuerzo límite a tracción que resiste la probeta, además matemáticamente la pendiente de la línea que se genera en la relación del esfuerzo con la deformación, es el valor del módulo de elasticidad en tensión para dicho material, en este contexto se presentan las tablas 6.22., 6.23. y las figuras 6.25. y 6.26., respectivamente, en las cuales se determina el Módulo de Elasticidad a tensión a través de la pendiente de la ecuación de la recta, se obtuvo un valor de 27.35 GPa ,que no corresponde a los valores obtenidos por (Herrera & Viteri, 2018) y mostrados por la (NEC-SE-GUADÚA, 2016), pero si son valores similares a los de autores como (Cely, Hernández, & Gutierrez, 2012).
- Por otra parte, el ensayo a flexión de la caña guadúa (*GaK*), determina el esfuerzo límite a flexión que resiste la probeta, además matemáticamente la ecuación (66) del capítulo 4.3.6, determina el valor del módulo de elasticidad en flexión para dicho material, en este contexto se presentan las tablas 6.26., 6.27. y las figuras 6.29. y 6.30., se determina el Módulo de Elasticidad a flexión a través de la ecuación mencionada. El valor obtenido es de 6.615 GPa y es muy similar al valor mostrado por la (NEC-SE-GUADÚA, 2016) y un poco menor a valores de autores como (Sapuyes, Osorio, & Takeuchi, 2018) o (Brand, Ruiz, & Lozano, 2015).
- Los valores obtenidos de los diferentes ensayos tanto al suelo, a la mezcla suelo cal y a la caña guadúa (*GaK*), fueron utilizados en la interfaz del programa SAP2000-V22.1., el cual, usa valores de peso específico, módulo

de elasticidad, coeficiente térmico, coeficiente de Poisson y el módulo de elasticidad en cortante para caracterizar un material isotrópico.

- El sistema de vivienda propuesto dispone de muros de espesor considerable, a su vez el mejoramiento del suelo a usar es fundamental para resistir cargas verticales, pero complica demasiado la ductilidad del sistema, la adición de un reforzamiento ante flexión se hace notorio, y las mejoras con la aplicación del refuerzo, son evidentes. En cuanto a ductilidad un sistema de superadobe con muros de suelo-cal al 4% y sin reforzamiento (*diseño sin refuerzo*) tiene un período 0.00264 s, pero si al sistema se le adiciona un reforzamiento vertical de estacas caña guadúa (*GaK*), (*diseño con refuerzo de estacas*) su período sube a 0.003857 s, es decir tiene un incremento de 68.45%, pero sí, adicional a esto, el reforzamiento se lo hace en la totalidad de la longitud vertical (*diseño con refuerzo de pinchos*) y no solo como estacas, el sistema se vuelve aún más flexible ya que su período aumenta a 0.004026 s, es decir aumenta un 4.38% respecto al reforzamiento de estacas de caña guadúa (*GaK*), por lo que, se concluye que basta con un reforzamiento de estacas caña guadúa, y que físicamente es mucho más complicado y costoso realizar un reforzamiento de tipo pinchos.
- Una vez determinado los modos de vibración del sistema en los tres casos de los modelos de superadobe, se concluye que el modelo propuesto con refuerzo de estacas de caña guadúa (*GaK*), sin ningún refuerzo y refuerzo de pinchos de caña guadúa (*GaK*), son similares, esto se debe que pese existe una pequeña variante en cuanto al peso del sistema, la configuración del mismo no varía y por ende los modos de vibración tampoco lo hacen, es decir, el refuerzo vertical de caña guadúa (*GaK*), afecta directamente en el periodo del sistema y no en los modos de vibración.
- Los desplazamientos relativos en los extremos superiores (esquinas de uniones) son muy insignificantes, en cuanto a las orientaciones horizontales, inferiores a un milímetro, pero en el sentido vertical tienen un valor un poco más considerable, aproximadamente 2.26 mm, ese es un valor muy por

debajo de las derivas aceptadas en la (NEC-SE-DS, 2015), el cual está en el orden de 1cm, con lo que se concluye que el sistema cumple con las derivas máximas estipuladas en dicha norma.

- Se establece que existes fuerzas axiales muy fuertes a lo largo de la longitud horizontal de los muros, por lo que, el pensar en un reforzamiento horizontal se hace evidente, también que el asegurar el diafragma como un empotramiento es necesario, ya que se verifica que dicho diafragma de caña guadúa (*GaK*) es necesario para unir a los muros en un solo sistema.
- El volteo de los muros o separación de las esquinas se contrarresta debido que las hiladas en las esquinas van trabadas alternadamente y el uso de un mínimo de cuatro estacas en cada hilada asegura la junta de los muros. En este sistema el uso de contrafuertes no se hace necesario, pero el anclaje del sistema al suelo de emplazamiento debe ser garantizado.
- El corte basal máximo estimado que soporta la estructura siguiendo la (NEC-SE-DS, 2015) es equivalente a 47% del peso del sistema en el sentido “X”, es decir, 10.19 Ton, mientras que, para el sentido “Y” el porcentaje de fuerza lateral que soporta la estructura es de 54.4% del peso, que es equivalente a 11.80 Ton, esto se debe a que en el sentido X la rigidez del sistema es menor, además, la combinación de la componente de cortante basal en los dos sentidos es de 71.59% en peso y es equivalente a 15.59 Ton, por lo que el sistema resiste grandes fuerzas laterales debido a su peso, y la necesidad de que no tenga irregularidades en planta, tenga dimensiones muy largas respecto a otras, es muy evidente.
- El porcentaje de la aceleración de la gravedad estimada, a través de la normativa de la (NEC-SE-DS, 2015), para el sentido “X” es aproximadamente 0.54g y 0.47g en el sentido “Y”, estos valores se obtienen de la figura 5.27., que representa el Espectro elástico de diseño en aceleraciones, esto indica que el sistema resiste fuerzas equivalentes a casi

la mitad de la aceleración de la gravedad, y serían módulos o viviendas de seguridad adecuada.

- Si se considera el espectro elástico de diseño en desplazamiento, se observa que los valores de desplazamiento son muy insignificantes para los períodos determinados a través de la (NEC-SE-DS, 2015), y los valores de desplazamiento en dicho espectro elástico de desplazamiento disminuyen más, si se usa los valores de períodos determinados a través del programa SAP2000-V22.1, entonces, pese a que bajo la normativa mencionada, el sistema posee valores de períodos mayores, los desplazamientos no son superiores a un milímetro de desplazamiento, en el diseño elástico en desplazamiento, con ello, el sistema cumple los valores de derivas de la (NEC-SE-DS, 2015) y más bien se considera un sistema muy rígido.
- En cuanto a la comparación del sistema de propuesto de superadobe con refuerzo vertical de estacas de caña guadúa (*GaK*), frente a sistemas de construcción en tierra, se concluye que el sistema presenta mejoras significativas en cuanto a configuración y desplazamientos, el sistema propuesto varios años atrás por (Bonilla & Ramos, 2013), usa varillas para el reforzamiento, y es de conocimiento general que la producción de acero frente a la producción de caña guadúa (*GaK*) es mucho más contaminante, y otro factor para el Ecuador es que el acero es un material importado, mientras que la caña guadúa puede ser cultivado, por ello el sistema propuesto es sistema mejorado a sistemas de tierra, incluso sistemas reforzados como el de (Bonilla & Ramos, 2013).
- En definitiva, se puede afirmar que el sistema de superadobe reforzado verticalmente con estacas de caña guadúa (*GaK*), presenta ventajas ante un sistema de adobe tradicional, ya que el sistema de adobe tradicional se debe usar esquinas que traban los bloques de adobe, que, sin ningún refuerzo, son fácilmente separables, llevando a que el sistema quede inhabitable.

- No cabe duda que el sistema propuesto de superadobe con refuerzo vertical de estacas de caña guadúa puede ser implementado con seguridad, teniendo en cuenta, como en todo sistema constructivo, las recomendaciones, dimensiones y cuidados constructivos necesarios, si el sistema es implementado de manera correcta, puede cumplir satisfactoriamente ante el sismo de diseño de (NEC-SE-DS, 2015).

## **7.2. RECOMENDACIONES**

- El uso de suelo con contenido arcilloso puede mejorar en gran porcentaje la cohesión, pero, si el material es demasiado arcilloso se recomienda añadir arena o grava para que la mezcla sea más homogénea.
- El suponer que un material es isotrópico, se puede fundamentar debido al uso que se le va a dar a dicho material, pero es necesario que, para estudios posteriores, se determine la histéresis de todos los materiales que conllevan el sistema, para así poder obtener valores más cercanos a la realidad.
- Si la capacidad de un procesador u ordenador no es de características óptimas para la modelación de un sistema a través del método de elementos finitos, la discretización en elementos sólidos de diferentes dimensiones, según sea la necesidad y requerimiento de valores, puede ayudar.
- Aún se debe mejorar mucho el sistema, por ejemplo, se puede probar variantes como espesores de paredes reducidas, ya que el instituto (CalEarth, 1999) recomienda que el ancho del muro sea desde los 30 cm hasta los 60 cm, por lo que, existen varias combinaciones aún por corroborar y analizar en futuras investigaciones.

- Los datos de la caña guadúa pueden ser variantes y en muchos casos desalentadores, para ello es necesario ajustar los valores con varias fuentes y realizar muchos ensayos de diferentes culmos.
- Un ensayo físico del sistema propuesto, es decir, del sistema de superadobe hecho con mezcla suelo cal al 4% de peso en cal, junto con el refuerzo vertical de estacas de caña guadúa (*GaK*) cada 50.0 cm y un diafragma horizontal (cubierta de guadúa) que esté empotrado en los muros y que adicionalmente cumpla la función de amarrar a los muros, sería ideal para una próxima investigación, se lo puede realizar bajo el protocolo reservado para ensayos a carga lateral cíclica sobre plataformas móviles, que posee el Centro de Investigación de la Vivienda (CIV) de la Escuela Politécnica Nacional, siguiendo directrices del (FEMA 461, 2007).

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, J., José, F., Navarro, Í., Durán, A., & Sirera, R. (2018). Forúm Ibérico de la cal. *Tradición, versatilidad e innovación en la cal: un material de exelencia*. Pamplona: Universidad de Navarra.
- Ambientum. (18 de Enero de 2018). *Materiales de construcción no contaminantes*. Obtenido de Ambientum: <https://www.ambientum.com/ambientum/construccion-sostenible/materiales-de-construccion-no-contaminantes.asp?hilite=%27sector%27%2C%27construccion%27%2C%27ha%27%2C%27sido%27%2C%27tradicionalmente%27>
- Ardila, C. (2013). Determinación de los valores de esfuerzos admisibles del bambú Guadúa Angustifolia Kunth de Tolima. Tolima, Colombia: UNAL.
- Argüello, G., & Ramón, P. (2004). Organización Internacional del trabajo. *Manual Andino para la construcción y mantenimiento de empedrados*. Quito, Ecuador: OIT. Obtenido de <http://www.ilo.org/public/spanish/employment/recon/eiip/download/andino.pdf>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS. (sf). Fondo para la reconstrucción y desarrollo social del eje cafetero - FOREC. *Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*. Colombia. Obtenido de <https://www.asosismica.org>
- ASTM D2166 M. (2016). Método de prueba estándar para la fuerza de compresión sin límites del suelo cohesivo. En A. S. Materials, *ASTM D2166 M*. Pensilvania.
- ASTM D2166M-16. (2016). Método de prueba estándar para resistencia a la compresión no confinada del suelo cohesivo. (A. International, Ed.) West Conshohocken, Pennsylvania, United States. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D2487-17. (2017). Sistema unificado de clasificación de suelos. *Práctica estándar para la clasificación de suelos con fines de ingeniería*. (A.

internacional, Ed.) West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos.  
Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM D2850-15. (2015). Método de prueba estándar para la prueba de compresión triaxial no consolidada no entrenada en suelos cohesivos. West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM International. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM D3080-11. (2011). Método de prueba estándar para la prueba de corte directo. *ASTM D3080-11*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM.

ASTM D421-85 (2007). (2007). Práctica estándar para la preparación en seco de muestras de suelo para el análisis del tamaño de partículas y la determinación de las constantes del suelo. (A. Internacional, Ed.) West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM D4318-10e1. (2010). Práctica Estandar del método para la determinación del límite líquido, límite plástica y índice de plasticidad de Sólidos. (A. Internacional, Ed.) West Conshohocken, Pennsylvania, United States. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM D698-12e2. (2012). Métodos de prueba estándar para las características de compactación de laboratorio del suelo utilizando el esfuerzo estándar (12 400 pies-lbf / pies<sup>3</sup> (600 kN-m / m<sup>3</sup>)). (A. International, Ed.) West Conshohocken, Pennsylvania, United States. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM D854-14. (2014). Métodos de prueba estándar para la gravedad específica de los sólidos del suelo por el picnómetro de agua. (A. Internacional, Ed.) West Conshohocken, Pennsylvania, United States. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTMD2216. (octubre de 2010). *Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass A*. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)

Blanco, C., & Morales, P. (s.f.). Arquitectos Sen Fronteras. *Sistema constructivo Adobe/Tapial*. Guatemala. Obtenido de <http://www.galicia.asfes.org/wp-content/uploads/2016/09/04-Ficha-Tecnica-Adobe-Tapial.pdf>

- Bonilla, D., & Merino, J. (Mayo de 2017). Estudio de las propiedades físicas de la caña guadúa y su aplicación como refuerzo en la construcción de estructuras de adobe. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Bonilla, J., & Ramos, J. (Septiembre de 2013). Investigación de un sistema estructural alternativo basado en el reforzamiento de paredes de adobe. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Braja, D. (2001). Fundamentos de ingeniería geotécnica. (T. Editores, Ed.) Mexico DF, Mexico.
- Brand, R., Ruiz, D., & Lozano, N. (2015). Caracterización física y mecánica de la guadúa angustifolia kunth mediante procesamiento digital de imágenes.
- Caballero, M. (Enero de 2015). Domos de Superadobe. Cáceres, España.
- CalEarth. (1999). *California Institute of Earth Architecture*. Obtenido de <https://www.calearth.org/>
- Camba, José; Chacón, Francisco; Pérez, Francisco. (abril de 1982). *Apuntes de Análisis Estructural I*. Mexico DF, México: UNAM. Obtenido de [http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/814/An%C3%A1lisis%20Estructural\\_CAMBA\\_ocr.pdf?sequence=1](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/814/An%C3%A1lisis%20Estructural_CAMBA_ocr.pdf?sequence=1)
- Canadell, S. (Junio de 2014). Estudio Estructural de domos realizados con la técnica de falsa cúpula y superadobe. *Escola Técnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports*. Barcelona, España: Departament d'enginyeria de la construcció.
- Castillo, E. (2018). Acumulación de deformaciones en interfaces suelo estructura inducidas termicamente. *TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MENCIÓN INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA*. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/152349/Acumulaci%C3%B3n-de-deformaciones-en-interfaces-suelo-estructura-inducidas-termicamente.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Cataldo, M. (2014). Diseño y evaluación de una vivienda de superadobe como alternativa de vivienda social sustentable en Chile. Chile.
- Ceballos, P. (1992). *Resvista INVI*. Obtenido de Las construcciones en tierra en Ecuador. Innovaciones tecnológicas: <http://200.89.73.130/index.php/INVI/article/view/156/135>
- Cely, L., Hernández, W., & Gutierrez, O. (2012). Caracterización de la Guadúa Angustifolia Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo a NSR-10. Boyacá, Colombia.
- Centro de Investigación de la Vivienda CIV. (2016). Estudio del comportamiento estructural ante carga vertical y lateral del sistema constructivo ... Quito, Pichincha, Ecuador.
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de Estructuras*. Naucalpan de Juárez, México: PEARSON. Recuperado el mayo de 2020
- Croft, C. (2011). Department of Architecture and Civil Engineering The University of Bath. *Structural Resistance of Earthbag Housing Subject to Horizontal Loading*. California, Estados Unidos.
- Cruz, A., & Sotomayor, Y. (Agosto de 2016). Diseño de dos prototipos de vivienda ecológica autoconstruible a partir del sistema constructivo de sacos de tierra (superadobe) ubicado en la comarca Las Salinas del municipio de Tola, departamento de Rivas. Managua, Nicaragua. Recuperado el Abril de 2018, de <https://core.ac.uk/reader/53105060>
- De la Fuente Lavalle, E. (2013). *IMCYC*. México: M. en A. Soledad Moliné Venanzi. Obtenido de SUELO-CEEMENTO.
- DomoTerra. (16 de Julio de 2016). *domoterra*. Obtenido de domoterra: <http://www.domoterra.es/quienes-somos.html>
- FEMA 461. (Junio de 2007). Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components. Washington D.C., EEUU.
- Gallestey, E., Castagnoli, D., & Clive, C. (2004). *Dialnet*. Obtenido de Nuevos niveles de rendimiento para la industria del cemento:

<https://library.e.abb.com/public/9933e9d2306cb00fc1256eae002d4814/13-19%20M852-SPA.pdf>

- García-Ochoa, J., Quito-Rodríguez, J., & Perdomo, J. (2019). Análisis de la huella de carbono en la construcción y su impacto sobre el ambiente. *Universidad Cooperativa de Colombia*. Colombia. Recuperado el 1 de Marzo de 2021, de <https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/16031>
- Gere, J., & Goodno, B. (2009). *Mecánica de Materiales*. Mexico: CENGAGE Learning.
- Gere, J., & Timoshenko, S. (1990). *Mecánica de Materiales*. México: Iberoamérica.
- Gutierrez, L., Manco, T., & Loaiza, C. B. (2003). Características Sísmicas de las construcciones de tierra en el Perú. *Contribución a la enciclopedia mundial de las construcciones de la vivienda*. Peru.
- Herrera, J., & Viteri, L. (Octubre de 2018). Estudio del comportamiento sismo-resistente en una estructura espacial de caña guadúa sometida a carga lateral con inversión, utilizando una modificación de la conexión Simón Vélez. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Higuera, C., Gomes, J., & Pardo, O. (2012). Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. Tunja, Colombia. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940771003>
- Higuera, C., Gomes, J., & Pardo, O. (2012). Caracterización de un suelos. *Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio*. Tunja, Colombia. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940771003>
- Higuera, C., Gomez, J., & Pardo, O. (Junio de 2012). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. *Caracterización de un Suelo Arcilloso tratado con Hidróxido de Calcio*. Tunja, Colombia.
- Huerta, S. (2004). Arcos, bovedas y cúpulas. *Regla de Carlo Fontana (1694) para las cúpulas simples, y su verificación mediante el dibujo de la correspondiente línea de empujes*. Madrid: Instituto Juand e Herrera.

- ISO 22157:2019(E). (2019). Estructuras De Bambú. Determinación De Las Propiedades Físicas Y Mecánicas De Los Tallos De Bambú. Métodos De Ensayo. Nueva York, United States: American National Standards Institute (ANSI). Obtenido de [www.iso.org](http://www.iso.org)
- Jácome, M. (Junio de 2017). Desarrollo de un modelo matemático utilizando interpolación de Lagrange para el comportamiento dinámico de sensores de presión LVDT. Riobamba, Ecuador.
- Lara, L., Aguirre, H., & Gallegos, M. (Octubre de 2018). *Revista Politécnica*. Obtenido de Estructuras Aporticadas de Hormigón Armado que Colapsaron en el Terremoto del 16 de Abril de 2016 en Tabuga– Ecuador: [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1390-01292018000400037](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292018000400037)
- LEMSUR. (2014). Manual de Laboratorio de Suelos I. Quito, Ecuador.
- Luna, P., Lozano, J., & Takeuchi, C. (2013). Determinación experimental de valores característicos de resiliencia para *Guadúa angustifolia*. Bogotá, Colombia: UNAL.
- Martínez, S. (Septiembre de 2015). Bambú como material estructural: Generalidades, aplicaciones y modernización de una estructura tipo. *Escola Técnica Superior D'Enginyeria Agronómica I del Medi Natural*. Valencia, España.
- Maya, J., & Vergara, J. (2017). *Universidad San Francisco de Quito. Repositorio Digital*. Obtenido de Industria de la construcción en el Ecuador: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/6522>
- MIDUVI. (2016). *Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda*. Obtenido de Programa Nacional de Vivienda Social: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/04/PROYECTO-PROGRAMA-NACIONAL-DE-VIVIENDA-SOCIAL-9nov-1.pdf>
- Ministerio de vivienda, c. y. (Abril de 2017). NORMA E.080 Diseño y construcción con tierra. *Anexo resolución Ministerial N° 121-2017- Vivienda*. Perú: El Peruano.

- Ministerio del Ambiente y Agua. (26 de Julio de 2016). Ecuador Suscribe Acuerdo de París sobre cambio climático. Quito, Ecuador: Dirección de Comunicación. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-suscribe-acuerdo-de-paris-sobre-cambio-climatico/>
- Moncayo, M., Vargas, J., & Barzola, I. (2017). Análisis sobre la recurrencia de los terremotos en Ecuador. Gayaquil, Guayas, Ecuador: PRISMA.
- Moreno, J., & Cendales, M. (2018). Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la Guadúa Angustifolia Kunth originaria de Armenia Quindio. Bogota, Colombia.
- NEC-SE-CG. (2015). Cargas No Sísmicas. *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Quito, Pichincha, Ecuador: MIDUVI; CAMICON.
- NEC-SE-DS. (Diciembre de 2015). Peligro Sísmico, diseño sismoresistente. *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Quito, Pichincha, Ecuador: MIDUVI; CAMICON.
- NEC-SE-GUADÚA. (Agosto de 2016). Estructuras de Guadúa (GaK). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Ecuador: MIDUVI; CAMICON.
- NEC-SE-VIVIENDA. (Enero de 2015). Viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 5m . *Código NEC-SE-VIVIENDA*. Quito, Pichincha, Ecuador: MIDUVI; CAMICON.
- Nolivos, J., & Yaselga, J. (2010). Estudios de conexiones entre los elementos estructurales de caña guadúa sometidos a carga axial. Quito, Pichincha, Ecuador: EPN.
- NTC5525. (2007). Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua Angustifolia Kunth. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones (ICONTEC).
- Ortiz, O. (2013). *Master en geología ambiental y recursos geológicos*. Obtenido de Sismotectónica y peligrosidad sísmica en Ecuador: <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1221/1/T-SENECYT-000352.pdf>

- Ottazzi, G., Felipe, J., Blondet, M., Villa-García, G., & Ginocchio, J. (sf). Ensayos de Simulación Sísmica de viviendas de adobe. Lima, Peru.
- Quijano, C. (26 de Enero de 2021). *SIMSCALE*. Obtenido de <https://www.simscale.com/blog/2016/07/tips-better-structural-analysis/>
- Rodríguez, A., & Fonseca, L. (2003). Comportamiento sísmico y alternativas de rehabilitación de edificaciones en adobe y tapia pisada con base en modelos a escala reducida ensayados en mesa vibratoria. Bogotá, Colombia.
- Rojas, J. (2003). Análisis de las propiedades mecánicas de la Guadúa Angustifolia mediante técnicas estadísticas y redes neuronales.
- Romero, J., & Julca, R. (febrero de 2020). Análisis dinámico no lineal de un modelo de vivienda de adobe reforzado con sogas. Lima, Peru: UPCA.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A. P., & Hill, M. (2004). *Facultad de agronomía Universiada de la república de Uruguay* . Obtenido de Propiedades físicas del suelo: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58102915/propiedades\\_fisicas\\_del\\_suelo.pdf?1546460788=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DFACULTAD\\_DE\\_AGRONOMIA\\_Propiedades\\_Fisica.pdf&Expires=1606349577&Signature=L0OA7CUxf7VMHV2m1PRg1z~noos0IJVAmGfFBe](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58102915/propiedades_fisicas_del_suelo.pdf?1546460788=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DFACULTAD_DE_AGRONOMIA_Propiedades_Fisica.pdf&Expires=1606349577&Signature=L0OA7CUxf7VMHV2m1PRg1z~noos0IJVAmGfFBe)
- Salas, O. V., & LanammeUCR. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. San José, Costa Rica.
- SAP2000. (Diciembre de 2019). SapStart. Estados Unidos. Obtenido de Computers y Structures, INC.
- Sapuyes, E., Osorio, J., & Takeuchi, C. (Abril de 2018). Resistencia y elasticidad a la flexión de la guadúa angustifolia kunth de Pitalito, Huila.
- Serway, R., & Jewett, J. (2008). *Física para ciencias e ingeniería*. México: CENGAGE Learning.
- SOLIDWORKS. (2011). Comprensión del Análisis no lineal. España, Europa: Dassault Systemes SolidWorks Corp.

- Torrent, R. (Abril de 2020). Materiales Advanced Services. *Cambios dimensionales del hormigón endurecido*. Buenos Aires, Argentina, Suiza. Obtenido de <https://web.icpa.org.ar/wp-content/uploads/2020/04/M10-Cambios-dimensionales.pdf>
- Tovar, R., & García, R. (s.f.). La cal y la calidad en la vivienda bioclimática. México DF, México: Universidad Autónoma Metropolitana. Obtenido de <http://foccal.org/descargas/ART-CAL-VIVIENDA.pdf>
- Valencia, J., Valencia, G., & Ñamo, P. (2010). Universidad Técnica de Ambato. *Deriva de piso*. Ambato, Ecuador: FICM.
- VAXA. (2007). *Vaxa Software*. Obtenido de <http://vaxasoftware.com/indexes.html>

## **ANEXOS**

**Anexo 1.- Planos arquitectónicos y estructurales.**

**Anexo 2.- Informe de Clasificación de suelos.**

**Anexo 3. – Informe de Densidad de suelo.**

**Anexo 4. – Informe de Compactación en suelos.**

**Anexo 5. – Informe de Compresión simple.**

**Anexo 6. – Informe de Corte directo en suelos.**

**Anexo 7. – Informe de Compresión triaxial en suelos.**

**Anexo 8. – Informe de Compactación en mezcla suelo-cal.**

**Anexo 9 - A. – Informe de Compresión simple en la mezcla suelo-cal  
al 4%.**

**Anexo 9 - B. – Informe de Compresión simple en la mezcla suelo-cal  
al 8%.**

**Anexo 9 - C. – Informe de Compresión simple en la mezcla suelo-cal  
al 12%.**

**Anexo 10 - A. – Informe de Corte directo en la mezcla suelo-cal al 4%.**

**Anexo 10 - B. – Informe de Corte directo en la mezcla suelo-cal al 8%.**

**Anexo 10 - C. – Informe de Corte directo en la mezcla suelo-cal al 12%.**

**Anexo 11 - A. – Informe de Ensayo Triaxial UU en la mezcla suelo-cal  
al 4%.**

**Anexo 11 - B. – Informe de Ensayo Triaxial UU en la mezcla suelo-cal  
al 8%.**

**Anexo 11 - C. – Informe de Ensayo Triaxial UU en la mezcla suelo-cal  
al 12%.**

**Anexo 12 - A. – Informe de Ensayo a Tracción Caña guadúa (*GaK*)  
Probeta 1.**

**Anexo 12 - B. – Informe de Ensayo a Tracción Caña guadúa (*GaK*)  
Probeta 2.**

**Anexo 13 - A. – Informe de Ensayo a Compresión Caña guadúa (*GaK*)**

**Probeta 1.**

**Anexo 13 - B. – Informe de Ensayo a Compresión Caña guadúa (GaK)**

**Probeta 2.**

**Anexo 14 - A. – Informe de Ensayo a Corte Caña guadúa (GaK)  
Probeta 1.**

**Anexo 14 - B. – Informe de Ensayo a Corte Caña guadúa (GaK)  
Probeta 2.**