

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL USO DE MICROPILOTES DE BAMBÚ Y
CONCRETO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil

AUTORA:

Angelica Patricia BASUALDO URBANO

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Jheru Naghyb GALLEGOS PÉREZ

ASESOR:

Salvador SOBRECASES MARTÍ

Lima, febrero, 2022

RESUMEN

Una de las opciones más empleadas para la estabilidad de taludes son los micropilotes de concreto, debido a sus ventajas constructivas, económicas y a sus competencias estructurales para brindar efecto antideslizamiento. Sin embargo, los materiales que constituyen estos elementos son conocidos por sus impactos negativos en el aspecto ambiental. Por este motivo, se presenta al bambú como un material con buenas características estructurales y ambientales para su posible empleo en la geotecnia como micropilote; por consiguiente, los objetivos principales de esta tesis son demostrar que el bambú es un elemento adecuado para su empleo como elemento estabilizador y que ante ciertas condiciones es una alternativa más beneficiosa ante los micropilotes de concreto. La metodología del presente trabajo de investigación propone un análisis comparativo entre las dos opciones, micropilotes de concreto y micropilotes de bambú, que se basa en el análisis geotécnico, estructural y mediante el sistema *Choosing by Advantages* (CBA), para que pueda ser evaluado no solo en aspectos técnicos, sino también en factores sociales, ambientales y económicos. En primer lugar, se establecen las propiedades físicas y mecánicas del bambú, provenientes de la revisión bibliográfica, puesto que es un material que presenta una gran variabilidad en sus propiedades. Posteriormente, se definen los casos de estudio en términos de propiedades mecánicas y elásticas del suelo, geometría del talud, disposición de los micropilotes de bambú y de concreto en cuestiones de espaciamiento, longitud, cantidad de filas y tipo de arreglo. Los casos de estudio definidos en base a la geometría de los taludes y sus propiedades del suelo deben estabilizarse empleando ambas alternativas y sus distintas formas de distribución, por lo que se realizan modelados 2D con las propiedades ya establecidas de ambos materiales con la finalidad de estabilidad cada uno de los taludes propuestos con ambas alternativas de refuerzo. Una vez obtenidos ejecutados los modelados 2D, se obtienen los factores de seguridad y los esfuerzos actuantes en los micropilotes, ya sean de bambú o concreto, con esta información se procede al análisis estructural de ambas propuestas para solo obtener los casos válidos tanto por estabilidad como por esfuerzos. Finalmente, con los diseños verificados, se procede a realizar el análisis técnico de los resultados obtenidos, donde los micropilotes de concreto resultan más competentes en todos los casos analizados. Por último, con esta información previa, se realiza el análisis CBA de los diversos factores propuestos para ambas alternativas con lo que se obtiene que los micropilotes de bambú son una propuesta económicamente viable, responsable con el medio ambiente y competente en términos técnico.

ÍNDICE

1	Generalidades.....	1
	1.1 Introducción	1
	1.2 Objetivos	3
	1.2.1 Objetivo general.....	3
	1.2.2 Objetivos específicos	3
	1.3 Hipótesis.....	3
	1.4 Justificación.....	3
	1.5 Metodología	4
2	Marco teórico.....	6
	2.1 Micropilotes como elemento estabilizador.....	6
	2.1.1 Clasificación de los micropilotes.....	6
	2.2 Diseño de micropilotes para estabilización de taludes.....	10
	2.2.1 Evaluar el factor de seguridad existente en el talud.....	11
	2.2.2 Evaluar la fuerza adicional requerida para un F.S. requerido	11
	2.2.3 Seleccionar la sección transversal.....	14
	2.2.4 Estimar la longitud.....	14
	2.2.5 Evaluar fallos estructurales	15
	2.3 Criterios de selección de materiales.....	16
3	Micropilotes de concreto.....	22
	3.1 Materiales	22
	3.1.1 Armaduras.....	22
	3.1.2 Lechada de cemento.....	22
	3.1.3 Mortero de cemento.....	24
	3.2 Protección contra la corrosión.....	24
	3.3 Fallo estructural de los micropilotes	25
	3.3.1 Resistencia estructural del micropilote a compresión.....	25
	3.3.2 Resistencia estructural del micropilote a tracción.....	27
	3.3.3 Resistencia estructural del micropilote a flexión.....	28
	3.3.4 Resistencia estructural del micropilote a cortante.....	29
	3.3.5 Resistencia estructural esfuerzo combinados.....	30
4	Micropilotes de bambú.....	31
	4.1 Bambú.....	31
	4.2 Morfología del bambú	34
	4.3 Anatomía del bambú.....	35

4.4	Propiedades mecánicas y elásticas.....	36
4.4.1	Propiedades físicas.....	36
4.4.2	Propiedades mecánicas.....	40
4.5	Durabilidad.....	42
4.6	Condiciones y recomendaciones para el uso del bambú.....	42
4.6.1	Cultivo y cosecha del bambú.....	43
4.6.2	Tratamientos.....	44
5	Métodos de análisis.....	49
5.1	Método de elementos finitos.....	49
5.1.1	Modelos constitutivos del suelo.....	51
5.1.2	Método de reducción de Esfuerzo Cortante (SSR).....	53
6	Modelamiento de alternativas.....	55
6.1	Definición de casos de estudio.....	55
6.2	Talud reforzado con micropilotes de bambú.....	60
6.2.1	Modelamiento de los casos de estudio.....	63
6.2.2	Análisis de resultados.....	71
6.3	Talud reforzado con micropilotes de concreto.....	84
6.3.1	Modelamiento de los casos de estudio.....	87
6.3.2	Análisis de resultados.....	89
7	Análisis de propuestas.....	101
7.1	Análisis técnico.....	101
7.1.1	Factores de seguridad.....	101
7.1.2	Comportamiento ante sollicitaciones de momentos y fuerzas.....	102
7.1.3	Número de elementos.....	106
7.2	Análisis multicriterio.....	107
8	Conclusiones y recomendaciones.....	117
8.1	Conclusiones.....	117
8.2	Recomendaciones.....	119
9	Bibliografía.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Modelado de solo un micropilote vertical.</i>	12
<i>Figura 2. Límites fuera de la zona de influencia</i>	13
<i>Figura 3. Esfuerzos preponderantes en taludes.</i>	16
<i>Figura 4. Tipos de Armadura de Micropilotes</i>	22
<i>Figura 5. Efecto de la relación agua cemento en las propiedades de la lechada</i>	23
<i>Figura 6. Distribución de bosques de bambú naturales según la zona climática.</i>	32
<i>Figura 7. Zonas de producción de Bambú según especie en el Perú</i>	33
<i>Figura 8. Partes de la Guadua Angustifolia.</i>	34
<i>Figura 9. Estructura anatómica de Guadua Angustifolia</i>	35
<i>Figura 10. Comparación comportamiento bambú con otros materiales.</i>	38
<i>Figura 11. Elementos típicos 2D</i>	51
<i>Figura 12. Modelo constitutivo elástico</i>	52
<i>Figura 13. Modelo elastoplástico Mohr Coulomb.</i>	52
<i>Figura 14. Modelo constitutivo Interface</i>	53
<i>Figura 15. Diagrama Esquemático de un talud de 5m de altura y uno de 7m de altura</i>	55
<i>Figura 16. Diagrama Esquemático de un talud de 8.5m de altura y uno de 10m de altura</i>	56
<i>Figura 17. Diagrama Esquemático de un talud de 12m de altura y uno de 15m de altura.</i>	56
<i>Figura 18. Distribución del refuerzo a lo largo de la corona.</i>	58
<i>Figura 19 Arreglos de bambú, a) micropilote simple, b) arreglo de 2 bambús, c) arreglo de 3 bambús</i>	58
<i>Figura 20 Distribución del refuerzo de micropilotes de concreto para una, dos y tres filas</i>	59
<i>Figura 21 Sección transversal del micropilote de concreto</i>	59
<i>Figura 22. Arreglos reales con sus equivalentes.</i>	62
<i>Figura 23. Herramienta Size Control</i>	66
<i>Figura 24. Creación del mallado correspondiente a la arcilla</i>	67
<i>Figura 25. Datos de entrada del bambú para la herramienta Wizard</i>	68
<i>Figura 26. Creación de la interfaz.</i>	69
<i>Figura 27. Propiedades de la interfaz generada por el comando Wizard.</i>	69
<i>Figura 28. Aplicación de las condiciones de contorno.</i>	70
<i>Figura 29. Definición del caso a analizar</i>	71
<i>Figura 30. Resultados de desplazamientos totales en el terreno</i>	71
<i>Figura 31. Resultados de fuerza axial sobre el micropilote</i>	72
<i>Figura 32. Resultados de fuerza cortante sobre el micropilote</i>	72
<i>Figura 33. Resultado de momento flector sobre el micropilote</i>	73
<i>Figura 34. Gráfica FS vs H para un arreglo simple.</i>	76
<i>Figura 35. Gráfico FS vs H para un arreglo triple</i>	77
<i>Figura 36. Gráfica de FS vs H para una fila de refuerzo.</i>	78
<i>Figura 37. Gráfica FS vs H para seis filas de refuerzo</i>	79
<i>Figura 38. Datos de entrada del concreto en Wizard.</i>	89
<i>Figura 39. Propiedades de la interfaz creadas por el Wizard.</i>	89
<i>Figura 40. Desplazamientos totales para un talud con tres micropilotes</i>	90
<i>Figura 41. Resultados de fuerza axial sobre el micropilote</i>	90
<i>Figura 42. Resultados de fuerza cortante sobre el micropilote</i>	91
<i>Figura 43. Resultado de momento flector sobre el micropilote.</i>	91
<i>Figura 44 Gráfica FS vs H para un diámetro de 20 cm</i>	93
<i>Figura 45 Gráfica FS vs H para un diámetro de 25 cm</i>	94

Figura 46. Gráfica de FS vs H para refuerzo con 3 filas de micropilotes de concreto..... 95

Figura 47. Diagrama de fuerzas axiales para micropilotes de concreto y bambú en un talud de 8.5 m 103

Figura 48. Diagrama de fuerzas cortantes para micropilotes de concreto y bambú en un talud de 8.5 m 104

Figura 49. Diagrama de momentos flectores para micropilotes de concreto y bambú en un talud de 8.5 m..... 105



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Recubrimientos mínimos.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2. Resultados de resistencia a compresión de diversos autores</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 3. Resultados a flexión de diversos autores.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 4. Resultados a tracción de diversos autores</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 5. Resultados a cortante de diversos autores</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 6 Preservantes para tratamientos químicos</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 7. Factores de seguridad para la estabilización de taludes</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 8. Parámetros del suelo.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 9 Propiedades del bambú Guadua Angustifolia.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 10 Dimensiones equivalentes para arreglos de bambú.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 11 Definición del material Arcilla.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 12 Definición del material Bambú.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 13 Definición de la propiedad para la arcilla.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 14 Definición de la propiedad para el bambú.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 15. Resultado de Factores de Seguridad correspondientes a un talud de 5m.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 16. Resultado de Factores de Seguridad correspondientes a un talud de 7m.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 17. Resultado de Factores de Seguridad correspondientes a un talud de 8.5m.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 18. Resultado de Factores de Seguridad correspondientes a un talud de 10m.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 19. Resultado de Factores de Seguridad correspondientes a un talud de 12m.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 20. Resultado de Factores de Seguridad correspondientes a un talud de 15m.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 21. Resistencias de diseño para el micropilote de bambú.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 22. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 5m.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 23. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 7m.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 24. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 8.5 m.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 25. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 10m.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 26 Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 12m.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 27 Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 15m.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 28 Propiedades del micropilote.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 29 Dimensiones y parámetros sección armadura tubular.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 30 Propiedades del mortero y del acero tubular.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 31 Parámetros micropilotes de concreto.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 32 Resistencia estructural de diseño para los micropilotes de concreto.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 33 Definición del material Concreto</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 34 Definición de la propiedad Micropilote de concreto.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 35 Factor de seguridad para un talud reforzado con micropilotes de concreto con D=20 cm. 92</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 36. Factor de seguridad para un talud reforzado con micropilotes de concreto con D=25 cm 92</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 37. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 5m.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 38. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 7m.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 39. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 8.5 m.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 40. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 10m.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 41 Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 12m.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 42 Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 15m.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 43. Incrementos en el FS por talud según tipo de refuerzo</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 44. Descripción del refuerzo mínimo para la estabilización de taludes de 5m, 7m y 8.5m</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 45 Asignación de importancia a los factores.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 46 Tabla de CBA.....</i>	<i>114</i>

1 Generalidades

1.1 Introducción

Durante el periodo de 1970 a 2009, en el Perú, se han producido 105 desastres naturales: el 71% provocado por fenómenos hidrometeorológicos (sequías, deslizamientos húmedos, inundaciones, etc.) y el 29 %, por eventos geofísicos (sismos, deslizamientos secos y erupciones) generando 74,000 muertes y un daño colateral a 18 millones de peruanos (BID, 2011). Uno de los desastres naturales más comunes son los deslizamientos de tierras que, a diferencia de los sismos, ocurren en todo el territorio nacional, ya que sus mecanismos de falla se determinan por la geología, hidrología y geomorfología de los taludes y laderas. Estos mecanismos cambiantes convierten a los movimientos de tierra en una amenaza natural de creciente preocupación con el avanzar de los años, pues sus impactos causan pérdidas monetarias, desplazamientos internos y efectos negativos en el medio ambiente (Igwe & Una, 2019).

Para combatir los riesgos ocasionados por los deslizamientos de tierras, existe una gran variedad de medidas de mitigación disponibles en donde la estabilización de taludes y el trabajo de protección de laderas son las principalmente usadas en el ámbito ingenieril. Con respecto a los métodos de estabilización, los micropilotes son los comúnmente empleados debido a su ventaja constructiva por no ser excavados, rápido funcionamiento y eficiencia económica (Hu & Wang, 2019). Tal como concluyen Li et al. (2020), las competencias de los taludes, en cuestión de efecto antideslizamiento y capacidad de carga, se ven incrementadas hasta en tres veces gracias al empleo de micropilotes, ya que estos permiten un mayor desplazamiento y retrasan el colapso del talud, lo cual convierte a este tipo de reforzamiento en el más adecuado para obras en ingeniería de geotécnica.

Los micropilotes, sean hincados o inyectados, están compuestos en su mayoría por concreto y acero, los materiales más empleados en la industria *AEC*. Su fabricación produce una gran cantidad y variedad de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático y genera un daño real sobre la atmósfera. En este contexto, se presenta al bambú como una opción aplicable al sector constructivo, y, sobre el cual, existe un gran desconocimiento acerca de sus beneficiosas características, gran facilidad de cultivo y su importancia para un desarrollo económico y social de la sociedad peruana (Juárez, 2019). Por ello, se recalca la importancia del estudio e investigación del bambú *Guadua Angustifolia*, especie más predominante en el mercado nacional y con varias zonas de producción en el Perú, para su aprovechamiento en los diversos sectores de la Construcción e Ingeniería como la geotecnia (Añasco & Rojas, 2015). Múltiples investigaciones, realizadas en otros países, afirman la utilidad de diferentes especies de bambú para cimentaciones o estabilización de taludes, la cual no solo se debe a su alto rendimiento estructural, sino, además, por sus características sostenibles y económicas.

Por ello, el desarrollo de este trabajo de tesis abordará un análisis de estabilidad de un talud con refuerzo de micropilotes de bambú para conocer la viabilidad de esta especie, *Guadua Angustifolia*, como elemento estabilizador, sus configuraciones óptimas de diseño y limitaciones en el campo geotécnico. Una comparación con el empleo de un refuerzo tradicional expondrá sus ventajas o desventajas, técnicas, sociales, económicas o ambientales con el fin de proporcionarle a la sociedad peruana una posible medida de prevención contra los deslizamientos de tierra.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el empleo de micropilotes de bambú frente a la alternativa de micropilotes de concreto para la estabilidad de un talud mediante un análisis comparativo

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar las distintas propiedades mecánicas y elásticas expuestas por distintos ensayos realizados en Perú y en el extranjero para el bambú
- Analizar la estabilidad de un talud en particular mediante el método de elementos finitos (FEM) con las dos alternativas propuestas, micropilotes de bambú y micropilotes de concreto ante las condiciones de parámetros establecidas
- Analizar el comportamiento, y configuraciones de los micropilotes de bambú y concreto en un modelo 2D para los distintos casos de estudio
- Determinar cuáles son las condiciones en las que se puede estabilizar un talud con micropilotes de bambú y concreto
- Evaluar mediante un análisis multicriterio con la metodología CBA la mejor alternativa según factores ambientales, sociales, económicos y constructivos

1.3 Hipótesis

El bambú es adecuado como elemento estabilizador para su empleo en obras geotécnicas relacionadas a la estabilidad de taludes; y, además, ante ciertas condiciones analizadas, resulta una alternativa beneficiosa tanto técnica como económicamente.

1.4 Justificación

La razón de este trabajo de tesis se centra en el desconocimiento de las propiedades del bambú como elemento estructural para la industria *Architecture, Engineering & Construction*

(AEC), específicamente en el ámbito geotécnico, para la prevención de desastres en taludes inestables. Se espera un beneficio social, pues se presenta una nueva alternativa que es sostenible y económica en comparación a los materiales convencionales y contaminantes con los que el mercado cuenta.

En adición, el no realizar los estudios correspondientes de este material y su aplicación en taludes, sería un retraso y a la vez un riesgo para la actual población vulnerable a los efectos generados por los deslizamientos de tierra, pues no se cuenta con nuevas alternativas que sean renovables, de bajo costo y viables regionalmente.

1.5 Metodología

- Se realizará la revisión de bibliografía para mencionar las generalidades de los micropilotes, características y propiedades de los materiales, y el método de análisis numérico para el trabajo de tesis.
- Se determinarán las condiciones importantes para la fase de cultivo y cosecha, así como los tratamientos necesarios para el empleo de bambú como micropilote. Además, se abordarán métodos para mejorar la durabilidad de este material al estar en contacto con el suelo por medio de revisión bibliográfica.
- Se establecerá las propiedades físicas y mecánicas del bambú por medio de revisión de bibliografía, debido a su gran variabilidad y a que este trabajo de investigación no realiza ensayos de laboratorio.
- Se realizará la revisión bibliográfica para obtener referencias y, así, determinar tanto los casos de estudio como el diseño de los micropilotes de bambú y de concreto para el reforzamiento de un talud.
- Se definirán los casos de estudio en términos de propiedades mecánica y elásticas del suelo, geometría del talud y disposición de los micropilotes de bambú y concreto.

- Se analizarán los parámetros que definen la interfaz para un correcto modelamiento de la interacción suelo-micropilote, tanto para el caso de los micropilotes de bambú y concreto.
- Se realizará el modelado 2D de los casos de análisis en el software Midas GTS NX que emplea el método de elementos finitos para obtener los resultados de factores de seguridad y esfuerzos del micropilote.
- Se procesará la información obtenida de los análisis numéricos mediante gráficos para realizar la comparación e identificar los casos más afines al tipo de refuerzo que se propone en este tema a desarrollar.
- Se realizará la discusión de resultados con la finalidad de enfatizar las ventajas y desventajas de cada una de las propuestas de refuerzo en aspectos técnicos.
- Se realizará un resumen de los resultados acompañado con cuadros y gráficos para realizar una comparación entre ambas propuestas en el aspecto técnico y multicriterio.
- Se determinarán a manera de conclusión, cuáles son las condiciones que posicionan al micropilote de bambú como alternativa más beneficiosa en términos técnicos frente a la propuesta de micropilotes de concreto.
- Se realizará una evaluación multicriterio con el sistema CBA para determinar la propuesta de refuerzo más ventajosa por medio de criterios sociales, ambientales, constructivos y, finalmente, económicos.

2 Marco teórico

2.1 Micropilotes como elemento estabilizador

Los micropilotes son elementos estructurales con diámetros pequeños, no mayores de 300 mm, que transfieren cargas al terreno y que contienen elementos portantes para transferir directa o indirectamente las cargas y/o limitar deformaciones. (UN-EN-1499,2005). Existe una gran variedad de estos disponibles en el mercado actual sea para brindar soluciones geotécnicas como soporte de cimentaciones o estabilización de taludes. Su notoriedad se debe a sus grandes ventajas que recaen en su gran capacidad portante para cargas laterales y axiales, menos problemas de restricción en el sitio y su operación auto suficiente, capaz de remplazar hasta un pilote (Liew, 2003).

2.1.1 Clasificación de los micropilotes.

En esta sección, en base a la literatura recolectada, los micropilotes se clasifican según su material, procedimiento constructivo y aplicación de diseño

a. Materiales

A lo largo de los años, se han utilizado diversos materiales para conformar micropilotes. Entre ellos se encuentra la madera, el acero, el cemento y aquellos compuestos formados por los dos últimos mencionados. Estos últimos son aquellos que en la actualidad predominan en la industria constructiva debido a su alta resistencia y durabilidad comparada con otros materiales. Por lo general, el micropilote está compuesto por lechada, mortero o concreto acompañado con armaduras de acero, sean barras corrugadas, secciones de acero o tuberías reforzadas.

b. Procedimiento constructivo

Según su ejecución en obra, estos se subdividirán en micropilotes hincados y perforados. Para ambos tipos, se requiere un método declarado con información acerca del uso de

micropilote, descripción del suelo y entorno, requerimientos técnicos, equipos y medidas para asegurar una correcta perforación (UN-EN 14199, 2005). Todo el procedimiento debe ser supervisado y ejecutado por profesionales y mano de obra calificada según corresponde con un plan de ejecución realizado previamente que establezca requerimientos y procedimiento.

b.1. Micropilotes hincados

Actualmente, estos micropilotes no son tan utilizados debido a las ventajas de la otra opción mencionada en el siguiente subíndice. Su uso se ha extendido en micropilotes de acero como refuerzo estructural sea para nuevas cimentaciones o fortalecimiento de antiguas, y, consolidación de terreno, para la reducción de asentamientos (GEOSEC, s/f.). Sin embargo, los micropilotes hincados pueden ser diversos de materiales con una misma ejecución explicada a continuación según la UN-EN 12699 (2001).

El procedimiento acorde posee una similitud al correspondiente con los pilotes de hinca, el cual consiste en la hinca del elemento o un tubo de hincado al generar presión en la dirección del elemento hasta llegar a la profundidad requerida o el rechazo del suelo. Se requiere de mazas, martillos vibradores o maquinaria de presión, como gatas hidráulicas, con dispositivos de medida de carga. Se resalta que este procedimiento es aplicable tanto a pilotes como micropilotes de variedad de materiales como acero, hormigón, madera, mixtos entre otros. La UN-EN 12699 (2001) recomienda comprobar su viabilidad de estos micropilotes, previamente, cuando se realiza el hincado sea por impacto o vibración con experiencias comparables o ensayos de hinca en emplazamientos cercanos al sitio o según especificaciones.

b.2. Micropilotes perforados

Estos micropilotes son más conocidos y utilizados por ser inyectados con lechada o mortero acompañados con refuerzos de acero. Su auge se debe a la gran capacidad portante y de transferencia de cargas al suelo o rocas para uso de soporte de estructuras, estabilidad de

taludes y, últimamente, como refuerzo sísmico debido a su gran flexibilidad (Sharma & Buragohain, 2014).

El procedimiento consiste en la perforación mediante maquinaria de rotación o rotopercusión compuesta por un taladro y acompañado con o sin una tubería de revestimiento según sean las condiciones del suelo hasta alcanzar la profundidad requerida respetando las tolerancias de posición, diámetro, longitud e inclinación. Se continúa con introducir la armadura de acero acorde según el plan de ejecución. Una vez colocado en posición, según el método de inyección, se procederá con la aplicación de mortero o lechada. La clasificación realizada por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento de España menciona y abarca los métodos más conocidos que se listaran a continuación:

- Inyección previa: Se realiza antes de la ejecución de micropilotes para evitar pérdidas de inyección grandes.
- Inyección única global: Se rellena de manera global el espacio entre la perforación del taladro y la armadura tubular de revestimiento desde la cabeza del micropilote.
- Inyección repetitiva: Comprende dos fases de inyección, la cual comienza con la primera lechada emplazada entre la armadura y la perforación, y la segunda es inyectada a través de válvulas de inyección antirretorno de manera global con variedad de modos de ingreso.
- Inyección repetitiva y selectiva: Se inicia con la inyección primaria usual como los demás métodos y después se realiza una reinyección de varias veces a través de tubos-manguitos en toda la longitud del micropilote.

Las maquinarias utilizadas, en la mayoría de los casos, para la inyección son una mezcladora, agitadores y bomba de inyección. En caso existiera entubación, esta se retiraría al mismo tiempo de la inyección. Posteriormente, se realizaría la unión con los elementos de

conexión según requerimientos del proyecto, donde se considera el uso de tapas de concreto, vigas o encepados que permitan la conexión con el terreno u otros micropilotes.

Existen ciertas consideraciones recomendadas para micropilotes inclinados de este tipo. La Dirección General de Carreteras de España (2005) menciona que no se suele superar entre los veinte o treinta grados sexagesimales con respecto a la vertical, ya que puede ocasionarse inestabilidad en el terreno, desviación en la perforación, mayores dificultades de instalación y flexiones excesivas.

c. Aplicación de diseño

Según la FHWA (2005), se define micropilotes de caso 1 a aquellos elementos que están directamente cargados y soportan la mayoría de la carga aplicada, y a los de caso 2 como elementos que circunscriben y refuerzan al suelo para proporcionarle una resistencia a cargas, conocidos como red de micropilotes reticulados. El primer enfoque se asemeja al comportamiento de los pilotes, ya que estos actúan de la misma manera transfiriendo cargas a estratos más resistentes con presentaciones individuales o grupales de micropilotes. En cambio, el segundo enfoque apunta a formar una masa reforzada de terreno con una red de micropilotes con la capacidad a para dar soporte ante cargas o problemas de estabilización.

Sus principales aplicaciones para ambos enfoques sean como estructuras de soporte o reforzamiento in-situ. Para aquellas de soporte, se incluye estructuras de cimentación, cimentaciones para nuevas estructuras, apuntalamiento de cimentaciones existentes (reparación, remplazamiento, protección, mejoramiento) y reforzamiento sísmico. En cambio, para reforzamiento, se utiliza para estabilidad de taludes o laderas, estructuras de retención de terreno, fortalecimiento de suelo, reducción de asentamientos y estabilidad estructural.

Se explicará una de las aplicaciones más comunes y aquella que se abordará para la presente tesis: los micropilotes para la estabilidad de taludes. Estos se pueden presentar en

maneras distintas para estabilizar taludes. Por un lado, Lizzi (1982) presenta una red de micropilotes reticulada con la capacidad de formar un suelo reforzado, como un muro de contención de gravedad, lo cual brindará resistencia al corte, tensional y compresiva. Por otro lado, Pearlman y Wolosick (1992) sugieren que los micropilotes individuales en grupos sirven para conectar la zona de movimiento con las estables. Su gran utilidad recae en su resistencia al corte bajo las superficies de falla, lo cual evita inestabilidades de taludes o laderas.

2.2 Diseño de micropilotes para estabilización de taludes

En este capítulo, se revisará la metodología de diseño planteada por la FHWA (*Federal Highway Administration*) (2005) para el diseño de micropilotes con el objetivo de estabilizar taludes. Es importante mencionar que la metodología propuesta tiene dos enfoques excluyentes uno de otro; no obstante, se mencionará solo el primer método y el segundo se recomienda consultar en el apartado 6.1 del Manual de Diseño y Construcción de la FHWA (2005).

Enfoque 1: En este enfoque, los micropilotes son instalados a través de la ladera inestable hasta una profundidad por debajo de la superficie de falla, obtenida del análisis de estabilidad. Menciona que los micropilotes deben estar sujetos a la superficie del suelo mediante una viga de concreto. Se debe mencionar que este método se enfoca en que los micropilotes trabajen de forma individual ante sollicitaciones axiales, cortantes y flectoras. Respecto al espaciamiento entre los elementos a lo largo del talud, se analiza considerando la cantidad necesaria de micropilotes por metro lineal para proporcionar la fuerza de estabilización mínima requerida, la cual es aquella necesaria para aumentar el factor mínimo de seguridad prescrito según normativas o recomendaciones. Por último, se mencionarán los pasos a seguir del diseño de micropilotes según este enfoque.

2.2.1 Evaluar el factor de seguridad existente en el talud

Los análisis de estabilidad de taludes usualmente se emplean para evaluar el factor de seguridad de un talud que se quiere estabilizar. Estos análisis se desarrollan en base a condiciones estáticas y pseudo estáticas cuyos valores son comparados con los mínimos requeridos que están en el rango de 1.3 a 1.5 en el caso estático y 1.1 en el caso pseudo estático; no obstante, para el desarrollo de estos análisis es importante definir parámetros geotécnicos y estructurales tanto del talud como del micropilote.

Además, se desarrolla el análisis para el momento en que el talud falla que, por definición, es cuando el factor de seguridad del talud es de 1. El método empleado para evaluar este caso se denomina “Back-Analyses”, el cual implica lo siguiente:

- Estimación de parámetros de análisis
- Desarrollar el análisis del talud con sus condiciones iniciales
- Ajustar los parámetros hasta un FS=1

2.2.2 Evaluar la fuerza adicional requerida para un F.S. requerido

Los micropilotes deben ser capaces de proveer una fuerza necesaria para incrementar el F.S de un valor propio del talud a un valor requerido y para esto se emplean los softwares de análisis de estabilidad de taludes. Estos análisis son realizados en tres etapas, las cuales se mencionan a continuación:

- Localización del micropilote

La magnitud de la fuerza resistente requerida varía según la localización del micropilote en el talud. Estas magnitudes se obtienen a través del desarrollo de diversos análisis con variaciones del lugar del micropilote, pero en donde se debe conservar el factor de seguridad requerido.

Para determinar la localización de los micropilotes, se recomienda relacionar la fuerza requerida para un F.S. requerido con la localización del micropilote para, así, obtener más información y realizar una mejor decisión.

- Métodos para modelar la fuerza de resistencia del micropilote

Para realizar su modelado, se debe adoptar uno de los dos métodos existentes, donde la adopción de uno de estos depende del software en el que se analice.

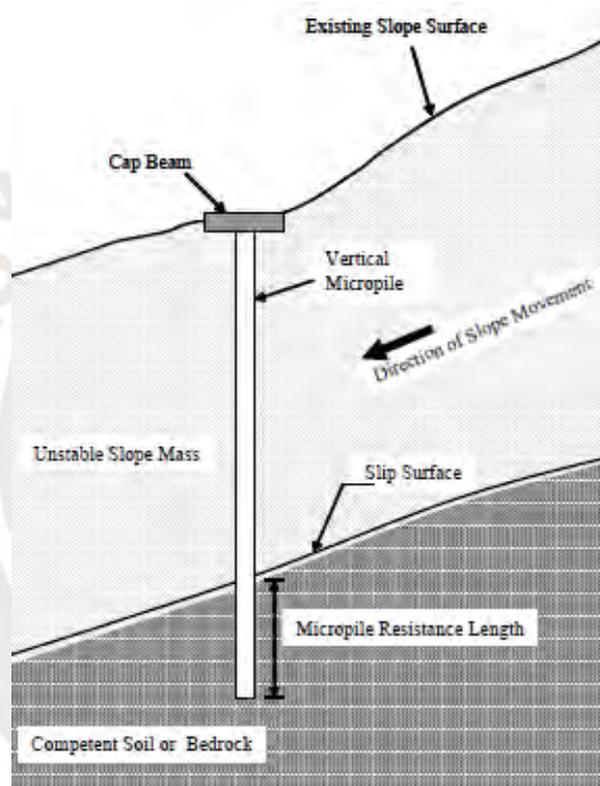


Figura 1. Modelado de solo un micropilote vertical.

Adaptado de “Manual on Micropiles Design and Construction”, por FHWA, 2005

- Método 1: La resistencia proporcionada por el micropilote puede modelarse como una resistencia brindada por una cohesión asignada al estrato de suelo donde el micropilote atraviesa la superficie de deslizamiento crítico. La relación entre la fuerza requerida y la cohesión se muestra en la siguiente ecuación.

$$H_{req} = c \times w \times \frac{1}{\cos(\alpha)}$$

Donde:

- c : Cohesión del suelo natural
 - w : Ancho de rebanada
 - α : Ángulo de la base de la rebanada
 - H_{req} : Fuerza al corte requerida
- Método 2: Con este método, no es necesario obtener la resistencia al corte de un micropilote a través de una cohesión asignada al estrato inestable, debido a que es posible ingresar el parámetro resistente al micropilote en cualquier localización de este dentro del talud.
- Evaluación de la estabilidad del talud fuera de la zona de influencia del micropilote

Con los análisis anteriores, se obtiene la fuerza resistente del micropilote y su localización dentro del talud para alcanzar un valor objetivo del factor de seguridad. No obstante, esto no implica que las superficies lejanas al micropilote posean un factor de seguridad mayor o igual al que se requiere, siendo estas zonas las que se muestran en la Figura 2.

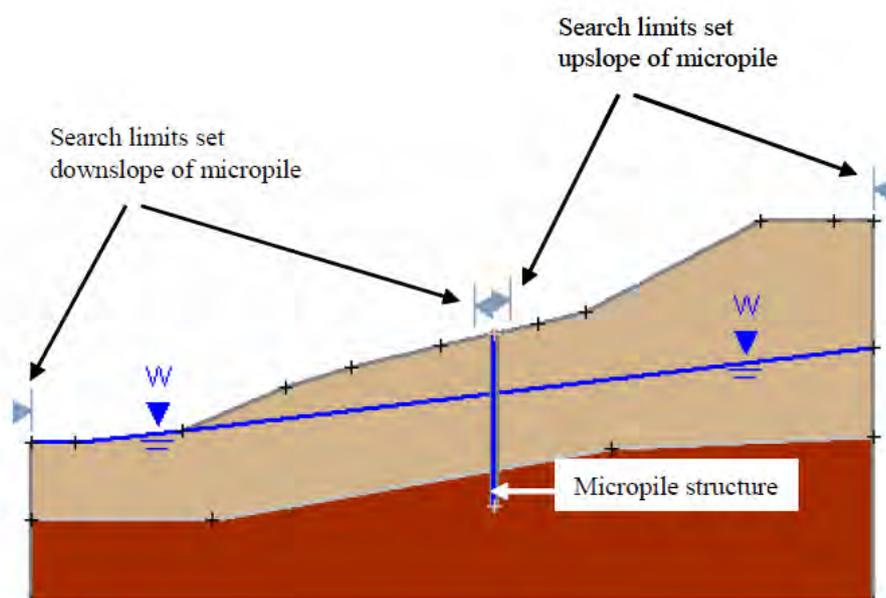


Figura 2. Límites fuera de la zona de influencia

Adaptado de “Manual on Micropiles Design and Construction”, por FHWA, 2005

2.2.3 Seleccionar la sección transversal

La superficie transversal de un micropilote es, en su mayoría, circular, conformada de concreto y un case de acero.

2.2.4 Estimar la longitud

La estimación total se determina de la siguiente forma:

$$L_{total} = L_{inferior} + L_{superior}$$

Donde:

- *L_{inferior}*: Longitud del micropilote por debajo de la superficie crítica
- *L_{superior}*: Longitud comprendida entre la superficie del talud y la superficie crítica

Estas longitudes están relacionadas con la fuerza axial que debe resistir el micropilote tanto por debajo como por encima de la superficie de falla. En el caso de las fuerzas axiales, se asume que las resistencias últimas, tanto por debajo como por encima de la superficie de falla, son iguales en magnitud. La resistencia última del micropilote por encima de la superficie de falla se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$P_{ult} = \alpha \times L_{superior} \times \pi \times d$$

Donde:

- *$\alpha_{superior}$* : Fuerza de adherencia entre la lechada y el suelo por encima de la superficie crítica.
- *L_{superior}*: Longitud comprendida entre la superficie del talud y la superficie crítica.
- *d*: Diámetro de la sección transversal del micropilote.
- *P_{ult}*: Resistencia última del micropilote

Como se requiere evitar la falla estructural combinada por carga axial y flexión, la longitud requerida por debajo de la superficie de falla se calcula como:

$$P_{ult} = \alpha \times L_{superior} \times \pi \times d$$
$$L_{inferior} = \frac{P_{ult}}{\alpha_{inferior} \times \pi \times d} \times FS$$

Donde:

- $\alpha_{inferior}$: Fuerza de adherencia entre la lechada y el suelo por debajo de la superficie crítica.
- $L_{inferior}$: Longitud comprendida por debajo de la superficie crítica.
- d : Diámetro de la sección transversal del micropilote.
- FS : Factor de seguridad recomendado de 2
- P_{ult} : Resistencia última del micropilote

No obstante, en el caso que las longitudes obtenidas sean de una magnitud inusual, se emplean las longitudes comerciales del concreto que van entre los 10m a 15m.

2.2.5 Evaluar fallos estructurales

Para el caso de micropilotes actuando como refuerzo en estabilización de taludes y/o laderas, los esfuerzos transmitidos a los micropilotes son, en su mayoría, cortantes y de flexión cerca de la superficie de falla, tal y como se muestra en la siguiente Figura 3.

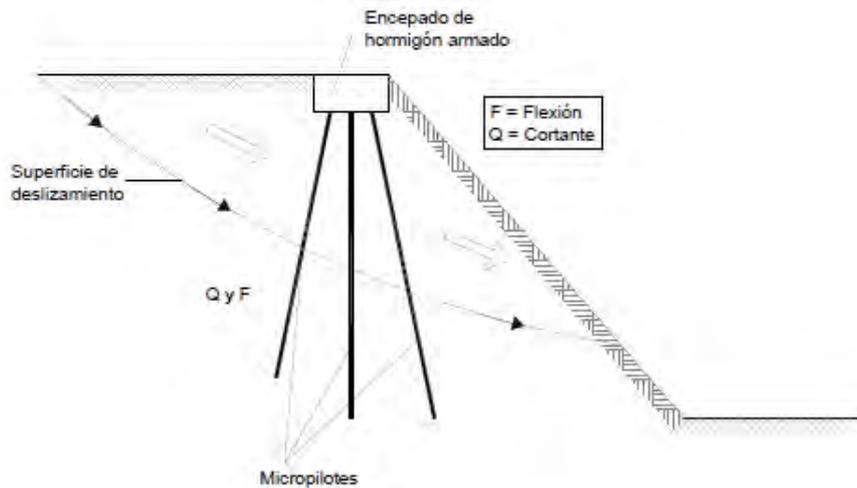


Figura 3. Esfuerzos preponderantes en taludes
 Adaptado de “Sobre el comportamiento de micropilotes trabajando a flexión y/o cortante en estructuras de tierra”, por Botello Rojas, 2015

En conclusión, para cada tipo de esfuerzos actuantes, la capacidad o resistencia de los micropilotes debe cumplir lo siguiente:

$$Resistencia\ de\ diseño \geq Resistencias\ requeridas$$

2.3 Criterios de selección de materiales

El crecimiento de la población y su urbanización han contribuido al aumento de tres veces la producción de materiales de construcción desde el 2000 al 2017 (Huang et al., 2019). Tanto la producción y adquisición de estos últimos viene acompañada de consecuencias como la emisión de gases de efecto invernadero (GHG) producidos por la combustión, y contaminación aérea, terrestre y acuática generada por los procesos de fabricación o tratamiento de los materiales (Cole & Rousseau, 1992). Esta polución ocasiona cambios climáticos mediante el calentamiento global, inundaciones, sequías entre otros con daños en los activos de la población y hasta su propia salud.

Dentro de los materiales más perjudiciales en términos de polución, se encuentran los comúnmente empleados en la industria AEC, los materiales convencionales, los cuales comprenden al concreto, acero y ladrillo. De acuerdo con la Organización para la Cooperación

y el Desarrollo Económico (2003), el 30% de los gases de efecto invernadero generados por los países afiliados corresponden al impacto de la construcción de edificaciones; lo cual refuerza la motivación de emplear insumos alternativos, materiales no convencionales, para disminuir el impacto ambiental que generan los materiales actualmente utilizados por la industria de la construcción.

El término materiales no convencionales o conocido, también, como materiales innovadores se introdujo en los últimos años con dos enfoques para la construcción. El primero apunta a fines ingenieriles sea para mejora de rendimiento o solución de problemas, mientras que el segundo se debe a las preocupaciones medio ambientales (Zhang & Canning, 2011). Estos materiales no convencionales se presentan como una opción factible ante los convencionales que para su transporte y producción requieren un alto consumo de energía y emiten gases de efecto invernadero contaminantes tal y como antes se mencionó.

Su conocimiento e, incluso su uso, se han extendido alrededor del mundo; sin embargo, su estudio e impacto es aún menor para ser utilizado en el Perú. Para la aplicación de estos materiales, es necesario que estén sujetos a normas y estándares para el diseño, construcción y mantenimiento con el objetivo de salvaguardar las vidas humanas y evitar futuras catástrofes (Zhang & Canning, 2011). Por ello, se convierte de suma importancia realizar investigaciones y ensayos de los materiales con posteriores análisis científicos e ingenieriles que comprueben la viabilidad y seguridad de los nuevos elementos propuestos. Entre los materiales no convencionales precedentes y con resultados positivos en diversos estudios, se encuentran aquellos compuestos por elementos reciclados, residuos o materiales naturales, como el bambú.

Este último material mencionado se presenta como una opción viable en Perú, debido a que es renovable, de fácil crecimiento, accesible económicamente entre otras características favorables que se desarrollarán más adelante. Se optará por utilizar ciertos criterios para la

justificación de uso de este material ante las alternativas convencionales, el cemento y el acero. Anastaselos et al. (2009) define un primer nivel de evaluación para la selección de materiales de construcción, la cual consta en los siguientes cinco parámetros: propiedades físicas y térmicas, emisiones de gases de efecto invernadero, impacto ambiental, costo y energía incorporada. A continuación, se explicará los criterios y, se desarrollará la justificación de forma concisa el empleo del bambú en comparación a los materiales convencionales.

- **Propiedades físicas, mecánicas y térmicas**

Las propiedades físicas son cualquier característica medible del material como la masa, dimensiones, volumen, densidad, rugosidad, etc. Mientras que las propiedades mecánicas representan la capacidad de resistencia que posee el material ante cualquier esfuerzo. Asimismo, estas propiedades no son las únicas por considerarse, ya que estas pueden variar según las condiciones de exposición del material que depende de las propiedades térmicas, químicas, magnéticas, entre otras. Por un lado, con respecto a las propiedades de los materiales convencionales como el cemento o el acero, estos poseen buena resistencia, densidad y son versátiles para múltiples funciones. Por otro lado, el material en estudio, el bambú, se presenta como una opción estructural viable y hasta con ciertas características destacables. Según Davila (2018), el bambú puede resistir hasta seis veces más con respecto a su peso específico a comparación del acero. Asimismo, posee una buena resistencia a compresión, tracción, corte y flexión para resistencia estructural.

- **Emisiones de gases de efecto invernadero**

Los gases de efecto invernadero (GEI) son definidos como cualquier fluido en fase gaseosa que es capaz de absorber radiación infrarroja atrapando y reteniendo calor en la atmósfera (DiPietro, 2018). Asimismo, estos gases, en su mayoría, son los responsables del calentamiento global teniendo como principales actores al dióxido de carbono, gas metano,

dióxido nitroso, vapor de agua y ozono, ya que permanecen una mayor cantidad de tiempo en la atmósfera y contribuyen aproximadamente en un 90% al calentamiento global (Borduas & Donahue, 2018). Respecto a lo que se aborda en esta investigación, la industria de la construcción tiene un efecto directo y significativo sobre las emisiones de GEI y, por ende, sobre el calentamiento global en las distintas fases, ya sea en la producción, instalación o mantenimiento. En específico, la cantidad de dióxido de carbono producido por el acero es de 2.2-2.8 KgCO₂/Kg mientras que, para el bambú, objeto de la presente investigación, se presentan valores de 0.25 KgCO₂/Kg (Archila et al., 2018), lo cual refuerza el propósito de investigar este material con fines estructurales en la geotecnia al tener una baja tasa de emisión de dióxido de carbono, actor principal de lo GEI.

- **Energía incorporada**

La energía incorporada hace referencia a la energía consumida a lo largo de la toda la vida útil de un material, aquí se incluye la energía empleada durante la extracción de las materias, fabricación, transporte, instalación, mantenimiento, reparación e incluso, incorpora a la energía utilizada durante la fase de gestión del final de su vida útil (Hu & Milner, 2020). Asimismo, estos consumos energéticos se manifiestan en forma de GEI emitidos a la atmósfera, lo cual relaciona a la energía incorporada con el impacto ambiental que se origina a lo largo de la vida útil de un material. Por este motivo, la conclusión de Gonzales y García (2006) de reducir la energía a través de la selección de materiales en las fases iniciales de un proyecto es de suma importancia, ya que minimiza el impacto ambiental de cualquier producto terminado a lo largo de su funcionamiento. En este sentido, es de conocimiento extendido que la industria de la construcción es una de las más contribuyentes en este factor específico, ya que la energía consumida del cemento ronda entre los 1000-5300 MJ/Kg (Aguado, Josa & Cardim, 2004) y en el caso del acero está entre los 29-35 MJ/Kg (Archila et al., 2018). No obstante, los valores

generados por el bambú son entre 4-6 MJ/Kg (Archila et al., 2018), lo cual indica que el bambú es un material exponencialmente amigable con el medio ambiente.

- **Impacto ambiental**

Se origina cuando una actividad produce modificaciones en el medio ambiente natural. Estos impactos pueden ser positivos o negativos, los cuales pueden evidenciarse tanto a corto como a largo plazo y de forma directa o indirecta. Por un lado, como se mencionó antes, la industria concretera produce grandes emisiones de efecto invernadero y desechos tóxicos que repercuten en la atmósfera y en los ecosistemas, en especial a aquellas ciudades o zonas industriales, donde se produce contaminación del aire, de los recursos hídricos y del suelo. Sus repercusiones se manifiestan en la salud pública y destrucción de los ecosistemas. Por otro lado, se encuentra el bambú como una opción ecológica, pues es un material renovable y de fácil acceso que no necesitan inversión de grandes cantidades de energía para su producción ni produce emisiones contaminantes. En vez, este funciona como fijador de CO₂ y productor de oxígeno.

- **Costo**

Se evaluarán los costos iniciales que se asocian al ciclo de vida de los materiales para evaluar su factibilidad para uso en la construcción. En el caso del análisis de costos entre los materiales convencionales y el bambú, se expondrá lo desarrollado por van der Luegt, van den Dobbelsteen y Janssen (2006) donde evalúan los costos ambientales y los financieros del bambú, concreto y acero como parte de elementos de un punto. En el caso de los costos ambientales, los correspondientes al bambú son del 8 % en relación con el del acero y del 10% respecto al concreto. Por otro lado, los costos financieros demuestran que el acero es más atractivo que el bambú, debido a la corta vida útil de este material natural; no obstante, en los costos de adquisición el bambú es el que presenta el menor costo con relación a los demás. Por

ende, se concluye que el bambú es un material que puede ser competitivo con aquellos comúnmente usados, además de que, a diferencia del estudio anterior, en el caso de Perú, diversas zonas producen esa planta por lo que los costos totales se reducirían.



3 Micropilotes de concreto

Los micropilotes empleados en la industria están comúnmente conformados por los materiales que se citan a continuación bajo ciertos requerimientos de normativas extranjeras ya desarrolladas en torno a estos elementos. En la siguiente Figura 4, se muestran los tipos de micropilotes de concreto que existen en el mercado.

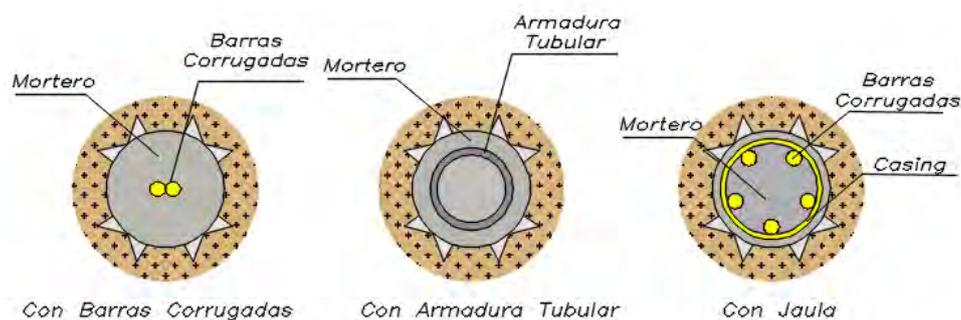


Figura 4. Tipos de Armadura de Micropilotes

Adaptado de “Micropilotes, un tipo de cimentación profunda”, por EADIC, 2016

3.1 Materiales

3.1.1 Armaduras.

La cantidad de armadura de refuerzo se emplea de acuerdo con las solicitaciones de fuerza cortante, flexión y rigidez necesaria para el control de deformaciones del elemento. Según la FHWA (2005), este refuerzo de acero puede consistir en una sola barra de acero, grupo de barras de refuerzo, *casing* de acero o por acero tubular laminado; no obstante, la Dirección General de Carreteras (2005) menciona que la armadura debe estar constituida, en específico, por un tubo de acero estructural y en caso sea requerido, con complementos de barras de acero.

3.1.2 Lechada de cemento.

La Dirección General de Carreteras (2005) define como lechada de cemento a la mezcla de cemento, agua y, en caso se requiera, aditivos, polvo mineral o arena de tamaño inferior a 2mm y cuyo peso total sea menor al empleado de cemento. Con respecto a este último material

mencionado, se emplean los de tipo I y II dependiendo de las condiciones de ejecución en obra. Asimismo, se deben asegurar las propiedades adecuadas de trabajabilidad, resistencia, estabilidad (control de exudación) y durabilidad mediante una correcta dosificación, pues en la búsqueda de mayor trabajabilidad se pueden perder las otras propiedades importantes de la lechada de cemento. Por ello, se recomienda una relación agua/cemento dentro del rango de 0.4 a 0.5 para asegurar que las propiedades antes mencionadas serán las óptimas según la siguiente Figura 5.

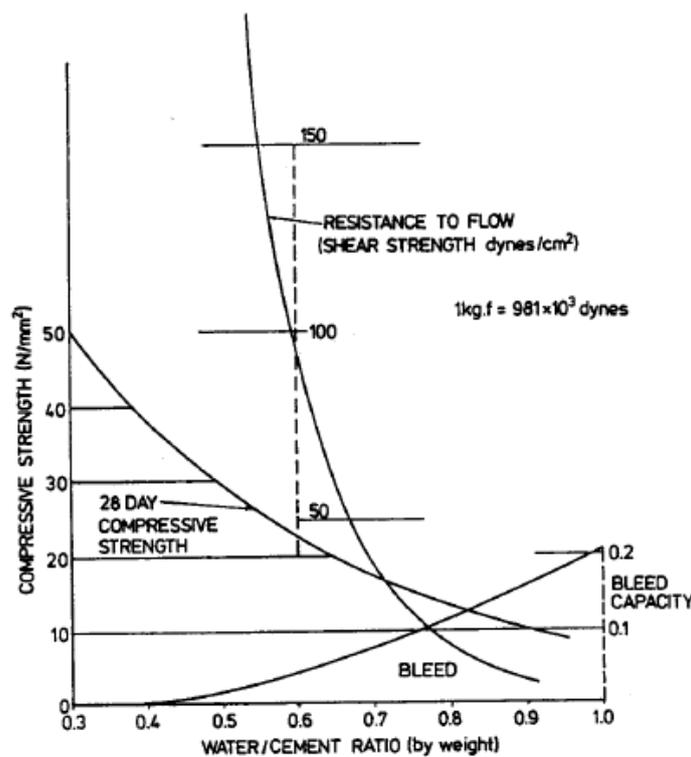


Figura 5. Efecto de la relación agua cemento en las propiedades de la lechada Adaptado de “Manual on Micropiles Design and Construction”, (FHWA, 2005)

Además, se requiere asegurar una resistencia compresión mínima que se encuentre en el rango de 28 a 35 MPa a partir de los 28 días, debido a que la lechada sirve para la transferencia de cargas entre la armadura y el terreno circundante (FHWA, 2005).

3.1.3 Mortero de cemento.

De acuerdo con las especificaciones de la Dirección General de Carreteras (2005), se considera mortero de cemento a aquellas mezclas que incluyen áridos que superan las limitaciones de las lechadas de cemento con respecto al tamaño máximo y/o de peso total. Estos morteros deben poseer una resistencia a la compresión mínima de 25 MPa a los 28 días de aplicado, presentar un contenido mínimo de cemento de 375 kg/m³ con una relación de agua/cemento menor a 0.6 en peso, y estar conformado por un árido limpio y seco con una distribución granulométrica de las siguientes características:

$$D_{85} \leq 4\text{mm}$$

$$D_{100} \leq 8\text{mm}$$

Donde:

D₈₅: Tamiz por el que pasa el 85% de la muestra

D₁₀₀: Tamiz por el que pasa el 100% de la muestra

3.2 Protección contra la corrosión

El sistema de protección que recomienda el MFOM (2005), para todas las armaduras de los micropilotes y los otros elementos metálicos empleados para la unión entre las barras, consiste en la disposición de un recubrimiento mínimo para la armadura en toda su longitud y sección, ya sea de lechada o mortero de cemento. Se muestran los recubrimientos mínimos recomendados según el tipo de esfuerzo al que esté sometido en la Tabla 1.

Tabla 1. *Recubrimientos mínimos*

	Lechada	Mortero
	(mm)	(mm)
Compresión	20	30
Tracción	25	35

Nota: Adaptado de “Guía para el Proyecto y la Ejecución de Micropilotes en Obras de Carretera”, por MFOM, 2003

En este sentido, se recomienda que los diámetros de excavación y los de la armadura tengan una diferencia entre ellos de al menos dos veces el recubrimiento que se les solicite. Asimismo, se debe considerar el efecto de la erosión en el recubrimiento, pues a lo largo de vida útil del micropilote este puede verse reducido en magnitud y ocasionar corrosión en las armaduras.

3.3 Fallo estructural de los micropilotes

En esta sección, se aborda las fórmulas para el cálculo de la resistencia estructural, las cuales se tomaron de la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera de la Dirección General de Carreteras (2005). Se seleccionó esta referencia, pues, en comparación a otras con respecto a diseño de micropilotes, establece un análisis más profundo tanto para compresión, tracción, flexión, cortante y hasta esfuerzos combinados.

3.3.1 Resistencia estructural del micropilote a compresión.

Para comprobar la resistencia a compresión, se debe comprobar la siguiente relación:

$$N_{c,Rd} \geq N_{c,Ed}$$

$$N_{c,Rd} = (0.85A_c f_{cd} + A_s f_{sd} + A_a f_y) \cdot \frac{R}{1.20 F_e}$$

Donde:

$N_{c,Rd}$: Resistencia estructural sometida a esfuerzos de compresión

$N_{c,Ed}$: Esfuerzos axiales de cálculo (compresión)

A_c : Sección neta de lechada o mortero, descontando armadura

f_{cd} : Resistencia de cálculo del mortero o lechada de cemento a compresión

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

f_{ck} : Resistencia característica del mortero o lechada a compresión simple, a los 28 días de edad

γ_c : Coeficiente parcial de seguridad para el mortero o lechada con un valor de 1.50

A_s : Sección total de las barras corrugadas de acero

f_{sd} : Resistencia de cálculo del acero de las armaduras corrugadas

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \leq 400MPa$$

f_{sk} : Límite elástico del acero de las armaduras corrugadas de la Tabla 2.2.

γ_s : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de las armaduras corrugadas con un valor de 1.15

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_a} \leq 400MPa$$

f_y : Límite elástico del acero de la armadura tubular de la Tabla 2.1.

γ_a : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular con un valor de 1.10

A_a : Sección de cálculo de la armadura tubular de acero

$$A_a = \frac{\pi}{4} [(de - 2re)^2 - di^2] Fu, c$$

de : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular

re : Reducción de espesor de la armadura por efecto de corrosión de la Tabla 2.4

di : Diámetro interior nominal de la armadura tubular

Fu, c : Coeficiente de minoración del área de la armadura tubular

R : Factor empírico de pandeo o coeficiente de reducción de la capacidad estructural del micropilote.

$$R = 1.07 - 0.027C_R \leq 1$$

C_R : Coeficiente adimensional cuyo valor se toma de la Tabla 3.6 de la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Dirección General de Carreteras, 2005)

F_e : Coeficiente de influencia de tipo de ejecución cuyo valor se toma de la Tabla 3.5 de la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Dirección General de Carreteras, 2005)

3.3.2 Resistencia estructural del micropilote a tracción.

Para comprobar la resistencia a tracción, se debe comprobar la siguiente relación:

$$N_{t,Rd} \geq N_{t,Ed}$$

$$N_{t,Rd} = (A_s f_{sd} + A_a f_{yd}) \cdot \frac{1}{1.10}$$

Donde:

$N_{t,Rd}$: Resistencia estructural sometida a esfuerzos de tracción

$N_{t,Ed}$: Esfuerzos axiales de cálculo (tracción)

A_s : Sección total de las barras corrugadas de acero

f_{sd} : Resistencia de cálculo del acero de las armaduras corrugadas

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

f_{sk} : Límite elástico del acero de las armaduras corrugadas de la Tabla 2.2 (Dirección General de Carreteras, 2005).

γ_s : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de las armaduras corrugadas con un valor de 1.15

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_a}$$

f_y : Límite elástico del acero de la armadura tubular de la Tabla 2.1 (Dirección General de Carreteras ,2005)

γ_a : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular con un valor de 1.10

A_a : Sección de cálculo de la armadura tubular de acero

$$A_a = \frac{\pi}{4} [(de - 2re)^2 - di^2] F_{u,t}$$

de : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular

re : Reducción de espesor de la armadura por efecto de corrosión de la Tabla 2.4 (Dirección General de Carreteras, 2005)

di : Diámetro interior nominal de la armadura tubular

$F_{u,t}$: Coeficiente de minoración del área de la armadura tubular cuyo valor se obtiene de la Tabla 3.7.

3.3.3 Resistencia estructural del micropilote a flexión.

Para comprobar la resistencia a flexión, se debe comprobar la siguiente relación:

$$M_{c,Rd} \geq M_{Ed}$$

Donde:

$M_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a flexión

M_{Ed} : Momento flector de cálculo

$$\text{Si } \frac{d_e - 2r_e}{t - r_e} \leq \frac{16450}{f_y}, Mc, Rd = W_{pl} \frac{f_y}{\gamma_a} F_u, f$$

$$\text{Si } \frac{16450}{f_y} < \frac{d_e - 2r_e}{t - r_e} \leq \frac{21150}{f_y}, Mc, Rd = W_{el} \frac{f_y}{\gamma_a} F_u, f$$

F_u, t : Coeficiente de minoración del área de la armadura tubular cuyo valor es 0.5 en caso no dispusiera de ensayos específicos

W_{pl} : Módulo plástico de la sección

W_{el} : Módulo elástico de la sección

$$W_{pl} = \frac{(d_e - 2r_e)^3 - d_i^3}{6}$$

$$W_{el} = \frac{\pi[(d_e - 2r_e)^4 - d_i^4]}{32(d_e - 2r_e)}$$

3.3.4 Resistencia estructural del micropilote a cortante.

Para comprobar la resistencia a cortante, se debe comprobar la siguiente relación

$$V_{c,Rd} \geq VEd$$

Donde:

$V_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección esfuerzo cortante. Se adoptará $V_{c,Rd} = V_{pl,Rd}$.

VEd : Esfuerzo cortante de cálculo

$$V_{pl,Rd} = \frac{2A_{pr}}{\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{f_y}{\gamma_a}$$

A_{pr} : Sección reducida de la armadura tubular de acero, calculada teniendo en cuenta la reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión

$$A_{pr} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_i^2]$$

3.3.5 Resistencia estructural esfuerzo combinados.

En el caso del micropilote, al estar sometido simultáneamente a esfuerzos axiales, flectores y cortantes, es necesario considerar la interacción entre esfuerzo. Por tanto, para estos esfuerzos combinados, se reduce el valor de resistencia. En caso, el esfuerzo cortante sea mayor a que la mitad de la resistencia plástica, se deberá considerar su efecto. El valor de resistencia flexión de la sección se le aplica un factor en caso la cortante sea mayor a la resistencia a cortante.

$$\text{Si } VEd \leq 0.5 V_{pl,Rd}, M_{v,Rd} = M_{c,Rd}$$

$$\text{Si } VEd > 0.5 V_{pl,Rd}, M_{v,Rd} = (1 - \rho) M_{c,Rd}$$

Donde:

$M_{v,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a flexión, teniendo en cuenta la interacción del esfuerzo cortante

$M_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a flexión (flexión pura)

ρ : Factor de reducción

$$\rho = \left(\frac{2VEd}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$$

4 Micropilotes de bambú

En este capítulo, se desarrolla las características de una especie de bambú en particular para que su uso como micropilote. Se comienza por remarcar la extensión global de esta planta y se procede con la investigación de la especie *Guadua Angustifolia*. Para la aplicación de esta última especie en la geotecnia, es necesario abordar su distribución geográfica en el Perú, anatomía, propiedades y posibles tratamientos para mejorar su durabilidad.

4.1 Bambú

El uso del bambú, en la industria constructiva, se caracteriza por su sustentabilidad y mínimo impacto ambiental en comparación con los materiales convencionales más usados, el concreto y el acero. Estos últimos consumen grandes cantidades de energía y requieren procesos centralizados que generan alta contaminación; por ello la necesidad de materiales ecológicos con bajo consumo de energía que conserven recursos naturales y reduzcan la polución (Ghavami & Marinho, 2003). Mediante varias investigaciones y construcciones, se ha comprobado que varias especies de bambú, alrededor del mundo, no solo cumplen con los requisitos ambientales, sino que poseen propiedades físico-mecánicas para uso estructural y hasta geotécnico.

El bambú o, también, conocido como pasto gigante, abarca bosques distribuidos en zonas tropicales y subtropicales en regiones de todo el mundo entre ellas se encuentra: Asia-Pacífico (67%), América (30%), y África (3%) (Huang, 2019). En la Figura 6, se observa la distribución de bosques de bambú en el mundo traslapada con un mapa de clasificación climática. Se puede observar que el Perú presenta gran cantidad de bosques distribuidos en todo su territorio que se desarrollan en diferentes hábitats.

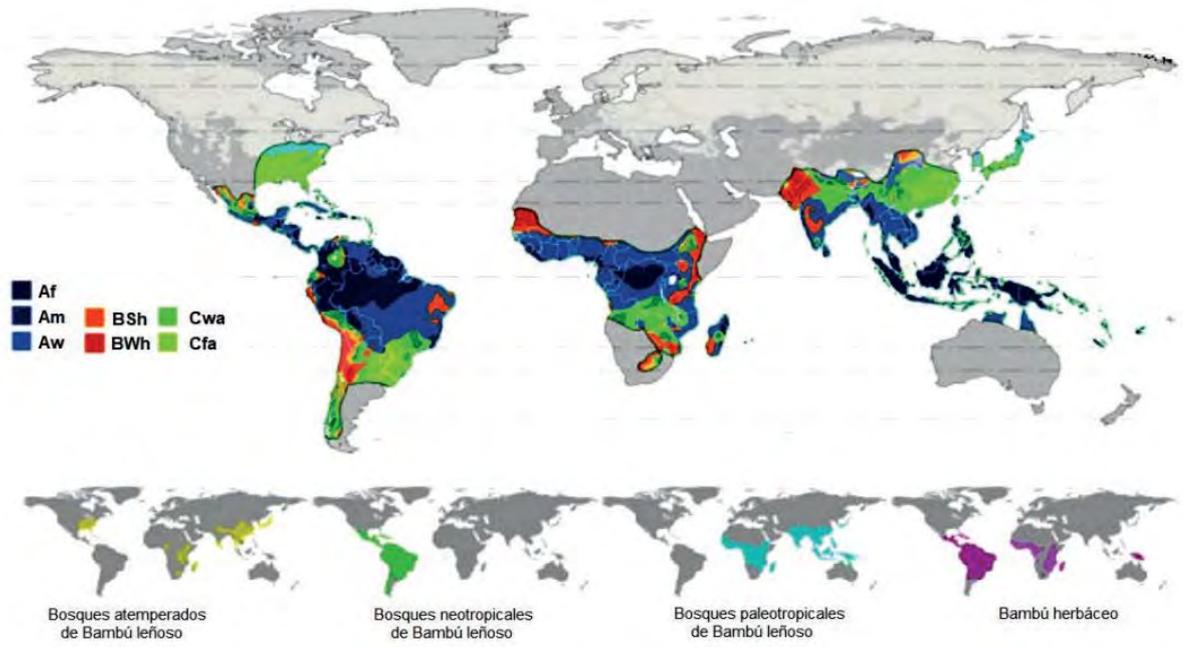


Figura 6. Distribución de bosques de bambú naturales según la zona climática.

Adaptado de “Application of Bamboo in Building Envelope”, por Huang, 2019

Nota: Af: Clima de selva tropical; Am: Clima monzón tropical; Aw: clima de sabana tropical; BSh: clima semiárido caliente; BWh; clima cálido desierto; Cwa/ Cfa: clima subtropical húmedo.

Se tiene alrededor de 1600 especies diferentes de bambú distribuidas alrededor del mundo (Añasco y Espinoza, 2015) y, en Latinoamérica, específicamente, se calcula un área cubierta de aproximadamente de 534,414 hectáreas (Lobovikov et al, 2007). Por consiguiente, debido a su predominancia en este continente y en el Perú como se muestra en la Figura 7, este trabajo involucra el estudio del bambú; en específico, la especie *Guadua Angustifolia*. Si bien existen otras especies predominantes con grandes facilidades de cultivo, esta especie abarca gran cantidad geográfica, especialmente en la costa norte, y alto potencial con respecto a sus características y estudio de estas (Añasco y Espinoza, 2015). Según SENCICO (2012), esta especie de bambú estructural se produce masivamente en las zonas de Piura, Cajamarca y San Martín; así como también en otros lugares como se muestra en la Figura 7, donde se presentan las diversas ubicaciones de producción del género *Guadua* y otras especies.



Figura 7. Zonas de producción de Bambú según especie en el Perú

Adaptado de “Norma E.100”, por SENCICO, 2012

En el Perú, su uso se ha extendido para mobiliario, utensilios, usos decorativos y viviendas, debido a que este material posee un rápido crecimiento, facilidad de cultivo, acceso y favorables propiedades. Su cultivo, para cualquier objetivo, significaría un beneficio para la sociedad peruana, pues este es un material ecológico y rentable con una cadena de producción que genera empleo. Asimismo, presenta un beneficio ambiental muy remarcable, ya que, en la espera de la madurez del bambú, este contribuiría a gran medida con la purificación del aire, control de erosiones, protector de cuencas hídricas, control de movimientos de tierra, entre otras ventajas que posicionan al bambú con un rol ecológico (Añasco y Espinoza, 2015).

El uso de esta planta, en la geotecnia en Perú, es aún limitado en comparación con otros países, los cuales han demostrado mediante ensayos, modelamientos y análisis su viabilidad, y

seguridad técnica. En los siguientes acápite, se abordan las propiedades del bambú *Guadua Angustifolia* para su posterior análisis como micropilotes.

4.2 Morfología del bambú

En general, la estructura base del bambú está compuesta por una caña segmentada en nudos y entrenudos, y ramificada en rizomas (raíces), tallos o culmos, ramas o riendas, hojas, flores y frutos (López, 2010). La parte primordial, para usos estructurales, es el tallo o culmo, el cual se caracteriza por ser un cilindro hueco entre los nudos y, en los nudos, se encuentra una sección circular completa llamada diafragma. En la Figura 8, se muestra el tallo de la guadua con las secciones señaladas del entrenudo y nudo.

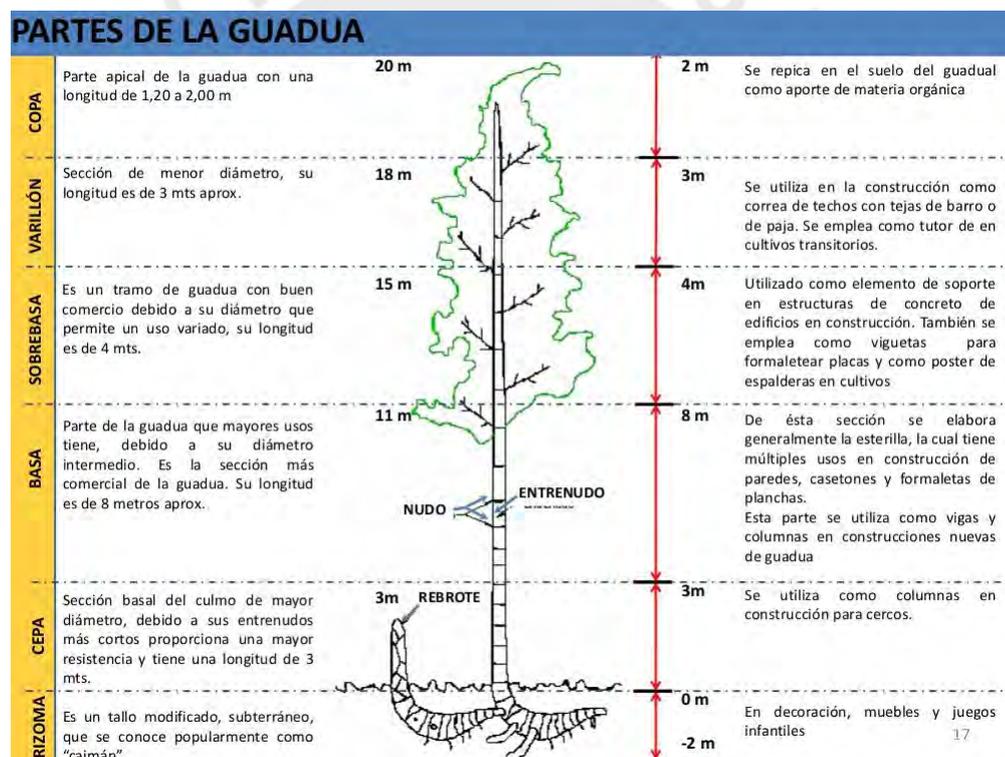


Figura 8. Partes de la *Guadua Angustifolia*

Adaptado de “LA GUADUA ANGUSTIFOLIA”, por Sabogal, 2013

Este tallo se subdivide en diferentes partes para sus diferentes usos. Según la descripción proporcionada por la Figura 8, las zonas más utilizadas para soporte estructural son la cepa, la basa y la sobrebasa. Esto se debe a que, en estas zonas, el diámetro y espesor del bambú es

mayor y, por ende, posee mayor resistencia. Con respecto a la altura del bambú, el bambú puede alcanzar una altura total entre 15 a 30 metros (Añasco y Espinoza, 2015). Las longitudes de las partes mencionadas en la Figura 8 son aproximadas y se desarrollan proporcionalmente según la altura del bambú.

4.3 Anatomía del bambú

Los culmos del bambú están formados anatómicamente por su corteza, parénquima, fibras y haces vasculares. El análisis de esta composición física se convierte en necesario para conocer y entender las propiedades físico-mecánicas de cada especie de bambú. Según Londoño et al. (2002), el culmo de la especie *Guadua* está formado por 40% de fibras (rango normal), 51% células de parénquima y 9% células conductoras. Su distribución se observa en la Figura 9 con un acercamiento en la sección transversal del culmo (a) y, en los haces vasculares (b), en la cual se puede observar una fibra.

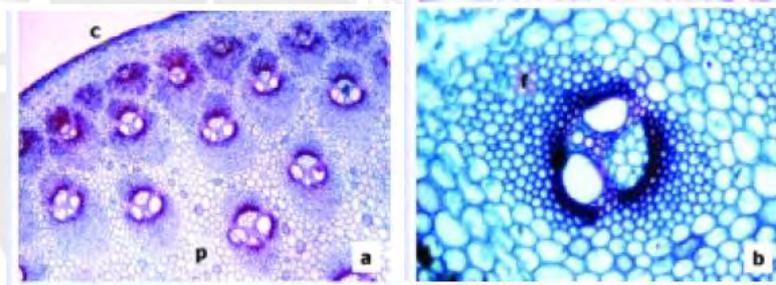


Figura 9. Estructura anatómica de *Guadua Angustifolia*

Adaptado de “Characterization of the anatomy of *Guadua Angustifolia*”, por Londoño et al., 2012

La importancia de estos elementos mencionados se debe a que los tejidos de conducción de sabia y las fibras sumergidas en parénquima integrados con los haces vasculares son los que otorgan la resistencia mecánica del culmo (Ghavami & Marinho, 2004). Por ello, según la cantidad tanto de las fibras como de haces vasculares, se puede estimar la resistencia de las distintas especies de bambú. Con respecto a la especie *Guadua Angustifolia*, Londoño et al. (2002) menciona que es un material ideal para usos estructurales por su gran porcentaje de

fibras que le permite una buena resistencia con relación a su peso, gran capacidad de absorber energía y excelente flexibilidad.

4.4 Propiedades mecánicas y elásticas

Debido a la importancia mundial del bambú y su variedad de especies por analizar, se han establecido diferentes estándares y normativas para determinar propiedades físicas y mecánicas, las cuales son siguientes:

- Norma ISO/22157-1:2004 *Bamboo – Determination of physical and mechanical properties - Part 1: Requirements*
- Norma ISO/22157-1:2004 *Bamboo – Determination of physical and mechanical properties - Part 2: Laboratory manual*
- ASTM 143-14 *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*
- Norma Técnica Colombiana NTC 5525:2007 *Método de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua Angustifolia Kunth*
- Manual Técnico Ecuatoriano MTE INEN 2:2004 *Manual de laboratorio sobre métodos de ensayo para la determinación de propiedades físicas y mecánicas del bambú*

En base a estos documentos, se pueden obtener resultados confiables y comparables para el uso del bambú con fines geotécnicos. En ese sentido, se debe mencionar que toda la bibliografía consultada ha realizado ensayos con alguno de los estándares antes mencionados, por lo que la recolección de datos de las propiedades físico-mecánicas son consideradas confiables.

4.4.1 Propiedades físicas.

Según Añasco y Espinoza (2015), la especie *Guadua Angustifolia* proveniente de Perú tiene una altura entre 15 y 30 metros, con diámetro variable entre 9 y 22 centímetros; no obstante, las dimensiones del bambú varían según su altura. La zona inferior, se caracteriza por poseer mayor diámetro y, a medida que se aleja de la base, este disminuye con tendencia a arquearse.

Asimismo, López et al. (2020) proporciona datos que sirven como orientación para conocer las dimensiones de las zonas estructurales de la *Guadua Angustifolia*, la cepa y la basa. Para la primera zona mencionada, el bambú presenta un diámetro exterior entre 11 a 13 cm con un espesor entre 1.5 a 2 cm, y, para la otra zona, un diámetro exterior entre 10 a 11 cm con espesor entre 1 a 1.5 cm. Estos valores servirán para determinar un diámetro y espesor uniforme para la idealización del micropilote de bambú como una sección tubular hueca.

➤ **Densidad (ρ)**

Para determinar la densidad del bambú, se emplea el teorema de Arquímedes, el cual consiste en sumergir el bambú en un volumen de agua conocido para luego, mediante el incremento del volumen, obtener la densidad al dividir el peso del bambú entre la variación del volumen de agua que generó al estar sumergido (Césare et al., 2019). Para la especie en estudio, Londoño et al. (2002) reporta una densidad relativa entre 0.5 y 0.6 g/cm³. Con respecto a la densidad seca del *Guadua Angustifolia*, Cely, Hernández y Gutiérrez (2012) obtienen resultados en la zona media de 0.710 g/cm³ en donde se considera el nudo y 0.797 g/cm³ sin nudo, y Huarcaya (2010) obtiene una densidad de 0.524 g/cm³. La densidad seca se obtiene entre la relación del peso seco y el volumen seco hallado con las mediciones de las probetas según lo establecido por la norma ISO/TC165N315 – ISO/DIS - 22157-2 (2004).

Sin embargo, estos valores de densidad no son uniformes y dependen proporcionalmente de la cantidad de fibras, la cual va en aumento desde la base hasta el tope del tallo. Esto se debe que hay una disminución del espesor del culmo, en donde el material empieza a tener menos parénquima y más fibras (Liese, 1998). Por ello, se relaciona la densidad con la cantidad de fibras y, por ende, también, con su resistencia mecánica. Con respecto a lo último, según Davila (2018), el incremento de fibras en la parte superior genera una mejor resistencia a flexión y compresión al bambú; sin embargo, con debilidad ante esfuerzos cortantes.

Según Wegst, Shercliff & Ashby (1993), las ventajas estructurales del bambú, respecto a otros materiales de ingeniería, se estudian en términos de densidad, y módulo de elasticidad, mostrado en la Figura 10. Se observa en la figura la línea $C, C = E^{1/2}/\rho$, una ecuación compuesta por E y ρ donde los materiales con mejor comportamiento están por encima de esta línea y aquellos con comportamiento deficiente por debajo. Es así que se evidencia que parte de las especies de bambú poseen cierta ventaja con respecto al peso específico en comparación al concreto y acero.

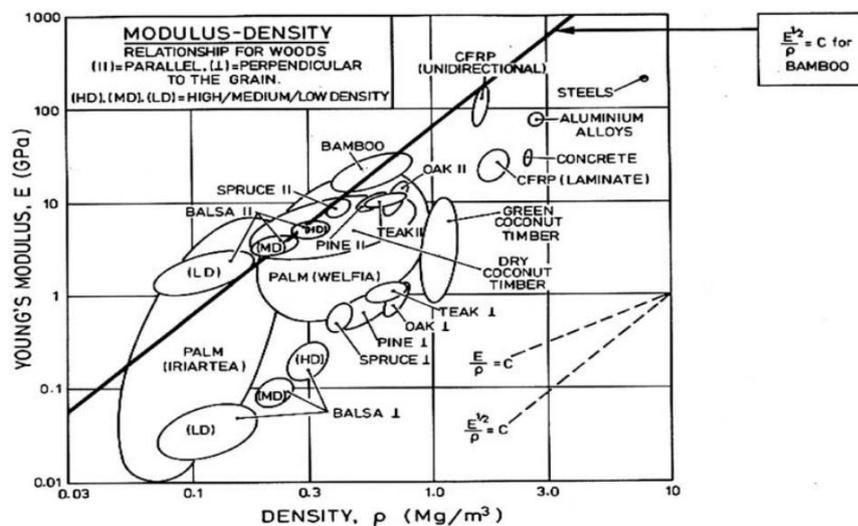


Figura 10. Comparación comportamiento bambú con otros materiales

Adaptado de “The structure and properties of bamboo as an engineering material”, por Wegst, Shercliff and Ashby, 1993

➤ Contenido de humedad

El contenido de humedad es la cantidad de agua con respecto a su peso expresado en porcentaje. La humedad del bambú puede variar entre un rango muy amplio por distintos factores según su temporada de cosecha, la cual puede duplicarse si no se realiza el corte de la planta en una temporada seca (Liese, 1998). Asimismo, cuando el bambú es joven, antes de los tres años, tiene alto contenido de humedad que al secarse esta propenso a rajaduras,

deformaciones y ataque por insectos (Takeuchi, 2014). Por estas razones, es recomendable seleccionar una edad y temporada de cosecha adecuada.

Asimismo, esta característica es importante, pues se ha demostrado que la humedad afecta las propiedades mecánicas del bambú (Dávila, 2018). Una investigación del *Guadua Angustifolia*, en Colombia, demostró que la resistencia en tensión no es alterada cuando la humedad se encuentra entre rangos de la humedad de equilibrio del material (12-18.5%) y el punto de saturación de 20% (Gutiérrez & Takeuchi, 2014). En caso los valores estén fuera de este rango, se pueden presentar valores menores de resistencia debido a la degradación de las fibras. Asimismo, en la Norma E.100, se menciona que el bambú estructural debe corresponder al contenido de la humedad de equilibrio del lugar (SENCICO, 2012).

Una recomendación realizada por Ghavami es que, para conservar el bambú, su contenido de humedad debe ser menor a 15% y, también, se tiene como beneficio mejores propiedades mecánicas y mejor penetración del preservante para un posterior tratamiento.

➤ **Contracción**

Al ser un material anisotrópico, es decir, con comportamientos diferentes según la dirección de análisis, el bambú presenta variación en sus dimensiones en la dirección radial, axial, tangencial y volumétrica bajo diferentes condiciones de su entorno, y según su edad. Cuando se empieza a perder la humedad, la contracción comienza y conlleva aumentos en su resistencia (Ghavami & Marinho, 2004). Para la dirección radial de la especie *Guadua*, se presentan contracciones entre 5 a 15% que resultan en un aumento de resistencia conforme vaya madurando la planta (Ángeles, 2014). Por ello, es aconsejable el uso de bambús maduros con porcentajes de contracción menores; sin embargo, Villareal et al. (2020) concluyen que, para usos excepcionales del *Guadua Angustifolia*, es recomendable realizar tratamientos y modificaciones para el manejo de contracción, pues presentan valores aun relativamente altos.

En resumen, el bambú *Guadua Angustifolia* es un material con buena resistencia para su bajo peso, el cual presenta un diámetro y resistencia variable según su altura y densidad. Con respecto a su resistencia, esta puede ser influenciada por su contenido de humedad y se recomienda que este valor sea bajo para no afectar a las fibras, las cuales son aquellas que proporcionan la resistencia. Asimismo, para controlar su humedad y contracción, es requerido algún tratamiento con preservante que permitan controlar estos dos factores con el fin de mejorar su durabilidad.

4.4.2 Propiedades mecánicas.

Las siguientes tablas realizadas muestran resultados de diversos autores del bambú *Guadua Angustifolia* bajo esfuerzos de compresión, tracción, flexión y cortante. Los valores obtenidos son valores medios, pues, debido a la variación geométrica y anatómica, existe mucha dispersión de resistencias tanto longitudinal como transversalmente.

Tabla 2. *Resultados de resistencia a compresión de diversos autores*

Autores	RM(MPa)	MOE(GPa)
Camacho y Paez (2002)	27.46	x
Uribe y Duran (2002)	49.46	x
López & Trujillo (2002)	47.66	x
Prada y Zambrano (2003)	41.05	x
Ghavami & Marinho (2004)	29.48	12.58
González (2007)	56.21	17.86
Capera & Erazo (2012)	28.49	11.98
Estacio (2013)	30.96	x
Córdova (2014)	39.58	16.55
Ángeles (2014)	10.01	29.56
Hernao & Rodríguez (2015)	24.94	x
Huarcaya (2010)	37.08	x
Gutiérrez (2010)	45.80	x
Estacio (2013)	30.96	x
Carpio & Vásquez (2016)	35.90	x
Lovatón (2020)	30.98	7.66

*RM: Resistencia Máxima

*MOE: Módulo de elasticidad

Tabla 3. Resultados a flexión de diversos autores

Autores	MOR(MPa)	MOE(GPa)
López & Trujillo (2002)	112.97	x
Córdova (2014)	50.11	10.53
Huarcaya (2010)	21.77	5.88
Estacio (2013)	36.76	7.59
Ángeles (2014)	61.09	44.88
Lovaton (2020)	26.01	1.8

*MOR: Módulo de rotura
*MOE: Módulo de elasticidad

Tabla 4. Resultados a tracción de diversos autores

Autores	RM(MPa)	MOE(GPa)
López & Trujillo (2002)	53.49	x
Janssen (2002)	148.40	x
Camacho & Paez (2002)	352.50	x
Ghavami & Marinho (2004)	86.96	15.11
Castrillo & Malaver (2004)	91.87	x
Ciro, Osorio & Velez (2005)	190.70	x
Córdova (2014)	121.80	10.50
Huarcaya (2010)	108.99	x
Gutiérrez (2010)	107.69	x
Ángeles (2014)	135.84	10.01
Carpio & Vásquez (2016)	18.50	x
Lovatón (2020)	120.82	27.92

*RM: Resistencia Máxima
*MOE: Módulo de elasticidad

Tabla 5. Resultados a cortante de diversos autores

Autores	RM(MPa)
López & Cheatle (2002)	6.87
López & Trujillo (2002)	6.87
Castrillon & Malayer (2004)	7.84
Ghavami & Marinho (2004)	2.02
Córdova (2014)	7.59
Hernao & Rodríguez (2015)	10.91
Huarcaya (2010)	8.18

Autores	RM(MPa)
Gutiérrez (2010)	6.40
Ángeles (2014)	5.05
Carpio & Vásquez (2016)	7.50
Estacio (2013)	36.76
Lovatón (2020)	8.5

*RM: Resistencia Máxima

Se observan muchas discrepancias entre los valores de resistencia de los autores, ya que las condiciones de ensayo, cantidad de muestras, procedimientos y, principalmente, procedencia del bambú son diferentes. La recopilación de datos se centró en países cercanos a Perú como Colombia, Ecuador y Brasil. Además, en las tablas anteriores, se resaltó los autores quienes realizaron ensayos del Guadua Angustifolia provenientes de Perú, ubicados en San Martín, Cajamarca o Amazonas.

4.5 Durabilidad

El bambú, al ser un material natural, sufre cambios en sus propiedades al ser cortado producto de condiciones externas o propia degradación biológica. Según Liese y Kohl (2015), la durabilidad del bambú sin tratar es muy baja con valores menores de un año para aquellos bambús sin ninguno tipo de cuidados externos o en contacto con el suelo. Mientras que otros autores mencionan que esta característica comprende entre uno a tres años (Peña, 2008). Los principales factores que perjudican la durabilidad del bambú son los siguientes: su especie, edad y contenido de agua o almidón.

4.6 Condiciones y recomendaciones para el uso del bambú

Tal como se menciona, en el inciso anterior, el bambú es un material con poca durabilidad; por este motivo, es primordial conocer las óptimas condiciones para su crecimiento, y preservación de sus características físicas y mecánicas. En consecuencia, una serie de procedimientos o tratamientos son necesarios de acuerdo con el nivel de exposición,

los cuales deben ser controlados tanto en la fase de cultivo como en la postcosecha. A continuación, se abordan aquellos aspectos necesarios para las dos fases determinadas.

4.6.1 Cultivo y cosecha del bambú.

➤ Clima, topografía y temperatura

Los bambús se pueden desarrollar en múltiples ecosistemas desde tropicales hasta áridos, pero presentan diferentes requerimientos, y propiedades físicas y mecánicas. Según Añazco y Rojas (2015), el desarrollo óptimo para las dimensiones y altura del *Guadua Angustifolia* se consigue bajo las siguientes condiciones:

- Altitud: 400- 1200 m.s.n.m.
- Temperatura: 18 – 26 °C
- Precipitación: mayor a los 1200 mm
- Humedad relativa: 80%
- Topografía: plana o con pendiente no mayor al 5%

Con respecto al último punto, Dávila (2018) menciona que los bambús pueden cultivarse en suelos inclinados y, debido a las cargas gravitacionales, estos presentarían en ventaja mayor resistencia al crecer de esta manera. Asimismo, Huarcaya (2010) expone que una siembra a mayor altitud produce especies de *Guadua* más resistentes a pesar de un lento crecimiento. Por último, acerca de las condiciones del suelo, su desarrollo es aplicable en suelos arenoso-limoso, arcillosos, suelos profundos, bien drenados y, en especial, fértiles (Ángeles, 2014)

➤ Edad del bambú

Se debe tener cuidado en la selección de cosecha el bambú, pues, a pesar de que este alcance su altura definitiva rápidamente, en su primer año, aún no desarrolla buena capacidad portante, pues su espesor no es el adecuado. Según Trujillo (2016), la elasticidad, densidad,

contenido de humedad y resistencia varían según la edad y llegan a un valor pico para después disminuir. Diversos autores mencionan que la edad ideal para la cosecha y posterior uso estructural se encuentra entre los tres y cinco años con respecto a la especie *Guadua*, pues sus propiedades físicas y mecánicas alcanzan valores establecidos y con suficiente consistencia.

➤ **Cosecha**

Se recomienda realizar el corte de las cañas al final de la tarde o en las primeras horas de la mañana, pues, en este horario, la planta contiene mayor cantidad de agua y almidón (Añazco & Rojas, 2015). De esta manera, los procedimientos posteriores se podrán realizar de manera más efectiva y rápida, pues se reducirá de cierta manera la fuente de nutrientes de otros seres vivos y se aligerará el peso. En suma, para evitar excesos de agua, sería favorable realizar la cosecha de estas plantas en periodos secos justo después de terminar la estación lluviosa (Liese & Kohl, 2015). Además, se debe tener presente realizar el corte del tallo a una altura de 10 o 15 centímetros desde el suelo y justo encima del nudo (NMBA, 2006).

4.6.2 Tratamientos.

Posterior a su corte, la caña de bambú está muy latente a dañarse ante ataques de insectos o hongos, la luz solar o humedad. Por ello, para prevenir posibles alteraciones y preservar el bambú, son aplicables dos grupos de tratamientos: tratamientos no químicos y químicos. Se recalca que para cualquier aplicación se requiere un control de calidad, duración, temperatura y dosificación de las soluciones a usar, ya que excesos pueden ocasionar el efecto contrario requerido. Asimismo, según las condiciones y el tiempo de exposición a que el bambú sea expuesto, se selecciona el tratamiento adecuado y su preservante correspondiente.

4.6.2.1 Tratamientos no químicos.

Existen variedad de tratamientos sin químicos después del corte como el curado en la mata, por inmersión en agua o por calentamiento. Asimismo, para reducir el contenido de

humedad, se requiere un proceso de secado, el cual se puede realizar de manera natural colocándolos de manera horizontal al aire o de manera artificial con un fuego abierto, estufas o cámaras cerradas. Con respecto a este procedimiento, es muy importante un especial cuidado, pues el bambú se puede agrietar, rajar, deformar y hasta colapsar (Hidalgo, 1974). Estos tratamientos son efectivos para el aumento de la durabilidad; sin embargo, ninguno confirma por sí solo la conservación del bambú ante interacciones con el suelo, pues su uso en la geotecnia no es usual.

4.6.2.2 *Tratamientos químicos.*

Se requiere de tratamientos químicos para la aumentar la durabilidad del bambú contra insectos y hongos de manera más efectiva, lo cual permite un mejor rendimiento del material y mayor garantía de su preservación. Los conservantes pueden ser de tipo hidrosolubles, aceitosos, resinas sintéticas o ácidos orgánicos que se aplican a bambú en su estado natural o seco. Según la NMBA (2006), los tratamientos para efectos a corto plazo se realizan mediante inmersión del bambú o por aplicación externa. Como se mencionó, estos no son de larga duración y tienen ciertas limitaciones con respecto a su exposición, pues no se absorbe gran cantidad del preservante y, con el tiempo, este se disuelve por distintos factores externos como la lluvia o el viento.

Por otro lado, para una mejor durabilidad del preservante dentro del bambú, el mismo autor mencionado recomienda los siguientes métodos: tratamiento de presión, tratamientos fríos o calor y el método Boucherie. Se presenta el método Boucherie, el cual consiste en el drenaje del preservante dentro del bambú para su absorción con ayuda de la gravedad, o un sistema mecánico sencillo con o sin presión. Este método es ambientalmente amigable, accesible en Perú, y confiable, pues el preservante permanece dentro del culmo fresco (Añazco y Espinoza, 2015). Otra aplicación muy efectiva aplicada al bambú seco es el tratamiento por presión; sin embargo, este requiere de instalaciones especiales y su costo es considerablemente

alto (Añazco y Espinoza, 2015). Según la NMBA, este último método es el más recomendable, pues aseguran una impregnación del preservante dentro del bambú, ya que se realiza la evacuación del aire dentro del culmo y, por el aumento de presión del cilindro presurizado, el preservante se impregna de manera más profunda en el bambú (NMBA, 2006).

Con respecto al tratamiento por caliente y frío, es el principio de inmersión en el cual se introduce el bambú seco en una solución caliente y posteriormente se deja enfriar; ambos procesos permiten la introducción del preservantes. Por ejemplo, un proceso recomendado según Liese y Koh (2015) para grandes cantidades de bambú, es aumentar la temperatura del bambú sumergido en aceite a 90 °C entre dos y tres horas, y después dejarlos enfriar completamente y retirarlo de la solución para finalmente obtener un bambú con posibilidad de uso para estructura en contacto con barro.

Debido a que esta investigación se centra en el uso de este material bajo una específica exposición, entre los posibles preservantes a usar para contacto con el suelo, Schroder (s.f.), Hidalgo (1974), y NMBA (2006) proponen los siguientes preservantes con las siguientes relaciones de los químicos y recomendaciones de concentración para una exposición con el suelo. Asimismo, la NMBA (2006) establece ciertas recomendaciones para la selección del método a utilizar para su aplicación. Estas propuestas, para un bambú expuesto ante el suelo, se encuentran en la Tabla 6 de manera resumida.

Tabla 6 Preservantes para tratamientos químicos

Preservantes	Fórmula	Ratio	Concentración recomendada	Método
Bórax de Ácido Bórico	Ácido bórico/ Bórax	1:1.5	4-5%	-
	Ácido bórico/Bórax/ Dicromato de sodio	2:2:0.5		-
Arseniato de cobre y cromo (CCA)	Pentóxido de Arsénico/ Sulfato de Cobre/ Dicromato de sodio	1:3:4	8-10%	Presión
Bromato de cobre y cromo (CCB)	Ácido bórico/Sulfato de cobre/Dicromato de sodio	1.5:3:4	8-10%	Presión
Cobre Cromo Acético	Sulfato de cobre/Dicromato de sodio/Ácido Acético	5.6:5.6:0.25	8%	-
Creosota	-	Listo para usar	8%	Frio y caliente
Sales de Boliden	-	-	8%	-

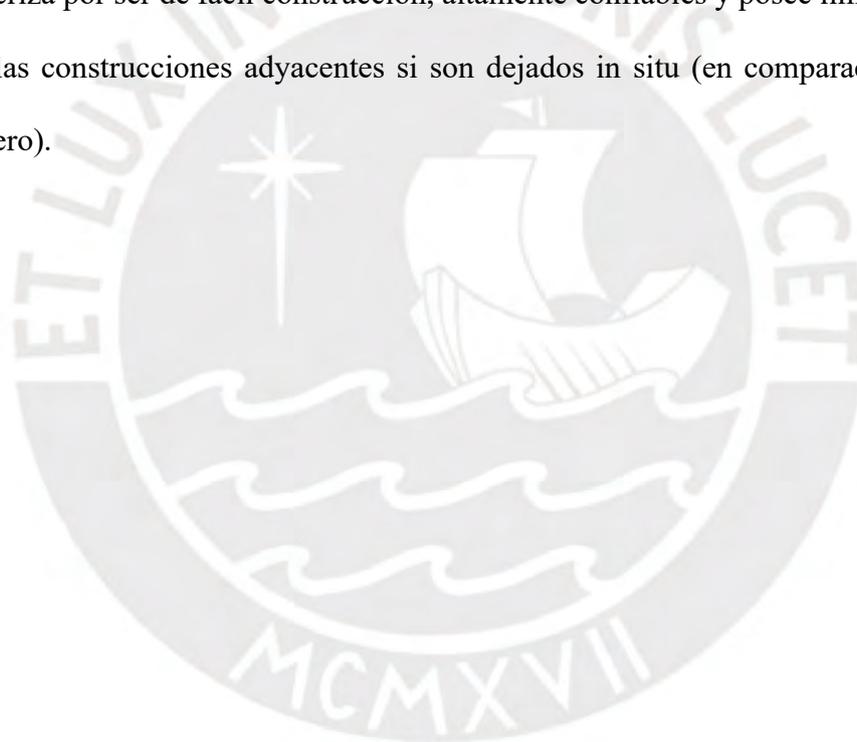
Nota: Basado en Schroder (s.f.), Hidalgo (1974), y NMBA (2006)

Una desventaja remarcable es que los químicos mencionados son altamente tóxicos y su exposición ante estos es peligrosa; por tanto, se requiere precauciones en el proceso de aplicación. Sin embargo, un estudio realizado por Bui, Grillet y Tran (2017) se enfocó en la indagación de aquellos tratamientos de bajo impacto ambiental con ayuda de otros tipos de aceite (de lino, de girasol o sin aceite) y diferentes controles de temperatura. Como resultado, el artículo concluyó que el mejor comportamiento resulta de un calentado del bambú sin aceite a 180°C por 1 o 2 horas como máximo y, luego, se enfrían en aceite de girasol. Su tratamiento no solo mejoró la durabilidad, sino que aumento su resistencia a compresión.

En resumen, para una aplicación geotécnica, se requiere un tratamiento químico que pueda preservar la integridad del bambú, pues está latente a sufrir ataques por insectos y hongo debido a su exposición al suelo y humedad. Existe gran variedad de tratamientos y preservantes que podrían aumentar la durabilidad del bambú entre 10 a 15 años; sin embargo, los mejores tratamientos, como el de presión, son de alto costo y requieren de equipo especializado,

mientras que el método Boucherie, el cual, también, posee una gran efectividad en la aplicación del preservante, no presenta un costo muy elevado además de estar disponible en Perú.

Cabe recalcar que, en general, hay una falta de estudios y ensayos de los tratamientos para su uso geotécnico en condiciones enterradas y, en específico, de la especie investigada. Sin embargo, a pesar de su desventaja con respecto a su durabilidad, este material se presenta como una alternativa para soluciones geotécnicas de carácter temporal. Esto se respalda con un antecedente en el cual se aplicó un diseño estructural de retención de tierras de manera temporal con Moso bambús. Según Dai et al. (2017), el bambú es aplicable a estos casos temporales, ya que se caracteriza por ser de fácil construcción, altamente confiables y posee limitados efectos adversos en las construcciones adyacentes si son dejados in situ (en comparación a un soil nailing de acero).



5 Métodos de análisis

En este capítulo, se abordan los análisis numéricos correspondientes para determinar la estabilización de taludes, los cuales se modelan en softwares y se evalúan con diferentes métodos. El modelo debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad como la geometría del talud, parámetros geológicos, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos entre otros (Suárez, 1998). En los últimos años, se ha extendido el uso del método de elementos finitos debido a su facilidad de resolución de problemas de alta complejidad que permite una mejor evaluación de un talud. La finalidad de emplear este método es obtener un factor de seguridad y esfuerzos en los elementos más precisos. A continuación, se explicará este último método mencionado, los modelos matemáticos que emplea y el enfoque para su aplicación en geotecnia.

5.1 Método de elementos finitos

El método de elementos finitos es una técnica computacional que se usa para obtener soluciones aproximadas de problemas de valores límite en ingeniería que se viene usando ampliamente para analizar problemas geotécnicos, debido a que posee ventajas como la poca necesidad de asunciones sobre las superficies de falla, manejo ilimitado de las condiciones de contorno, así como de su correcta aplicación en problemas de diseño complejos que involucran a la interacción suelo-estructura (Afiri & Gaby, 2018).

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se entiende que los métodos de elementos finitos son técnicas computacionales que permiten obtener una solución numérica de una ecuación diferencial definida sobre un dominio que se divide en múltiples zonas o regiones pequeñas conocidas como elementos, los cuales están parametrizados por puntos, más conocidos, como nodos, que conforman al elemento en sus distintos límites de las divisiones generadas en el dominio y, a la vez, los conectan. Estos métodos encuentran una solución exacta en la cual se resuelven las ecuaciones diferenciales en los nodos, mientras que, en aquellos puntos que no

son nodos, los puntos de integración, solo se resuelve de forma aproximada mediante una interpolación.

Tal y como se indica líneas arriba, un dominio o medio continuo es la base sobre la que trabajan los métodos de elementos finitos y es ahí donde radica su importancia; por tal motivo, este se definirá para un mejor entendimiento. Asimismo, se abordará el concepto de elemento y nodos, ya que están relacionado con el medio continuo y a nivel general, con toda la discretización de los elementos.

Un medio continuo, según Oliver & Agelet De Saracibar (2000), se define como un conjunto infinito de partículas, las cuales pueden formar parte de un sólido, fluido o gas, que se estudia sin considerar posibles discontinuidades existentes en el nivel atómico o molecular. De esta manera, se admite que no haya discontinuidades entre las partículas y, cuya descripción del medio y de sus propiedades, se pueden realizar mediante funciones. Este concepto es de suma importancia, pues permite considerar al suelo como un medio continuo que cuenta con partículas muy pequeñas respecto a un volumen.

Asimismo, estos medios continuos para ser analizados son divididos en pequeñas regiones, denominados elementos finitos, los cuales poseen las mismas propiedades del sólido continuo que integraban en un primer momento, además de estar conectados unos con otros mediante sus propios lados y a través de varios nodos.

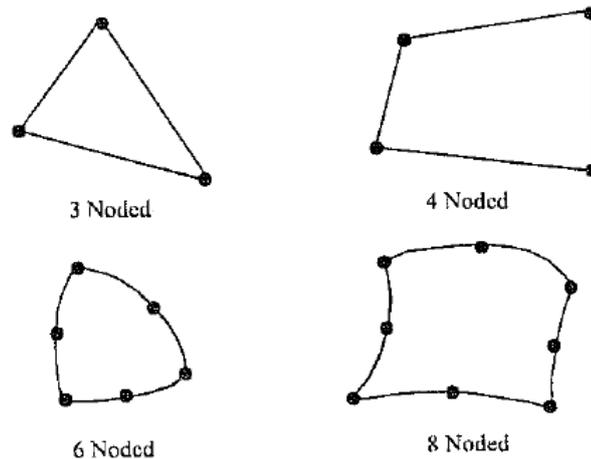


Figura 11. Elementos típicos 2D

Adaptado de “Finite element analysis in geotechnical engineering”, por Potts and Zdravkovic, 1999

Los elementos finitos comúnmente empleados para problemas de dos dimensiones (2D) son de forma triangular o cuadrangular, como se muestra en la Figura 11, los cuales poseen una geometría definida gracias a la ubicación de los nodos, pues, para los elementos cuyos lados son rectos, los nodos, usualmente, se ubican en las esquinas. Mientras que aquellos que cuentan con lados curvos, se deben insertar nodos adicionales; generalmente, estos extras se ubican en el punto medio de cada lado curvo (Potts & Zdravkovic, 1999).

5.1.1 Modelos constitutivos del suelo.

En este apartado se abarcan los modelos constitutivos a emplear en el modelamiento de los casos de estudio. Estos modelos constan de ecuaciones constitutivas que permiten definir a los materiales. En ese sentido, los modelos elegidos son aquellos que se ajustan mejor al comportamiento de los elementos con los que se trabajan por lo que se mencionan los siguientes:

5.1.1.1 Modelo Elástico.

Es un modelo lineal donde la tensión es proporcional a la deformación, además de tener como constantes de proporcionalidad al módulo de elasticidad (E) y la relación de Poisson (ν). Este modelo es el adecuado para para la idealización de estructuras de concreto armado o acero.

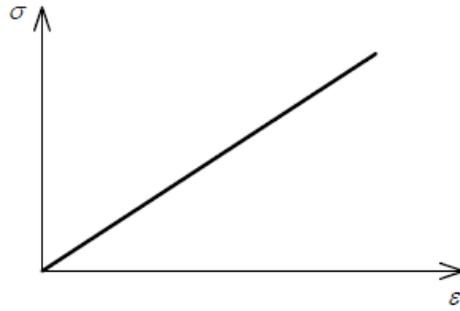


Figura 12. Modelo constitutivo elástico
Adaptado de “Chapter 4: Mesh”, por Midas GTS NX, s/f

5.1.1.2 Modelo Mohr Coulomb.

Es un modelo elastoplástico con una aproximación de primer orden al comportamiento no lineal del suelo. Este modelo relaciona la ley de Hooke con el criterio de falla Mohr-Coulomb. Es importante mencionar que este modelo no representa un comportamiento elastoplástico progresivo, sino uno que involucra a la elasticidad perfecta y la plasticidad como se muestra en la Figura 13; esta última se asocia al desarrollo de deformaciones plásticas o irreversibles. Asimismo, este modelo requiere de cinco parámetros; tres de estos, la cohesión, ángulo de resistencia la corte y el ángulo de dilatación, controlan el comportamiento plástico, mientras que los dos restantes, el módulo de Young y la relación de Poisson, controlan el comportamiento elástico.

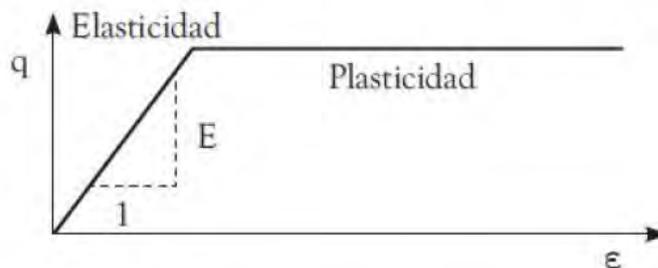


Figura 13. Modelo elastoplástico Mohr Coulomb

Adaptado de “Análisis de modelos constitutivos para representar el comportamiento de los suelos del Sector las Orquideas de la Ciudad de Cuenca, Ecuador”, por Vintimilla y Avila, 2016

5.1.1.3 Modelo Interface.

Este modelo tiene la finalidad de simular el comportamiento del límite que existe entre materiales iguales o diferentes, pues se emplea para simular interfaces suelo-estructura, como la fricción entre pilotes y suelo. Está basado en la ley de fricción de Coulomb y sigue el supuesto de que la fuerza de fricción de una interfaz es proporcional al coeficiente de fricción y las fuerzas de confinamiento perpendiculares a la dirección normal que actúan sobre la interfaz; no obstante, la no linealidad de la interfaz puede calcularse mediante una fórmula empírica que emplea un factor de reducción de fuerza (R) y un espesor virtual (tv) (Midas GTS NX, s/f). En el caso de Midas GTS NX, una manera de definir la interfaz es mediante la herramienta “Wizard” que se define por medio de dos parámetros (tv, R). Se muestra el diagrama de este modelo constitutivo en la Figura 14 para obtener los parámetros de la interfaz.

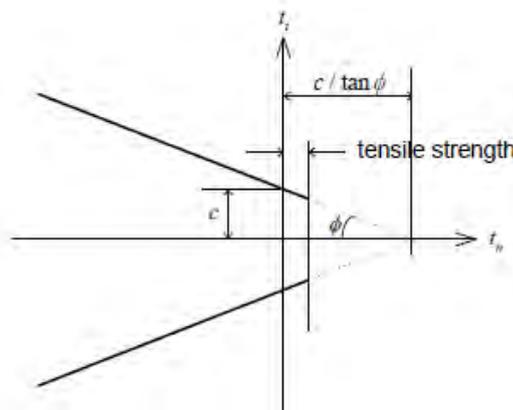


Figura 14. Modelo constitutivo Interface
Adaptado de “Chapter 4: Mesh”, por Midas GTS NX, s/f

5.1.2 Método de reducción de Esfuerzo Cortante (SSR).

El método de elementos finitos, tal como se mencionó al inicio de la sección, es altamente aplicado a la estabilidad de taludes. En este sentido, uno de los enfoques más aplicados, en el método, para la obtención del factor de seguridad es la reducción de esfuerzo cortante.

En primer lugar, el factor de seguridad es un elemento de referencia para evaluar la estabilidad de un talud (López Jimeno, 2000), el cual considera a los valores mayores a la unidad como taludes estables y mientras sean mayores, menor será la posibilidad de rotura o falla. En consecuencia, los distintos valores de factor de seguridad recomendados por las distintas normas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7. Factores de seguridad para la estabilización de taludes

Normativa	Talud temporal		Talud permanente	
	Estática	Sísmica	Estática	Sísmica
AASHTO LRFD	1.33-1.53	1.1	1.33-1.53	1.1
NAVFAC-DM7	1.3-1.25	1.2-1.15	1.5	1.2-1.15
FHWA-NHI-11-032	-	1.1	-	1.1
CE.020	-	-	1.5	1.25

Nota. Adaptado de “Estabilidad de Talud: Conceptos Básicos, Parámetros de Diseño y Método de Cálculo”, por Valiente et al., 2015

En segundo lugar, el método de reducción de esfuerzo cortante consta en la reducción de los parámetros hasta que ocurra la falla en el talud o el colapso, lo cual resulta en el factor de seguridad definido como la relación de los parámetros de resistencias reales entre los parámetros críticos (Shiferaw, 2021).

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_r} = \frac{C}{C_r}$$

Donde:

ϕ : Angulo de fricción actual del suelo

C: Cohesión actual del suelo

ϕ_r : Angulo de fricción reducido del suelo

C: Cohesión reducida del suelo

La aplicación de esta técnica presenta una ventaja principal como la visualización del proceso de falla en forma progresiva. Por otro lado, sus desventajas radican en la definición de la no convergencia, es decir, el momento en el que el talud colapsa y se detiene el cálculo, ya que se define muchas veces bajo criterios matemáticos y no sobre la estabilidad física del talud (Monte, 2020).

6 Modelamiento de alternativas

6.1 Definición de casos de estudio

En la presente tesis, se analizan seis casos con geometría distinta, los cuales están compuestos de una arcilla de media compactación cuyos parámetros geotécnicos se muestran en la siguiente tabla elaborada.

Tabla 8. *Parámetros del suelo*

Parámetros del suelo	
Módulo de elasticidad (KN/m ²)	40000
Peso unitario (KN/m ³)	20
Cohesión (KN/m ²)	15
Ángulo de fricción (°)	18
Módulo de Poisson	0.35

Los casos de estudio fueron seleccionados con el objetivo de visualizar a partir de qué altura los micropilotes de bambú no brinden un refuerzo óptimo para la estabilizar un talud. En las siguientes figuras, se observan los esquemas de los casos de estudio con una geometría de talud distinta con respecto a su altura que presenta una inclinación uniforme de 63°.

Caso 1: Talud de 5m de altura

Caso 2: Talud de 7m de altura

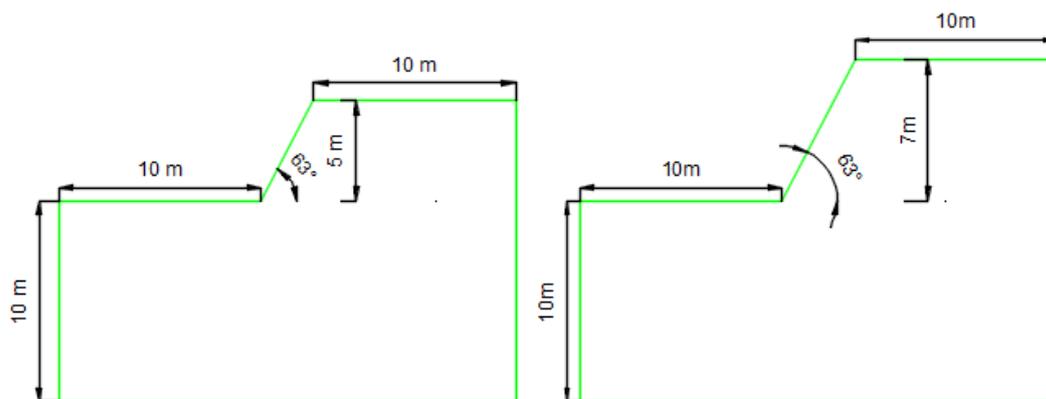


Figura 15. Diagrama Esquemático de un talud de 5m de altura y uno de 7m de altura

Caso 3: Talud de 8.5m de altura

Caso 4: Talud de 10m de altura

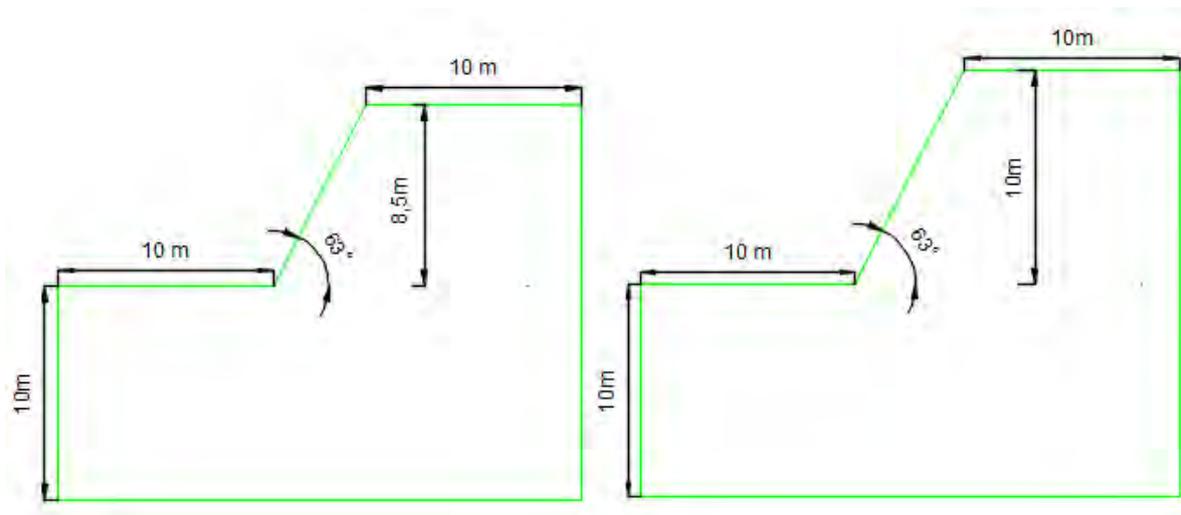


Figura 16. Diagrama Esquemático de un talud de 8.5m de altura y uno de 10m de altura

Caso 5: Talud de 12m de altura

Caso 6: Talud de 15m de altura

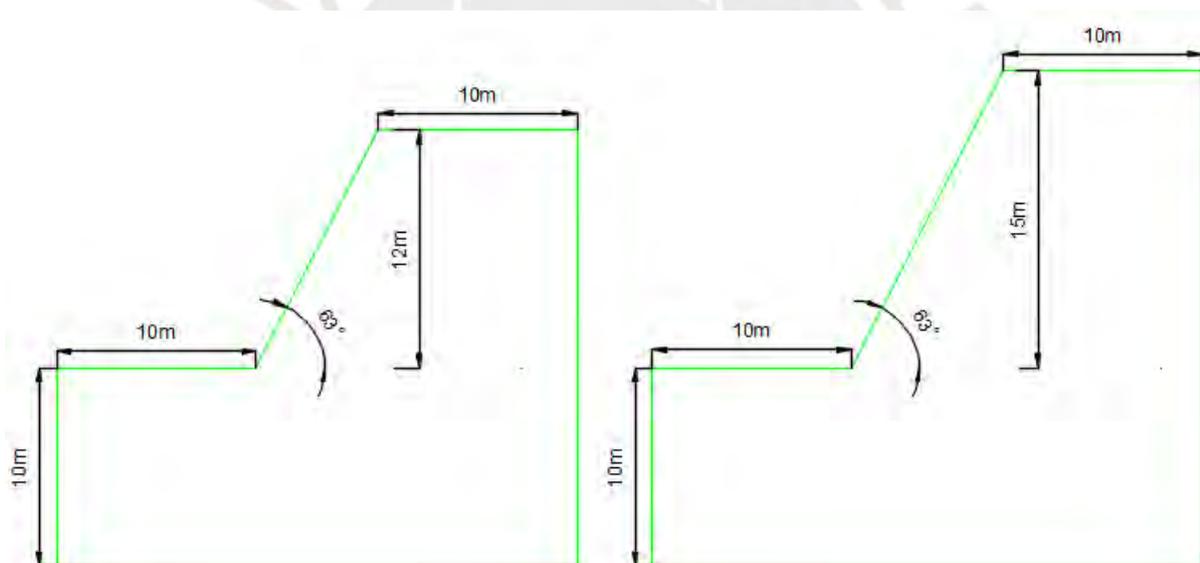


Figura 17. Diagrama Esquemático de un talud de 12m de altura y uno de 15m de altura

Respecto del espaciamiento perpendicular al eje longitudinal del talud, se realizaron diversos análisis para obtener la separación óptima entre micropilotes. Se analizaron espaciamientos de 0.5m, 1.00m y 1.50m, los cuales dieron como resultado que los micropilotes separados cada 0.50m son aquellos que proporcionan una mejor estabilidad al talud, lo cual se debe a que los elementos de refuerzos se encuentran dentro de la zona de falla y forman una mayor masa reforzada gracias a su menor separación.

La longitud de los micropilotes se define según el apartado 2.2. en el cual se establece que estos deben estar embebidos por debajo de la superficie de falla para evitar ciertos comportamientos no deseados en el micropilote (FHWA, 2005). Como resultado se obtuvo que, para taludes de suelo uniforme, la longitud para cada refuerzo, según las fórmulas de la FHWA, son tres veces la longitud de la zona superior del micropilote hasta la superficie de falla. Debido a que la longitud del refuerzo sería muy larga, luego de una evaluación de las longitudes de empotramiento en MIDAS GST NX, se define el criterio de emplear una longitud dependiendo del tipo de micropilote, bambú o concreto, que asegure el empotramiento del elemento por debajo de la superficie de falla.

En cuanto al refuerzo estructural de bambú, la cantidad de micropilotes también será objeto de análisis, debido a que se requiere conocer la influencia de estos, conforme se vaya incrementando la altura. Por lo que se analiza un máximo de 6 filas, espaciadas entre ellas 0.5 metros, con una longitud variable que depende del caso de estudio, ya que, según la altura del talud, se determina la longitud del micropilote para que cruce la superficie de falla, el cual se detalla en la sección 6.2. Asimismo, se establece como punto de inicio para reforzar el talud para ambos tipos de refuerzo una distancia de 0.25 m de la corona del talud. A continuación, se muestra la distribución del refuerzo a emplear en todos los casos de estudio con refuerzo de bambú.

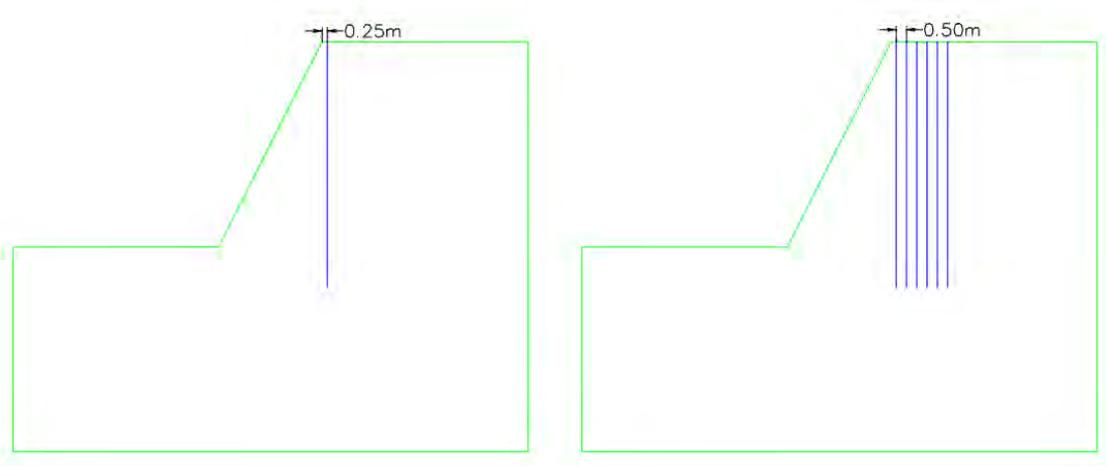


Figura 18. Distribución del refuerzo a lo largo de la corona.

Por último, es de suma importancia conocer la influencia de distintos arreglos de bambú como parte de un solo micropilote; estos arreglos constan de la inclusión de uno a cuatro ramas de bambú de 10cm de diámetro y 1 cm de espesor, por lo que se realiza los análisis de los casos de estudio con el refuerzo expuesto anteriormente, pero con la variación de distintos arreglos por micropilote de bambú; no obstante, en el caso del concreto, solo se emplean dos tipos de secciones circulares, una de 20 cm y 25 cm de diámetro. De forma seguida, en la Figura 19, se muestran algunos de los arreglos de bambú a analizar.

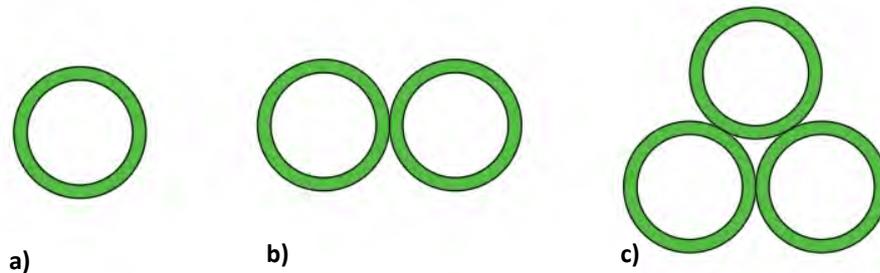


Figura 19 Arreglos de bambú, a) micropilote simple, b) arreglo de 2 bambús, c) arreglo de 3 bambús

Con respecto a los micropilotes de concreto, para el modelado y análisis de esta sección, se muestra la Figura 20 que ilustra la distribución de refuerzo que se utilizan usualmente para estabilizar taludes en la cual los micropilotes se posicionan de manera vertical o poseen cierta inclinación con respecto a la vertical. Se suelen inclinar los micropilotes entre 0 a 30 grados, ya que incrementa la capacidad individual del elemento para estabilizar el talud (FHWA, 2005). La longitud del micropilote concreto se determina mediante la suma de la longitud medida desde la cresta hasta el círculo de falla y la longitud de empotramiento de 1.5 metros determinada con el criterio antes mencionado. Asimismo, cabe mencionar que las figuras muestran cómo será la distribución del refuerzo de concreto para una, dos y tres filas de micropilotes, los cuales se utilizan para el modelado y análisis de esta investigación.

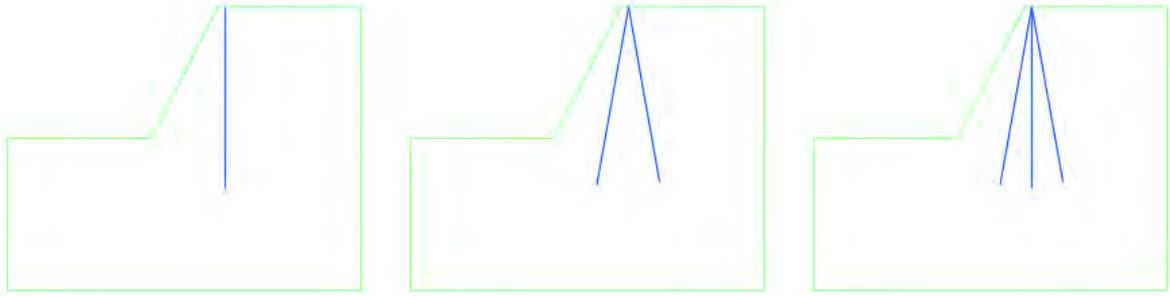


Figura 20 Distribución del refuerzo de micropilotes de concreto para una, dos y tres filas

Con respecto a la sección transversal, para el análisis de los micropilotes de concreto, se utiliza dos diámetros: 20 y 25 cm como se observa en la Figura 21. Cada uno con su sección de acero tubular correspondiente según su tamaño, las cuales se mostrarán más a detalle en secciones posteriores.

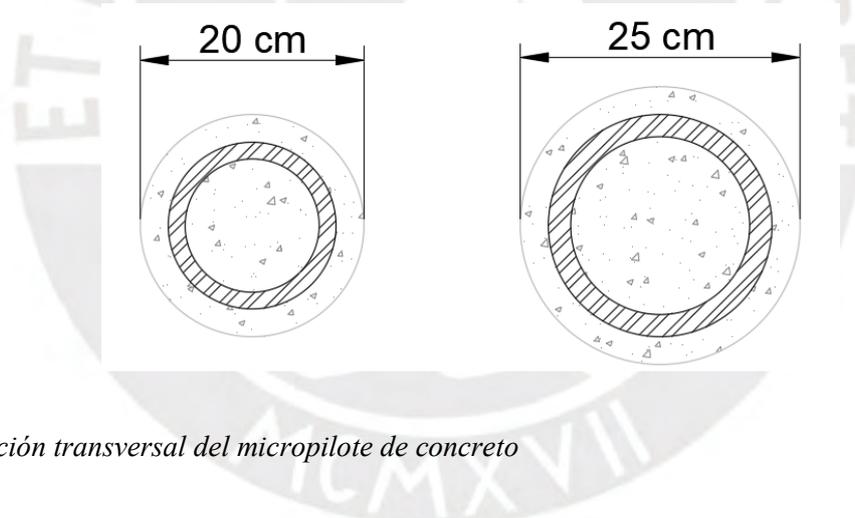


Figura 21 Sección transversal del micropilote de concreto

Por otro lado, para determinar la inclinación, se evaluará los valores de fuerza cortante máximos de un micropilote inclinado (Hult) y el valor de la fuerza axial presente en el elemento. Según la FHWA (2005), para valores de Hult, menores 350 KN, es requerido una inclinación de 10°; caso contrario, se debe utilizar la Figura 6-20 de la FHWA para hallar el valor de inclinación adecuado.

6.2 Talud reforzado con micropilotes de bambú

En esta sección, se aborda la estabilización de taludes para los casos de estudio con micropilotes de bambú. Se definen las propiedades físicas y mecánicas del bambú para el posterior análisis con el método de elementos finitos. Por último, se explica brevemente su modelamiento y se exponen los resultados correspondientes al análisis realizado para las inclusiones de bambú.

En primer lugar, debido a que la sección transversal del bambú varía según su altura, para el modelamiento y análisis, se realiza una simplificación y se asume que el micropilote de bambú posee una sección circular hueca uniforme en toda su longitud. Para estimar las dimensiones apropiadas, se analizaron diversos ensayos realizados en Perú que mencionan las propiedades físicas de bambú con un valor promedio de su diámetro exterior en el rango de 9.0 a 11.0 cm acompañado de un espesor entre 0.8 y 1.5 cm. Cabe mencionar que estos valores se obtienen de la zona comercial del tallo, los cuales provienen de la sobrebasa, cepa y basa, cuyo empleo se destina al sector de la construcción en su mayoría. Asimismo, como se estableció previamente, Lopez et al. (2020) proporciona ciertas dimensiones orientativas para la cepa y la basa con valores entre los rangos establecidos; por tanto, se seleccionará las dimensiones establecidas en el estudio de la cepa, el cual es la zona intermedia entre la basa y sobrebasa, para las dimensiones del bambú a modelar en el programa.

En segundo lugar, con respecto a la longitud de los micropilotes, esta se limita por las longitudes de las distintas zonas del tallo del bambú. Respecto a estas zonas, para un bambú de tamaño promedio con longitud total de 20 metros, la cepa mide aproximadamente 3 metros; la basa, 8 metros y; la sobrebasa, 4 metros. Por ello, para este trabajo de investigación, se estableció un valor de 15 metros de largo para los micropilotes, pues la suma de sus partes resulta en este valor aproximadamente. Sin embargo, para los taludes de 5, 7 y 8.5 metros de altura, se utiliza un bambú con longitud de 10 metros. Se optó por estas longitudes promedios

debido a la longitud variable del bambú y al especial cuidado que se debe tener al realizar el corte del tallo para preservar su resistencia y durabilidad.

En tercer lugar, para la selección de los valores de las propiedades mecánicas, se opta por la selección de datos empleados en artículos de Perú y de la Norma E100. A continuación, se muestra una tabla resumen con los valores seleccionados para sus propiedades y autores correspondientes.

Tabla 9 Propiedades del bambú Guadua Angustifolia

Propiedades del bambú <i>Guadua Angustifolia</i>		
Propiedades	Valor	Autor
Diámetro exterior (cm)	10.00	López et al. (2020)
Espesor (cm)	1.00	López et al. (2020)
Peso específico (KN/m ³)	5.14	Huarcaya (2010)
Módulo de Young (GPa)	9.5	Norma E.100 (2012)
Coefficiente de Poisson	0.25	Abdul & Rizki (2017)

Por último, como ya se hizo mención, los arreglos de bambú por micropilote son objeto de análisis, ya que es probable que estas composiciones aumenten la resistencia de los micropilotes para la estabilidad de taludes. Es así que para el modelamiento de los arreglos en un modelo 2D, se procede a realizar una equivalencia de áreas a una sección circular hueca con la misma área transversal y hueca que los arreglos en cuestión. En la siguiente Figura 22, se observa los arreglos con sus secciones equivalentes en caso le corresponda.

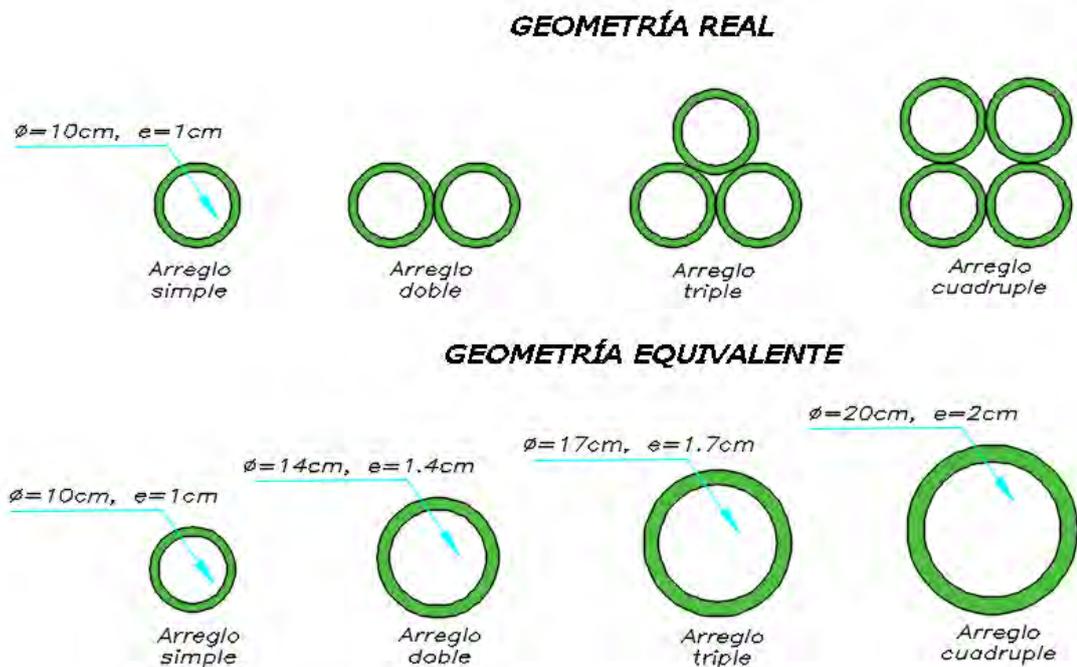


Figura 22. Arreglos reales con sus equivalentes

Se muestran las equivalencias de áreas para cada arreglo en la siguiente Tabla 10 ,

Tabla 10 Dimensiones equivalentes para arreglos de bambú

Arreglo	Área (cm ²)	Área hueca (cm ²)	Diámetro exterior equivalente (cm)	Espesor equivalente (cm)
1	28	50	10.00	1.0
2	57	101	14.20	1.4
3	85	151	17.30	1.7
4	113	201	20.00	2.0

6.2.1 Modelamiento de los casos de estudio.

En esta sección se presenta la metodología realizada para el modelamiento de los diferentes casos de estudio.

6.2.1.1 Configuración de análisis.

Se debe establecer el tipo de modelo, la dirección de la gravedad, el sistema de unidades y modificar los parámetros iniciales según convenga. Para esta tesis se selecciona el tipo 2D y tanto las unidades como los parámetros serán los predeterminados.

6.2.1.2 Modelado de la geometría.

Para el modelado de la geometría se emplea la herramienta “*Polyline*”; no obstante, para geometrías reales más complejas se recomienda el ingreso de puntos directamente de una tabla de Excel para evitar la carga de trabajo. Para usar la herramienta “*Polyline*”; en primer lugar, se debe seleccionar el punto de inicio de la geometría y por medio de incrementos relativos en los ejes coordenados, permite continuar las líneas hasta cerrar el polígono.

Para el caso de las inclusiones, micropilotes de bambú, se debe dibujar una línea del largo del elemento. Esto se logra con la aplicación de la herramienta “*Line*”, a la cual primero se debe ingresar el punto de inicio y luego, el punto final por medio de incrementos relativos.

6.2.1.3 Definición de materiales.

Una vez con la geometría terminada, se procede a la definición de los diversos materiales a representar en el modelo, ya sea de los distintos estratos del suelo como de las estructuras. Para ello, se debe ingresar a la opción “*Material*” en la pestaña “*Mesh*” y se procede insertando los siguientes parámetros del suelo de la Tabla 11.

Tabla 11 Definición del material Arcilla

Nombre	Arcilla
Material	Isotrópico
Tipo de modelo	Mohr-Coulomb
General	
Módulo de elasticidad (E)	40000 KN/m ²
Módulo de Poisson (ν)	0.35
Peso unitario (r)	20 KN/m ³
Poros	
Peso unitario (Saturado)	21 KN/m ³
Initial Void Ratio (e0)	0.5
No Lineal	
Cohesión (C)	15 KN/m ²
Ángulo de fricción (°)	18

En el caso de los materiales estructurales, de tipo Isotrópico, se debe seleccionar la casilla “*Structure*” e insertar los parámetros de cada uno de ellos que se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12 Definición del material Bambú

Nombre	Bambú
Material	Isotrópico
Tipo de modelo	Elástico
Módulo de elasticidad (E)	9.5 E+06 KN/m ²
Módulo de Poisson (ν)	0.25
Peso unitario (r)	5.14 KN/m ³

6.2.1.4 Definición de propiedades.

Las propiedades son importantes porque permiten representar atributos físicos de las mallas y se asignan a los conjuntos de mallas durante su generación. Al definir las propiedades del se debe elegir el material a usar y para las propiedades de la estructura se deben definir el tipo de estructura o elemento y la forma de la sección transversal con detalle para una mejor

representación en el modelo. En ambos casos, los parámetros se insertan en la opción “Property” de la pestaña “Mesh”. Las propiedades del suelo se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13 Definición de la propiedad para la arcilla

Nombre	Arcilla media
Tipo	2D
Sub-tipo	<i>Plane Strain</i>
Material	Arcilla media

Las propiedades del micropilote de bambú se describen en la siguiente tabla. De acuerdo con ello, es importante mencionar que el software Midas GTS NX calcula automáticamente las rigideces de la sección transversal basado en la forma de la sección transversal.

Tabla 14 Definición de la propiedad para el bambú

Nombre	Micropilote bambú
Tipo	1D
Tipo de modelo	<i>Embedded beam</i>
Material	Bambú
Espaciamiento	-
Sección	<i>Pipe</i>
Medida de la sección	D=0.1m ,tw=0.01m

6.2.1.5 Generación de mallas.

La forma y la calidad de la malla son muy importantes para el análisis de elementos finitos. En general, cuanto más pequeño sean los tamaños de malla, mejor será la calidad del análisis. Sin embargo, los tamaños de malla pequeños también extenderán el tiempo de análisis. Por lo tanto, se recomienda determinar el tamaño de la malla considerando tanto la precisión como la eficiencia del análisis. Una de las metodologías más recomendadas consiste en generar mallas más densas alrededor de los lugares donde desea ver el resultado.

Para estos casos de estudio se plantea una forma de malla de mayor tamaño cerca a los contornos lejanos a la zona inclinada y más pequeños cerca de la zona mencionada. Asimismo,

en el micropilote se definen tamaño de malla aún más pequeños para obtener mejores resultados de las fuerzas a las que se somete. Para esto, se selecciona la pestaña “Mesh”, luego la opción “Size control”, y, por último, se seleccionan los segmentos y su respectivo tamaño según se requiera. En la Figura 23, se observa la definición de la separación de los nodos en el contorno y en el micropilote.

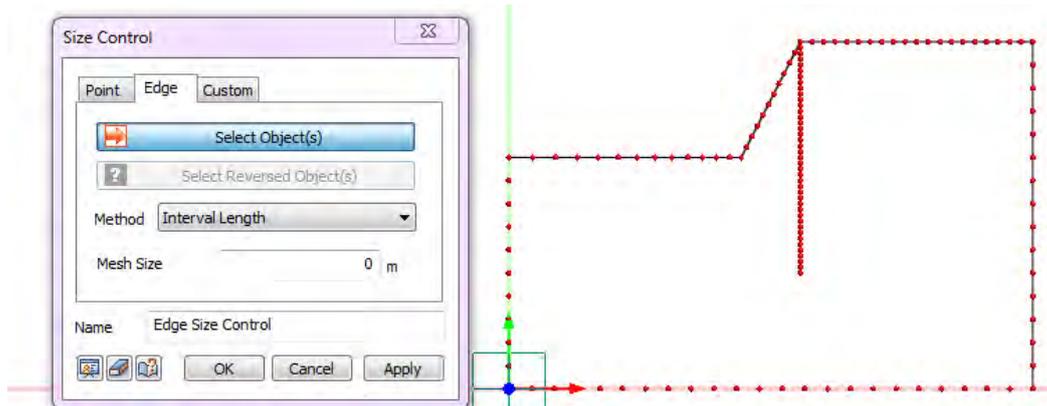


Figura 23. Herramienta Size Control

Una vez definido el tamaño de las mallas, se procede a generar el mallado de la superficie 2D. Es importante recordar que las soluciones por medio de métodos de elementos finitos se dan en cada nodo de la malla, lo que quiere decir que la geometría a analizar debe conectar los nodos del micropilote con los del suelo. En este sentido, el software Midas GTS NX permite generar el mallado de la superficie considerando, en caso se requiere, geometrías en el interior con la cual se deban compartir los puntos de solución. Para su aplicación, primero se debe dirigir a la sección “Generate” de la pestaña “Mesh” e ingresar a la opción “2D”. Una vez dentro de esta opción, se ingresa a “Auto-Area”, se selecciona la opción “Include Interior Edges”, se continúa con la selección de los bordes a mallar; en este caso, tanto la geometría exterior como la interior, se ingresa el tamaño de la malla, la medida antes definida para el contorno exterior de mayor separación y, por último, se selecciona la propiedad correspondiente al suelo.

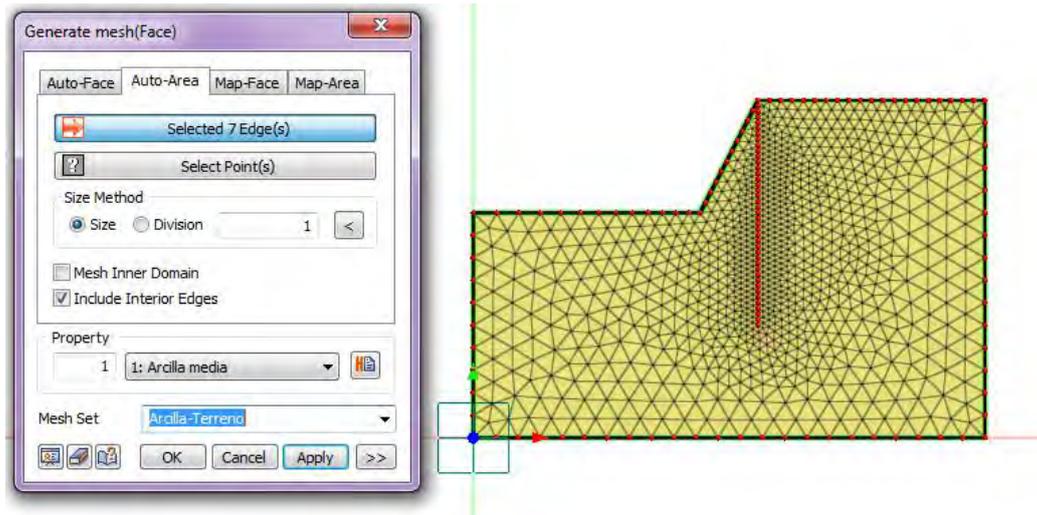


Figura 24. Creación del mallado correspondiente a la arcilla

En el caso de los elementos 1D, se ingresa a la opción “1D” de la sección “Generate”, se selecciona la geometría (líneas) que se desea mallar. Luego, se ingresa el tamaño de la malla; en este caso, debe ser el mismo tamaño que se definió con anterioridad, y, por último, se selecciona la propiedad correspondiente a la estructura.

6.2.1.6 Interfaz.

Se emplea para simular el comportamiento de la interfaz entre el suelo y los miembros estructurales con una gran diferencia de rigidez relativa. El método de generación de la interfaz se clasifica según el tipo de modelo (2D / 3D) y el objetivo (Estructuras). Las propiedades deben definirse para crear un elemento interfaz. Estas propiedades se pueden ingresar de forma directa o por medio de unos parámetros iniciales, dependientes de los elementos adyacentes, mediante la herramienta “Wizard”.

La metodología empleada en este trabajo fue mediando la herramienta “Wizard”, ya que mediante un análisis de sensibilidad de los parámetros solicitados y considerando la rigidez del elemento estructural es posible obtener buenos resultados. En este sentido, según la teoría propuesta por el Software Midas GTS NX para los parámetros “ t_v ” (“*Virtual Tickness Factor*”) y “ R ” (“*Strength Reduction Factor*”); para el caso del “ t_v ” los valores oscilan entre 0.01 y 0.1,

y están relacionados de forma inversa con la rigidez del elemento, por lo que, si el elemento es bastante rígido, el valor de “ t_v ” es bajo; asimismo, el parámetro “ R ” depende de la variabilidad del material y brinda valores típicos para ciertas interacción suelo/elemento. Como conclusión del análisis de sensibilidad, para los parámetros de “ t_v ” y “ R ” se definieron los valores de 0.1 y 0.7 respectivamente, debido a que, para el parámetro “ t_v ”, la rigidez del bambú es bastante menor en comparación a la del concreto; asimismo, para el parámetro “ R ” se asume el mismo valor que para el concreto, lo cual se refuerza con la investigación realizada por Dai et al. (2016) en donde se lleva a cabo un modelamiento de soilnailing y pilotes de bambú en suelo arcilloso usando un valor de parámetro “ R ” de 0.67. En la Figura 25, se muestran el ingreso de los parámetros mencionados.

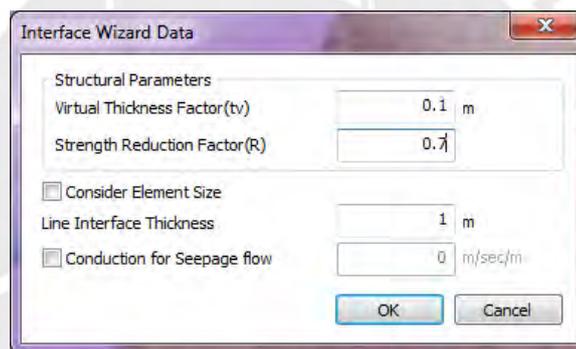


Figura 25. Datos de entrada del bambú para la herramienta Wizard

Para su aplicación, se debe ingresar a “*Interface*” dentro de la sección “*Element*”, en la pestaña “*Line*” para los elementos en 1D. Una vez dentro de la sección “*Line*”, en la casilla “*Type*”, se recomienda “*From node*”, ya que como los nodos de elemento se comparten con los del suelo su aplicación es más sencilla, pues solo se deben seleccionar los nodos. Con los nodos ya seleccionados, se selecciona “*Wizard*”, debido a que será la forma de definir las propiedades para la interfaz suelo/estructura y se ingresan los parámetros ya antes definidos (“ t_v ”=0.1, “ R ”=0.7). Asimismo, se debe seleccionar la casilla “*Create Other Element*” y elegir “*Rigid Link*”, pues mediante esta última selección permite conectar los nodos como si fueran todos partes de un elemento. Por último, se coloca el nombre de la malla; en caso se desee

verificar las propiedades calculadas por la herramienta antes empleada, se ingresa a “Materials” y se busca el material tipo “Interface and Pile-Interface”, se muestran los resultados de la herramienta Wizard para la creación de la interfaz en la Figura 27.

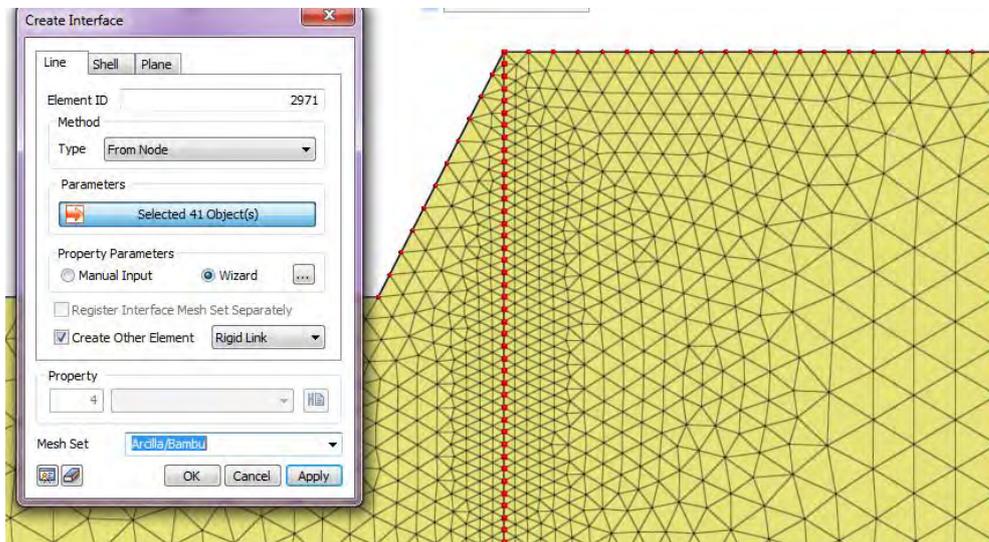


Figura 26. Creación de la interfaz

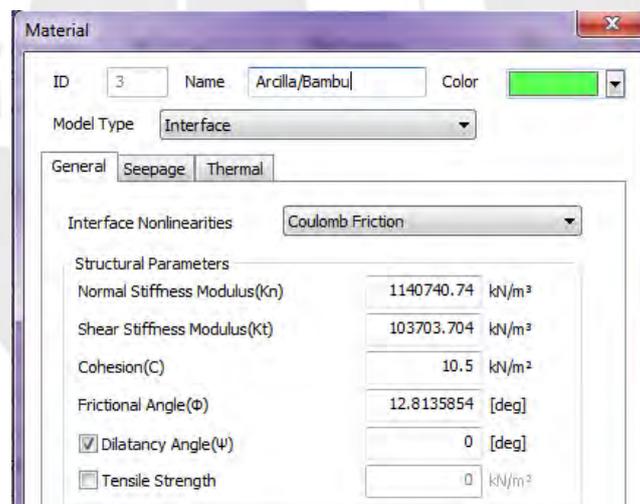


Figura 27. Propiedades de la interfaz generada por el comando Wizard

6.2.1.7 Condiciones de carga.

Los casos de estudio se analizan para la situación estática, es decir, sometido a su propio peso. Ante esto, el software permite calcular automáticamente multiplicando el peso unitario del suelo, la geometría de la estructura con la aceleración de la gravedad, a la cual se le asigna el valor al iniciar la configuración del análisis y la dirección la define de forma predeterminada

según el tipo de modelado; n obstante, es posible modificarla según se requiere. Para su empleo se debe ingresar a la pestaña “*Static/Slope Analysis*” y luego a “*Self Weight*”.

6.2.1.8 Condiciones de contorno.

En el caso de este análisis, se deben restringir los desplazamientos horizontales tanto del borde izquierdo como derecho, pero, además, también los horizontales y verticales de la borde inferior. Midas GTS NX genera estas restricciones de forma automática con la herramienta “*Auto*” dentro de la opción “*Constraint*” de la sección “*Boundary*”. Se selecciona la opción de mallado automático como se observa en la Figura 28.

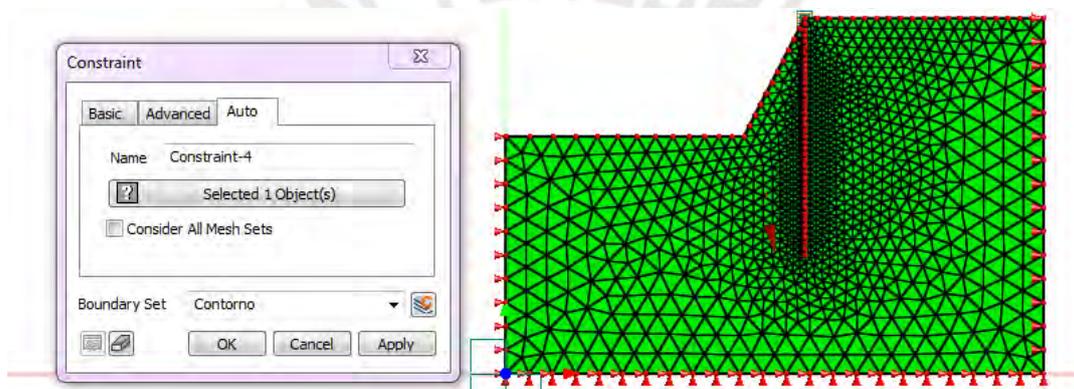


Figura 28. Aplicación de las condiciones de contorno

6.2.1.9 Definir el caso de análisis.

En esta sección, se establece el método de análisis y los datos del modelo para su análisis. Generalmente, para el análisis en elementos finitos se emplea el método SRM, descrito en capítulos anteriores, para la estabilidad de taludes. Asimismo, como datos de entrada, se agregan las mallas antes generadas, excepto la correspondiente al “*Rigid Link*”, debido a que caracteriza al elemento más no afecta a las propiedades del suelo ni a la interfaz. También, se deben añadir la condición de contorno fijada previamente, así como también la condición de carga. Para esto se debe ingresar al menú “*Analysis*”, dirigirse a la opción “*Analysis Case*”, agregar un caso y seleccionar tanto el tipo de solución como los datos de entrega requeridos para el análisis como se observa en Figura 29.

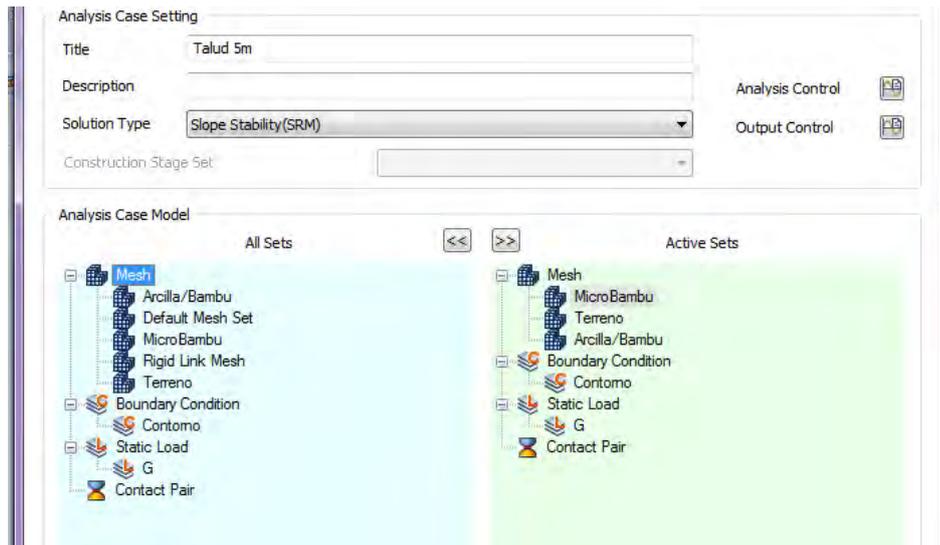


Figura 29. Definición del caso a analizar

6.2.2 Análisis de resultados.

En esta sección referente a los resultados, se mencionan los distintos valores de factor de seguridad obtenidos por el método de elementos finitos en el software Midas GTS NX para los distintos casos de estudio. Solo se exponen los resultados como se obtienen para el caso de un talud de 7 metros de altura reforzado con una fila de micropilote de bambú compuesto por arreglo simple. En la Figura 30, se observa los resultados de desplazamiento y, en las demás, los resultados de fuerzas y momentos actuantes en el micropilote de bambú.

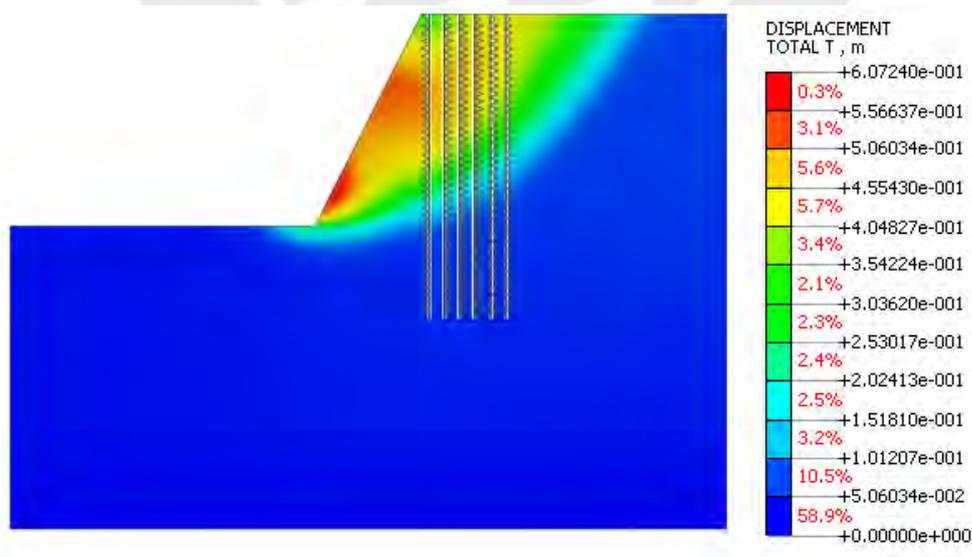


Figura 30. Resultados de desplazamientos totales en el terreno

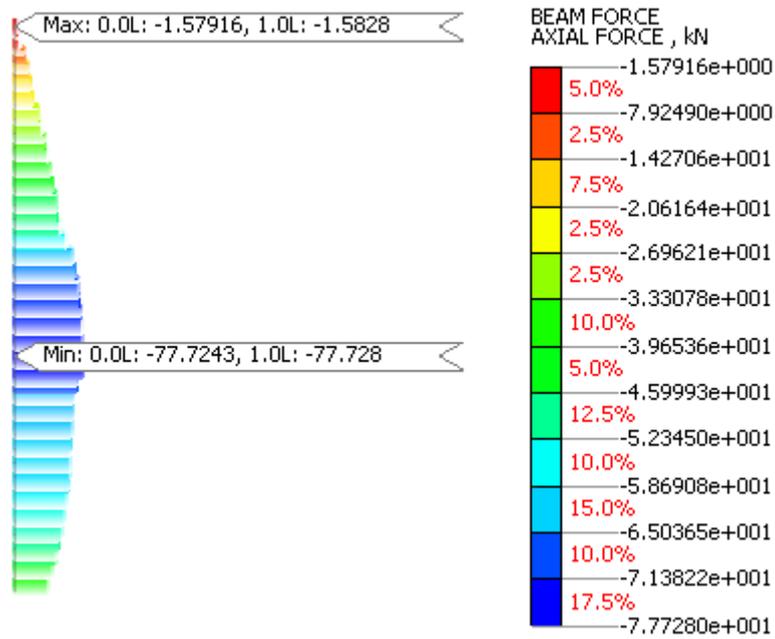


Figura 31. Resultados de fuerza axial sobre el micropilote

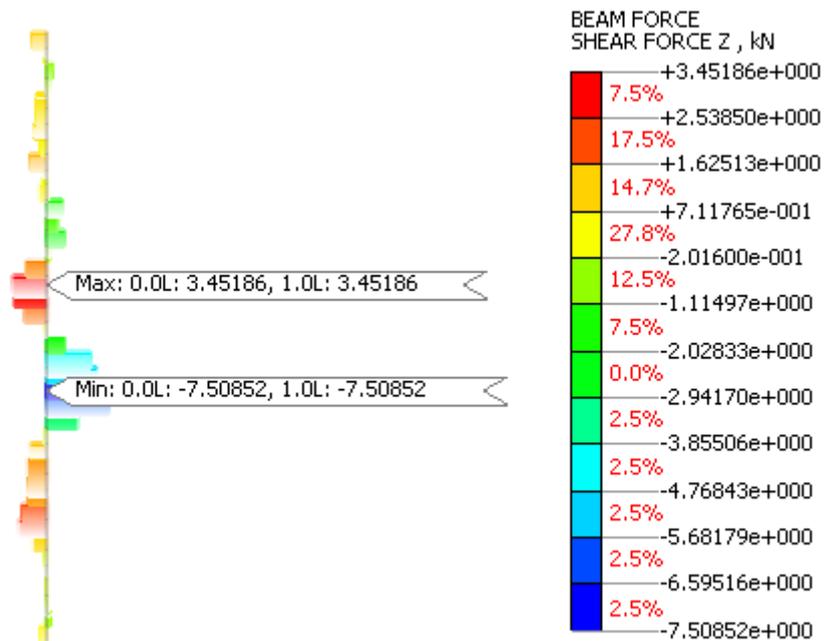


Figura 32. Resultados de fuerza cortante sobre el micropilote

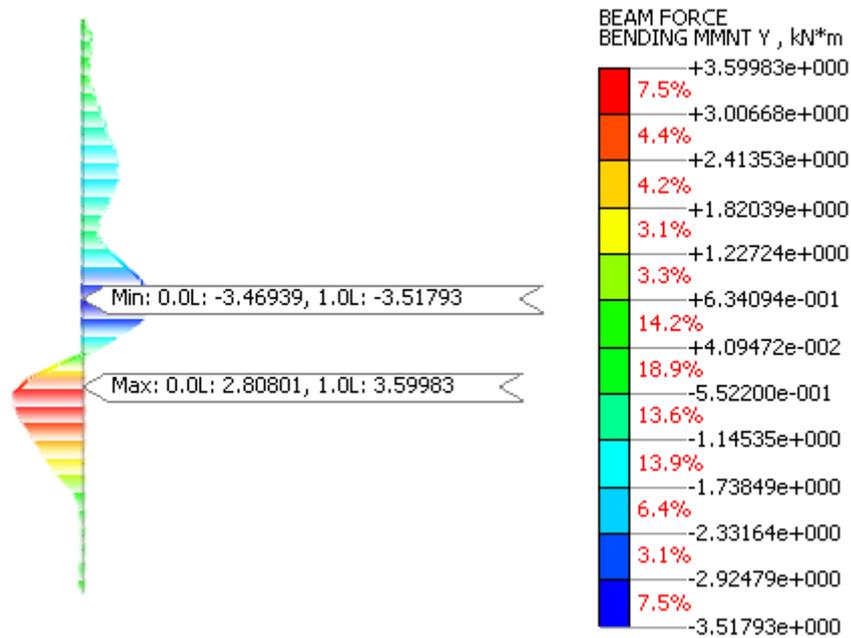


Figura 33. Resultado de momento flector sobre el micropilote

Una vez presentados los distintos gráficos más relevantes que se obtienen del análisis, se muestran las distintas tablas de elaboración propia que contienen los resultados correspondientes a factores de seguridad de los casos sin refuerzo y de aquellos reforzados con distintos tipos de arreglo y filas según sea el caso.

Tabla 15. Resultado de Factores de Seguridad correspondientes a un talud de 5m

Talud de 5m	Sin refuerzo	1 filas	2 filas	3 filas	4 filas	5 filas	6 filas
Sin arreglos	1.54	-	-	-	-	-	-
Arreglo simple	-	1.90	2.01	2.10	2.20	2.32	2.32
Arreglo doble	-	1.93	2.06	2.15	2.29	2.32	2.37
Arreglo triple	-	1.99	2.10	2.20	2.28	2.34	2.38
Arreglo cuádruple	-	2.08	2.15	2.22	2.29	2.35	2.38

Tabla 16. Resultado de Factores de Seguridad correspondientes a un talud de 7m.

Talud de 7m	Sin refuerzo	1 filas	2 filas	3 filas	4 filas	5 filas	6 filas
Sin arreglos	1.18	-	-	-	-	-	-
Arreglo simple	-	1.38	1.45	1.53	1.58	1.66	1.66
Arreglo doble	-	1.45	1.52	1.58	1.59	1.66	1.66
Arreglo triple	-	1.45	1.52	1.57	1.62	1.66	1.67
Arreglo cuádruple	-	1.48	1.53	1.58	1.63	1.68	1.69

Tabla 17. Resultado de Factores de Seguridad correspondientes a un talud de 8.5m

Talud de 8.5m	Sin refuerzo	1 filas	2 filas	3 filas	4 filas	5 filas	6 filas
Sin arreglos	0.98	-	-	-	-	-	-
Arreglo simple	-	1.19	1.25	1.30	1.33	1.38	1.38
Arreglo doble	-	1.25	1.26	1.35	1.38	1.38	1.39
Arreglo triple	-	1.26	1.33	1.37	1.38	1.39	1.40
Arreglo cuádruple	-	1.26	1.33	1.37	1.38	1.39	1.39

Tabla 18. Resultado de Factores de Seguridad correspondientes a un talud de 10m

Talud de 10m	Sin refuerzo	1 filas	2 filas	3 filas	4 filas	5 filas	6 filas
Sin arreglos	0.91	-	-	-	-	-	-
Arreglo simple	-	1.05	1.09	1.13	1.16	1.17	1.19
Arreglo doble	-	1.06	1.11	1.14	1.18	1.17	1.20
Arreglo triple	-	1.09	1.15	1.18	1.20	1.20	1.20
Arreglo cuádruple	-	1.08	1.14	1.18	1.20	1.19	1.21

Tabla 19. Resultado de Factores de Seguridad correspondientes a un talud de 12m

Talud de 10m	Sin refuerzo	1 filas	2 filas	3 filas	4 filas	5 filas	6 filas
Sin arreglos	0.82	-	-	-	-	-	-
Arreglo simple	-	0.94	0.94	0.99	1.00	1.03	1.04
Arreglo doble	-	0.94	0.96	0.98	1.01	1.03	1.04
Arreglo triple	-	0.96	0.96	1.01	1.02	1.03	1.04
Arreglo cuádruple	-	0.94	1.00	1.02	1.02	1.04	1.05

Tabla 20. Resultado de Factores de Seguridad correspondientes a un talud de 15m

Talud de 10m	Sin refuerzo	1 filas	2 filas	3 filas	4 filas	5 filas	6 filas
Sin arreglos	0.72	-	-	-	-	-	-
Arreglo simple	-	0.82	0.82	0.84	0.85	0.87	0.88
Arreglo doble	-	0.82	0.83	0.84	0.86	0.87	0.87
Arreglo triple	-	0.82	0.84	0.85	0.87	0.87	0.89
Arreglo cuádruple	-	0.81	0.83	0.85	0.88	0.88	0.88

Con el resumen de factores de seguridad es posible construir gráficas que permitan evaluar la influencia del número de filas en el factor de seguridad, por lo que a continuación se muestran las siguientes curvas.

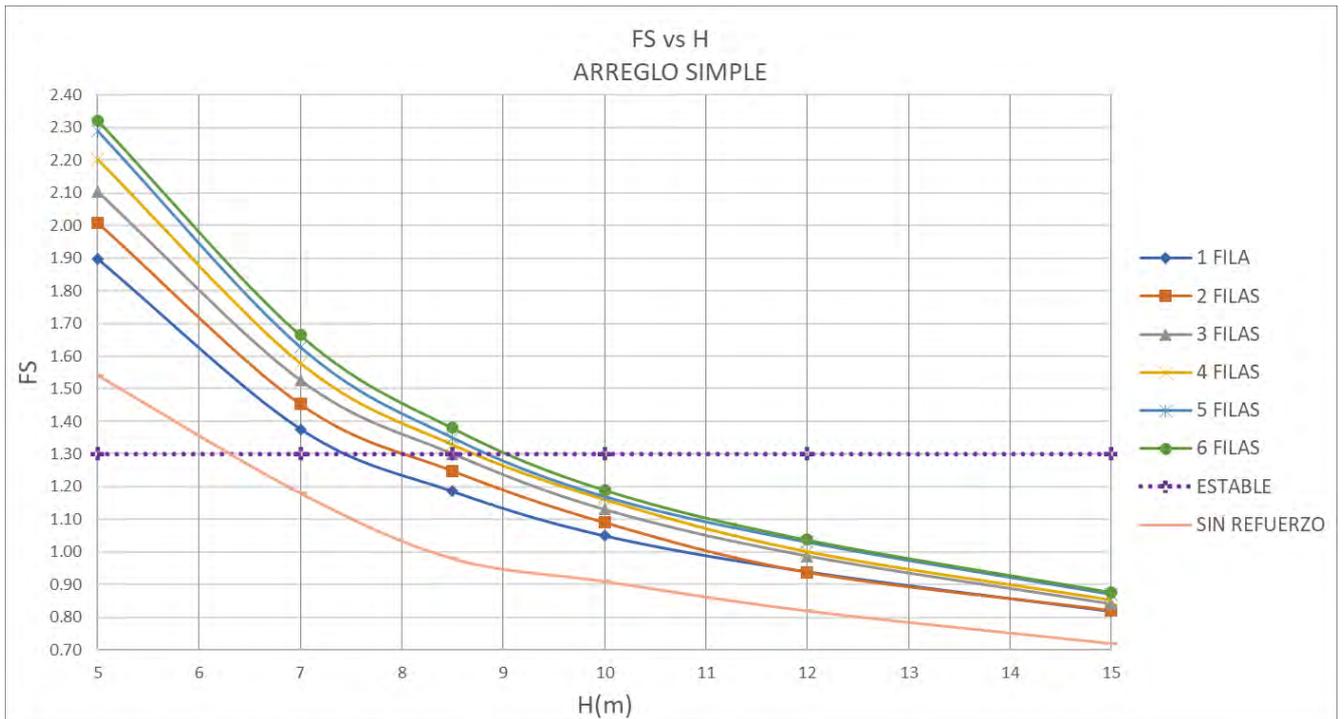


Figura 34. Gráfica FS vs H para un arreglo simple

La Figura 34 muestra el impacto de número de filas de refuerzo en el factor de estabilidad considerando micropilotes con arreglo simple. Esta gráfica indica que la influencia del número de filas de micropilotes es mayor para taludes de hasta 8.5m de altura en comparación a los de 10m, 12m y 15m, lo cual se debe a la poca sección transversal que posee una rama de bambú para soportar fuerzas cortantes y a la mayor masa que conforma la superficie de falla. De igual manera, es importante indicar que estos incrementos en el factor de seguridad correspondientes al aumento de filas de refuerzo no son considerables, ya que, en el caso más óptimo, se obtiene un incremento de alrededor de 0.5 en el factor de seguridad al pasar de una a seis filas de micropilote.

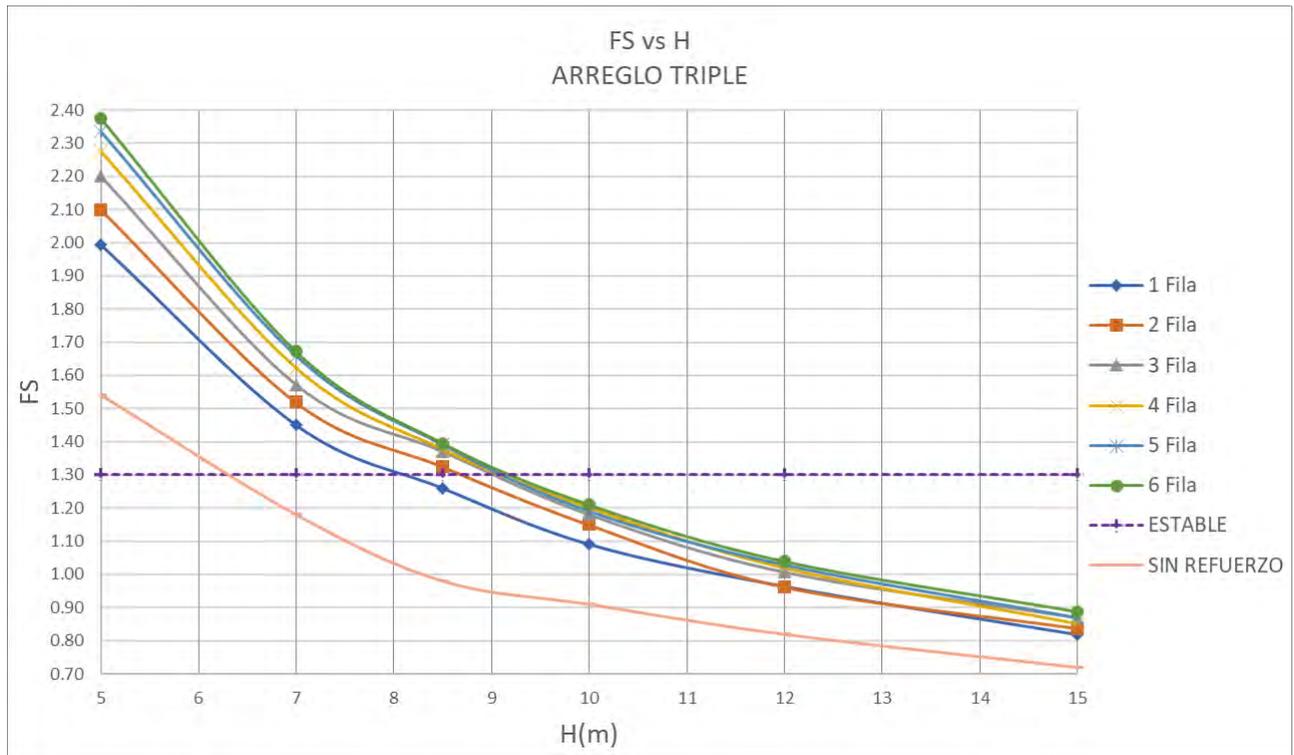


Figura 35. Gráfico FS vs H para un arreglo triple

A manera de contraste, la Figura 35 muestra las tendencias de los factores de seguridad para variaciones en el número de filas reforzadas con un arreglo triple. Esta gráfica fortalece la idea que los factores de seguridad aumentan conforme se incrementa el número de filas. En adición, comparados con los resultados con un arreglo simple, se pueden notar ligeros incrementos que permiten estabilizar taludes adicionales, lo cual evidencia de forma preliminar que los arreglos podrían tener un efecto positivo en el factor de seguridad.

Para identificar qué tipo de arreglo es el más adecuado, se presentan las siguientes gráficas que, a diferencia de las anteriores, permiten percibir el efecto de los distintos arreglos ante un número de filas de refuerzo determinado.

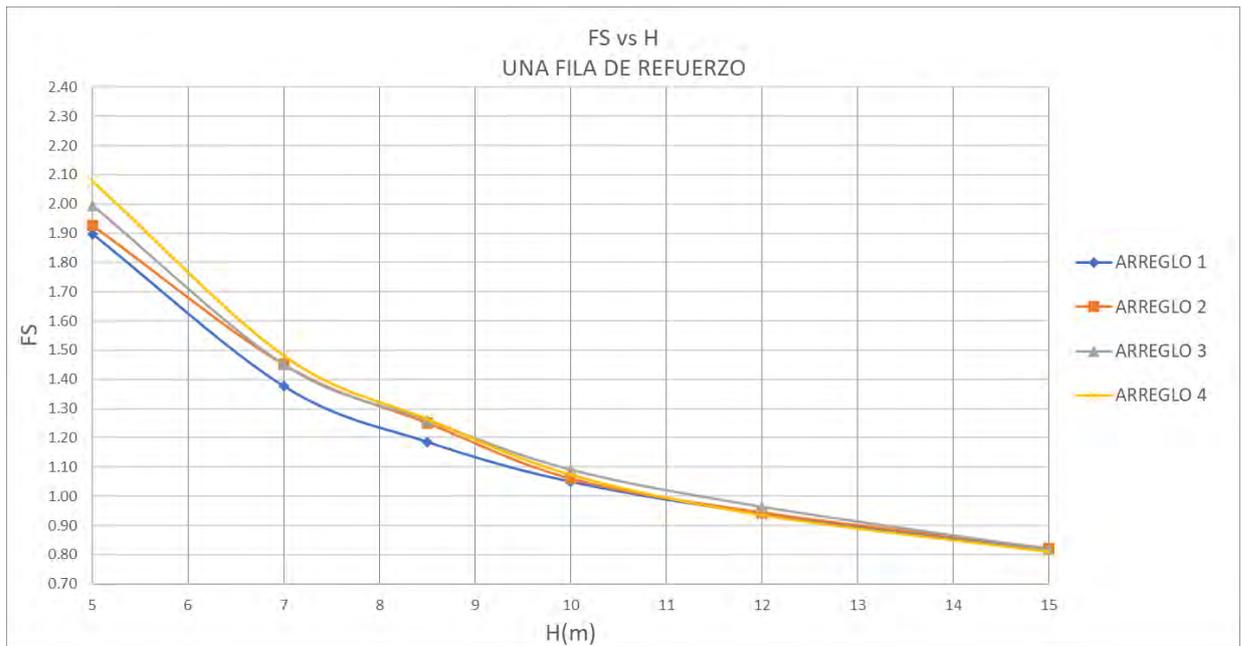


Figura 36. Gráfica de FS vs H para una fila de refuerzo

La Figura 36 expone la influencia de los distintos arreglos en los factores de seguridad para una fila de refuerzo, donde se observa un comportamiento similar entre los arreglos triples y cuádruples, ya que no presentan cambios significativos; no obstante, se aprecian ligeros aumentos en los factores de seguridad conforme los arreglos sean más voluminosos para un talud de 5 metros de altura. Además, para el caso de grandes alturas, se observa que el impacto de distintos arreglos es mínimo en el factor de seguridad y, en algunos casos, la mayor diferencia se presenta para arreglos simples en comparación al resto.

Se presume que las causas de estos resultados son dos: primero, la sección transversal, ya que la diferencia entre los aportes en el factor de seguridad se da al contrastar un arreglo simple con los compuestos; segundo, los desplazamientos generados, ya que la masa desplazada aumenta en magnitud al evaluar taludes más altos y esta necesitaría inclusiones de mayor rigidez para lograr mejores resultados en la estabilización. Es por ello que, para taludes bajos, es posible observar diferencias claras entre ellos, pues superficies de falla de menor tamaño derivan en sollicitaciones de menor proporción.

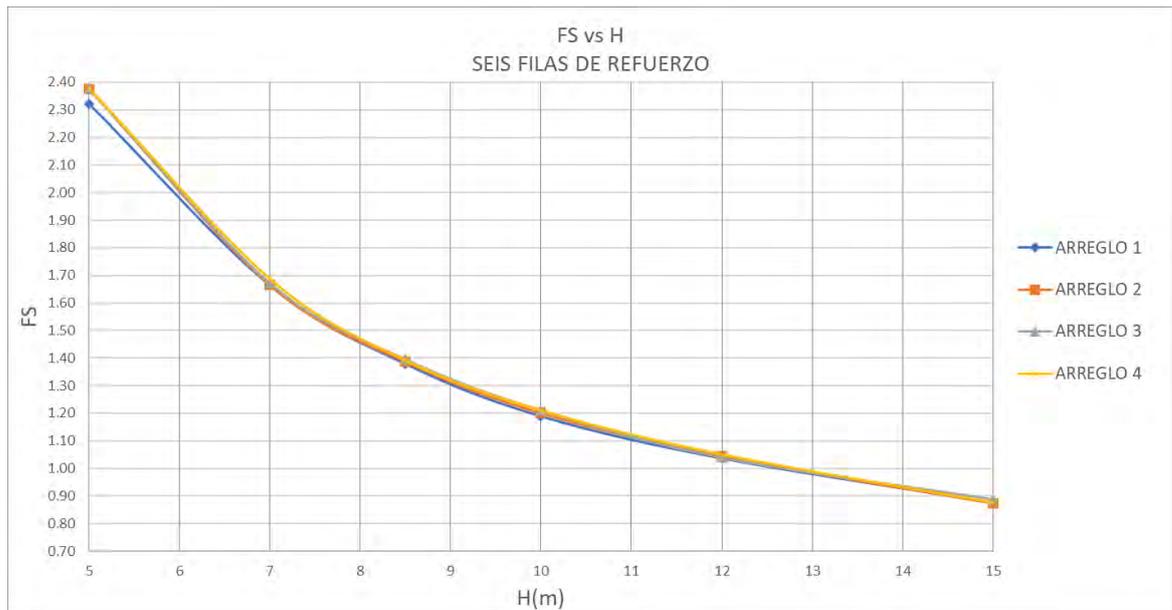


Figura 37. Gráfica FS vs H para seis filas de refuerzo

En adición a lo presentado en el párrafo anterior, la Figura 37 permite confirmar que los arreglos no son un componente crítico al querer incrementar el factor de seguridad, ya que, como se aprecia, los incrementos para cada una de las alturas, en el mejor de los casos, son del orden de 0.1 al pasar de un arreglo simple a uno cuádruple cuando se tienen seis filas de micropilotes. Esto confirma que el número de filas es más efectivo para aumentar el factor de seguridad en comparación a lo generado con los tipos de arreglo; no obstante, no se descarta el aporte de estos últimos para otros fines como puede ser el caso de los análisis estructurales.

Antes de ingresar a discutir o analizar los resultados de los micropilotes de bambú como estructura, es crucial mencionar las resistencias permisibles a emplear para el análisis de las sollicitaciones del bambú.

En primer lugar, es importante recalcar, como en apartados anteriores, que, en la actualidad, no se cuenta con una norma que fije valores o métodos constructivos para el bambú para la estabilización de taludes. Debido a ello, se utiliza valores de la Norma E.100, norma técnica destinada al diseño y construcción de edificaciones de bambú, y de estudios de ensayos

de laboratorios realizados en tesis pasadas para la misma especie de bambú con la finalidad de establecer esfuerzos admisibles para cada uno de los arreglos.

En segundo lugar, como los valores que se tienen de los estudios obtenidos por Lovaton (2020) son resistencias máximas, asumidas como nominales, se deben reducir para obtener las resistencias de diseño y realizar la comparación con las fuerzas obtenidas de los modelos numéricos para cada uno de los casos; este factor de reducción se asume que es el mismo que el correspondiente al concreto, 0.9, de acuerdo en lo establecido por la Norma Técnica de Edificación E 060 (2009).

Por último, se muestra la Tabla 21 con los valores de las resistencias de diseño con sus fuerzas y momentos calculados para el análisis de solicitaciones para cada uno de los distintos arreglos.

Tabla 21. Resistencias de diseño para el micropilote de bambú

Resistencias	Máx (MPa)	Diseño (MPa)	Diseño (KN/m ²)	Arreglo				
				Solicitaciones	1	2	3	4
Tracción por Flexión	26	23.40	23400	Momento Flector (KN.m)	1.36	3.85	7.24	10.85
Tracción	120.82	108.70	108738	Tracción (KN)	307.40	614.90	922.30	1229.80
Compresión	30.98	27.90	27882	Compresión (KN)	78.80	157.70	236.50	315.30
Corte	8.5	7.65	7650	Cortante (KN)	21.63	43.26	64.89	86.52

Con los valores de esfuerzos admisibles, es posible verificar que los distintos casos de estudio cumplan el diseño por resistencia. Para ello se muestran las tablas de las fuerzas actuantes. Además, se debe mencionar que cambiará la orientación de las páginas para una mejor vista de las tablas.

Tabla 22. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 5m

FILAS	ARREGLO 1				ARREGLO 2				ARREGLO 3				ARREGLO 4			
	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS
1	-48.60	7.46	5.83	1.90	-48.42	10.27	9.50	1.93	-46.26	16.48	26.43	1.99	-48.85	43.57	46.86	2.08
2	-39.41	5.05	5.13	2.01	-41.19	6.43	7.90	2.06	-43.51	13.35	16.72	2.10	-42.60	28.60	23.76	2.15
3	-38.23	3.42	4.02	2.10	-41.39	5.23	6.73	2.15	-43.24	19.12	12.95	2.20	-42.93	26.47	15.07	2.22
4	-40.14	2.85	3.82	2.20	-42.71	15.16	8.71	2.29	-45.15	21.05	10.39	2.28	-43.88	22.33	10.59	2.29
5	-38.58	2.73	3.36	2.32	-42.20	10.78	5.19	2.32	-45.39	16.17	7.21	2.34	-44.57	18.70	8.09	2.35
6	-37.22	2.41	2.80	2.32	-43.59	11.48	4.63	2.37	-46.39	13.95	5.56	2.38	-45.21	15.24	6.63	2.38

Tabla 23. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 7m

FILAS	ARREGLO 1				ARREGLO 2				ARREGLO 3				ARREGLO 4			
	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS
1	-77.73	7.51	3.60	1.38	-77.98	16.22	13.13	1.45	-75.85	18.23	16.12	1.45	-75.16	22.10	23.94	1.48
2	-50.41	5.18	3.41	1.45	-59.99	9.26	8.74	1.52	-69.75	16.56	11.84	1.52	-62.44	16.81	11.33	1.53
3	-48.27	3.93	2.62	1.53	-58.09	11.79	7.10	1.58	-63.67	14.73	8.43	1.57	-68.63	18.88	10.68	1.58
4	-49.98	3.22	2.61	1.58	-52.47	8.49	4.69	1.59	-65.36	15.29	7.94	1.62	-66.46	15.94	8.79	1.63
5	-50.44	4.14	2.94	1.66	-53.31	11.38	5.29	1.66	-55.59	12.19	5.87	1.66	-61.85	14.42	7.37	1.68
6	-45.53	3.07	2.47	1.66	-46.93	6.72	2.94	1.66	-51.28	9.68	4.24	1.67	-52.27	10.98	5.41	1.69

Tabla 24. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 8.5 m

FILAS	ARREGLO 1				ARREGLO 2				ARREGLO 3				ARREGLO 4			
	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS
1	-101.78	6.65	3.00	1.19	-100.95	19.94	20.07	1.25	-103.45	19.71	21.53	1.26	-114.73	16.36	15.13	1.26
2	-65.28	5.71	3.49	1.25	-74.03	8.76	7.32	1.26	-94.45	13.22	17.89	1.33	-96.06	15.37	25.89	1.33
3	-64.78	4.69	3.09	1.30	-79.68	7.81	8.80	1.35	-94.21	10.16	14.86	1.37	-95.25	11.64	17.76	1.37
4	-64.70	4.03	2.77	1.33	-74.70	6.32	6.55	1.38	-76.07	6.68	7.98	1.38	-81.79	7.68	10.13	1.38
5	-57.17	2.82	1.45	1.38	-65.26	4.28	3.60	1.38	-72.36	5.05	5.30	1.39	-75.32	6.27	6.44	1.39
6	-54.78	2.59	1.22	1.38	-62.20	4.06	2.29	1.39	-69.00	5.82	3.29	1.40	-71.80	7.45	3.86	1.39

Tabla 25. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 10m

FILAS	ARREGLO 1				ARREGLO 2				ARREGLO 3				ARREGLO 4			
	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS
1	-127.10	6.00	3.37	1.05	-127.61	11.94	9.93	1.06	-124.97	17.29	18.25	1.09	-130.04	17.98	18.94	1.08
2	-80.62	4.38	2.16	1.09	-79.03	6.55	5.42	1.11	-97.98	12.72	16.10	1.15	-92.98	12.46	15.22	1.14
3	-72.56	4.05	2.31	1.13	-83.00	6.97	6.35	1.14	-98.70	9.85	13.05	1.18	-102.96	11.25	15.50	1.18
4	-69.24	3.44	1.71	1.16	-80.33	5.46	5.03	1.18	-90.12	7.23	9.02	1.20	-89.84	7.54	9.34	1.20
5	-67.32	2.80	1.35	1.17	-71.15	3.85	2.67	1.17	-79.05	4.87	4.67	1.20	-79.64	5.30	5.63	1.19
6	-62.55	2.27	0.98	1.19	-67.28	3.33	1.93	1.20	-72.13	4.67	2.09	1.20	-75.48	5.93	3.40	1.21

Tabla 26 Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 12m

FILAS	ARREGLO 1				ARREGLO 2				ARREGLO 3				ARREGLO 4			
	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS
1	-153.28	3.50	2.70	0.94	-154.52	6.53	5.29	0.94	-157.91	16.30	18.46	0.96	-162.11	13.10	13.00	0.94
2	-92.19	1.72	0.93	0.94	-96.18	5.25	3.96	0.96	-97.57	6.74	6.77	0.96	-112.33	14.97	21.52	1.00
3	-82.28	2.36	1.63	0.99	-85.90	4.67	4.16	0.98	-101.02	7.50	9.45	1.01	-113.67	11.22	15.89	1.02
4	-60.69	1.33	0.58	1.00	-82.07	3.35	3.14	1.01	-94.59	5.31	6.60	1.02	-100.08	6.29	8.71	1.02
5	-75.75	1.80	1.20	1.03	-85.54	3.66	3.50	1.03	-82.08	3.37	3.28	1.03	-91.41	4.39	5.49	1.04
6	-76.14	1.87	1.16	1.04	-76.67	2.34	1.87	1.04	-83.17	3.68	2.94	1.04	-83.72	4.58	3.20	1.05

Tabla 27 Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 15m

FILAS	ARREGLO 1				ARREGLO 2				ARREGLO 3				ARREGLO 4			
	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS	Axial (KN)	Cortante (KN)	Momento (KN/m)	FS
1	-202.06	2.95	1.60	0.82	-204.74	8.77	6.47	0.82	-214.76	10.68	8.76	0.82	-206.90	9.15	9.77	0.81
2	-119.38	1.90	0.63	0.82	-125.14	3.99	2.71	0.83	-126.49	5.54	5.16	0.84	-132.24	8.54	8.85	0.83
3	-100.21	1.93	1.20	0.84	-101.64	3.00	1.93	0.84	-121.00	10.93	10.89	0.85	-110.18	8.78	9.68	0.85
4	-91.00	2.26	1.15	0.85	-100.46	4.68	3.61	0.86	-96.50	4.03	3.82	0.87	-115.97	9.41	9.44	0.88
5	0.00	0.00	0.00	0.87	-87.61	2.00	1.75	0.87	-94.81	2.72	2.71	0.87	-106.74	5.90	5.28	0.88
6	-88.65	1.39	0.90	0.88	-91.83	1.91	1.63	0.87	-101.64	3.89	2.90	0.89	-96.55	3.31	1.15	0.88

De acuerdo con los resultados mostrados en las Tablas 22 a 27, aquellos conjuntos de valores resaltados en verde son solicitaciones que cumplen con ser menores a los esfuerzos admisibles; por ello, además de permitir validar veinte casos de estudio, se pueden analizar los resultados para obtener conclusiones importantes en el bambú como material estructural. En primer lugar, los resultados muestran que los arreglos simples y dobles brindan casos válidos, pero solo con cinco o seis filas de refuerzo, lo cual evidencia su poca eficiencia ante las solicitaciones a las que se encuentran sometidos, ya que, si se evalúan más a fondo, esto sucede por la poca resistencia a flexión que poseen a diferencia de su resistencia a cortante, compresión o tracción. En segundo lugar, es importante resaltar que los números de casos por arreglo son factibles o válidos solo al emplear un número alto de filas hasta llegar al caso de un talud de 10m de altura, lo cual manifiesta que los arreglos triples y cuádruples brindan un mejor comportamiento estructural que combinado con la disposición del refuerzo puede brindar casos válidos por estabilidad ($FS > 1.3$) y ante esfuerzos sometidos hasta el límite de altura ya mencionado.

6.3 Talud reforzado con micropilotes de concreto

En esta sección, se abordará la estabilización de taludes para los casos de estudio con micropilotes de concreto. Para el modelamiento, se optó por seleccionar una sección circular completa con las propiedades mecánicas correspondientes al concreto armado, las cuales se muestran en la Tabla 28 junto con sus propiedades físicas.

Tabla 28 Propiedades del micropilote

Propiedades del concreto		
Propiedades	D=20cm	D=25cm
Peso específico (kN/m ³)	25	
Módulo de Elasticidad (kN/m ²)	25000000	
Coefficiente de Poisson	0.15	

Para su análisis estructural, se establece una sección de acero representativa, una armadura tubular, con sus dimensiones especificadas para cada caso en la Tabla 29, la cual se seleccionó de catálogos comerciales de Piresa y Angorik según el diámetro de los micropilotes y el recubrimiento necesario.

Tabla 29 Dimensiones y parámetros sección armadura tubular

Dimensiones armadura tubular			
Diámetro de micropilote	D (cm)	20.00	25.00
Diámetro exterior armadura tubular	de (cm)	15.00	20.00
Diámetro interior armadura tubular	di (cm)	12.00	16.00
Espesor armadura tubular	t (cm)	1.50	20
Área armadura tubular	Aa (m ²)	63.62	113.10

Con la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de cimentación, se establecieron los límites elásticos del concreto y el acero seleccionado al cual se aplica un coeficiente de seguridad parcial para hallar las resistencias del mortero a los 28 días (f_{cd}) y la resistencia de cálculo de la armadura tubular (f_{yd}). Con respecto al acero, se optó por seleccionar un límite elástico comúnmente usado denominado por la UNE en 10027 como S460 con un valor correspondiente de 460 MPa y un valor de resistencia para el mortero o lechada de 28 kN/m². En la Tabla 30, se observa un resumen de las propiedades explicadas para el micropilote de concreto.

Tabla 30 Propiedades del mortero y del acero tubular

Parámetros	D=20cm	D=25cm
f_{ck} (MPa)	27.460	27.460
γ_c	1.5	1.5
f_{cd} (Mpa)	18.306	18.306
f_y (MPa)	460	460
γ_a	1.1	1.1
f_{yd} (MPa)	400	400

fck: Resistencia del mortero o lechada a compresión simple
γ_c : Coeficiente parcial de seguridad para el mortero o lechada
fcd: del mortero o lechada a compresión simple a 28 días de edad
f _y : Límite elástico del acero de la armadura tubular
γ_a : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular
f _{yd} : Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular

Asimismo, se establecieron las condiciones necesarias de las características del suelo y del tipo de unión del micropilote para hallar la resistencia de este, los cuales se listan a continuación:

- ✓ El tipo de terreno para ejecutar los micropilotes es un suelo natural sin alterar con consistencia muy blanda obtenida mediante la cohesión establecida.
- ✓ Con respecto al tipo de unión, se optó por unión mediante manguitos doblemente roscados sin disminución de sección.

Una vez establecido las condiciones mencionadas anteriormente, se establecen los siguientes parámetros necesarios mostrados en la Tabla 31 con las tablas de la Dirección General de Carreteras, y se calcula la sección reducida, módulo de plástico y elástico de las secciones de los dos micropilotes utilizados para posteriormente realizar los cálculos correspondientes.

Tabla 31 Parámetros micropilotes de concreto

Parámetros	Micropilote	
	D=20cm	D=25cm
<i>re</i>	0	0
R	1	1
Fe	1.05	1.05
Fu,c	1	1
Fu,t	1	1
Fu,f	0.50	0.50
Apr (cm ²)	63.617	113.097
Wpl (cm ⁶)	2.75E-04	6.51E-04
Wel (cm ³)	1.96E-04	4.64E-04

re: Reducción de espesor de armadura

R: Factor empírico de pandeo o coeficiente de reducción de capacidad estructural

F_e: Coeficiente de influencia de tipo de ejecución

Fu,c: Coeficiente de minoración del área de armadura tubular en función del tipo de unión

Fu,t: Coeficiente de minoración del área de armadura tubular en función del tipo de unión

Fu,t: Coeficiente de minoración del área de armadura tubular en función del tipo de unión

Apr: Sección reducida de la armadura tubular de acero

Wpl: Módulo plástico de la sección

Wel: Módulo elástico de la sección

Finalmente, con las propiedades y parámetros establecidos, con las ecuaciones establecidas en la sección 3.3., se hallan los valores de las resistencias estructurales para los micropilotes de 20 y 25 centímetros de diámetro. Se muestran en la Tabla 32.

Tabla 32 Resistencia estructural de diseño para los micropilotes de concreto

Tipo de cargas	Nomenclatura	Resistencia estructural de diseño	
		D=20 cm	D=25 cm
Compresión	Nc,Rd (kN)	2329.004	4056.929
Tracción	Nt,Rd (kN)	2418.507	4299.568
Flexión	Mc,Rd (kN.m)	57.395	136.048
Cortante	Vpl, Rd (kN)	977.821	1738.349

6.3.1 Modelamiento de los casos de estudio.

En esta sección correspondiente al modelamiento de los micropilotes de concreto, solo se mencionan los puntos en que se diferencia del modelo, como la definición del material, propiedades e interfaz, ya que la metodología es idéntica a la expuesta en la sección correspondiente al bambú.

6.3.1.1 Definición de materiales.

Respecto al procedimiento de aplicación, este es el mismo que su equivalente en bambú. Por este motivo, solo se expondrá sus parámetros correspondientes a este material en la siguiente Tabla 33.

Tabla 33 Definición del material Concreto

Nombre	Concreto
Material	Isotrópico
Tipo de modelo	Elástico
Módulo de elasticidad (E)	2.5 E+07 KN/m ²
Módulo de Poisson (v)	0.15
Peso unitario (r)	25 KN/m ³

6.3.1.2 Definición de propiedades.

Al igual que en la sección anterior, en este apartado se menciona el tipo de elemento, el material a emplear y la forma de la sección transversal para obtener las rigideces a través del cálculo realizado por el software. En la Tabla 34, se visualiza la definición del micropilote de concreto en el programa.

Tabla 34 Definición de la propiedad Micropilote de concreto

Nombre	Micropilote concreto
Tipo	1D
Tipo de modelo	<i>Embedded beam</i>
Material	Concreto
Espaciamiento	0.5
Sección	<i>Solid round</i>
Medida de la sección	D=0.25m

6.3.1.3 Interfaz.

De acuerdo con lo mencionado en la sección similar sobre el bambú, el concreto es un material más rígido en comparación al bambú por lo que los parámetros a emplear en la herramienta “Wizard” serán 0.01 para el “tv” y 0.7 para el “R”. Este último es por recomendación del mismo software, ya que define un valor de 0.7 a 1 para la interacción concreto/arcilla. Respecto a la metodología de aplicación, esta es la misma que aquella expuesta en la sección correspondiente al bambú. A continuación, en la Figura 38 y 39, se

muestran tanto los parámetros para la herramienta antes mencionada como las propiedades del material correspondiente.

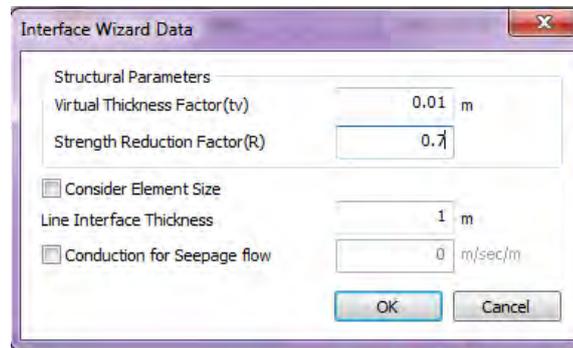


Figura 38. Datos de entrada del concreto en Wizard

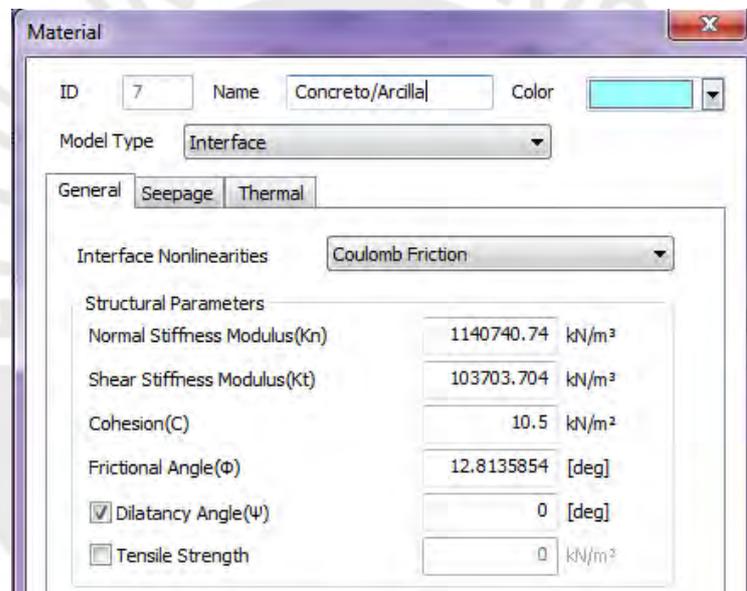


Figura 39. Propiedades de la interfaz creadas por el Wizard

6.3.2 Análisis de resultados.

En esta sección referente a los resultados, se mencionan los distintos valores de factor de seguridad obtenidos por el método de elementos finitos en el software Midas GTS NX para los distintos casos de estudio con los micropilotes de concreto. A continuación, se muestra, en la Figura 40, con el resultado en desplazamiento de un talud con altura de 7 metros.

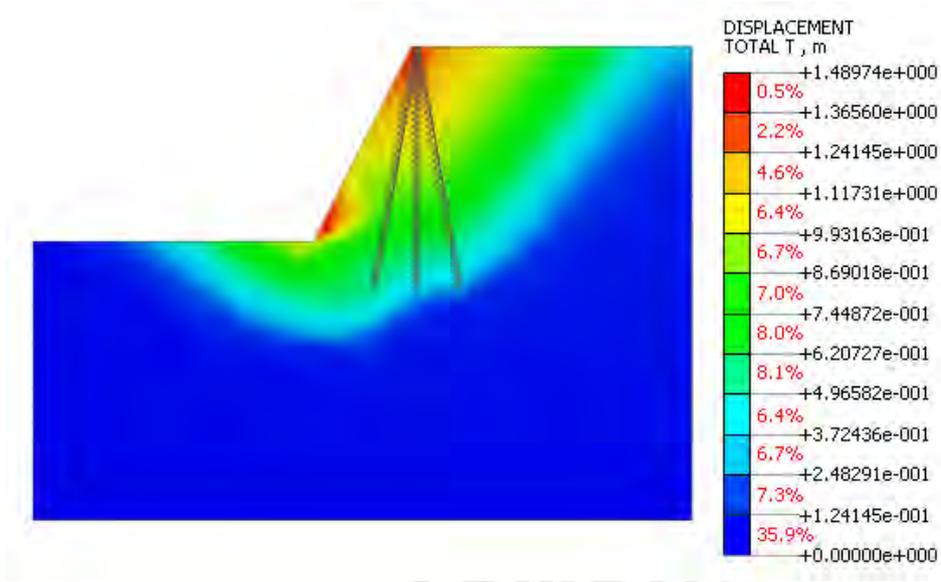


Figura 40. Desplazamientos totales para un talud con tres micropilotes

En las figuras 41 a 43, se mostrarán los resultados de las cargas producidas en los micropilotes para una configuración compuesta por tres micropilotes. Cada configuración posee su propia tendencia en sus respectivos diagramas de fuerzas o momentos; sin embargo, debido a que la configuración de tres micropilotes es la más representativa, esta se mostrará a continuación.

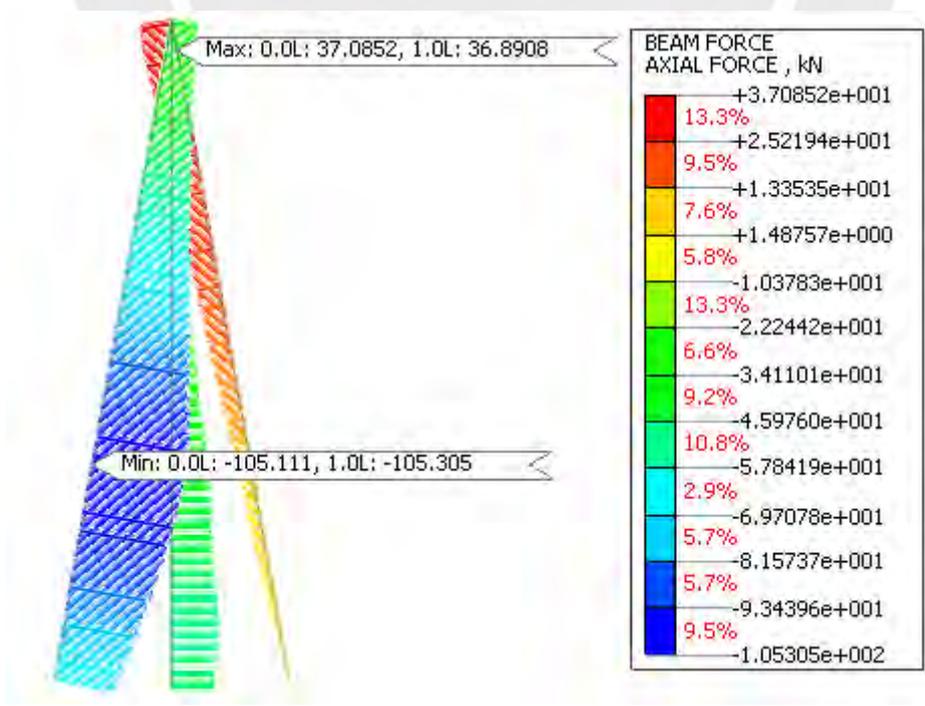


Figura 41. Resultados de fuerza axial sobre el micropilote

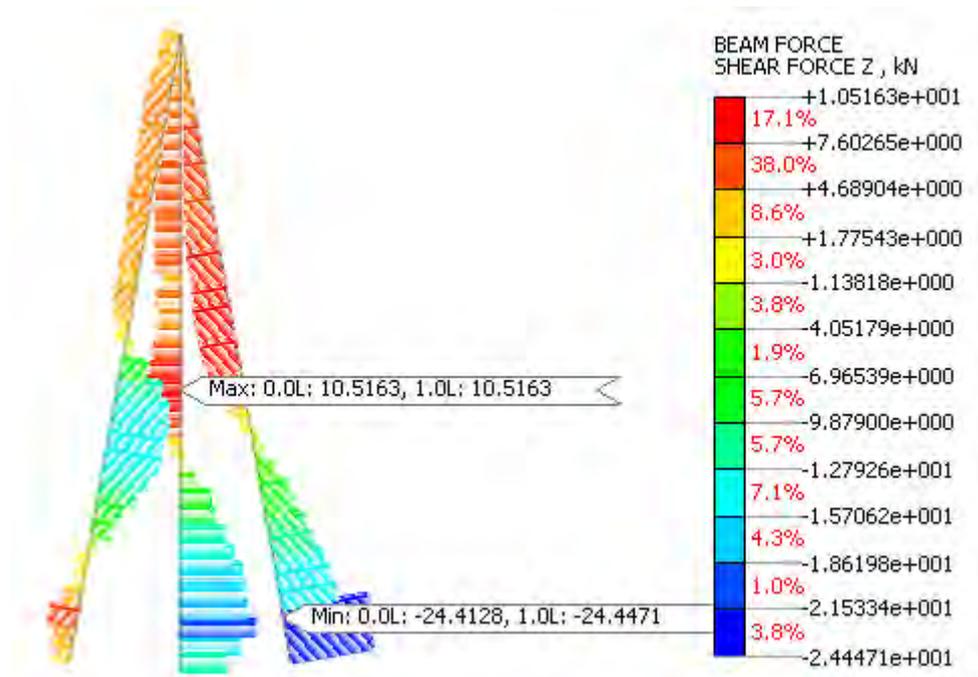


Figura 42. Resultados de fuerza cortante sobre el micropilote

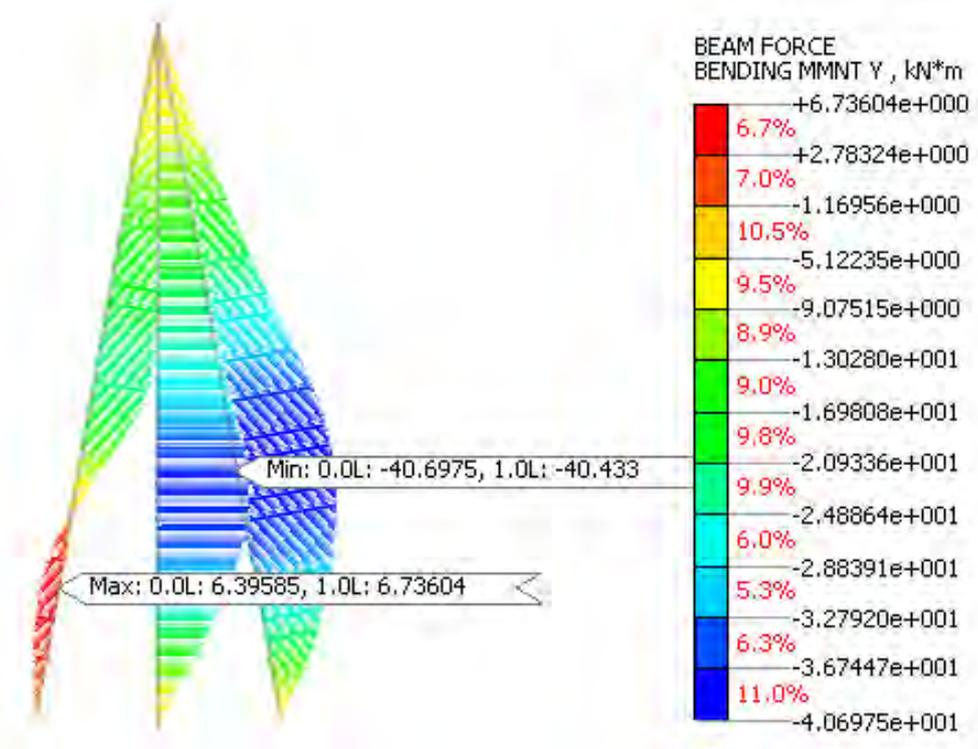


Figura 43. Resultado de momento flector sobre el micropilote

A continuación, se muestran las distintas tablas de elaboración propia que contienen los resultados correspondientes a factor de seguridad tanto sin refuerzo y según la cantidad de filas de micropilote de refuerzo para cada uno de los casos de estudio.

Tabla 35 Factor de seguridad para un talud reforzado con micropilotes de concreto con $D=20$ cm

Altura del talud (m)	Sin refuerzo	1 fila	2 filas	3 filas
5	1.54	1.85	2.11	2.13
7	1.18	1.39	1.62	1.63
8.5	0.98	1.20	1.34	1.37
10	0.91	1.07	1.15	1.21
12	0.82	0.95	0.98	1.03
15	0.72	0.77	0.84	0.86

Tabla 36. Factor de seguridad para un talud reforzado con micropilotes de concreto con $D=25$ cm

Altura del talud (m)	Sin refuerzo	1 fila	2 filas	3 filas
5	1.54	1.87	2.10	2.12
7	1.18	1.39	1.62	1.62
8.5	0.98	1.20	1.34	1.37
10	0.91	1.07	1.19	1.24
12	0.82	0.96	1.03	1.08
15	0.72	0.78	0.84	0.89

Con el resumen de factores de seguridad obtenidos de las anteriores tablas, es posible construir gráficas que permitan una mejor evaluación de la influencia del número de filas, por lo que a continuación se muestran las siguientes curvas de tendencia obtenidas de los valores de factores de seguridad obtenidos de los modelos tanto para un diámetro de 20 cm y 25 cm.

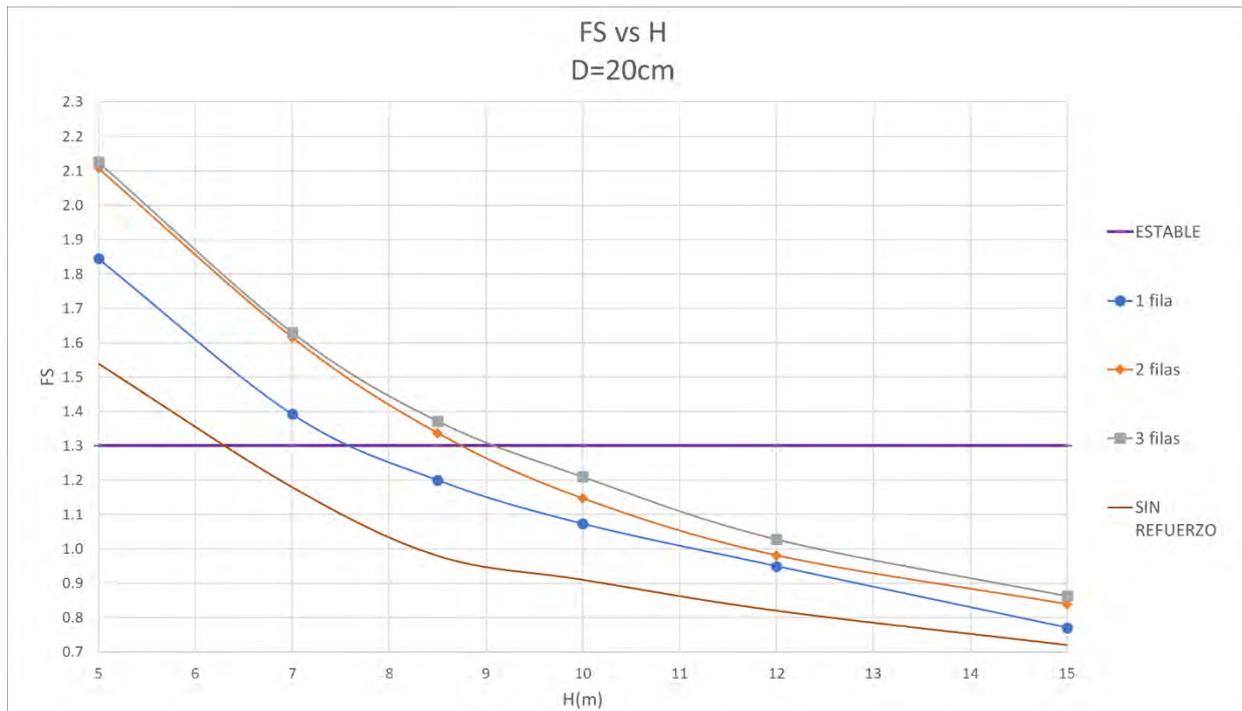


Figura 44 Gráfica FS vs H para un diámetro de 20 cm

Por un lado, la Figura 44 muestra el impacto en el factor de seguridad según la cantidad de filas de refuerzo de micropilotes de concreto armado con un diámetro de 20 centímetros para taludes con diferentes alturas. Esta gráfica indica que es posible estabilizar taludes con micropilotes con una altura entre 5 a 9 metros. Al analizar la tendencia, se observa que el factor de seguridad obtenido con un refuerzo de dos y tres micropilotes presenta valores y curvas de tendencias muy similares a comparación de un talud reforzado con un solo micropilote, el cual se encuentra más por debajo de las curvas mencionadas. Sin embargo, en general, la influencia de filas no es tan significativa, pues el incremento máximo que este puede llegar a tener para el mejor de los casos es de 0.28 al comparar un talud reforzado con un micropilote y otro reforzado con tres micropilotes.

Con respecto a la influencia de los micropilotes para diferentes alturas, se observa que el incremento de factor de seguridad en comparación a un talud sin refuerzo es mayor para taludes entre 5 a 10 metros es más acentuado en comparación a taludes con alturas mayores. Para taludes con altura entre 12m y 15m, la cantidad de filas proporciona un factor de seguridad con

valores mucho más cercanos entre ellos y la influencia de su refuerzo para estos casos no parece tan significativa, pues no se llega al valor mínimo de 1.3 para estabilizar el talud ni un incremento al factor de seguridad inicial del terreno. En este sentido, se obtiene que el factor de seguridad del talud sin refuerzo para refuerzos con una fila se eleva entre 7 y 22.5 % con un incremento máximo en el caso óptimo de 0.3. Mientras que, para configuraciones formadas por dos y tres filas de micropilotes, estos valores aumentan en una parecida proporción entre 16.5% y 40% con un incremento máximo en el caso óptimo de 0.6.

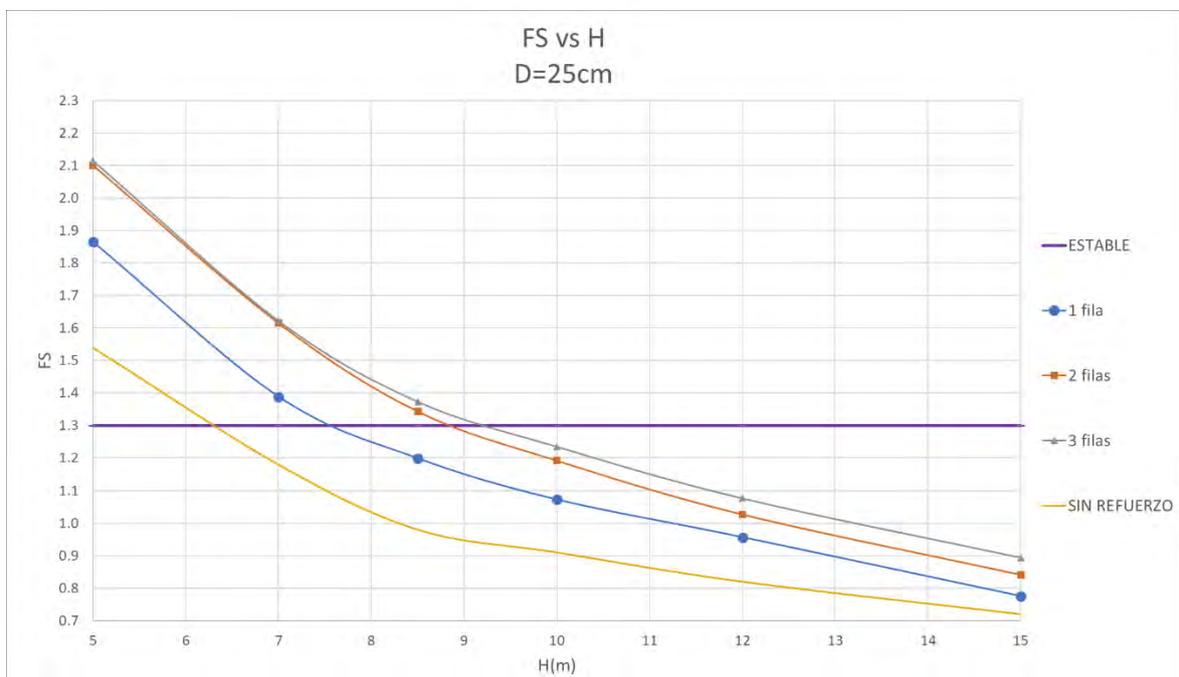


Figura 45 Gráfica FS vs H para un diámetro de 25 cm

Por otro lado, en la Figura 45, se observa una misma tendencia parecida con valores de factores de seguridad iguales o muy cercanos. En comparación a la gráfica de la Figura 44, se presenta un leve aumento en el factor de seguridad con un valor máximo de hasta 0.05, lo cual indicaría mediante solo este análisis que ambos diámetros poseen mismo rendimiento. Por tanto, el análisis de la sección anteriores similar al de la Figura 45.

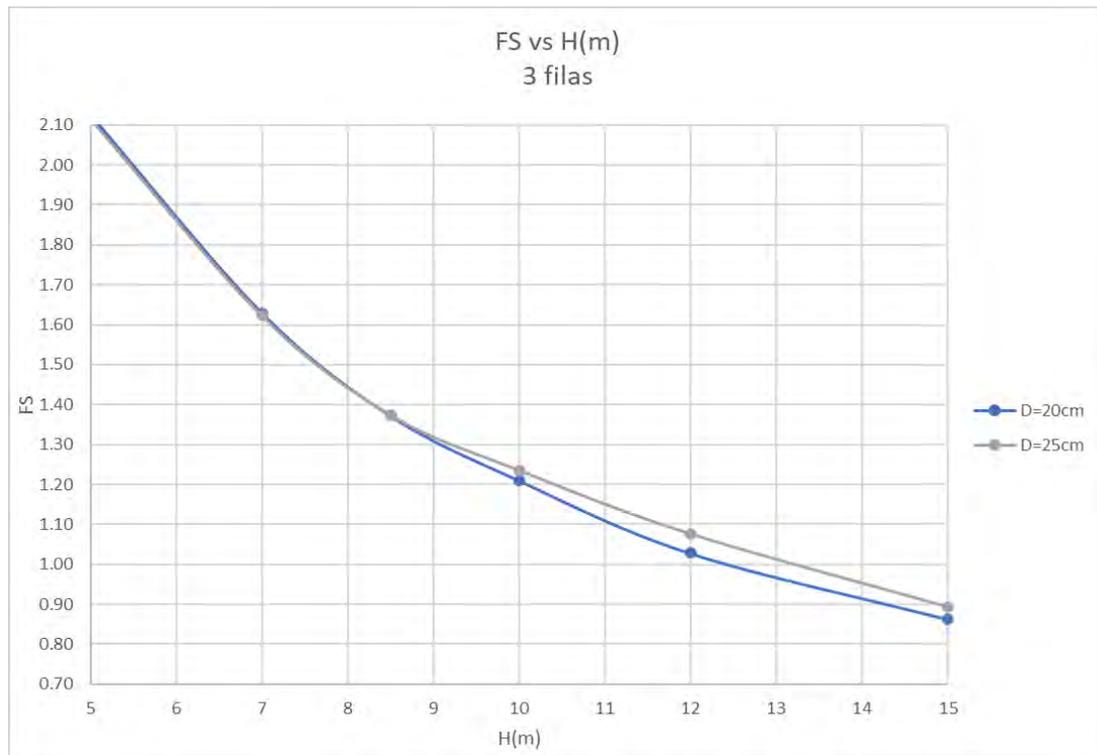


Figura 46. Gráfica de FS vs H para refuerzo con 3 filas de micropilotes de concreto

Se presenta la Figura 46 que expone la diferencia entre los diferentes diámetros en los factores de seguridad para tres filas. Según lo mencionado anteriormente, se confirma que la influencia entre factores de seguridad obtenidos de un diámetro de 20 centímetros y uno de 25 es mínima a pesar de que existan ciertos casos de incremento para alturas mayores del diámetro mayor, pues ninguna diferencia de factores de seguridad es tan significativa. Este tipo de gráfico es representativo en comparación a aquellos taludes reforzado con una y dos filas, pues los valores de factores de seguridad son iguales o cercanos en los dos diámetros.

A continuación, se analiza el fallo estructural de los micropilotes con los valores de resistencias admisibles ubicadas en la Tabla 32, la cuales se determinaron con la Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes en obras de carretera dada por el Dirección General de Carreteras de España. Se verifica que los valores obtenidos de los diagramas de fuerzas y momentos sean menores a las fuerzas y momentos admisibles tanto de compresión, tracción, cortante y flexión según el arreglo.

Cabe recalcar que se realiza un análisis adicional para cada caso según lo establecido en la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera, en la cual se comprueba su resistencia estructural ante esfuerzos combinados que consisten en la comprobación de interacción entre esfuerzos cortantes y flectores, pues, al reforzar un talud, los micropilotes se encuentran sometidos a estos esfuerzos de forma simultánea. Según la Dirección General de Carreteras (2005), explicada en la sección 3.3.5 del presente documento, en caso de que la fuerza cortante (VEd) sea mayor a la mitad de su resistencia al corte (Vpl, Rd), al valor de momento admisible, se le aplica un factor de reducción calculado con la fuerza cortante producida (VEd) y la resistencia al corte del micropilote (Vpl, Rd). En caso contrario, se utiliza el mismo momento admisible.

Al analizar los valores de fuerza cortante (VEd) producidos en el micropilote, se observa que estos son siempre menores al 50% de la resistencia al corte (Vpl, Rd) según este sea un micropilote de 20 o 25 centímetro de diámetro.

$$\text{Si } VEd \leq 0.5 Vpl, R ; Mv, Rd = Mc, Rd$$

$$\text{Si } VEd > 0.5 Vpl, Rd ; Mv, Rd = (1 - \rho) Mc, Rd$$

Para 20 cm,

$$0.5 Vpl, R = 0.5 \times 977.821 = 488.911 \text{ kN}$$

Para 25 cm,

$$0.5 Vpl, R = 0.5 \times 1738.349 = 869.175 \text{ kN}$$

Al disminuir el valor de resistencia al corte para un diámetro de 20 y 25 centímetros, se obtiene los siguientes resultados con valor de 488.911 kN y 869,175 kN respectivamente para evaluarlos con las fuerzas actuantes en los micropilotes (VEd). Al evaluar las fuerzas máximas actuantes de las siguientes tablas, se observa que no es necesario aplicar un factor de reducción

a la carga admisible de flexión, pues los valores VEd son bastante menores a los valores hallados anteriormente.



Tabla 37. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 5m

FILAS	D=20cm					D=25cm				
	Compresión	Tracción	Cortante	Momento	FS	Compresión	Tracción	Cortante	Momento	FS
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN.m)		(kN)	(kN)	(kN)	(kN.m)	
1	45.061	0.000	9.505	15.909	1.85	46.551	0.000	9.308	16.829	1.87
2	72.709	42.342	26.829	45.220	2.11	75.104	40.102	31.085	59.359	2.10
3	70.833	37.976	25.297	23.905	2.13	76.784	35.779	31.945	36.782	2.12

Tabla 38. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 7m

FILAS	D=20cm					D=25cm				
	Compresión	Tracción	Cortante	Momento	FS	Compresión	Tracción	Cortante	Momento	FS
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN.m)		(kN)	(kN)	(kN)	(kN.m)	
1	71.539	0.000	14.763	30.995	1.39	72.201	0.000	14.156	30.512	1.39
2	107.423	35.075	30.099	64.316	1.62	112.150	46.899	35.573	84.656	1.62
3	105.305	37.085	24.447	40.698	1.63	107.870	40.011	28.455	46.952	1.62

Tabla 39. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 8.5 m

FILAS	D=20cm					D=25cm				
	Compresión	Tracción	Cortante	Momento	FS	Compresión	Tracción	Cortante	Momento	FS
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN.m)		(kN)	(kN)	(kN)	(kN.m)	
1	89.895	0.000	18.485	35.633	1.20	92.722	0.000	19.802	43.935	1.20
2	110.991	25.314	32.029	73.659	1.34	116.371	44.964	40.580	109.158	1.34
3	107.441	36.784	28.887	50.383	1.37	112.387	46.909	38.481	68.504	1.37

Tabla 40. Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 10m

FILAS	D=20cm					D=25cm				
	Compresión	Tracción	Cortante	Momento	FS	Compresión	Tracción	Cortante	Momento	FS
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN.m)		(kN)	(kN)	(kN)	(kN.m)	
1	109.118	0.000	19.131	51.773	1.07	110.683	0.000	22.381	56.893	1.07
2	120.516	1.547	23.131	37.804	1.15	145.831	40.790	42.114	117.984	1.19
3	127.411	46.177	28.000	52.321	1.21	137.479	61.703	40.746	84.016	1.24

Tabla 41 Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 12m

FILAS	D=20cm					D=25cm				
	Compresión	Tracción	Cortante	Momento	FS	Compresión	Tracción	Cortante	Momento	FS
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN.m)		(kN)	(kN)	(kN)	(kN.m)	
1	140.100	0.000	16.190	42.570	0.95	139.426	0.000	22.494	60.476	0.96
2	140.020	5.840	32.720	28.900	0.98	164.210	21.279	38.834	109.755	1.03
3	127.784	28.589	14.173	30.550	1.03	153.528	73.732	40.354	99.950	1.08

Tabla 42 Solicitaciones para los refuerzos detallados en un talud de 15m

FILAS	D=20cm					D=25cm				
	Compresión	Tracción	Cortante	Momento	FS	Compresión	Tracción	Cortante	Momento	FS
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN.m)		(kN)	(kN)	(kN)	(kN.m)	
1	159.120	0.000	15.180	30.150	0.77	192.579	0.000	8.021	11.811	0.78
2	161.160	14.650	59.520	54.790	0.84	172.157	10.903	64.061	104.019	0.84
3	157.050	41.680	24.580	36.740	0.86	202.484	59.870	39.369	107.842	0.89

En conclusión, al evaluar las cargas mostradas en las posteriores tablas con su resistencia admisible, los valores que se encuentran resaltados de color verde en las distintas tablas son aquellos que cumplen las condiciones de tener fuerzas o momentos actuantes menores a los máximos permisibles y poseen un valor de factor de seguridad mayor a 1.3. En este sentido, se pueden validar la mayoría de los casos hasta una altura de 8.5 metros, pues, a pesar de que varios de los micropilotes para alturas entre 10 y 15 metros cumplan los requerimientos de los esfuerzos admisibles, no se posee el mínimo valor factor de seguridad de 1.3.

Asimismo, los resultados muestran que la cantidad de casos de estudios aceptables para un diámetro mayor de 25 centímetros es mayor en comparación al diámetro menor a pesar del poco incremento con respecto al factor de seguridad. Esto se debe a la mayor sección tanto de concreto como de acero que permite una mejor resistencia en general y especialmente en flexión, ya que debido a esta última sollicitación los casos con diámetro de 20 centímetros no cumplen.

En suma, se recalca que el refuerzo con dos micropilotes no es tan efectivo, pues sus esfuerzos de flexión son mayores y superan la resistencia de la sección para los casos de 20 cm de diámetro. Por último, se resalta que los resultados son una tendencia, mientras mayor sea la cantidad de filas el factor de seguridad aumenta y los esfuerzos disminuyen en específico para la configuración compuesta por tres micropilotes, pues los esfuerzos a flexión y cortante se reducen y se distribuyen en el grupo de micropilotes. Con respecto a la compresión y tracción, se observa que estos esfuerzos se incrementan levemente al aumentar las filas y el diámetro, pero aun así se encuentran muy por debajo del admisible y cumple para todos los casos.

7 Análisis de propuestas

La determinación de la alternativa de refuerzo más conveniente se basa en un análisis técnico, el cual comprende la revisión de los factores de seguridad obtenidos, así como la resistencia de las alternativas a las diversas solicitaciones. Asimismo, se realiza un análisis multicriterio basado en la metodología *Choosing by Advantages* (CBA) para diferenciar a las propuestas evidenciando sus ventajas y ponderándolas para la mejor toma de decisiones.

7.1 Análisis técnico

En esta sección, se realiza el análisis técnico para las propuestas de refuerzo de bambú y concreto armado enfocado en tres criterios considerados más relevantes y estudiados a lo largo del presente texto: los factores de seguridad, resistencias y número de elementos.

7.1.1 Factores de seguridad.

En este factor, el criterio de comparación será el máximo y mínimo incremento en el factor de seguridad que se obtiene al reforzar un talud en comparación a un caso no reforzado, pues los valores varían según la forma del mallado y la cantidad de refuerzo en términos de composición, disposición y número de filas. Esta comparación se realiza entre ambas propuestas de refuerzo y para cada uno de los casos de estudio que logren ser considerados como estables según el factor de seguridad mínimo alcanzado de 1.3, más no según el diseño por resistencia. A continuación, se muestra la siguiente tabla elaborada a partir de los datos mostrados en las tablas 15, 16 y 17 para valores correspondientes al refuerzo de bambú, mientras que para el refuerzo de concreto se emplean los datos de las tablas 31 y 32.

Tabla 43. Incrementos en el FS por talud según tipo de refuerzo

Talud	Micropilote de Bambú				Micropilote de Concreto			
	Min (%)	Composición (A-F)	Max (%)	Composición (A-F)	Min (%)	Composición (D-F)	Max (%)	Composición (D-F)
5 m	23%	1-1	54%	4-6	20%	20-1	38%	25-3
7 m	17%	1-1	43%	4-6	18%	20-1	38%	25-3
8.5 m	21%	1-1	42%	4-6	22%	20-1	40%	25-3

Nota: “A” refiere a “arreglo”, “F” refiere a “filas” y “D” refiere a “diámetro”.

De acuerdo a lo mostrado en la Tabla 43, los micropilotes de bambú presentan valores de incrementos de factor de seguridad similares y ligeramente mayores a los micropilotes de concreto en relación con sus casos no reforzados respectivamente. Por lo que se concluye que estos micropilotes resultan más efectivos que los micropilotes de concreto al analizar la influencia de ambos en el factor de seguridad sin considerar si sus esfuerzos exceden las cargas admisibles.

Para los incrementos mínimos, este comportamiento mayor o cercano al concreto se debe a la gran elasticidad y resistencia del bambú, lo cual permite un valor similar de influencia en el talud. En contraste, para los incrementos máximos, se obtiene incrementos mejores a los del concreto armado en comparación al mínimo, ya que, además de las buenas propiedades mecánicas del bambú, al utilizar arreglos y mayor cantidad de filas, mayor cantidad de material absorbe los esfuerzos transmitidos del terreno y se proporciona un factor de seguridad mayor.

7.1.2 Comportamiento ante solicitaciones de momentos y fuerzas.

El análisis estructural de los refuerzos de bambú y concreto se realiza comparando la forma de las gráficas de momento flector, fuerza cortante y fuerza axial para exponer y contrastar sus comportamientos ante las distintas solicitaciones, en contraste con cómo debería ser su comportamiento según la guía de diseño y construcción de micropilotes (FHWA, 2005). El comparativo se realiza para el caso más crítico, un talud de 8.5m y solo para los refuerzos que cumplen con el diseño por resistencia por lo que se muestran las siguientes gráficas

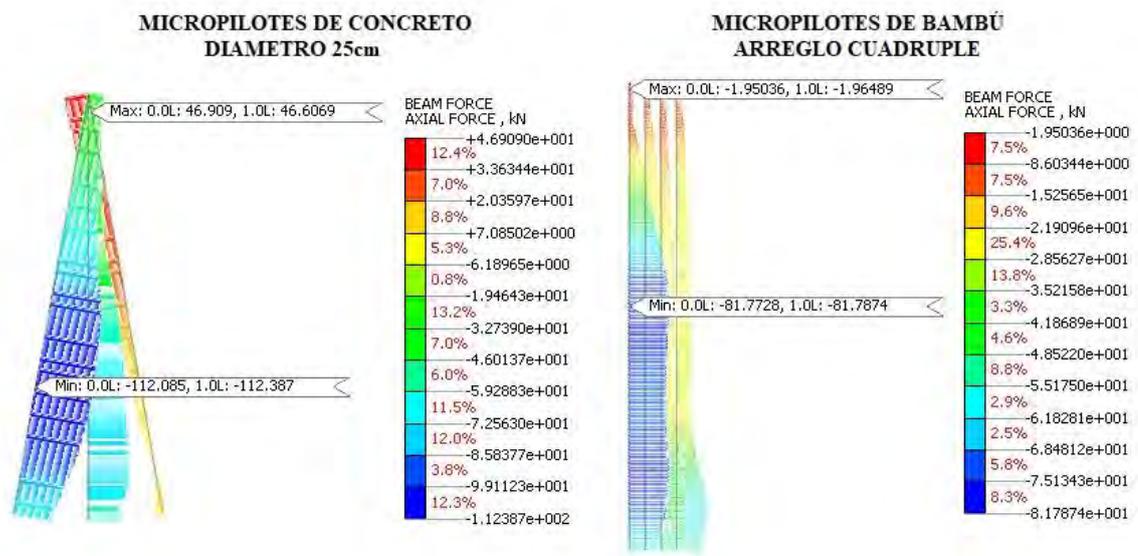


Figura 47. Diagrama de fuerzas axiales para micropilotes de concreto y bambú en un talud de 8.5 m

Para las fuerzas axiales, en primer lugar, según FHWA (2015), en un grupo de micropilotes de concreto, el elemento con pendiente negativa tiene remanentes de fuerzas en tensión a comparación de los otros elementos, pues solo se presentan compresiones en ellos; además, menciona que en elementos verticales solo se presentan fuerzas de compresión.

Al contrastar esta información con los diagramas existentes, por ejemplo, aquellos visibles en la Figura 47, se presenta un comportamiento acorde a lo leído, pues, en el caso de micropilotes de concreto, se puede observar elementos en compresión, el micropilote con pendiente positiva y aquel ubicado en posición vertical, mientras que el elemento sometido a fuerzas en tensión es el que presenta pendiente negativa. De igual forma, para los micropilotes de bambú, solo se presentan micropilotes verticales bajo fuerzas en compresión, donde el primer elemento es el más cargado de compresiones.

Desde otra perspectiva, si los comparamos entre ellos, se puede observar en la Figura 47 que los micropilotes de concreto presentan una mayor absorción de compresiones, lo cual pueda ser por la mayor rigidez que presenta en comparación a los micropilotes de bambú; no obstante,

se puede observar un comportamiento similar entre ellos, ya que el primer elemento de la corona del talud es el que está más cargado en ambos casos y los elementos siguientes presentan una disminución en comparación a la carga máxima presente en el primer elemento.

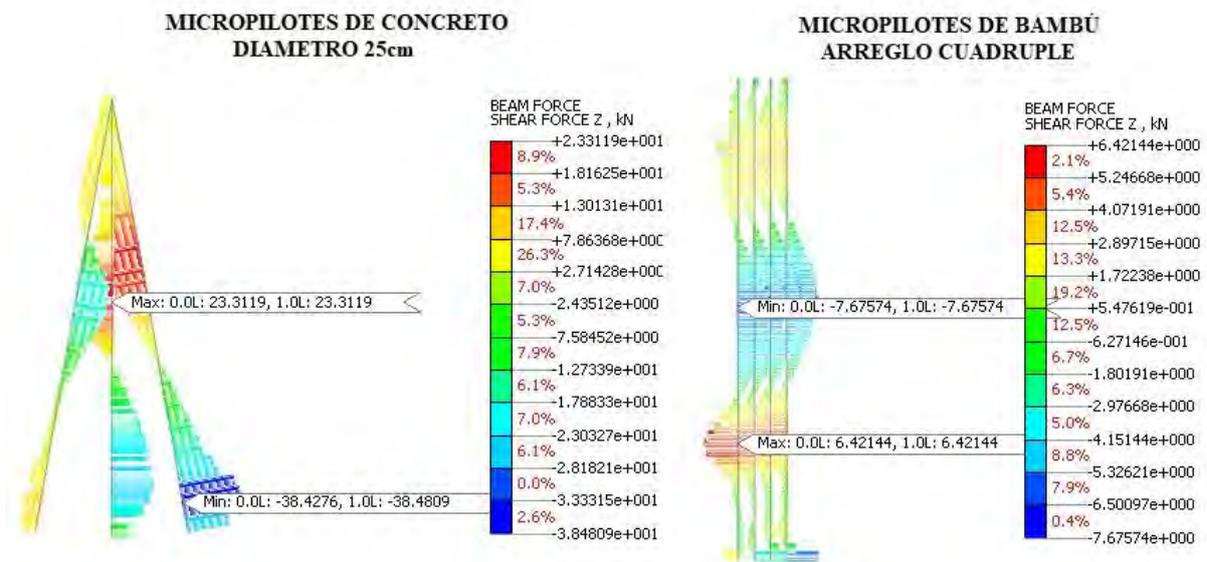


Figura 48. Diagrama de fuerzas cortantes para micropilotes de concreto y bambú en un talud de 8.5 m

En la Figura 48, respecto al diagrama de cortantes, se puede observar que las máximas cortantes absolutas se originan en las superficies de falla o en la zona media del micropilote. Con respecto a los micropilotes de concreto, no se observan cambios de dirección por debajo de las superficies de falla; en cambio, en el caso del talud reforzado con bambú, se muestran cambios de dirección por debajo de las cortantes originadas por la superficie de falla, lo cual puede ser por la diferente configuración que presentan ambas propuestas. Asimismo, se observa una gran diferencia en magnitudes al comparar ambas alternativas, pues en el caso del concreto tanto la máxima cortante positiva como negativa son aproximadamente el triple o cuádruple en comparación con las fuerzas presentes en el bambú, lo cual se debe a valor elevado de módulo de elasticidad del concreto armado en comparación al bambú.

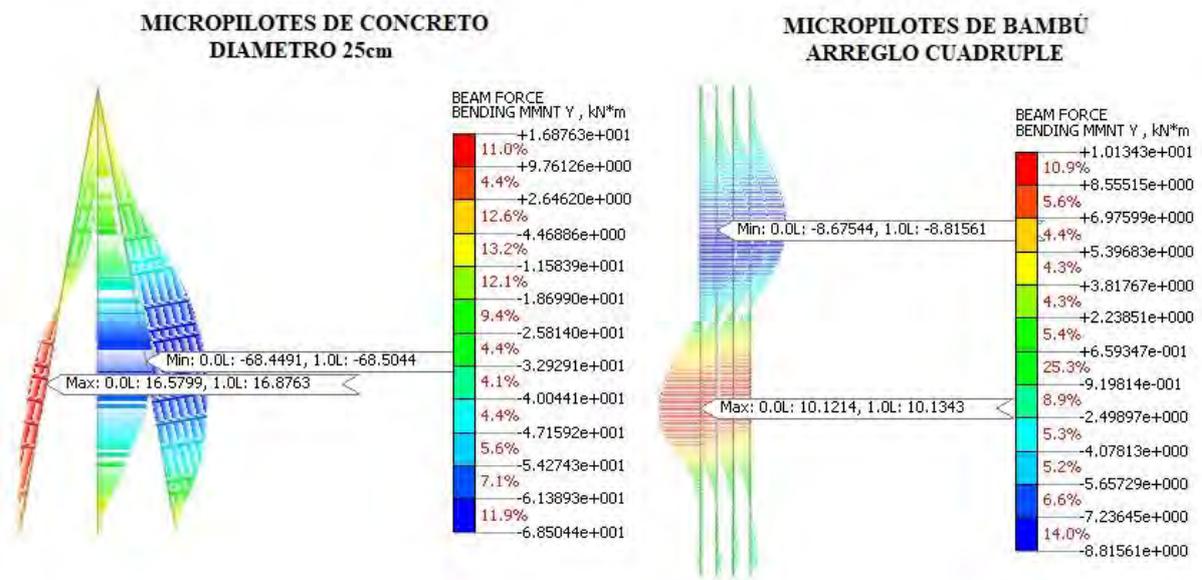


Figura 49. Diagrama de momentos flectores para micropilotes de concreto y bambú en un talud de 8.5 m

Con respecto a los diagramas de momentos flectores, la FHWA (2005) menciona que los momentos flectores son cercanos a cero en la ubicación de las máximas fuerzas axiales. En ese sentido, en los micropilotes de concreto, se puede observar que el cambio de concavidad en el diagrama del elemento con pendiente positiva muestra un punto de momento cero, acorde con la ubicación de fuerza axial máxima; sin embargo, en el resto de los elementos de concreto no se puede observar claros momentos cercanos al cero ni cambios de concavidad. En contraste, para los micropilotes de bambú, sí se puede cumplir este comportamiento, pues en cada punto de máxima fuerza axial se tiene un momento igual a cero.

Respecto a las capacidades de cada uno de los materiales, en el caso del bambú, se presentan magnitudes mucho menores en comparación al concreto, pues el máximo momento del bambú es 10.13 kN.m, mientras que en el caso del concreto es 68.5 kN.m., lo cual evidencia la gran diferencia entre las secciones y rigideces. En adición, una de las observaciones en torno al comportamiento del bambú radica en su poca resistencia frente a momentos flectores y, en

algunos casos, ante sollicitaciones de cortante, lo que resulta en una necesidad de refuerzo para mejorar su desempeño estructural entorno a las fuerzas antes mencionadas.

En conclusión, el comportamiento de ambas alternativas se debe a la disposición de los micropilotes y a las diferentes propiedades mecánicas de sus respectivos materiales. Respecto a los micropilotes de concreto, debido a su rigidez, presentan un mejor comportamiento antes las distintas sollicitaciones presentes en la estabilidad de taludes como lo son los esfuerzos cortantes y a flexión, gracias al refuerzo de acero tubular que los conforman; mientras que, para el micropilote de bambú, es necesario adicionarle un refuerzo para mejorar su capacidad resistente ante flexiones y así tener una mayor cantidad de casos válidos según el diseño por resistencia.

7.1.3 Número de elementos.

En esta sección, se desarrolla el criterio basado en la cantidad de refuerzo mínimo requerido para estabilizar los casos de estudio y, además, aquellos casos que hayan sido considerados válidos según la verificación por cargas admisibles para ambas propuestas. En este sentido, se elabora la siguiente tabla según la información recabada de las tablas 22, 23 y 24 para los datos referentes al bambú y de las tablas 37, 38 y 39 para los datos correspondientes al concreto.

Tabla 44. Descripción del refuerzo mínimo para la estabilización de taludes de 5m, 7m y 8.5m

	FS		Composición		FS		Composición	
Talud	Sin refuerzo	Bambú	Arreglo	Filas	Sin refuerzo	Concreto	Diámetro	Filas
5m	1.54	2.34	Triple	Cinco	1.54	1.85	20	Una
7m	1.18	1.66	Doble	Seis	1.18	1.39	20	Una
8.5m	0.98	1.38	Doble	Cinco	0.98	1.37	20	Tres

De acuerdo con los datos mostrados en la Tabla 44, se infiere que el bambú es capaz de estabilizar y cumplir con su diseño por resistencia al emplear arreglos dobles como mínimo distribuidos a lo largo de cinco a más filas, mientras que, en el caso del concreto, se obtiene

que basta con un micropilote de 20cm de diámetro y en algunos casos, con una sola de fila de refuerzo para estabilizar y cumplir con el diseño por resistencia. Por ello, es importante mencionar que, a pesar de que los micropilotes de bambú requieran de una mayor cantidad de filas para estabilizar en comparación al concreto, esto solo nos brinda una idea de la cantidad de trabajo que requiere una alternativa en comparación a la otra, ya que, si se quiere analizar su eficiencia, hacen falta factores que brinden una noción más completa de cada una de las alternativas, por lo que se estudian en el análisis multicriterio.

Como conclusión de la sección, los micropilotes de concreto brindan un efecto idóneo en el factor de seguridad, aportando un mínimo incremento del 20% y un máximo incremento del 40% con respecto a sus casos no reforzados; además, presentan un mejor comportamiento ante las sollicitaciones de cortante y flexión, ya que no es necesario tener mayores diámetros ni espesores de refuerzo para que cumplan con el diseño por resistencia. Con respecto al número de elementos, esta alternativa representa un menor volumen de trabajo, pues, en taludes de hasta 7.5m de altura tan solo requiere una fila para verificar un diseño óptimo y brindar un FS aceptable, y un máximo de 3 filas para estabilizar correctamente taludes de mayor altura como los de 8.5m de alto.

Con respecto a los micropilotes de bambú, estos brindan un mejor efecto en el factor de seguridad aportando un mínimo incremento del 41% y un máximo incremento del 51% con respecto a sus casos no reforzados. Sin embargo, esto se debe a los arreglos y la cantidad de filas presentes en el refuerzo para que se cumpla el diseño por resistencias, lo cual permite obtener un mejor factor de seguridad a comparación de la opción de concreto.

7.2 Análisis multicriterio

En esta sección, se aborda un análisis multicriterio para realizar una comparación de ambas propuestas en esta investigación. Se utiliza la metodología llamada Choosing By

Advantages (CBA), la cual es definida, según Arroyo et al. (2003), como un sistema que soporta la toma de decisiones en el cual se realizan comparativos entre las ventajas de las alternativas.

Este sistema consta de un vocabulario conformado por los siguientes términos: alternativa, factor, criterio, atributo, ventaja e importancia de cada ventaja (Suhr, 1999). A continuación, se exponen las definiciones, según Suhr (1999), y se establecen según el enfoque de esta investigación.

- Alternativas: En primer lugar, se define cuáles son las propuestas a comparar. Para este caso, se define por un lado los micropilotes de bambú y por otro los micropilotes de concreto.
- Factores: Este es un elemento, parte o componente que influyen en la toma de decisiones. Para esta investigación, se propone los siguientes factores: impacto ambiental del material, innovación, oportunidad de crecimiento peruano, constructibilidad, mano de obra especializada, estándar de diseño y durabilidad.
- Criterios: Son las reglas de decisión o normas establecidas por las personas que toman la decisión, las cuales se deben seguir para evaluar los factores. Se establecen aquellos de carácter obligatorio, las cuales son condiciones que la alternativa debe seguir y, por otro lado, lo de carácter deseado que representa las preferencias de las personas que toman la decisión. Estos criterios se definen en específico según el factor.
- Atributos: Son las características, calidad o consecuencia de cada una de las alternativas. Esta se definirá según la información de cada propuesta y su respectivo factor.
- Ventajas: Es el beneficio, ganancia o mejora al comparar las alternativas. Asimismo, esta se definirá en específico según la información sea cuantitativa o cualitativa de cada propuesta y se compara las otras alternativas.

La secuencia de pasos para realizar el CBA consiste en definir los anteriores conceptos en el orden listado. Como penúltimo paso, se debe decidir la importancia de cada ventaja, la cual, según Suhr (1999), se denomina Iofa. Este proceso se realiza mediante la valoración de los factores entre un puntaje entre 0 a 100 en la cual mientras sea más importante se le otorga un mayor puntaje. Finalmente, se asigna los puntajes para cada alternativa según el factor y se suma los puntajes totales de cada propuesta para compararla con el costo.

A continuación, se exponen los atributos para los micropilotes de bambú y concreto para cada factor con los cuales se sustenta la ventaja de una alternativa en comparación:

- ✓ Impacto ambiental: El bambú posee una gran ventaja en comparación al concreto, ya que es conocido por ser un material ecológico, sostenible y sustentable. Este tiene un rol ecológico importante en el ecosistema, pues genera gran cantidad y calidad de servicios ecosistémico al suelo, aire, agua, microclima, biodiversidad y paisaje debido a su plantación (Añazco & Espinoza, 2015). Por ejemplo, esta planta, en los primeros seis años de crecimiento, es un fijador de dióxido de 54 toneladas métricas por hectárea (Arias y Hoyos, 2004). Asimismo, su bajo costo, facilidad de cultivo y rápido crecimiento posiciona al bambú como material sustentable y renovable. En contraste, se encuentra el cemento y el acero cuyo consumo de energía y producción industrializada producen una gran huella de carbono. Con respecto al primer material, este produce entre 0.5 a 1 kgCO₂/kg de gases de efecto invernadero mientras que el acero ronda 0.5 a 5 kgCO₂/kg (Barcelo et al, 2013).

En adición, el uso de bambú como refuerzo temporal resultaría más beneficioso ambientalmente, debido a que este un material biodegradable, el cual no generaría grandes y duraderas cantidades de residuos a comparación de la concreto y el cemento. Asimismo, el hecho que se opte por una estructura basados en estos últimos materiales para uso temporal significa el uso de grandes cantidades de material para un tiempo de

vida tan reducido (Hossain y Sun, 2018). Por tanto, el uso de micropilotes de concreto no resulta favorable para el medio ambiente, ya que, como se mencionó, la producción de sus materiales conlleva a un gran impacto negativo al medio ambiente por su alto consumo de energía y emisiones de CO₂ equivalente.

- ✓ Innovación: Este factor se considera debido a que el uso y análisis del bambú para su aplicación en la geotecnia, en específico, de la especie *Guadua Angustifolia* no se ha abarcado con anterioridad y requiere de varias investigaciones futuras para comprobar su viabilidad y estandarizar su proceso. El material posee buenas propiedades mecánicas en general; sin embargo, como se mencionó en capítulos anteriores, bajo ciertas solicitaciones, no posee buena resistencia a corte y flexión. En este sentido, es posible su aplicación de este material con otros que permitan un mejor comportamiento. Asimismo, no solo es aplicable su uso como estabilizador de taludes, sino además como material estructural para diferentes especialidades de la Ingeniería. Por otro lado, los micropilotes de concreto armado están constituidos por materiales ampliamente estudiados y poseen varios estándares que guían tanto el diseño como ejecución.
- ✓ Oportunidad de crecimiento peruano: Este factor se considera debido a que el uso de bambú puede representar un beneficio social y económico en el Perú. Utilizar este material, en nuevos ámbitos como la geotecnia, promueve su uso y, por ende, la demanda de más plantaciones; según INBAR (2013), una industria de bambú sólida en Ecuador, Colombia y Perú podría generar ganancias de hasta USD 30 millones por año y tener la capacidad de crear más de 10.000 nuevos empleos en los siguientes años sobre todo en áreas rurales de escasos recursos, lo cual puede significar el crecimiento de esta industria y en el desarrollo de este sector en las zonas rurales. Respecto a los micropilotes de concreto, estos son una opción bastante conocida en la actualidad, además de presentar un impacto en las empresas peruanas o extranjeras que realizan tanto el diseño como la

ejecución estas soluciones; es así que su impacto económico y social se centra en zonas industrializadas, puesto que se cuentan con los equipos y personal de amplia experiencia.

- ✓ Constructibilidad: Este punto determina la complejidad constructiva de la aplicación de cada propuesta para estabilizar taludes. Por un lado, con respecto a la ejecución de los micropilotes de bambú, no hay estándares o normativas que regulen el procedimiento constructivo; sin embargo, se presenta un antecedente en donde se aplicó un soil nail y pilotes de Moso bambú, el cual se hincó, sin perforar, con un martillo neumático y con mano de obra (Dai, 2017). Considerando el antecedente mencionado, podría ser aplicable una ejecución similar teniendo en cuenta los cuidados necesarios para no dañar al bambú al hincarlo en la cabeza. Por otro lado, el proceso de ejecución de micropilotes de concreto armado requiere el uso de maquinarias de perforación e inyección (mezcladora, agitador, bomba de inyección); además de personal especializado para la supervisión y aplicación con la finalidad de asegurar la calidad del micropilote.

Con respecto al mismo factor, también se evalúan otras características que influyen en la constructibilidad como el peso de material y la cantidad de filas por ejecutar. Para ello, se analiza un caso de estudio para una altura de siete metros, en el cual se compara el refuerzo mínimo a emplear. Con respecto a los micropilotes de bambú, se requiere de 6 filas de un arreglo doble con longitud de diez metros y, para los micropilotes de concreto, un micropilote de concreto de 20 cm con una longitud de 8 metros. Al estimar el peso, a pesar de que se utilice mayor cantidad de filas de refuerzo, el peso de todos los bambús juntos es 18% del peso de solo el acero utilizado para un solo micropilote. Por tanto, en base a lo comentado, a pesar de que los micropilotes de bambú requieran de una mayor cantidad de ejecuciones, su proceso de ejecución es más sencillo, sus materiales más livianos y emplean menos maquinaria.

- ✓ Mano de obra especializada: Con respecto a este factor, se evalúa el nivel de especialización los procesos de ejecución para los micropilotes en el marco peruano. Para la primera alternativa, debido a que este un método de estabilización innovador aplicado en países extranjeros, en Perú, no existe mano de obra especializada que conozca los requerimientos y el proceso exacto para el hincado de micropilotes de bambú. En contraste, en cuanto a la segunda alternativa, existe varias empresas peruanas o extrajeran que realizan el diseño y ejecución de los micropilotes de concreto
- ✓ Estándar de diseño: Por un lado, la primera alternativa no presenta ningún estándar de diseño aplicado para la geotecnia; sin embargo, posee múltiples normativas para un diseño estructural y construcción de edificaciones de bambú. Por otro lado, el diseño de micropilotes presenta varias guías o normativas, las cuales son las siguientes: AASHTO LRFD Bridge Design Specification (2018), Micropile Design and Construction (2005), Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera de la Dirección General de Carreteras (2005) entre otros.
- ✓ Durabilidad: Este punto evalúa la durabilidad de cada material al estar en contacto con el suelo. Por un lado, el bambú se caracteriza debido que es un material orgánico por tener baja durabilidad; sin embargo, según Hidalgo (1974), y NMBA (2006), este si es tratado químicamente, es posible su preservación al estar en contacto con el suelo durante 10 a 15 años. Sin embargo, se recalca que la cantidad de investigaciones realizadas con respecto a este tema son limitadas y no hay precedentes en los cuales se verifique la preservación de este material tratado al usarse como un elemento estructural enterrado. En contraste, la segunda alternativa presenta una mayor vida útil según los requerimientos del diseño. El cemento posee una alta durabilidad excepto a ataques químicos o biológicos; sin embargo, según su nivel de exposición, es posible añadir

aditivos a la mezcla para contrarrestar cualquier posible efecto perjudicial y hasta mejorar el comportamiento del material.

Una vez establecidos los atributos y ventajas de cada propuesta, se asigna la importancia de cada factor, el cual se encuentra en la Tabla 45. Como principal factor, se estableció el estándar de diseño, ya que este establece una referencia para obtener el mejor comportamiento del elemento estructural y asegurar el cumplimiento del diseño antes las sollicitaciones. En segundo lugar, para realizar un proceso de ejecución exitoso, es requerida una mano de obra especializada para realizar los procedimientos y asegurar el correcto funcionamiento de la estructura.

En tercer lugar, la constructibilidad posee un nivel de importancia elevado debido a que mientras el proceso de ejecución y transporte de materiales sea más dificultoso o requiera de mayor equipamiento, la cantidad de mano de obra y especialistas requerida es mayor, y asimismo una mayor inversión en el proceso. Seguidamente, se presenta la durabilidad del material, puesto que ambos materiales poseen una vida útil al estar en contacto con el suelo; sin embargo, hay una desventaja con respecto a la cantidad de investigación según cada material.

Después, se ubica otro grupo de factores ubicado con una puntuación menor debido a que estos no son temas usualmente analizados; sin embargo, son de suma importancia, ya que evalúan al material según su beneficio a la sociedad y al ambiente. Se establece el impacto ambiental como un factor de importancia elevado en comparación, seguido de la oportunidad de crecimiento peruano y, finalmente, se presenta el factor de innovación.

Tabla 45 Asignación de importancia a los factores

Importancia	Factor
100	Estándar de diseño
90	Mano de obra especializada
80	Constructibilidad
70	Durabilidad
60	-
50	Impacto ambiental del material
40	Oportunidad de crecimiento peruano
30	Innovación
20	-
10	-
0	-

A continuación, se presenta la tabla CBA con los puntajes asignados según la información sustentada previamente y la importancia de cada factor establecida.

Tabla 46 Tabla de CBA

Id	Factores y Criterios	Atributos	Alternativa 1		Alternativa 2	
			Micropilotes de Bambú		Micropilotes de Concreto	
1	Impacto ambiental del material	Huella de carbono	At: Fijador de CO2		At: Emisor de CO2 equivalente	
	Criterio: Menor impacto ambiental es mejor		Vent:1	50	Vent:0	0
2	Innovación	Lineas de investigación	At: Potencial proyección futura		At: Escasa proyección futura	
	Criterio: Mayor líneas de investigación futura es mejor		Vent:1	30	Vent:0	0
3	Oportunidad de crecimiento peruano	Ventajas a la sociedad peruana	At: Mayor desarrollo regional		At: Beneficio poblaciones industrializadas	
	Criterio: Mayor beneficio regional es mejor		Vent:1	40	Vent:0	0
4	Constructibilidad	Dificultad constructiva	At: Hincado sencillo		At: Gran cantidad de actividades	
	Criterio: Mayor dificultad constructiva es peor		Vent:1	80	Vent:0	0
5	Mano de obra especializada	Experiencia construcción	At: Poca mano de obra especializada		At: Existe mano de obra especializada	
	Criterio: Mayor experiencia en la construcción es mejor		Vent:0	0	Vent:1	90
6	Estándar de diseño de taludes	Cantidad estándares	At: No posee ningún estándar o guía		At: Posee gran cantidad de estándares y guías	
	Criterio: Mayor cantidad de estándares de diseño es mejor		Vent:0	0	Vent:1	100
7	Durabilidad	Vida útil	At: Baja durabilidad		At: Mayor durabilidad	
	Criterio: Mayor durabilidad es mejor		Vent:0	0	Vent:1	70
Importancia total de la ventaja				200		260

Como resultado del análisis multicriterio de la Tabla 46, la alternativa de micropilotes de concreto es la más ventajosa a comparación de la otra alternativa, los micropilotes de bambú, a pesar de que se hayan considerado factores que usualmente no son considerados. En gran medida, la alternativa compuesta por bambú presenta una gran desventaja debido a la falta de normativas o estándares que respalden su uso.

Sin embargo, la primera alternativa se presenta como una solución innovadora con múltiples beneficios sociales y ambientales para la sociedad peruana como se demostró con los factores anteriormente explicados. Asimismo, este se presenta como una solución económicamente más rentable, ya que la unidad de bambú tratado con Ácido Bórico y Bórax tiene un costo de S/.80 aproximadamente (Añasco y Espinoza, 2015). En contraste, los micropilotes de concreto poseen un valor estimado de 400 dólares por metro lineal, el cual es un valor estimado que cubre los materiales y el proceso de ejecución (Liles et al., 2020). A simple vista, a pesar de que el precio del bambú no incluya su ejecución, la cual se caracteriza por ser sencilla con menor cantidad de maquinaria, el precio del material destaca por su bajo costo, lo cual lo convierte en una alternativa más llamativa a comparación de la otra opción.

En especial, la primera alternativa de bambú se convierte más adecuada para taludes temporales, puesto que la durabilidad del material es corta ante exposiciones con el suelo y no generaría residuos contaminantes ni un impacto ambiental considerable como la segunda alternativa. Asimismo, posee ciertas ventajas como su fácil proceso de ejecución y el bajo peso del material, lo cual lo hacen más manejable a los micropilotes para la mano de obra.

Finalmente, según lo mencionado anteriormente con respecto a su costo y el puntaje obtenido de la Tabla 46 del CBA, en el caso que los micropilotes sean requeridos para taludes temporales, la opción con mayor ventaja es los micropilotes de bambú, ya que presenta una buena cantidad atributos acompañado de un bajo costo, y, asimismo, se remarca que esta

alternativa cumple, como la otra alternativa, con el principal propósito de estabilizar de un talud para ciertos casos de estudios. A pesar de que tenga ciertas deficiencias, estas se podrían contrarrestar con una mayor cantidad de investigaciones que respalden su uso, permitan mejorar su comportamiento y durabilidad.



8 Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo de investigación presenta al bambú como material innovador como materia prima de micropilotes. Los micropilotes de bambú demuestran ser un éxito en la sustitución de los micropilotes de concreto armado convencionales para algunas de las condiciones de análisis consideradas, además de presentar muchas ventajas sociales y ambientales en comparación a la alternativa convencional. En este trabajo de tesis, se elaboran simulaciones numéricas sobre su estabilidad y se aborda su desempeño desde un punto de vista estructural para la verificación por resistencia de los micropilotes de bambú. Se pueden obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones:

8.1 Conclusiones

Como resultado de este trabajo de tesis, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Es necesario el uso de tratamientos químicos en micropilotes de bambú enterrados para mitigar o reducir los ataques por insectos u hongos, y humedad.
- A pesar de las recomendaciones de tratamientos para el bambú ante una exposición contra el suelo, estos no respaldan la preservación del material al estar completamente enterrado; por ende, no aseguran mantener sus resistencias.
- Los distintos arreglos en el bambú son importantes en temas estructurales, ya que, según los análisis realizados, estos le brindan mayor capacidad de resistir tanto esfuerzos cortantes como de flexión en comparación a un arreglo simple; además, es importante precisar que los arreglos no tienen una influencia significativa en los factores de seguridad.
- Para las condiciones de análisis consideradas, la cantidad de filas, en comparación a los distintos arreglos, tiene mayor influencia en el factor de seguridad.
- Es importante resaltar que los arreglos de micropilotes de bambú más idóneos son los triples y cuádruples para la estabilización de taludes, ya que brindan una mayor capacidad por corte y flexión.

- Los micropilotes de bambú, en el caso de solicitaciones de momento flector, presentan grandes limitaciones, lo cual hace necesario el empleo de un refuerzo estructural en las zonas de mayor esfuerzo a flexión; ya que, en los taludes de 5m, 7m y 8.5m, en gran cantidad de casos, se logra un factor de seguridad mínimo de 1.3, pero no son válidos ante el diseño por resistencia.
- Para poder determinar bajo qué condiciones es viable el empleo de micropilotes de bambú, se utilizaron seis taludes de distinta geometría reforzados con diferentes arreglos y distribuidos en un máximo de seis filas. Para un talud de 5m, los casos válidos para el refuerzo con micropilotes de bambú son aquellos en donde se emplean arreglos triples al largo de cinco y seis filas, así como para arreglos cuádruples distribuidos cinco y seis filas. Para un talud de 7m de altura, se usan arreglos dobles a lo largo de seis filas o arreglos triples o cuádruples a lo largo de cinco y seis filas. Por último, para un talud de 8.5m de altura, se utiliza un refuerzo que consta de arreglos simples, dobles o triples a lo largo de cinco o seis filas, o arreglos cuádruples con un mínimo de cuatro filas. Todos estos casos cumplen con un factor de seguridad 1.3 y por el diseño por resistencias.
- Según el análisis técnico, solo en términos de factor de seguridad, los micropilotes de bambú resultan convenientes en comparación a los de concreto ante las condiciones de análisis consideradas. En cambio, al analizar el diseño por resistencia y la cantidad de elementos por utilizar, los micropilotes de concreto resultan más favorables para los casos de estudio evaluados.
- El uso del bambú en micropilotes se presenta como una alternativa ventajosa en comparación al uso de concreto armado. Esto se debe a que no solo contribuye a la estabilidad de un talud, sino a que, también, es considerado un material sostenible y ecológico, el cual puede contribuir al desarrollar de economías regionales por la posible industrialización de esta planta.

- Los micropilotes de bambú poseen dos ventajas constructivas; primero, su hincado se acentúa por ser de fácil ejecución y segundo, el bajo peso del material permite un mejor manejo de este por parte de la mano de obra.
- Una desventaja, respecto a la constructibilidad de los micropilotes de bambú, es la mayor cantidad de volumen necesario de material para estabilizar el talud, el cual requiere de la ejecución de varias filas de refuerzo a comparación de los micropilotes de concreto.
- Una desventaja remarcable que poseen los micropilotes de bambú en comparación a los de concreto es la falta de estándares o guías que respalden su uso y permitan un correcto diseño geotécnico.
- El uso de micropilotes de bambú, debido a su baja durabilidad y poca investigación de tratamientos, podría estar más orientado para estabilizar taludes de manera temporal.
- El uso de micropilotes de concreto tiene un gran impacto negativo en el medio ambiente al generar una elevada cantidad de residuos, por lo que, a comparación del bambú, no es recomendable para taludes temporales.
- Al comparar precios, sin considerar el proceso de ejecución, los micropilotes de bambú resultan ser más rentables que los de concreto, a pesar del alto costo del primero en tratamientos para mejorar su durabilidad.
- El análisis multicriterio realizado con la metodología CBA ayuda establecer la mayor cantidad de ventajas que posee el micropilote de concreto a comparación a la del bambú; sin embargo, el bajo costo del bambú como sus otros atributos mencionados anteriormente, lo posicionan como la opción más favorable para estabilizar un talud bajo las condiciones analizadas.

8.2 Recomendaciones

Para un mejor desarrollo de investigaciones, con respecto al uso del bambú con fines geotécnicos, se brinda las siguientes recomendaciones:

- ✓ Los análisis 3D son necesarios para calibrar los análisis 2D, más aún cuando se emplean secciones equivalentes a las reales; pues a pesar de contar con área e inercia equivalentes, no es posible aseverar un comportamiento similar a una geometría real, lo cual sí es viable plasmar en un modelado 3D.
- ✓ Debido a la alta variabilidad de las propiedades del bambú, se recomienda realizar los siguientes ensayos previos a su análisis y ejecución: ensayos de propiedades físicas (densidad básica, humedad, contracción), ensayo compresión, de tensión y de corte perpendicular a las fibras, y ensayos de flexión estáticos.
- ✓ Entre los tratamientos recomendados para el uso estructural del bambú, se presentan los tratamientos por el método caliente y frío, Boucherie, y por presión como los más efectivos para mejorar la durabilidad de esta planta; debido a que impregnan el preservante dentro del bambú de manera muy efectiva.
- ✓ Se recomienda la realización de ensayos para evaluar las propiedades físicas y mecánicas del bambú, en específico de la especie *Guadua Angustifolia*, ante diferentes tratamientos y preservativos.
- ✓ Se recomienda que en una futura línea de investigación se aborden los diversos tratamientos para el bambú, en los cuales se identifique el impacto de estos en las propiedades mecánicas de la planta y en la durabilidad, para condiciones en que el bambú esté completamente enterrado.
- ✓ Se propone como futura línea de investigación tanto el diseño de las uniones estructurales para los micropilotes de bambú, como un manual de ejecución de los mismos.
- ✓ Se recomienda el desarrollo de una normativa peruana que permita estandarizar las propiedades mecánicas de esta planta y brindar recomendaciones para su tratamiento. Todo ello con la finalidad de emplearlo en la estabilidad de taludes, y exponer esta

planta, *Guadua Angustifolia*, como una alternativa competente en este tipo de proyectos.

- ✓ Se recomienda la investigación de un refuerzo adicional que aumente la resistencia por flexión y por corte de la especie de bambú *Guadua Angustifolia* para lograr un mejor comportamiento, ante las sollicitaciones antes mencionadas, al emplearlo como materia prima de micropilotes.



9 Bibliografía

- Asociación Española de Normalización y Certificación (2001). *Realización de trabajos geotécnicos especiales: Pilotes de desplazamiento* (UNE-EN 12699:2001).
- Aguado, A., Josa, A., & Cardim, A. (2004). Fortalezas y debilidades de los inventarios de cementos para su empleo en análisis de ciclo de vida (ACV). *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. <https://doi.org/10.3989/cyv.2004.v43.i2.601>
- Anastaselos, D., Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2009). An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions. *Energy and Buildings*, 41(11), 1165–1171. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.003>
- Ángeles Castro, F. D. (2014). *Propiedades físicas y mecánicas de la Guadua Angustifolia con fines estructurales*. (Tesis de grado para optar por el título de ingeniero civil, Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú)
- AASHTO (2018) *AASHTO LRFD Bridge Design Specification*. Washington DC, United States: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Añasco, M., & Espinoza, A. (2015). *Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú (Guadua Angustifolia)*. Quito, Ecuador: INBAR.
- Afiri, R., & Gabi, S. (2018). Finite element slope stability analysis of Souk Tleta dam by shear strength reduction technique. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s41062-017-0108-1>
- Archila, H., Kaminski, S., Trujillo, D., Zea Escamilla, E., & Harries, K. A. (2018). Bamboo reinforced concrete: a critical review. *Materials and Structures*, 51(4), 102. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1228-6>
- British Standards Institution. (2005). *Execution of Special Geotechnical Works – Micropiles* (BS EN 14199: 2005).
- Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G., & Gartner, E. (2014). Cement and carbon emissions. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 47(6), 1055–1065. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0114-5>
- Borduas, N., & Donahue, N. M. (2018). *Chapter 3.1 - The Natural Atmosphere* (B. Török & T. B. T.-G. C. Dransfield (eds.); pp. 131–150). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00006-6>
- Botello Rojas, A. P. (2015). *Sobre el comportamiento de micropilotes trabajando a flexión y/o cortante en estructuras de tierra*. (Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España)
- Bui, Q. B., Grillet, A. C., & Tran, H. D. (2017). A bamboo treatment procedure: Effects on the durability and mechanical performance. *Sustainability (Switzerland)*, 9(9), 1–11. <https://doi.org/10.3390/su9091444>

- Capera A. & Erazo O. (2012). *Resistencia a la compresión paralela a la fibra y determinación del módulo de elasticidad de la guadua angustifolia del Municipio de Pitalito-Huila*. (Tesis de grado para optar por el título de ingeniero agrícola, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia)
- Cely Moreno, L. A., Hernández Rojas, W. G., & Junco Gutiérrez, O. J. (2013). Caracterización de la Guadua Angustifolia Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-10. *Revista Facultad de Ingeniería*, 21(33), 53–71. <https://doi.org/10.19053/01211129.2118>
- Cole, R. J., & Rousseau, D. (1992). Environmental auditing for building construction: Energy and air pollution indices for building materials. *Building and Environment*, 27(1), 23–30. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(92\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0360-1323(92)90004-9)
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN DE LA NORMA E.060 CONCRETO ARMADO (2009). *Norma Técnica de Edificación “E.060 CONCRETO ARMADO”*. Lima.
- Córdova, L. P. A. (2014). *Obtención de las propiedades mecánicas y estructurales de la caña Guadua Angustifolia*. (Tesis de Licenciatura, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador)
- Culzoni, R. A. M. (1985). *Características dos bambus e sua utilização como material alternativo no concreto* (Doctoral dissertation, PUC-Rio).
- Davila, A. M. J. (2018). *Numerical Analysis of Bamboo Piles for Slope Stability* (Doctoral dissertation, PUC-Rio).
- Dai et al. (2016). Moso Bamboo Soil-Nailed Wall and Its 3D Nonlinear Numerical Analysis. *International Journal of Geomechanics*, 16(5), 04016012. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000634](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000634)
- Dirección General de Carreteras (2005). *Guía para el Proyecto y la Ejecución de Micropilotes en Obras de Carretera*. Paseo La Castellana, España: Dirección General de Carreteras.
- Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S., & Culp, C. H. (2010). Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*, 42(8), 1238–1247. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.016>
- DiPietro, J. A. (2018). *Chapter 8 - Forcing Agent: Sea Level Change* (J. A. B. T.-G. and L. E. (Second E. DiPietro (ed.); pp. 95–106). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811191-8.00008-7>
- Duncan, J. M., & Chang, C. Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*
- Eadic. (2016). *Micropilotes, un tipo de cimentación profunda*. Recuperado de <https://www.eadic.com/micropilotes-un-tipo-de-cimentacion-profunda/> [Consulta: 01 de diciembre de 2020]

- Estacio, D. G. (2013). *Evaluación De Las Propiedades Físico - Mecánicas Del Bambú - Bagua - Amazonas*. (Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú)
- Federal Highway Administration. (2005). Manual on Micropile Design and Construction
- GEOSEC (s.f.) Ground Engineering GROUNDFIX Micropilotes Activos Hincados <https://www.geosec.es/wp-content/uploads/2018/12/2-groundfix-web.pdf>
- Ghavami, K., & Marinho, A. B. (2003). Propriedades geométricas e mecânicas de colmos dos bambus para aplicação em construções. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, 23(3), 415-424.
- Ghavami, K., & Marinho, A. B. (2004). Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 9(1), 107–114. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662005000100016>
- Ghavami, K. (2005). Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement and concrete composites*, 27(6), 637-649.
- Gobierno de México. (s.f.). Acciones y Programas. Ciudad de México: Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/impacto-ambiental-y-tipos-de-impacto-ambiental> / [Consulta: 22 de noviembre de 2020]
- González, C. (2007). *Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la Guadua angustifolia y determinación del módulo de elasticidad*. (Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia)
- González, M. J., & García Navarro, J. (2006). Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. *Building and Environment*, 41(7), 902–909. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006>
- Gutierrez Gonzalez, M., & Takeuchi Tam, C. (2014). Efecto del contenido de humedad en la resistencia a tensión paralela a la fibra del bambú *Guadua Angustifolia* Kunth. *Scientia Et Technica*, 19(3), 245-250. <https://doi.org/10.22517/23447214.9117>
- Hassiotis, S., & Chameau, J. L. (1997). Design methods for stabilization of slopes with piles. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*. 123(4), 314. [https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:4\(314\)](https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:4(314))
- Hidalgo, Oscar (1974). Bambú, su cultivo y aplicaciones en: Fabricación de Papel, Construcción, Arquitectura, Ingeniería y Artesanía., Estudios Técnicos colombianos LTDA., Colombia, p. 100-106.
- Hossain, M. U., & Poon, C. S. (2018). Global warming potential and energy consumption of temporary works in building construction: A case study in Hong Kong. *Building and Environment*, 142, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.026>
- Hu, T. & Wang, T. (2019). Numerical Investigation of the Performance of a New Anchored Micropile Structure Against Landslides. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 56(5), 321–327. <https://doi.org/10.1007/s11204-019-09609-3>
- Huang, B., Gao, X., Xu, X., Song, J., Geng, Y., Sarkis, J., Fishman, T., Kua, H., & Nakatani, J. (2020). A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of

- Building Materials. *One Earth*, 3(5), 564–573.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.010>
- Huang, Z. (2019). *Application of Bamboo in Building Envelope*. Suiza: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-12032-0>
- Huang, B., Chen, Y., McDowall, W., Türkeli, S., Bleischwitz, R., & Geng, Y. (2019). Embodied GHG emissions of building materials in Shanghai. *Journal of Cleaner Production*, 210, 777–785. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.030>
- Hu, M., & Milner, D. (2020). Visualizing the research of embodied energy and environmental impact research in the building and construction field: A bibliometric analysis. *Developments in the Built Environment*, 3, 100010.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100010>
- Igwe, O., & Una, C. O. (2019). Landslide impacts and management in Nanka area, Southeast Nigeria. *Geoenvironmental Disasters*, 6(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0122-z>
- INBAR (2013). El bambú, una alternativa innovadora para la diversificación y generación de ingresos locales rurales: promoviendo la gestión de conocimiento sobre bambú en Ecuador, Colombia y Perú. Quito, Ecuador: INBAR.
- Ito, T., & Matsui, T. (1975). Methods to Estimate Lateral Force Acting on Stabilizing Piles. *Soils and Foundations*, 15(4), 43–59.
https://doi.org/https://doi.org/10.3208/sandf1972.15.4_43
- ISO/TC165N315 (2004) “Laboratory Manual on Testing Methods for Determination of physical and mechanical properties of bamboo” traducida al español en la Norma ISO 22157-2: 2004.
- Juárez, D. A. (2019). *Uso y rentabilidad del Bambú como material estructural de construcción*. (Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima, Perú)
- Kaur, P. J., Satya, S., Pant, K. K., & Naik, S. N. (2016). Eco-Friendly Preservation of Bamboo Species: Traditional to Modern Techniques. *Eco-Friendly Preservation of Bamboo Species: Traditional to Modern Techniques*, 11(4), 10604–10624.
<https://doi.org/10.15376/biores.11.4>
- Kaveh, A. (2014). Computational structural analysis and finite element methods. In *Computational Structural Analysis and Finite Element Methods*.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-02964-1>
- Li, N., Men, Y., Yuan, L., Gao, H., Li, J., & Wang, B. (2020). Study on the Mechanical Characteristic of Micropiles Supporting Landslide Under Step-Loadings. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(3), 2761–2771. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01184-x>
- Liew, S. S., & Fong, C. C. (2003). Design & Construction of Micropiles. *Geotechnical Course for Pile Foundation Design & Construction*, September, 1–49.

- Liese, W. (1998). *The anatomy of BAMBOO CULMS*. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan
- Liese, W., & Köhl, M. (2015). *Bamboo*. Berlin: Springer International Publishing.
- Liles, P., Wolosick, J., & Sak, T. (2020) Design and Construction of High-Capacity Micropiles for ABC Projects (diapositiva), Estados Unidos de America. Diapositiva 21 de 49.
- Lizzi, F. (1982). The Pali Radice (Root Piles), Symposium on Soil and Rock Improvement Techniques including Geotextiles, Reinforced Earth and Modern Piling Methods, Bangkok.
- Lobovikov, M., Paudel, S., Ball, L., Piazza, M., Guardia, M., Ren, H. & Wu, J. (2007). World bamboo resources: a thematic study prepared in the framework of the global forest resources assessment 2005. Rome, Italy: INBAR.
- Londoño, X., Camayo, G. C., Riaño, N. M., & López, Y. (2002). Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. *Bamboo Science and Culture*, 16(1), 18-31.
- López Cárdenas, A. (2010). *Bambú: biología, cultivo, manejo y usos en el Perú* (No. F01 L6). Ministerio de Agricultura.
- López-Jimeno, C. (2000). *Manual de ingeniería de túneles*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid
- López, L. F., & Correal, J. F. (2009). Estudio exploratorio de los laminados de bambú *Guadua angustifolia* como material estructural. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 11(3), 171–182. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2009000300001>
- Lopez, L., Césare, M., Gonzales, H., Acevedo, M., & Cobeñas, P. (2020). CONSIDERACIONES EN LA ELABORACIÓN DE PISOS DE BAMBÚ LAMINADO CON *Guadua angustifolia* Kunth. *Bambucyt*, 8-14.
- Monte, I. A (2020). Análisis de estabilidad de taludes de roca mediante el método de elementos finitos. (Tesis de Licenciatura, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería. Concepción, Chile)
- NMBA (2006) Preservation of bamboo. New Delhi, India: National Mission on Bamboo Applications
- Oliver, X.; Agelet de Saracibar, C., (2000). Mecánica de medios continuos para ingenieros. *Universitat Politècnica de Catalunya*. Capítulo 1: Descripción del movimiento continuo, pp. 1-24. Barcelona, Cataluña.
- OECD. (2003). *Environmentally Sustainable Buildings: Challenges and Policies*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264033863-en>
- Pearlman, S. L., and Wolosick, J. R. (1992). Pin Piles for Bridge Foundations, *Proceedings, 9th Annual International Bridge Conference*, Pittsburgh, Pennsylvania, June 15-17

- Peña, A. (2008). *Estudio preliminar de algunas propiedades físico-mecánicas del bambú (Guadua angustifolia Kunth) preservado a través de compuestos químicos*. (Tesis de licenciatura, Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela)
- Pérez de Ágreda, E. A. (2005). *Estabilidad de Taludes Inestabilidad de Taludes*.
- Perevochtchikova, María. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y política pública*, 22(2), 283-312. Recuperado en 23 de noviembre de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792013000200001&lng=es&tlng=es.
- Potts, D. M., & Zdravkovic, L. (2001). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Application*. Thomas Telford. <https://books.google.com.pe/books?id=37PStsDpevoC>
- Reddy, V. R., Kurian, M., & Ardakanian, R. (2015). LCCA Applications in Infrastructure and Other Projects: Some Case Studies. In V. R. Reddy, M. Kurian, & R. Ardakanian (Eds.), *Life-cycle Cost Approach for Management of Environmental Resources: A Primer* (pp. 39–65). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06287-7_3
- Sabogal, S. (2013). Nuevos materiales: La *Guadua angustifolia* “El bambú colombiano” (diapositiva), Colombia. Diapositiva 17 de 106.
- Schanz, T., Vermeer, P., & Bonnier, P. (1999). Formulation and verification of the Hardening-Soil Model. In *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*.
- SENCICO (2012) *Norma Técnica E.100 Bambú*. Lima, Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Sharma, B., & Buragohain, P. (2014). Behaviour of Micropile Groups under Oblique Pull Out Loads in Sand. *Indian Geotechnical Journal*, 44(4), 400–408. <https://doi.org/10.1007/s40098-013-0091-1>
- Sharma, B., Gatóo, A., Bock, M., & Ramage, M. (2015). Engineered bamboo for structural applications. *Construction and Building Materials*, 81, 66–73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.077>
- Shiferaw, H. M. (2021). Study on the influence of slope height and angle on the factor of safety and shape of failure of slopes based on strength reduction method of analysis. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s43088-021-00115-w>
- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos.
- Suhr, J. (1999). *The choosing by advantages decisionmaking system*. Quorum, Westport: Greenwood Publishing Group.

- Takeuchi, C. (2014). *Caracterización mecánica del bambú Guadua laminado para uso estructural*. (Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Doctor en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia)
- Tolmos, C. A., Lacambra, S., Tsuneki, H., Quijandria, G., Ludeña, C., Grunwaldt, A., & Fernandez-Baca, J. (2011). PERÚ: Gestión del Riesgo de Desastres y Adaptación al Cambio Climático. Perú: Banco Internacional de Desarrollo. Recuperado de <https://publications.iadb.org/es/publicacion/15407/peru-gestion-del-riesgo-de-desastres-y-adaptacion-al-cambio-climatico-marco-de-la>
- Van der Lugt, P., van den Dobbelen, A. A. J. F., & Janssen, J. J. A. (2006). An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. *Construction and Building Materials*, 20(9), 648–656. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.023>
- Valiente, R., Sobrecases, S., & Díaz, A. (2015). *Estabilidad de Taludes: Conceptos Básicos, Parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo*. Revista Civilizate, (7), 50-54.
- Vintimilla, C., & Avila, E. (2016). Análisis de modelos constitutivos para representar el comportamiento de los suelos del sector las Orquideas de la ciudad de Cuenca, Ecuador. *AyTDiseño*, (16), 71-83. https://administracionytecnologiaparaeldisenio.azc.uam.mx/publicaciones/anuario_2016/04.pdf
- Wallied, O., Yimin, Z., & Gulbin, O.-D. (2020). Minimizing Greenhouse Gas Emissions from Construction Activities and Processes. In *Construction Research Congress 2012* (pp. 1859–1868). <https://doi.org/doi:10.1061/9780784412329.187>
- Wegst UGK, Shercliff HR, Ashby MF. The structure and properties of bamboo as an engineering material, University of Cambridge, UK, 1993.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (1993). *El Método de Los Elementos Finitos: Formulación Básica y Problemas Lineales*. Barcelona: Cimne.
- Zhang, C., & Canning, L. (2011). Application of non-conventional materials in construction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 164(4), 165–172. <https://doi.org/10.1680/coma.900061>