



Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil

**Análisis comparativo de metodologías de cálculo para el
diseño de tablestacas de acero**

Autor: Jiménez Yumi Alex Paúl

Tutor: Ing. Hugo Marcelo Otáñez Gómez, Mag.

Quito, septiembre 2021



DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, JIMÉNEZ YUMI ALEX PAÚL, con cédula de ciudadanía número 172234467-6, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



JIMÉNEZ YUMI ALEX PAÚL

C.C. 172234467-6

DECLARATORIA

El presente Trabajo de Titulación titulado:

**“Análisis comparativo de metodologías de cálculo para el
diseño de tablestacas de acero”**

Realizado por:

JIMÉNEZ YUMI ALEX PAÚL

Como requisito para la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Ha sido dirigido por el profesor

Ing. Hugo Marcelo Otáñez Gómez, Mag.

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor.

Ing. Hugo Marcelo Otáñez Gómez, Mag.

TUTOR

DECLARATORIA DE PROFESORES INFORMANTES

Los profesores informantes:

Ing. Luis Alberto Soria Núñez, Msc.

Ing. Diego Xavier Jara Almeida, Msc. MBA.

Después de revisar el trabajo presentado,
Lo han calificado como apto para su defensa oral ante el tribunal
examinador

Luis Alberto Soria Núñez

Diego Xavier Jara Almeida

DEDICATORIA

Dedicado a mi familia, gracias por su esfuerzo, sacrificio y confianza.

A Yiselle Bonucci, por nunca dudar que lograríamos este triunfo.

Angie, por tu comprensión, cariño y por todo tu apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por regalarme sabiduría, fuerza y salud, para poder afrontar cada dificultad con la mejor actitud y optimismo.

A mis padres, hermanas, por ser el soporte fundamental durante todo este tiempo de formación académica, sepan que tienen todo mi cariño.

Agradecer hoy y siempre a mi madre por su ejemplo de profesionalismo para realizar su trabajo y demostrar que con esfuerzo y dedicación se logran objetivos.

A mi padre, gracias por su apoyo y sus valiosos consejos han logrado que llegue a cumplir uno a uno mis objetivos.

A mis amigos, por todas las experiencias vividas y los conocimientos compartidos durante todos estos años de estudio.

A Angie, por su comprensión, paciencia y amor.

Agradezco a mi tutor de tesis el Ing. Marcelo Otáñez, por haberme permitido recurrir a su intelecto científico, de igual manera, su paciencia y preocupación durante el desarrollo de esta investigación.

RESUMEN

En la presente investigación, se pretende mostrar un análisis comparativo de diferentes métodos de cálculo para el diseño de tablestacas de acero. Dentro de las metodologías a utilizar se encuentran: el método de Braja M. Das, Blum, y Equilibrio Límite, así como la verificación de cálculo mediante el software ProSheet. El empleo de este software permitirá obtener una aproximación más certera sobre el comportamiento de estos elementos estructurales. Los parámetros por comparar en esta investigación son la distancia de penetración y el momento flector máximo de cada método desarrollado.

La investigación comienza con una breve introducción a las tablestacas como elemento estructural y los diferentes tipos de tablestacas que existen. Además de sus sistemas de hincados y aplicaciones en obras civiles. En el tercer capítulo, se desarrolla la presión lateral de tierra en donde se explican la presión en reposo, activa y pasiva, por las teorías de Coulomb y Rankine. Adicionalmente se describen posibles sobrecargas que afectan a las tablestacas.

En el cuarto capítulo se describe cada una de las metodologías a desarrollarse, por lo tanto, se describen los factores a ser tomados en cuenta dentro de cada método al igual que las condiciones y fórmulas de cálculo.

En el quinto capítulo se presenta los parámetros del suelo con sus respectivos estratos a ser analizados. Este capítulo será importante para posteriormente poder analizar los resultados obtenidos con cada uno de los métodos realizados.

En el capítulo seis, se realiza el análisis de los resultados obtenidos donde se muestran que, para tablestacas en voladizo, el método de Braja Das junto con el software ProSheet presentan un buen comportamiento en la relación entre la profundidad de clava y el momento flector; teniendo en consideración que las tablestacas en voladizo son ideales hasta una profundidad de 6 metros; este par de métodos muestran valores de momentos flectores bajos hasta los 6.5 metros.

PALABRAS CLAVE

Tablestaca, Contención de tierras, Profundidad, Equilibrio.

ABSTRACT

The present investigation is intended to show a comparative analysis of different calculation methods for the design of steel sheet piles. Among the methodologies to be used is the method of Braja M. Das, Blum, and Limit Equilibrium, as well as the calculation verification using the ProSheet software. The use of this software will allow us to obtain a more accurate approximation of the behavior of these structural elements. The parameters to be compared in this investigation are the penetration distance and the maximum bending moment of each method developed.

The investigation begins with a brief introduction to sheet piles as a structural element and the different types of sheet piles that exist. In addition to its driving systems and applications in civil works. In the third chapter, the lateral earth pressure is developed where the pressure at rest, active and passive, is explained by the theories of Coulomb and Rankine. Additionally, possible overloads affecting the sheet piles are described.

The fourth chapter describes each of the methodologies to be developed, therefore, the factors to be considered within each method are described as well as the conditions and calculation formulas.

The fifth chapter presents the soil parameters with their respective strata to be analyzed. This chapter will be important to later be able to analyze the results obtained with each of the methods performed.

In chapter six, the analysis of the results obtained is carried out where: they show that, for cantilevered sheet piles, the Braja Das method together with the ProSheet software present a good behavior in the relationship between the depth of the nail and the bending moment, taking into consideration that cantilevered sheet piles are ideal up to a depth of 6 meters; This pair of methods show values of low bending moments up to 6.5 meters.

KEY WORDS

Sheet Pile, Land Containment, Depth, Balance

Índice

1. Capítulo I.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Desarrollo de la propuesta.....	1
1.3. Planteamiento del problema.....	1
1.4. Definición de variables.....	2
1.5. Relación de variables.....	3
1.6. Justificación.....	3
1.7. Objetivos.....	3
1.7.1. Objetivo Principal.....	3
1.7.2. Objetivos Secundarios.....	4
1.8. Alcance.....	4
1.9. Limitaciones.....	4
1.10. Hipótesis.....	5
1.11. Metodología.....	5
2. Capítulo II: Tablestacas como elemento estructural.....	5
2.1. Introducción a las tablestacas.....	5
2.2. Tipos de tablestacas.....	6
2.2.1. Tablestacas de madera.....	6
2.2.2. Tablestacas de hormigón armado.....	8
2.2.3. Tablestacas de acero.....	8
2.3. Sistemas de hincado de tablestacas.....	12
2.3.1. Sistema Movil – Ram.....	12
2.3.2. Sistema Power Pack.....	15
2.3.3. Sistema Hammer.....	16
2.3.4. Sistema Hydro Press.....	17
2.4. Aplicaciones.....	18

2.4.1. Civiles.....	18
2.4.2. Medioambientales.....	19
2.4.3. Medios marinos y fluviales.....	19
3. Capítulo III: Presión lateral de tierra	19
3.1. Introducción.....	19
3.2. Presión de tierra en reposo.....	21
3.3. Presión activa de Coulomb.	23
3.4. Presión pasiva de Coulomb.	26
3.5. Presión activa de Rankine.....	27
3.6. Presión pasiva de Rankine.....	31
3.7. Empujes sobre tablestacas.....	33
3.8. Sobrecargas.....	34
3.8.1. Sobrecargas horizontales.....	34
3.8.2. Empujes de agua.....	34
3.8.3. Sismo.....	34
3.8.4. Olas.....	34
4. Capítulo IV: Métodos de análisis de tablestacas	35
4.1. Definición del modelo de cálculo.....	35
4.1.1. Condiciones de apoyo en el pie.....	36
4.1.2. Condiciones de profundidad de clava.....	36
4.2. Método de Braja Das.....	37
4.3. Método de Blum.	42
4.4. Equilibrio límite.	45
4.5. ProSheet.....	47
5. Capítulo V: Modelación.....	49
5.1. Premisas para el análisis de resultados mediante la comparación de los diferentes métodos.....	49
5.2. Parámetros de modelación.....	49

5.3.	Perfil estratigráfico.....	51
5.4.	Método de Braja M. Das.....	51
5.5.	Método de Blum.	53
5.6.	Método de Equilibrio Limite.	56
5.7.	ProSheet.....	59
6.	<i>Capítulo VI: Resultados Obtenidos.....</i>	<i>62</i>
7.	<i>Capítulo VII: Conclusiones y Recomendaciones.....</i>	<i>66</i>
7.1.	Conclusiones.....	66
7.2.	Recomendaciones.....	67
	<i>Bibliografía.....</i>	<i>69</i>
	<i>Anexo I.....</i>	<i>71</i>
	Método de cálculo de Braja M. Das	71
	<i>Anexo II.....</i>	<i>75</i>
	Método de cálculo de Blum.....	75
	<i>Anexo III.....</i>	<i>78</i>
	Método de cálculo de equilibrio límite	78

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Tablestacas de madera. (Tablones)</i>	6
<i>Ilustración 2. Tablestacas de madera. (Wakefield)</i>	7
<i>Ilustración 3. Sistema de tablestacas de madera.</i>	7
<i>Ilustración 4. Tablestacas de hormigón.</i>	8
<i>Ilustración 5. Tablestacas de Acero</i>	9
<i>Ilustración 6. Perfil Tipo Z</i>	10
<i>Ilustración 7. Perfiles Tipo U</i>	11
<i>Ilustración 8. Perfil plano.</i>	11
<i>Ilustración 9. Tablestaca elevada y asegurada con el mástil.</i>	13
<i>Ilustración 10. Tablestaca lista para ser hincada</i>	14
<i>Ilustración 11. Tablestaca hincada.</i>	15
<i>Ilustración 12. Martillo Hammer</i>	16
<i>Ilustración 13. Martillo Hammer instalado</i>	17
<i>Ilustración 14. Sistema Hydro Press</i>	18
<i>Ilustración 15. Presión de tierra en reposo.</i>	20
<i>Ilustración 16. Presión de tierra activa</i>	20
<i>Ilustración 17. Presión de tierra.</i>	21
<i>Ilustración 18. Presión activa de Coulomb</i>	23
<i>Ilustración 19. Empuje activo de Coulomb con una sobrecarga sobre el terreno.</i>	25
<i>Ilustración 20. Presión pasiva de Coulomb</i>	26
<i>Ilustración 21. Empuje activo de Rankine</i>	28
<i>Ilustración 22. Círculos de Mohr-Coulomb correspondientes a los desplazamientos del muro</i>	29
<i>Ilustración 23. Empuje pasivo de Rankine</i>	31

<i>Ilustración 24. Círculos de Mohr-Coulomb correspondientes a los desplazamientos del muro en estado pasivo.</i>	32
<i>Ilustración 25. Empuje sobre tablestacas.</i>	33
<i>Ilustración 26. Tablestaca en voladizo que penetra arena y su variación de momento.</i>	37
<i>Ilustración 27. Coeficientes de seguridad parciales.</i>	42
<i>Ilustración 28. Método de Blum.</i>	43
<i>Ilustración 29. Software de Diseño ProSheet.</i>	48
<i>Ilustración 30. Perfil Estratigráfico</i>	51
<i>Ilustración 31. Empujes activos y pasivos sobre la tablestaca.</i>	56
<i>Ilustración 32. Medidas Geométricas del sistema de retención.</i>	59
<i>Ilustración 33. Propiedades del suelo.</i>	60
<i>Ilustración 34. Profundidad de la tablestaca.</i>	61
<i>Ilustración 35. Momento flector máximo.</i>	61
<i>Ilustración 36. Altura vs Profundidad de clava</i>	63
<i>Ilustración 37. Altura vs Momento Flector máximo</i>	64
<i>Ilustración 38. Profundidad de clava vs Ángulo de fricción</i>	65
<i>Ilustración 39. Definir material</i>	79
<i>Ilustración 40. Propiedades del material</i>	79
<i>Ilustración 41. Propiedades de la sección.</i>	79
<i>Ilustración 42. Propiedades de sección</i>	79
<i>Ilustración 43. Ingreso de cargas.</i>	79
<i>Ilustración 44. Ingreso de cargas.</i>	79
<i>Ilustración 45. Ingreso de cargas.</i>	79
<i>Ilustración 46. Diagrama de momentos.</i>	79

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Empujes sobre tablestacas.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 2. Valores de profundidad de clava según el tipo de suelo.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 3. Parámetros de modelación.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 4. Resultados obtenidos.....</i>	<i>62</i>

1. Capítulo I

1.1. Antecedentes

La diversidad de suelos que existe en nuestro país y sobre todo la baja calidad portante de suelos en la costa ecuatoriana, conllevan a la constante investigación de métodos para ayudar a la contención de terrenos. Generalmente hablar del término tablestacas resultar un poco extraño en algunos casos; estos elementos prefabricados de diferentes materiales, entre los más comunes son: madera, hormigón y acero. La selección del tipo de material de tablestaca dependerá de las características del suelo y el presupuesto.

En los últimos años en Ecuador han comenzado a desarrollarse proyectos marítimos, en los cuales, el uso de tablestacas debido a su buen comportamiento en presencia de nivel freático, podría ser una buena elección al momento de realizar este tipo de obras civiles.

1.2. Desarrollo de la propuesta.

El análisis tendrá énfasis en la profundidad de clava, y momento flector máximo de tablestacas de acero en voladizo. Se pretende satisfacer este análisis por la metodología según Braja M. Das, Blum y equilibrio límite, al igual que el análisis de tablestacas mediante Sap2000 para obtener su momento flector máximo. Además, se empleará el software ProSheet para el análisis de tablestacas en voladizo. Las mismas permitirán comparar diferentes diseños para obtener el más adecuado.

1.3. Planteamiento del problema.

A nivel mundial las tablestacas se han establecido como una opción eficaz ante otros métodos de contención de tierras y agua, en especial su utilización en obras portuarias.

El problema radica cuando los suelos en los que se desarrolla la obra no tienen una capacidad portante suficiente para soportar muros con otros materiales, para solventar este tipo de problema se utilizan tablestacas de acero. Ventajosamente implementar el uso de tablestacas en obras civiles ha brindado soluciones

estructurales eficientes al momento de impermeabilizar, reducir costos e inspeccionar la obra.

En Ecuador los derrumbes han ocasionado grandes pérdidas humanas y económicas; tienen una relación directa con el crecimiento poblacional y las necesidades de cada zona además del relieve ecuatoriano.

En varias ciudades, los barrios y comunidades se han desarrollado muy cercanas a taludes ya existentes, aumentando la necesidad de contención de tierras en tales zonas. De igual manera, los derrumbes se convierten en un problema complejo por diferentes factores como sismicidad, precipitaciones de alta intensidad, geometría y composición geológica de taludes.

Las carreteras son obras que requieren intervención frecuente ante este tipo de problemas, porque en diversas situaciones son afectadas por derrumbes lo que produce el cierre del paso vehicular impidiendo la entrada y salida de vehículos a distintas zonas, lo que afecta a la economía y a la infraestructura vial.

Los muros de contención se implementan como pared en zanjas con la finalidad de contener una masa de tierra de una forma permanente y evitar derrumbes.

1.4. Definición de variables.

Variable independiente.

Método de Blum.

Este método permite estudiar tablestacas en voladizo generando una fuerza adicional.

Método de Braja M. Das.

Este método permite el cálculo de tablestacas considerando al elemento estructural como una viga en voladizo.

Método de Equilibrio Limite.

Este método determina a los empujes como auto equilibrantes y permite determinar longitud de empotramiento y momento flector máximo.

Variables dependientes.

Longitud de la tablestaca.

La longitud de la tablestaca será definida como la sumatoria de la longitud teórica y la profundidad de cada uno de sus estratos superiores a la línea de dragado.

Deflexiones de la tablestaca.

Es la respuesta de la tablestaca sujeta a esfuerzos, donde el grado de deformación dependerá del tipo de suelo.

Momento flector máximo.

La distribución de tensiones sobre la tablestaca genera una fuerza resultante, la misma que es perpendicular a la longitud de la tablestaca, produciendo flexión sobre su eje longitudinal.

1.5. Relación de variables.

De acuerdo con las diferentes metodologías las variables definidas van a ser correlacionadas con el objeto de controlar longitudes máximas y momentos generados por el empuje de tierras.

1.6. Justificación.

Las tablestacas son elementos estructurales, que por su función permiten de manera eficaz, contener terrenos. En Ecuador se ha empleado estas estructuras, pero no existe una norma propia en la que el ingeniero civil se pueda guiar; lo que obliga a buscar en normativas internacionales para aplicar en proyectos del país.

En Ecuador, las tablestacas están proporcionando mejoras significativas en el ámbito constructivo, su uso es muy útil en el desarrollo de estructuras marinas y contención de muros.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo Principal.

- Comparar los métodos de cálculo de Blum, Braja M. Das, Equilibrio limite y ProSheet para el diseño óptimo de tablestacas de acero.

1.7.2. Objetivos Secundarios.

- Describir métodos y parámetros geotécnicos con la investigación de teorías para el diseño de muros tablestacados.
- Encontrar un método adecuado mediante cálculos para la modelación de un muro tablestacado que este dentro de las características geotécnicas de nuestro país.
- Analizar los resultados obtenidos con la comparación de los diferentes métodos investigados para obtener un diseño óptimo.

1.8. Alcance

Se realizará el análisis comparativo de tres métodos de cálculo: Blum, Braja M. Das, Equilibrio límite, utilizados para el hincado de tablestacas, considerando los empujes de tierra activos y pasivos por los criterios de Rankine y Coulomb. Además, se realizará el análisis con el software ProSheet, el mismo que corroborará los resultados obtenidos.

Se analizará la hinca de tablestacas en suelos arenosos, considerando la profundidad de clava y el momento flector máximo que debe soportar la tablestaca en voladizo como elemento estructural.

1.9. Limitaciones

Se considera fuera del alcance de este proyecto de estudio el análisis de metodologías de cálculo de tablestacas ancladas.

Las tablestacas al ser elementos estructurales prefabricados requieren una conexión entre tablestacas, por lo tanto, en esta investigación no se considera el detalle de las conexiones entre tablestacas de acero, al igual que la interacción con el suelo.

Las tablestacas al ser elementos de contención de tierras estarán expuestos a sobrecargas que puedan afectar su correcto desempeño, por lo tanto, no se tomarán en cuenta la interacción de sobrecargas de viento al igual que la relación de la tablestaca frente a un sismo.

1.10. Hipótesis

El análisis comparativo de los métodos de diseño de tablestacas identificará longitudes y momentos flectores máximos adecuados en suelos arenosos, con la obtención de los resultados se realizará un diseño óptimo de una tablestaca.

1.11. Metodología

Se realizará el análisis de tablestacas por métodos de Blum, Braja M. Das, Equilibrio límite, definiendo el tipo de suelo según sus propiedades mecánicas.

Se realizará el cálculo para la hincada de tablestacas en suelos de tipo arenoso, considerando el cálculo de momentos flectores máximos, longitud de clava como variables a ser comparadas.

Los parámetros de modelación también serán analizados en el programa ProSheet, que permite dimensionar muros de contención de tablestacas de una manera rápida.

2. Capítulo II: Tablestacas como elemento estructural

2.1. Introducción a las tablestacas.

Las tablestacas son elementos estructurales utilizados en la ingeniería civil, por lo general en el ámbito geotécnico. La unión de varias tablestacas genera un muro de contención, llamado: tablestacado. El objetivo principal de estos muros es la contención de tierras.

El uso de este tipo de estructuras radica desde hace varias décadas, lo que ha conllevado que los materiales con los que se construía estas estructuras vayan evolucionando, buscando así materiales más resistentes y con una durabilidad mayor a lo largo del tiempo. Los primeros usos de tablestacas inician en Egipto en el año 2600 a.C. En esta época las tablestacas eran utilizadas para la construcción de pozos profundos., con el pasar de los años la utilización de estos elementos estructurales han ido evolucionando, llegando ahora hasta las tablestacas de acero, incluso se dispone de tablestacas de hormigón armado.

La utilización de las tablestacas y su tipo de material dependerá de las consideraciones, ventajas y desventajas que cada material le brindará a la obra.

Ahora, las tablestacas más comunes en obras civiles son las de acero, estos elementos son hincados por métodos de vibración o golpeo. Al construir este tipo de muros dependerá mucho del tipo de obra, debido que estos elementos pueden ser permanentes o recuperables. Además, este método de contención de terrenos tiene algunas ventajas como costos más bajos, y un menor tiempo en ejecución de obra. Existen varios tipos de tablestacas y la elección del material dependerá del tipo de suelo, el presupuesto de la obra, y los empujes laterales del terreno.

2.2. Tipos de tablestacas.

2.2.1. Tablestacas de madera.

Las tablestacas de madera tienen origen en Egipto, donde se importaba madera de cedro desde Líbano en el año 2600 a.C. El mayor uso que tuvieron las tablestacas fue en la construcción de pozos y en muelles de pilotes, el requerimiento de madera fue tan alto que la extinguieron. En la actualidad, las tablestacas de madera se ocupan en estructuras de bajo peso, donde la presencia del nivel freático es nula. Dentro de las tablestacas de madera más comunes existen los tablonés ordinarios y las tablestacas Wakefield.

Los tablonés pueden llegar a tener una sección transversal aproximadamente de 5 cm x 30 cm y su instalación se la realiza borde con borde formando una pared continua. (*Ilustración 1* **Error! Reference source not found.**).

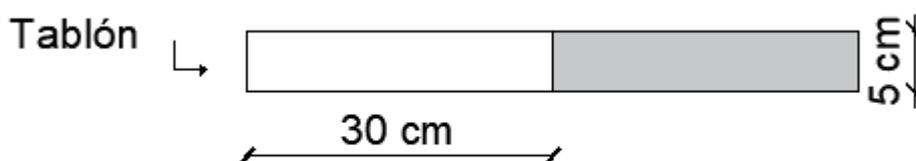


Ilustración 1. Tablestacas de madera. (Tablonés)

Fuente: (Jiménez, 2021)

En cambio, las tablestacas Wakefield se las elabora por la unión de tres tablonés, es decir, los tablonés son clavados entre sí, con la particularidad que el tablón del medio debe tener un desfase entre 5 a 7.5 centímetros. (*Ilustración 2*).

2.2.2. Tablestacas de hormigón armado.

Las tablestacas de hormigón armado son utilizadas por lo general en obras permanentes debido a que son menos afectadas por la corrosión. Sin embargo, este tipo de tablestacas son muy vulnerables a fisuras, además de ser muy pesadas. Se fabrican con refuerzos como: tirantes y placas de anclado, con la finalidad que puedan soportar cargas laterales permanentes a las que son sometidos durante y después de la construcción. Además, en ocasiones se pueden reforzar con pilotes adosados en el centro de la tablestaca. Las tablestacas de concreto precolado tienen un espesor de 15 a 25 centímetros. Por lo general este tipo de tablestacas se las utiliza en lugares donde el nivel freático es muy alto, es decir, su uso es muy habitual en muelles.



Ilustración 4. Tablestacas de hormigón.

Fuente: (CimentaJON, 2010).

2.2.3. Tablestacas de acero.

Las tablestacas de acero son los elementos estructurales más utilizados dentro de esta clasificación. La alta resistencia, al igual que su peso propio muy bajo son las ventajas con la que cuentan estos elementos estructurales. Sin dejar de lado su reutilización, dicho de otra manera, éstas tablestacas se pueden ocupar en obras permanentes o temporales por lo que pueden ser extraídas y reutilizadas. La

selección del tipo de forma dependerá mucho de las fuerzas a las que va a estar sometida la tablestaca, estas fuerzas pueden ser de tracción o flexión.

Las conexiones entre tablestacas pueden ser de dos tipos: machihembrado o de rótulas lo que sin duda alguna garantiza que sean impermeables.

Al mencionar su alta resistencia, las tablestacas metálicas durante su hincada no presentan problemas de pandeo, lo que es una gran ventaja, porque permiten la construcción de muros con grandes alturas, además este tipo de tablestacas metálicas resisten esfuerzos de flexión entre 170 y 210 MN/m².



Ilustración 5. Tablestacas de Acero.

Fuente: (CIMTRONIC DESIGN &ENGINEERING, 2020).

2.2.3.1. Tipos de tablestacas de acero.

Las tablestacas laminadas en caliente son las más utilizadas en la construcción de muros de contención, obras portuarias y reforzamiento de márgenes fluviales, sin dejar de lado que existen otros tipos de obras civiles en las que son aplicadas. Los perfiles son hincados mediante impacto o equipos vibratorios, dentro de las tablestacas de acero existen tres tipos: Tipo z, Tipo U y tablestacas planas.

A continuación, se realiza una breve descripción de los diferentes tipos de tablestacas de acero.

- **Perfiles Z.**

Los perfiles Z, son usualmente utilizados en obras portuarias y en cimentaciones profundas, el uso más común para este tipo de perfiles es: la protección ante inundaciones, gracias a la gran anchura de estos perfiles. Por lo general estos elementos, no son tan pesados a comparación de los perfiles en U. Dentro de otras ventajas de este tipo de perfil es: su mayor inercia, que reduce las deformaciones. (ArcelorMittal, 2019).

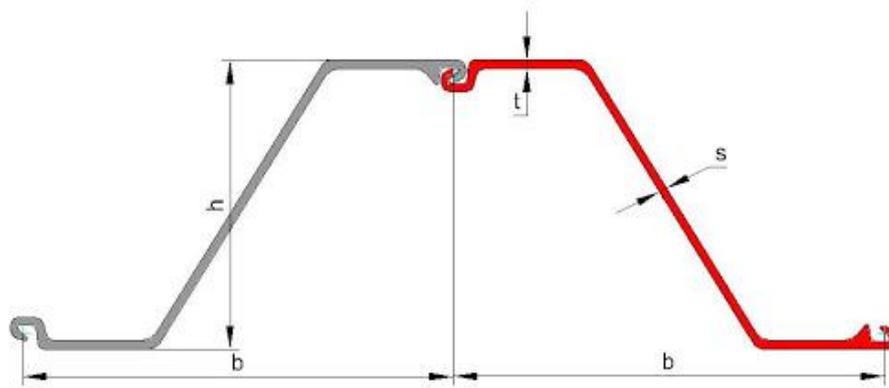


Ilustración 6. Perfil Tipo Z.

Fuente: (arquitectura+acero, s.f.)

- **Perfiles U.**

Los perfiles U, son muy comunes para trabajos de ingeniería temporales, por lo que es normal que sean reutilizadas. Tiene longitudes estándares de 6,9,12 y 15 metros, hasta una longitud máxima de 27 metros. La conexión de este tipo de perfil puede resultar sencilla incluso bajo el agua.

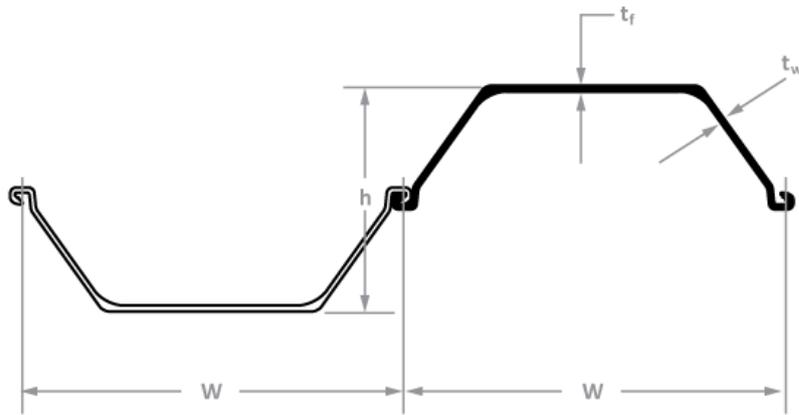


Ilustración 7. Perfiles Tipo U.

Fuente: (Skyline Steel, s.f.).

- **Perfiles planos.**

Los perfiles planos, se conectan formando recintos independientes en diferentes configuraciones geométricas, que posteriormente se unen entre sí. (ArcelorMittal, 2019). La resistencia y estabilidad de los recintos dependerá de la interacción que tengan con el terreno natural.

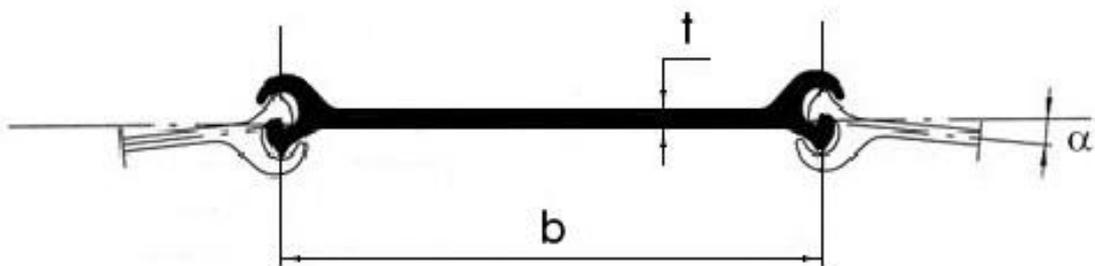


Ilustración 8. Perfil plano.

Fuente: (ArcelorMittal, 2019).

2.3. Sistemas de hincado de tablestacas.

La correcta elección del sistema de instalación de tablestacas es de gran importancia, para garantizar una instalación segura como el de los trabajadores. Además, se debe asegurar que no se provoquen daños en la geometría de las tablestacas. La hinca se realizará hasta alcanzar la longitud de empotramiento requerida, definida en el diseño. (Muros de contención y tablestacas, 2015). A continuación, se describen los diferentes sistemas de hincado para tablestacas de acero.

2.3.1. Sistema Movil – Ram.

El hincado del tablestacado por el sistema Movil-Ram, se realiza mediante una máquina autopropulsada que consta de un mástil telescópico. Mediante alta vibración la tablestaca es introducida hasta la profundidad calculada.

El sistema Movil – Ram favorece mucho al hincado debido a que el mástil puede ser regulado en los tres ejes tridimensionales, lo que favorece al hincado direccional.

El procedimiento de hincado es el siguiente:

- a) Se levanta la tablestaca aproximadamente 30 cm para poder conectar la cadena de seguridad. De esta manera el perfil quedará asegurado y podrá ser suspendido gracias al mástil.



Ilustración 9. Tablestaca elevada y asegurada con el mástil.

Fuente: (Muros de contención y tablestacas, 2015).

- b) Cuando la tablestaca se encuentra en posición vertical, es prensada con la mordaza y se procede a hincarla.



Ilustración 10. Tablestaca lista para ser hincada.

Fuente: (Muros de contencion y tablestacas, 2015).

- c) Mediante vibración la tablestaca es hincada hasta quedar a la profundidad calculada.



Ilustración 11. Tablestaca hincada.

Fuente: (Muros de contencion y tablestacas, 2015).

2.3.2. Sistema Power Pack.

El sistema Power Pack se emplea cuando el terreno a tablestacar es de difícil acceso o se encuentra a una distancia considerable. Este sistema incluye una central hidráulica y un vibrador que se encuentra suspendido en una grúa.

El procedimiento de hincado es el siguiente:

- a) Al igual que en el sistema anterior la tablestaca debe ser levantada aproximadamente 30 cm para poder conectar la cadena de seguridad y elevar la tablestaca.
- b) La tablestaca es prensada con la mordaza y el vibro-hincador es desplazado hasta la línea de hinca, se debe golpear hasta la profundidad calculada.
- c) Se realiza una excavación de aproximadamente 0.60 metros para colocar arriostramiento.

d) Se realiza la excavación hasta la cota final.

2.3.3. Sistema Hammer.

El sistema Hammer utiliza un sistema hidráulico que eleva una masa, que será la que posteriormente golpeará a la tablestaca en la parte superior para poder hincarla.

El martillo Hammer puede ser instalado en una grúa o utilizando un sistema Movil-Ram. El tipo de tipo de suelo determinara la altura y la velocidad del golpe del martillo.



Ilustración 12. Martillo Hammer.

Fuente: (TERRA Trenchless Technologies, 2006).



Ilustración 13. Martillo Hammer instalado.

Fuente: (TERRA Trenchless Technologies, 2006).

2.3.4. Sistema Hydro Press.

El sistema Hydro Press es un sistema moderno de hincado en las tablestacas, este método es muy ocupado en zonas donde existen edificios lindantes, debido a que es un método que no produce vibraciones. Se realiza con la ayuda de unos pistones de gran dimensión y a extrema presión.

El hincado mediante este sistema ya no se lo realiza de forma individual como en los sistemas antes mencionados, se lo realiza en grupo de 3 o 4 tablestacas.

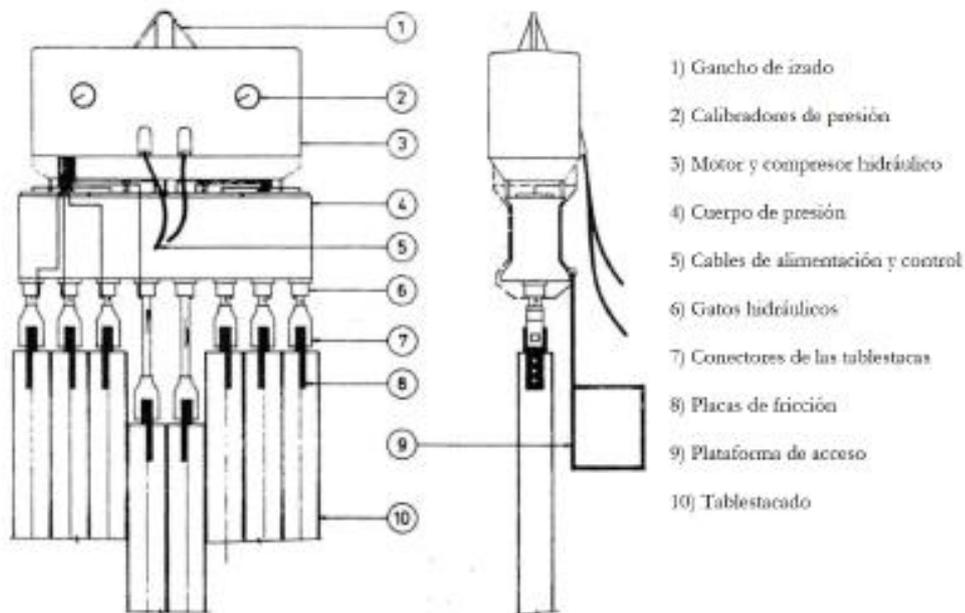


Ilustración 14. Sistema Hydro Press.

Fuente: (Sanmartin Carrillo, 2009)

2.4. Aplicaciones.

La aplicación de las tablestacas dependerá del tipo de obra en las que se quiera aplicar, estas pueden ser de índole temporal o permanentes. La aplicación de tablestacas es una técnica muy utilizada en obras de gran magnitud como puentes, vertederos hidráulicos, puertos, contención de zonas contaminadas.

2.4.1. Civiles.

En excavaciones el uso de las tablestacas de acero es muy amplio debido a su rapidez de instalación y su gran ventaja de poder ser reutilizadas. Además, no se necesita un área de trabajo grande para lograr su montaje, lo que es muy bueno en zonas con difícil acceso como para la excavación de un talud. En este tipo de obras las tablestacas son utilizadas en: aparcamientos subterráneos, cimentaciones, excavaciones temporales.

En adición, las tablestacas son utilizadas para la contención de tierras de esta manera se han desarrollado obras como túneles, terraplenes, taludes de carretera.

2.4.2. Medioambientales.

Las tablestacas metálicas como lo mencionamos en el capítulo anterior tienen una gran característica de ser impermeables, lo que permite el uso de estos elementos estructurales en la dispersión de contaminantes.

2.4.3. Medios marinos y fluviales.

En la construcción de muelles y diques se utilizan las tablestacas como principal elemento estructural, su función de soportar grandes cargas verticales y momentos flectores, han avivado las ganas de construir con estos materiales.

Su aplicación también se ha visto en encauzamientos y obras de estabilización de cauces, esto gracias a que, pueden ser hincadas en el agua. Además, otra aplicación de las tablestacas es, en el control de erosión.

3. Capítulo III: Presión lateral de tierra

3.1. Introducción.

Un diseño idóneo para muros de retención de tierras necesita de un análisis de la presión lateral de tierra. (Braja M., 2012). A continuación, se muestra los tipos de relleno que existen frente a un muro.

- a) El muro está restringido contra el movimiento. La presión lateral de tierra sobre el muro a cualquier profundidad se llama presión de tierra en reposo. (Braja M., 2012). (*Ilustración 15. Presión de tierra en reposo* Ilustración 15).
- b) El muro se puede inclinar respecto al suelo retenido. Con suficiente inclinación del muro, la cuña triangular de suelo detrás del muro fallará. La presión lateral de esta condición, se llama presión activa de tierra. (Braja M., 2012). (*Ilustración 16*).
- c) El muro es empujado hacia el suelo retenido. Con suficiente movimiento del muro, la cuña del suelo fallará. Esta condición se llama presión pasiva de tierra. (Braja M., 2012) . (*Ilustración 17*).

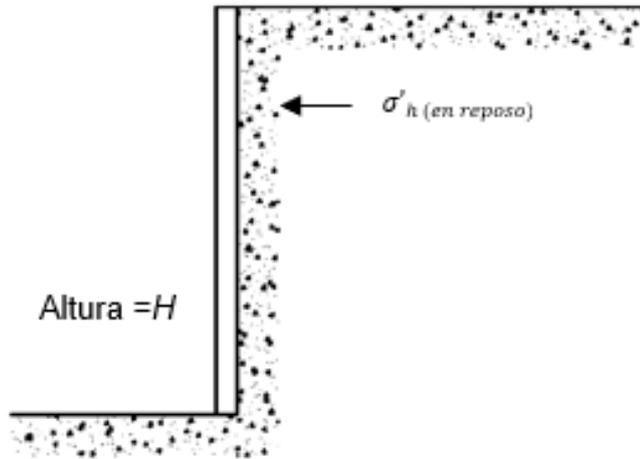


Ilustración 15. Presión de tierra en reposo.

Fuente: (Jiménez, 2021).

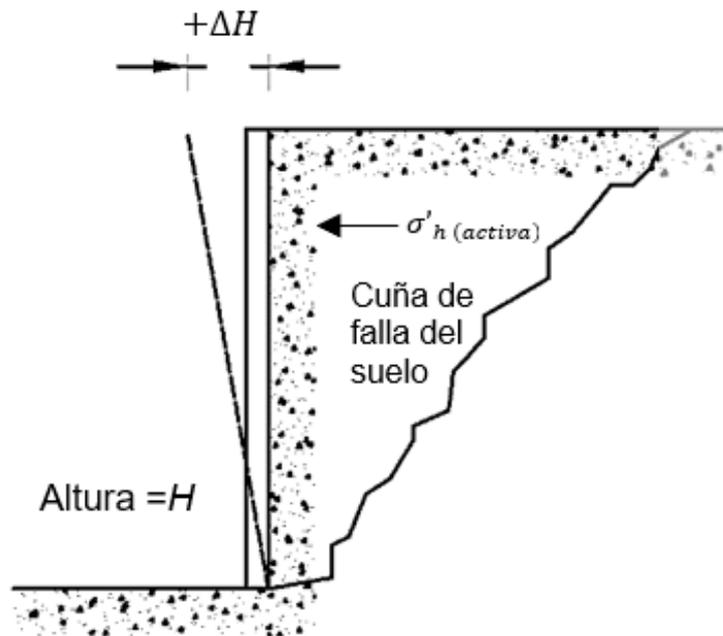


Ilustración 16. Presión de tierra activa.

Fuente: (Jiménez, 2021).

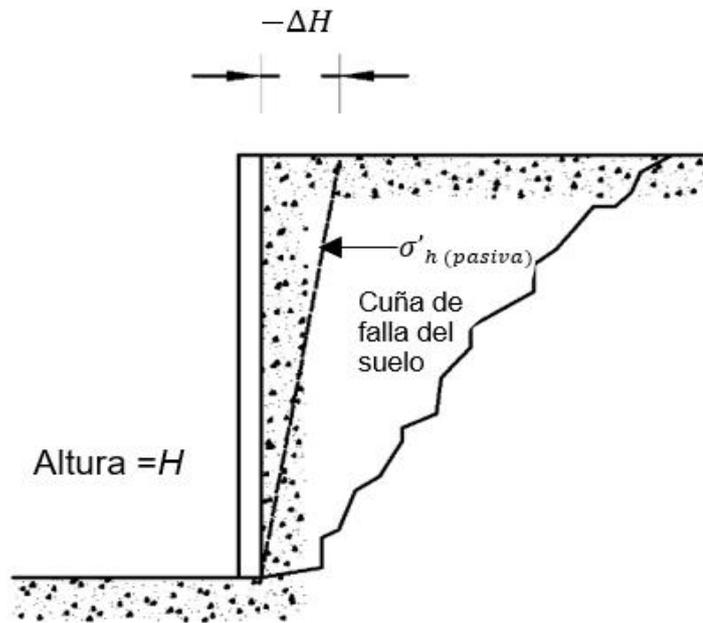


Ilustración 17. Presión de tierra.

Fuente: (Jiménez, 2021).

3.2. Presión de tierra en reposo.

La presión de tierra en reposo ocurre cuando un terreno a permanecido en su estado natural, es decir, no ha sufrido ningún desplazamiento horizontal ni rotacional. La presión en reposo considera a la estructura como rígida, por lo tanto, se puede considerar como aquella que no experimenta flexiones significativas, es decir, que no gira, ni se desplaza.

Los muros que se encuentran en reposo no se alejan del suelo y no se acercan hacia él; de ninguna de las dos maneras. En el caso del empuje en reposo las deformaciones horizontales serán nulas.

El empuje en reposo está definido por la siguiente ecuación:

$$P_0 = \frac{1}{2} K_0 H^2 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

K_0 =Coeficiente de presión en reposo.

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

σ'_h =presión efectiva horizontal.

σ'_v = presión efectiva vertical.

El coeficiente de empuje en reposo para suelos granulares de grano grueso, está determinado por la siguiente ecuación:

$$K_0 = 1 - \sin\phi \quad \text{Ecuación 3.3}$$

De igual manera se presenta la ecuación para suelos granulares de grano fino:

$$K_0 = 0.44 + 0.42 \left(\frac{IP}{100} \right) \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Un muro tablestacado dependiendo del estado en las que se encuentre puede estar sometido a cualquiera de los siguientes tipos de presión lateral:

- Empujes de tierra activos y pasivos.
- Presión lateral debido a una sobrecarga.
- Fuerzas de viento.
- Fuerzas sísmicas.
- Presión de olas.

3.3. Presión activa de Coulomb.

El empuje activo se puede definir como: el movimiento lateral de tierras contra un muro o cualquier estructura, que pueda retener al depósito de suelo. Por lo tanto, es la presión mínima que desarrolla el terreno cuando la estructura que lo está reteniendo cesa.

La teoría de Coulomb es un modelo más real por lo que se obtiene valores de presión activa más exactos. Además, la teoría de Coulomb toma en cuenta la fricción del muro. Coulomb en su análisis del empuje activo siempre considera los parámetros del suelo.

El empuje activo de Coulomb muestra un muro con una cuña de falla que se mueve hacia abajo, empujando el muro, por lo que existirá un desplazamiento suficiente para que pueda moverse.

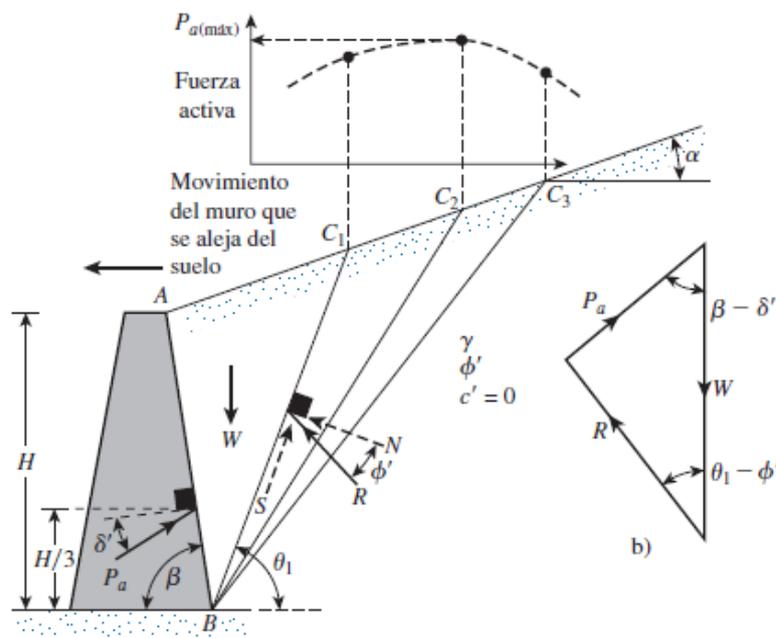


Ilustración 18. Presión activa de Coulomb.

Fuente: (Braja M., 2012).

Las fuerzas actuantes dentro de la presión activa de Coulomb ver (Ilustración 18 Ilustración 18. Presión activa de Coulomb.

Fuente:) son las siguientes:

- El movimiento del terrero generará una cuña con un peso propio llamado W .
- Las fuerzas normales (N) y resistentes (S) generan una resultante (R), la misma que estará inclinada un ángulo ϕ' . Ver (*Ilustración 18*)
- Según (Braja M., 2012). La fuerza activa por longitud unitaria del muro, P_a , estará inclinada respecto a la normal del parámetro del muro a un ángulo δ' .
 - δ' : se define como el ángulo de fricción del muro. El valor de δ' se encuentra entre $\frac{\phi'}{2}$ y $\frac{2}{3}\phi'$. (Henriquez Caceres, 2010).

El empuje activo de Coulomb se define por la siguiente ecuación:

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde:

γ = Peso específico del suelo.

H = Altura del muro.

K_a = Coeficiente de presión activa de tierra de Coulomb.

$$K_a = \frac{\text{sen}^2(\beta + \phi')}{\text{sen}^2 \beta \text{sen}(\beta - \delta') \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi' + \delta') \text{sen}(\phi - \alpha)}{\text{sen}(\beta - \delta') \text{sen}(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

La fuerza P_a se ubica a $\frac{H}{3}$, esta distancia debe ser medida desde la parte inferior de la tablestaca, es decir, desde la base. El ángulo definido como δ' será la inclinación de la fuerza P_a , respecto a la normal trazada hasta la parte posterior del muro.

En el caso de un muro vertical como lo es el caso de estudio de esta investigación, las condiciones serán: $\alpha = 0^\circ, \beta = 90^\circ$.

En el caso de existir una sobrecarga uniforme q que se encuentre encima del relleno, la fuerza activa P_a , se podrá calcular de la siguiente manera:

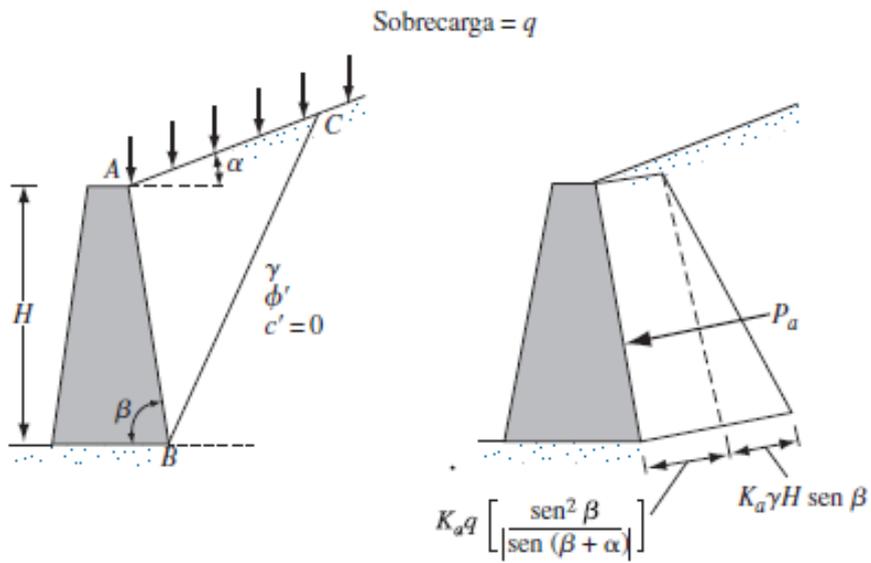


Ilustración 19. Empuje activo de Coulomb con una sobrecarga sobre el terreno.

Fuente: (Braja M., 2012).

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma_{eq} H^2 \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde:

$$\gamma_{eq} = \gamma + \left[\frac{\text{sen } \beta}{\text{sen}(\beta + \alpha)} \right] \left(\frac{2q}{H} \right) \quad \text{Ecuación 3.8}$$

3.4. Presión pasiva de Coulomb.

El empuje pasivo se da cuando la estructura de retención se mueve contra el suelo, entonces el suelo se verá comprimido lateralmente. El suelo presentara una resistencia al corte ante el empuje que tiende a moverlo.

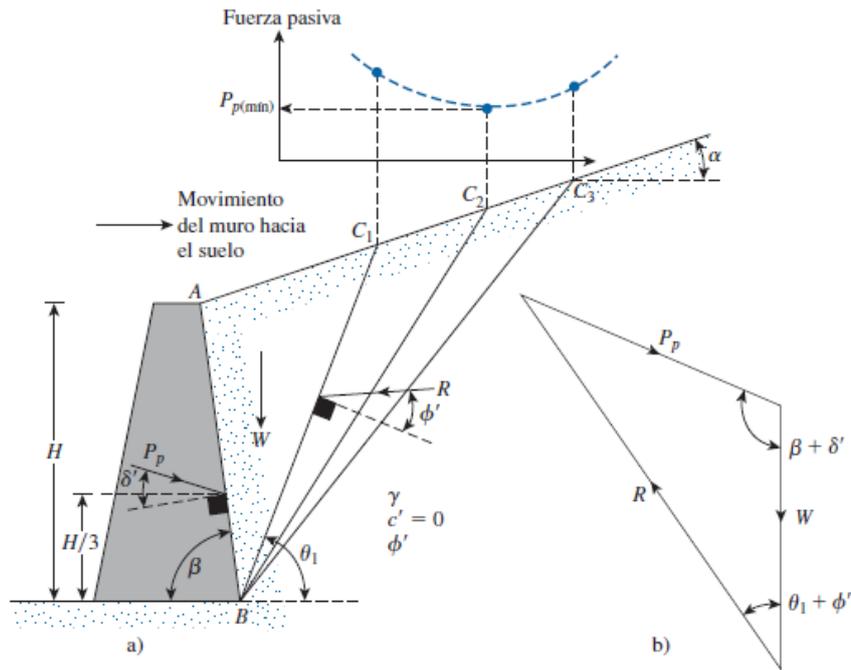


Ilustración 20. Presión pasiva de Coulomb.

Fuente: (Braja M., 2012).

El valor de P_p se determina a partir del triángulo ABC1 formado por la cuña W. Ver (Ilustración 20b). Se conoce la dirección de las fuerzas W, P_p y R. Además, la magnitud de la fuerza W, de esta manera se puede determinar el valor de P_p .

El empuje pasivo de Coulomb se expresa de la siguiente manera:

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma K_p H^2 \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde:

γ = Peso específico del suelo.

H = Altura del muro.

K_p = Coeficiente de presión pasiva de tierra de Coulomb.

$$K_p = \frac{\text{sen}^2(\beta - \phi')}{\text{sen}^2 \beta \text{ sen}(\beta - \delta') \left[1 - \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi' + \delta') \text{sen}(\phi + \alpha)}{\text{sen}(\beta + \delta') \text{sen}(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Al igual que la presión activa se considera $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 90^\circ$ para muros verticales, y la fuerza pasiva se ubicará a $\frac{H}{3}$, distancia medida desde el fondo de la tablestaca.

3.5. Presión activa de Rankine.

El empuje activo de Rankine ocurre cuando el terreno es susceptible a una expansión ilimitada, es decir, que se generan esfuerzos cortantes en todos los planos. Ver (Ilustración 21). Según, (Henriquez Caceres, 2010) si la rotación es lo suficientemente grande se formará una cuña por detrás de la estructura; esto producirá una condición de falla del suelo dando lugar a un estado de equilibrio plástico.

Las superficies de falla en el terreno formarán ángulos de $\pm 45 + \frac{\phi'}{2}$ con respecto a la horizontal. (Ilustración 21).

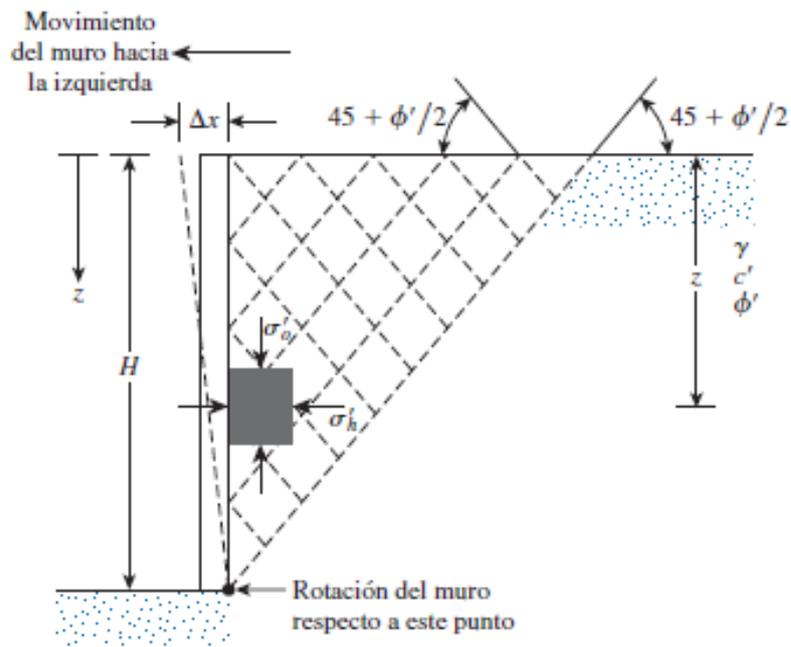


Ilustración 21. Empuje activo de Rankine.

Fuente: (Braja M., 2012).

Los desplazamientos $\Delta x = 0$ y $\Delta x > 0$ ver *Ilustración 21*, formados detrás del muro, puede ser representado por los círculos de Mohr-Coulomb. Ver (*Ilustración 22*). Puede existir el caso que, Δx , siga en aumento causando que el desplazamiento del muro alcance a la envolvente de falla de Mohr-Coulomb, representada por la siguiente ecuación:

$$s = c' + \sigma' \tan \phi' \quad \text{Ecuación 3.11}$$

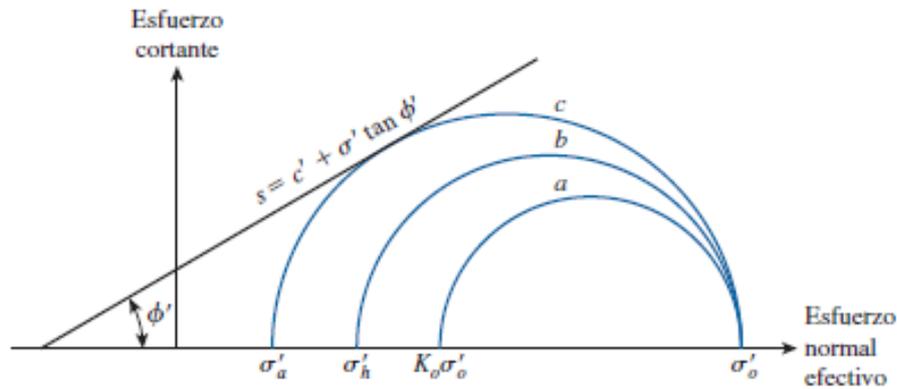


Ilustración 22. Círculos de Mohr-Coulomb correspondientes a los desplazamientos del muro.

Fuente: (Braja M., 2012).

El empuje activo de Rankine está definido para la condición de falla del terreno, donde el esfuerzo horizontal es σ'_a . La relación entre los esfuerzos principales y la envolvente de falla de Mohr-Coulomb se representa en la ecuación (3.12).

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Donde:

Los esfuerzos principales mayores son: $\sigma'_1 = \sigma'_0$

Los esfuerzos principales menores son: $\sigma'_3 = \sigma'_a$

Por lo tanto,

$$\sigma'_a = \sigma'_0 K_a - 2c' \sqrt{K_a} \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Donde:

K_a = coeficiente de presión activa de Rankine.

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right) \quad \text{Ecuación 3.14}$$

La presión activa tendrá variación de acuerdo con la profundidad, siendo así:

$$\sigma'_0 = 0 \text{ cuando } z = 0$$

$$\sigma'_0 = \gamma H \text{ cuando } z = H$$

De igual manera, se muestra que la presión activa es igual a:

$$-2c'\sqrt{K_a} \text{ cuando } z = 0$$

Por lo tanto, los esfuerzos de tensión disminuyen con la profundidad volviéndose cero hasta llegar a una profundidad z_c .

$$\gamma z_c K_a - 2c'\sqrt{K_a} = 0 \quad \text{Ecuación 3.15}$$

Donde:

z_c = Profundidad de grito de tensión.

$$z_c = \frac{2c'}{\gamma\sqrt{K_a}} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

La profundidad z_c , es considerada cuando el esfuerzo de tensión en el terreno a la larga ocasionará una grieta en la superficie entre el terreno y el muro. (Braja M., 2012).

En este caso podemos obtener dos fórmulas:

- a) El empuje activo ocurre antes que la grieta de tensión aparezca, y está definido por la siguiente ecuación:

$$P_a = \frac{1}{2} H^2 \gamma K_a - 2c'H\sqrt{K_a} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

- b) El empuje activo ocurre después que la grieta de tensión aparece, y está definido por la siguiente ecuación:

$$P_a = \frac{1}{2} (H - Z_c) \gamma K_a H - 2c'\sqrt{K_a} \quad \text{Ecuación 3.18}$$

La presión activa de tierra en suelos granulares llegará a tener valores de desplazamientos entre $(0.001H - 0.004H)$ en el caso que el muro se desplace hacia afuera, y $(0.01H - 0.04H)$ en suelos cohesivos.

$$\sigma_a = \sigma_0 \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2c' \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{Ecuación 3.19}$$

El empuje activo generalizado para la presión activa de Rankine está definido por la ecuación (3.20).

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \quad \text{Ecuación 3.20}$$

3.6. Presión pasiva de Rankine.

El estado pasivo ocurre cuando la masa del terreno es comprimida lateralmente una cantidad Δx , Ver (Ilustración 23). Donde el esfuerzo horizontal σ_h' aumentara respecto a $\sigma'_0 K_0$.

Si el valor de Δx sigue en aumento, los esfuerzos a la profundidad z llegan hasta la envolvente de falla Mohr-Coulomb. Ver (Ilustración 24). Es decir, el suelo que se encuentra detrás del muro será empujado hacia arriba.

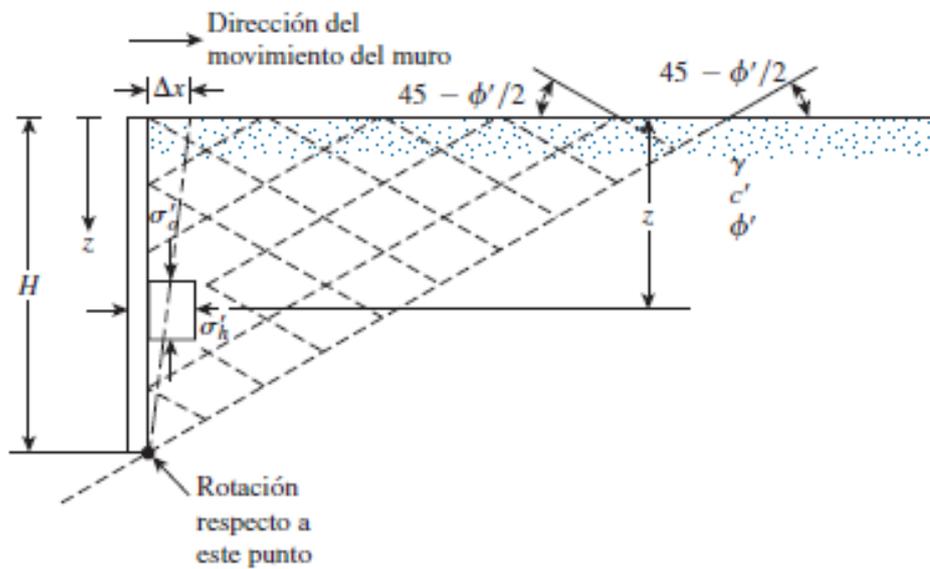


Ilustración 23. Empuje pasivo de Rankine.

Fuente: (Braja M., 2012).

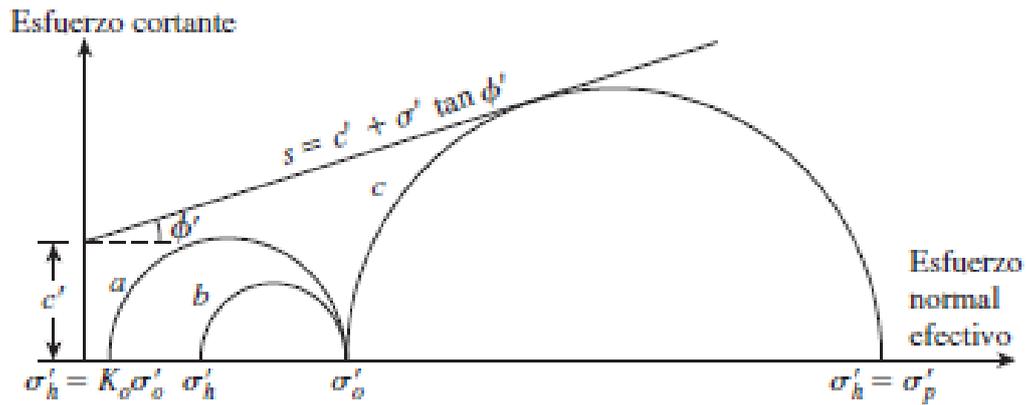


Ilustración 24. Círculos de Mohr-Coulomb correspondientes a los desplazamientos del muro en estado pasivo.

Fuente: (Braja M., 2012).

$$\sigma'_p = \sigma'_o \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad \text{Ecuación 3.21}$$

Donde:

σ'_p = esfuerzo principal mayor.

σ'_o = esfuerzo principal menor.

Ahora, el coeficiente de presión pasiva de Rankine K_p , está definido por la ecuación (3.22).

$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad \text{Ecuación 3.22}$$

De la ecuación (3.19), se obtiene:

$$\sigma'_p = \sigma'_o K_p + 2c' \sqrt{K_p} \quad \text{Ecuación 3.23}$$

El empuje pasivo se representa con la siguiente ecuación:

$$P_p = \frac{1}{2} (H - Z_c) \gamma K_p H - 2c' \sqrt{K_p} \quad \text{Ecuación 3.24}$$

Si se trata de un suelo granular, el empuje pasivo será:

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma K_p H^2 \quad \text{Ecuación 3.25}$$

3.7. Empujes sobre tablestacas.

Se analiza en detalle el cálculo de tablestacas de acero, frente a los empujes en el terreno, siendo estas fuerzas la base de diseño de estos elementos.

Para un caso general se considera los diferentes empujes que actúan en un terreno horizontal y sin sobrecargas. Además, el peso propio de la tablestaca no se considera dentro de los cálculos. (**Error! Reference source not found.**)

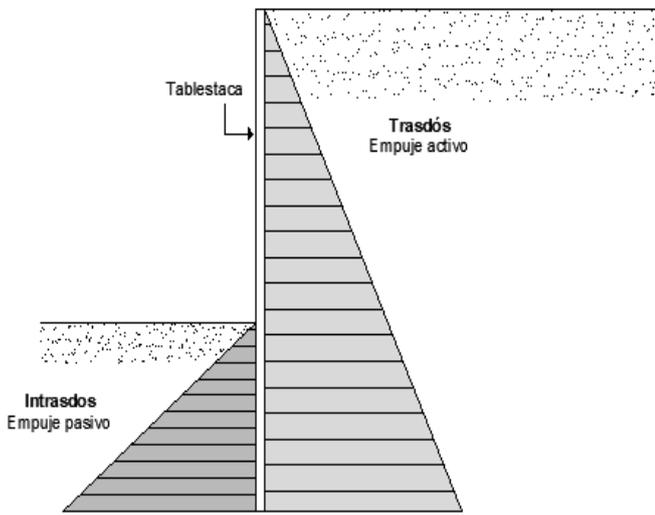
Empujes sobre tablestacas	
Trasdós	Intradós
Es la cara de la tablestaca que está en contacto con el terreno. Por lo tanto, se considera un empuje activo en ese lado d la tablestaca.	Opuesto al trasdós, es la cara visible de la tablestaca. Se considera un empuje pasivo, debido que la estructura se mueve contra el suelo.
 <p style="text-align: center;"><i>Ilustración 25. Empuje sobre tablestacas.</i> <i>Fuente: (Jiménez, 2021).</i></p>	

Tabla 1. Empujes sobre tablestacas.

(Jiménez,2021).

3.8. Sobrecargas

3.8.1. Sobrecargas horizontales.

Las sobrecargas horizontales pueden ser puntuales o distribuidas, este tipo de sobrecargas son muy comunes en los muelles tablestacados. Cuando estas fuerzas de sobrecarga se encuentran dentro de la cuña de análisis no se deben dejar de lado. Los bolardos en los muelles también deben ser considerados como sobrecargas que actuarán sobre las tablestacas.

3.8.2. Empujes de agua.

Presión hidrostática.

Una diferencia en nivel del agua de cualquier lado de la tablestaca crea una presión hidrostática desequilibrada. Las presiones de agua son calculadas multiplicando la profundidad de agua por su peso específico. Si se asume una condición hidrostática sin flujo, es decir sin tener en cuenta los efectos de la filtración, se asume que la presión hidrostática actúa a lo largo de toda la profundidad de hinca. La presión de agua se debe agregar a las tensiones efectivas del suelo a cada lado de la tablestaca para obtener las totales. (Sanmartin Carrillo, 2009).

3.8.3. Sismo.

Los efectos de sismo deben ser tomados en cuenta en zonas con un historial sísmico de alto riesgo, y en aquellas zonas que se considere vulnerables ante la actividad sísmica. Uno de los efectos más severos que puede producir un sismo en un terreno donde se encuentre un sistema tablestacado es la licuefacción, en este caso se debería mejorar el terreno o en el mejor caso tratar de reubicar el sistema tablestacado.

3.8.4. Olas.

Probablemente el comportamiento de las olas es un fenómeno natural que poco se ha logrado comprender. Las olas pueden ser producto de viento, temblores y movimiento de las embarcaciones. Por lo tanto, las fuerzas horizontales generadas por efecto de las olas dependerán de factores como: la profundidad a la que se encuentra la ola con la tablestaca. Además, de la frecuencia de las olas; la longitud y

altura serán otros factores que determinarán la acción de cargas laterales en la estructura.

4. Capítulo IV: Métodos de análisis de tablestacas

4.1. Definición del modelo de cálculo.

Para definir un método de cálculo de tablestacado se sugiere seguir los siguientes pasos:

- a) Obtener y/o calcular los parámetros del suelo.
- b) Calcular los coeficientes de empujes activos y pasivos.
- c) Calcular las presiones del suelo.
- d) Calcular el equilibrio de fuerzas horizontales y de momentos.
- e) Calcular la profundidad teórica de clava.
- f) Calcular momentos flectores máximos.

Según (Sanmartin Carrillo, 2009). Es posible tener un valor inicial de clava según el tipo de suelo.

Longitud de clava	Tipo de suelo
0.75 H	Denso
H	Firme
1.50 H	Suelo
2.00 H	Muy suelto

Tabla 2. Valores de profundidad de clava según el tipo de suelo.

(Sanmartin Carrillo, 2009).

4.1.1. Condiciones de apoyo en el pie.

Dentro del diseño de un tablestacado existen condiciones de apoyo libre o fijo en el pie de la tablestaca. La determinación del tipo de apoyo dependerá de la profundidad de clava, respecto a la deformación que pueda sufrir la tablestaca. Al no abarcar tablestacas ancladas en este estudio, se considera un tablestacado en voladizo, este tipo de tablestacado puede ser diseñado para soportar muros entre 4.50 metros a 6.00 metros de altura; de lo contrario la clava sería muy profunda y no se podría garantizar el equilibrio. De igual manera la sección del perfil tendría un perfil con un gran espesor para poder resistir momentos flectores.

4.1.2. Condiciones de profundidad de clava.

La profundidad de clava teórica ($D_{teorica}$) tendrá un aumento en su longitud, tal como se lo describa en cada método analizado, eventualmente la profundidad de clava ira variando su valor, dependiendo del incremento que cada método considere en su análisis.

4.2. Método de Braja Das

Los muros en voladizo o tablestacas en voladizo son utilizados hasta una altura aproximada de 6 metros, estos elementos actúan como una viga en voladizo. La distribución de las presiones y la profundidad de empotramiento sobre un muro tablestacado se pueden observar en la (Ilustración 26).

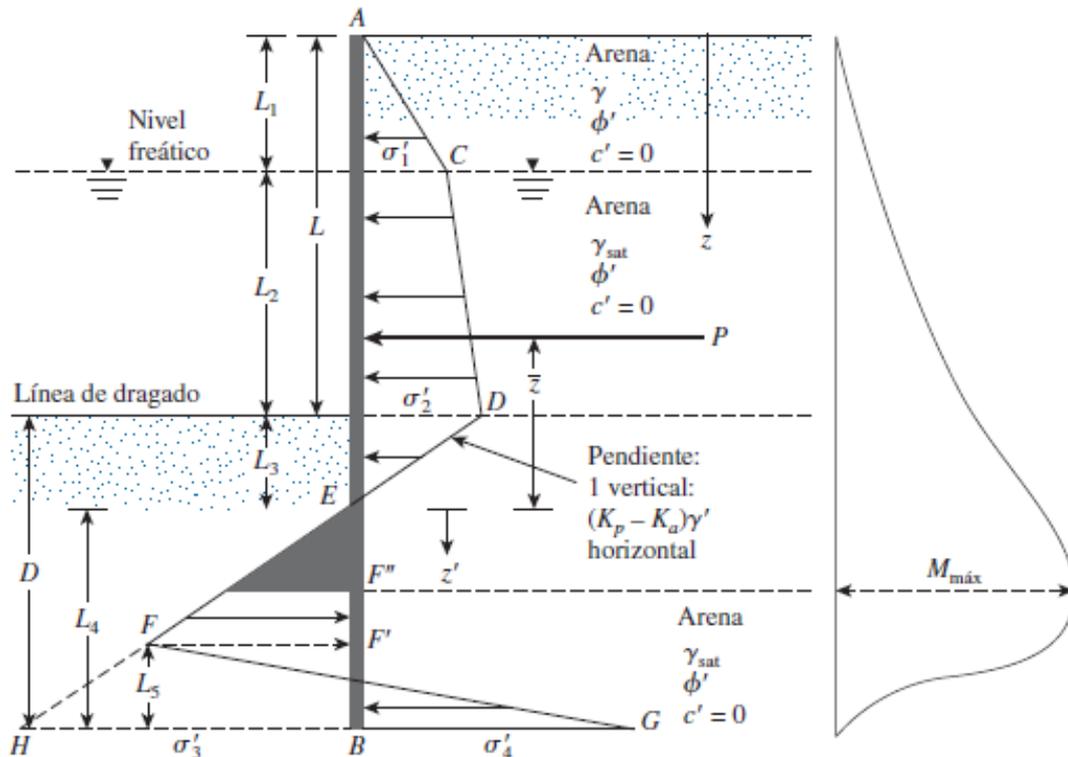


Ilustración 26. Tablestaca en voladizo que penetra arena y su variación de momento.

Fuente: (Braja M., 2012).

A continuación, se presenta el método de cálculo de tablestacas de acero en suelos arenosos. De acuerdo con la *Ilustración 26*, se obtiene la presión activa mediante la ecuación (4.1) a una profundidad $z = L_1$.

$$\sigma'_1 = \gamma L_1 K_a \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

K_a = Coeficiente de presión activa de Rankine.

γ = Peso específico del suelo arriba del nivel freático.

Ahora bien, el esfuerzo σ'_2 representa la presión activa a nivel de la línea de dragado, por lo tanto, la suma de los estratos de suelo será una nueva profundidad, y estará definido como: $z = L_1 + L_2$ ver ecuación (4.2). Cabe mencionar que esta profundidad se encuentra bajo el Nivel freático del terreno, por lo que se deberá definir el peso específico efectivo del suelo.

$$\sigma'_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a \quad \text{Ecuación 4.2}$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde:

γ' = peso específico efectivo del suelo.

El cálculo de la presión activa horizontal desde la línea de dragado hasta el punto F'' se calculará con la ecuación (4.4).

$$\sigma'_a = [\gamma L_1 + \gamma' L_2 + \gamma'(z - L_1 - L_2)] K_a \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Por consiguiente, la presión pasiva a una profundidad z , se calcula con la siguiente ecuación:

$$\sigma'_p = \gamma'(z - L_1 - L_2) K_p \quad \text{Ecuación 4.5}$$

K_p = Coeficiente de presión pasiva de Rankine.

$$K_p = tg^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

Para obtener la presión lateral neta que actúa sobre el suelo se combinan las ecuaciones (4.4) y (4.5).

$$\sigma' = \sigma'_a - \sigma'_p = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a - \gamma'(z - L_1 - L_2)(K_p - K_a) \quad \text{Ecuación 4.6}$$

$$\sigma' = \sigma'_2 - \gamma'(z - L)(K_p - K_a) \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Donde:

$$L = L_1 + L_2 \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Ahora bien, a una profundidad de L_3 , la presión neta será cero. Entonces:

$$\sigma'_2 - \gamma'(z - L)(K_p - K_a) = 0 \quad \text{Ecuación 4.9}$$

$$(z - L) = L_3 = \frac{\sigma'_2}{\gamma'(K_p - K_a)} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

El segmento \overline{HB} representado en la (Ilustración 26), se refiere a la presión σ'_3 mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma'_3 = L_4(K_p - K_a)\gamma' \quad \text{Ecuación 4.11}$$

La presión pasiva en el fondo de la tablestaca σ'_p , se encontrará a una profundidad de $z = L + D$.

$$\sigma'_p = (\gamma L_1 + \gamma' L_2 + \gamma' D) K_p \quad \text{Ecuación 4.12}$$

La presión activa a la misma profundidad se define de la siguiente manera:

$$\sigma'_a = \gamma' D K_a \quad \text{Ecuación 4.13}$$

Para obtener la presión lateral neta de la tablestaca que se encuentra en el fondo, se lo realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma'_p - \sigma'_a = \sigma'_4 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_p - \gamma' D (K_p - K_a)$$

$$\sigma'_p - \sigma'_a = \sigma'_4 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_p - \gamma' L_3 (K_p - K_a) + \gamma' L_4 (K_p - K_a)$$

$$\sigma'_p - \sigma'_a = \sigma'_4 = \sigma'_5 + \gamma' L_4 (K_p - K_a) \quad \text{Ecuación 4.14}$$

Donde:

$$\sigma'_5 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_p + \gamma' L_3 (K_p - K_a) \quad \text{Ecuación 4.15}$$

La distancia D como lo muestra la Ilustración 26, representa la distancia en el fondo de la tablestaca, D es la suma de $L_3 + L_4$

$$D = L_3 + L_4 \quad \text{Ecuación 4.16}$$

La fuerza puntual P se la obtiene, realizando sumatoria de momentos respecto al punto B.

$$P - \frac{1}{2} \sigma'_3 L_4 + \frac{1}{2} L_5 (\sigma'_3 + \sigma'_4) = 0 \quad \text{Ecuación 4.17}$$

Donde:

P= representa las presiones formadas entre los puntos ACDE.

$$P(L_4 + \bar{z}) - \left(\frac{1}{2} \sigma'_3 L_4\right) \left(\frac{L_4}{3}\right) + \frac{1}{2} L_5 (\sigma'_3 + \sigma'_4) \left(\frac{L_5}{3}\right) = 0 \quad \text{Ecuación 4.18}$$

Para obtener la distancia L_5 , se despeja de la ecuación (4.17).

$$L_5 = \frac{\sigma'_3 L_4 - 2P}{\sigma'_3 + \sigma'_4} \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Al combinar las ecuaciones (4.11), (4.14), (4.18), (4.19) se puede obtener la ecuación de cuarto grado de L_4 , entonces:

$$L_4^4 + A_1 L_4^3 - A_2 L_4^2 - A_3 L_4 - A_4 = 0 \quad \text{Ecuación 4.20}$$

Para poder resolver la ecuación (4.20). Se debe reemplazar las siguientes igualdades:

$$A_1 = \frac{\sigma'_5}{\gamma' (K_p - K_a)} \quad \text{Ecuación 4.21}$$

$$A_2 = \frac{8P}{\gamma' (K_p - K_a)} \quad \text{Ecuación 4.22}$$

$$A_3 = \frac{6P[2\bar{z}\gamma' (K_p - K_a) + \sigma'_5]}{\gamma'^2 (K_p - K_a)^2} \quad \text{Ecuación 4.23}$$

$$A_4 = \frac{P[6\bar{z}\sigma'_5 + 4P]}{\gamma'^2 (K_p - K_a)^2} \quad \text{Ecuación 4.24}$$

Cabe recalcar que se puede utilizar un factor de seguridad en K_p .

Donde:

FS= factor de seguridad.

$$K_{p(diseño)} = \frac{K_p}{FS} \quad \text{Ecuación 4.25}$$

El factor de seguridad puede tomar valores entre (1.5 a 2).

Para el cálculo del momento máximo se requiere determinar un punto de fuerza cortante.

$$P = \frac{1}{2}(z')^2(K_p - K_a)\gamma'$$

Despejando z' se obtiene:

$$z' = \sqrt{\frac{2P}{(K_p - K_a)\gamma'}} \quad \text{Ecuación 4.26}$$

La magnitud del momento flector máximo se obtiene con la siguiente ecuación:

$$M_{max} = P(\bar{z} + z') - \left[\frac{1}{2}\gamma'(z')^2(K_p - K_a) \right] \frac{1}{3}z' \quad \text{Ecuación 4.27}$$

Para dimensionar el perfil de la tablestaca se lo realiza con el esfuerzo de flexión permisible del material.

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{perm}} \quad \text{Ecuación 4.28}$$

Donde:

S= módulo de sección de la tablestaca.

σ_{perm} = esfuerzo de flexión permisible de la tablestaca.

4.3. Método de Blum.

La metodología de Blum considera que, la tablestaca oscila alrededor de un punto ubicado en el extremo inferior de la tablestaca.

La diferencia entre los empujes activos y pasivos que se generan por debajo del punto 0, se verán reemplazados por una fuerza C, que actúa en el tramo entre 0 y A. De este modo, la resultante C actuara sobre el punto 0 para fines de cálculo.

La teoría de cálculo de Blum consiste en asumir que el momento actuante sobre la pantalla, con respecto a un punto de giro en la parte inferior de la tablestaca es cero, con esto, el valor de la fuerza resultante se anula y se puede determinar el valor de la profundidad de empotramiento.

Se debe tener en cuenta que la profundidad de clava encontrada es la mínima por lo que se requiere un incremento del 20%, es decir, $0.2 \cdot t_0$.

Se puede obtener los empujes activos y pasivos una vez encontrada la profundidad de clava; la diferencia entre estos empujes nos genera el valor de la fuerza contra restante C. Posteriormente se calcula el momento flector máximo y los esfuerzos de corte junto con sus respectivas profundidades.

Al igual que la metodología de (Braja M., 2012). El coeficiente de empuje pasivo k_p se verá minorado por un coeficiente propuesto por la (Seguridad estructural Cimientos, 2019). Definido en este escrito como k_{pm} .

Situación de dimensionado	Tipo	Materiales		Acciones	
		γ_R	γ_M	γ_E	γ_F
Pantallas					
	Estabilidad fondo excavación	1,0	2,5 ⁽⁶⁾	1,0	1,0
	Sifonamiento	1,0	2,0	1,0	1,0
Rotación o traslación					
	Equilibrio límite	1	1,0	0,6 ⁽⁷⁾	1,0
	Modelo de Winkler	1	1,0	0,6 ⁽⁷⁾	1,0
	Elementos finitos	1,0	1,5	1,0	1,0

Ilustración 27. Coeficientes de seguridad parciales.

Fuente: (Seguridad estructural Cimientos, 2019).

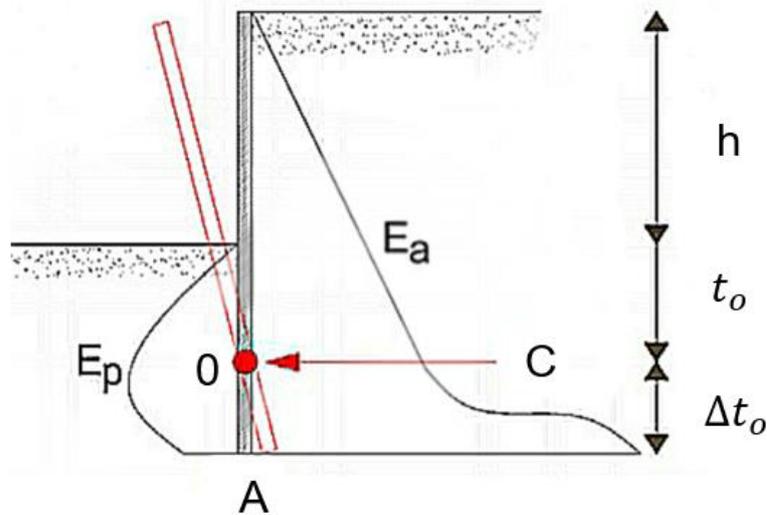


Ilustración 28. Método de Blum.

Fuente: (Jimenez, 2021).

A continuación, se presentan las ecuaciones y condiciones adoptadas para el diseño de tablestacas en voladizo basadas en el método de Blum.

Los coeficientes de empuje activo y pasivo se calculan mediante la teoría de Rankine, descritos en la ecuación (3.14) y (3.22) respectivamente.

Se encuentra la profundidad de giro (t_o) mediante la ecuación (4.29).

$$t_o = \frac{h}{\sqrt[3]{\frac{K_{pm}}{k_a} - 1}} \quad \text{Ecuación 4.29}$$

La profundidad (t_o) será afectada por un incremento del 20% obteniendo, Δt_o . La longitud de empotramiento D será la suma de $t_o + \Delta t_o$.

Por lo tanto, la longitud total de la tablestaca D_{total} será la suma de $D + h$.

Dentro de las fuerzas que actúan sobre la tablestaca se encuentran: el empuje activo p_a y el empuje pasivo p_p , estas fuerzas se calculan mediante las ecuaciones (4.30) y (4.31) respectivamente.

$$p_a = k_a \gamma \frac{(h+t_o)^2}{2} \quad \text{Ecuación 4.30}$$

$$p_p = k_{pm} \gamma \frac{(t_o)^2}{2} \quad \text{Ecuación 4.31}$$

La fuerza resultante C, se calcula de la diferencia entre los empujes activos y pasivos.

$$C = p_p - p_a \quad \text{Ecuación 4.32}$$

El cálculo del momento flector máximo se lo realiza con la siguiente ecuación:

$$M_{max} = \frac{1}{6} \gamma k_{pm} \frac{h^3}{\left(\sqrt{\frac{k_{pm}}{k_a}} - 1\right)^2} \quad \text{Ecuación 4.33}$$

La profundidad a la que se encuentra el momento flector máximo.

$$z_{max} = \frac{h}{\sqrt{\frac{k_{pm}}{k_a}} - 1} \quad \text{Ecuación 4.34}$$

El esfuerzo cortante máximo está definido por:

$$Q_{max} = \frac{1}{6} \gamma k_{pm} \frac{h^2}{\sqrt{\frac{k_{pm}}{k_a}} - 1} \quad \text{Ecuación 4.35}$$

La profundidad a la que se encuentra el esfuerzo de corte máximo se calcula:

$$z_1 = \frac{h}{\frac{k_{pm}}{k_a} - 1} \quad \text{Ecuación 4.36}$$

4.4. Equilibrio límite.

El método de equilibrio límite en tablestacas determina que los empujes son auto equilibrantes. El método establece, que las masas de tierra producirán la resistencia al corte, al buscar desplazar el terreno que se encuentra sobre la línea de dragado respecto a la masa que ese encuentra en la parte inferior.

Por lo general, se consideran a las superficies de empujes con formas geométricas como: rectangulares o triangulares.

Las ecuaciones de empujes activos y pasivos serán determinadas a partir de la ecuación (4.37). Representa la presión del suelo a cualquier profundidad.

$$\sigma = \gamma kh \quad \text{Ecuación 4.37}$$

Ahora bien, cuando el empuje activo o pasivo es triangular, se realiza la idealización como si se buscará puntualizar una fuerza triangular, es decir, $\frac{bxh}{2}$ donde: la base será igual al esfuerzo del suelo a cualquier profundidad, obteniendo $\frac{1}{2}\gamma kh * h$.

$$E_{a1} = \frac{1}{2} * k_a * \gamma * df_1^2 \quad \text{Ecuación 4.38}$$

$$E_{a2} = k_a * \gamma * df_1^2 * (df_2 + D - z) \quad \text{Ecuación 4.39}$$

$$E_{a3} = k_a * \gamma' * \frac{(df_2 + D - z)}{2} \quad \text{Ecuación 4.40}$$

$$E_{p4} = (k_p * \gamma * df_1 * k_p * \gamma' * (df_2 + D - z)) * z \quad \text{Ecuación 4.41}$$

$$E_{p5} = k_p * \gamma' * \frac{z^2}{2} \quad \text{Ecuación 4.42}$$

$$E_{p6} = k_p * \gamma' * \frac{(D-z)^2}{2} \quad \text{Ecuación 4.43}$$

$$E_{a7} = (k_a * \gamma' * (D - z)) * z \quad \text{Ecuación 4.44}$$

$$E_{a8} = k_a * \gamma * \frac{z^2}{2} \quad \text{Ecuación 4.45}$$

Para establecer una condición de equilibrio, es necesario plantear dos ecuaciones que relacionen los empujes activos y pasivos, estas ecuaciones serán: $\Sigma F_x=0$ y $\Sigma M=0$.

De igual manera, cuando el empuje activo y pasivo está representado en forma rectangular, se realiza la idealización como si se buscará puntualizar una fuerza rectangular, es decir, $b \times h$ donde la base de igual manera será reemplazada por la ecuación (4.37). Obteniendo así:

$$\gamma k h * h$$

Para lograr el equilibrio límite de todos los empujes encontrados se debe plantear una primera ecuación, siendo esta la sumatoria de fuerzas horizontales.

$$E_{a1} + (E_{a2} + E_{a3}) + (E_{p4} + E_{p5}) = E_{p6} - (E_{a7} + E_{a8}) \quad \text{Ecuación 4.46}$$

Por otro lado, la sumatoria de momentos respecto al punto 0, será otra ecuación fundamental para el cumplimiento del equilibrio límite.

$$E_{a1} * \left(\frac{df_1}{3} + df_2 + D\right) + E_{a2} * \left(\frac{df_2 + D - z}{2} + z\right) + E_{a3} * \left(\frac{df_2 + D - z}{3} + z\right) + E_{p4} * \left(\frac{1}{2} * z\right) + E_{p5} * \left(\frac{1}{3} * z\right) - E_{p6} * \left(\frac{D - z}{3} + z\right) - E_{a7} * \left(\frac{1}{2} * z\right) - E_{a8} * \left(\frac{1}{3} * z\right) = 0 \quad \text{Ecuación 4.47}$$

Una vez determinadas las diferentes ecuaciones de empuje activo y pasivo, junto con las ecuaciones de la estática, se debe resolver el sistema de diez ecuaciones y diez incógnitas; consiguiendo así los diferentes valores de los empujes que actúan sobre la tablestaca, además de la longitud de clava.

Las presiones sobre la tablestaca a diferentes profundidades son determinadas mediante las siguientes ecuaciones:

$$C_1 = k_a * \gamma * df_1 \quad \text{Ecuación 4.48}$$

$$C_2 = k_a * \gamma * df_1 * k_p * \gamma' * (df_2 + D - z) \quad \text{Ecuación 4.49}$$

$$C_3 = k_p * \gamma * df_1 * k_p * \gamma' * (df_2 + D - z) \quad \text{Ecuación 4.50}$$

$$C_4 = k_p * \gamma * df_1 * k_p * \gamma' * (df_2 + D - z) + k_p * \gamma' * z \quad \text{Ecuación 4.51}$$

$$C_5 = k_p * \gamma' * (D - z) \quad \text{Ecuación 4.52}$$

$$C_6 = k_a * \gamma' * (D - z) \quad \text{Ecuación 4.53}$$

$$C_7 = k_a * \gamma' * (D - z) + k_a * \gamma' * z \quad \text{Ecuación 4.54}$$

Para determinar el momento flector máximo se debe considerar que los momentos en los extremos de la tablestaca son igual a cero. Se obtiene el momento flector máximo del programa Sap2000.

4.5. ProSheet

ProSheet es un programa desarrollado por la empresa Arcelor Commercial RPS. ProSheet es un software integral de diseño de tablestacas para muros de contención en voladizo y muros con un solo soporte (un ancla o puntal). Se basa en la teoría de Blum.

Es una herramienta bastante simple para determinar todas las fuerzas requeridas para diseñar un muro de contención de tablestacas, e ideal para diseños preliminares. Los factores de presión y resistencia del suelo se determinan de acuerdo con la teoría de Caquot / Kérisel. (ArcelorMittal, 2019).

El método de cálculo está basado en el soporte de tierra fijo. Este método, menciona que las tablestacas se deforman de acuerdo con su base, es decir, al igual que en el método de Blum; la tablestaca girara alrededor del punto donde se aplica una fuerza resultante. Ver (*Ilustración 28*).

ProSheet, permite desarrollar tres casos de análisis como son:

- Tablestacas en voladizo.
- Tablestacas con anclajes o puntales.
- Tablestacas con anclajes o puntajes según Blum.

Al ser un software de licencia libre, ProSheet, no incluye en su análisis efectos de sismo, ni distancias de anclaje al igual que deslizamientos de muros.

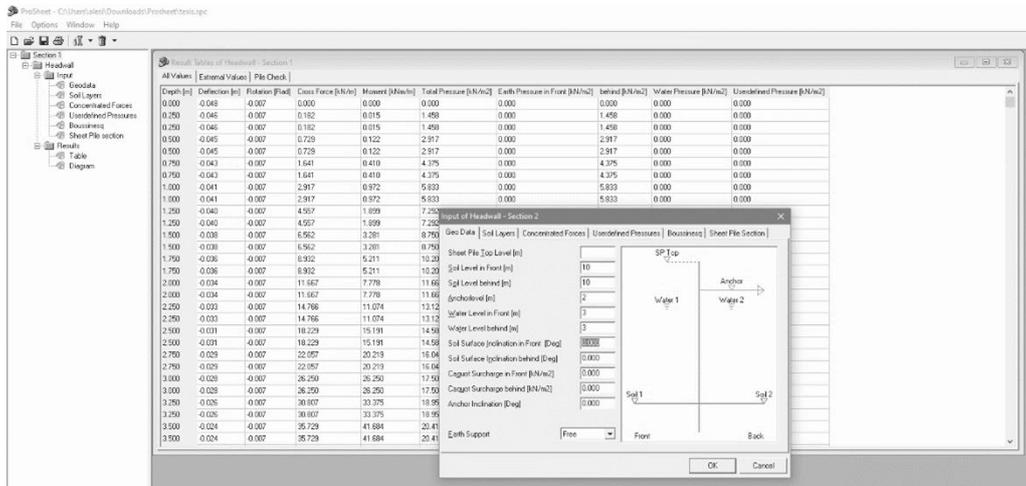


Ilustración 29. Software de Diseño ProSheet.

Fuente: (ProSheet,2021)

5. Capítulo V: Modelación

5.1. Premisas para el análisis de resultados mediante la comparación de los diferentes métodos.

- El terreno analizado no tiene cohesión, se trata de un suelo granular conformado por un estrato mandante.
- No se diseñará un sistema de anclaje, por lo que este análisis de estabilidad queda fuera de estudio.
- Debido a que el material más utilizado en tablestacas es el acero, su diseño será realizado con dicho material.
- No se analizarán sobrecargas, sobre la superficie de la tablestaca, por lo tanto, efectos de sismo, tire de bolardos, impacto de buques no se consideran en el análisis.

5.2. Parámetros de modelación.

Parámetros de modelación	
Peso específico natural del suelo.	$\gamma = 17.50 \frac{kN}{m^3}$
Ángulo de Fricción del suelo.	$\phi' = 30^\circ$
Peso específico saturado del suelo.	$\gamma_{sat} = 17.50 \frac{kN}{m^3}$
Peso específico del agua.	$\gamma = 9.81 \frac{kN}{m^3}$
Cohesión.	$c' = 30 \text{ kPa}$

Profundidad a la que se encuentra el Nivel Freático.	$df_1 = 2 m$
Profundidad a la que se encuentra el Nivel Freático - la base de la tablestaca.	$df_2 = 3 m$

Tabla 3. Parámetros de modelación.

(Jiménez,2021).

Los parámetros que permitirán establecer una comparación entre los métodos desarrollados son:

- **Profundidad de clava:** será la distancia requerida para que la tablestaca se encuentre en equilibrio bajo las diferentes condiciones del suelo.
- **Momento flector máximo:** el momento flector máximo permitirá calcular a sección transversal de la tablestaca.

5.3. Perfil estratigráfico

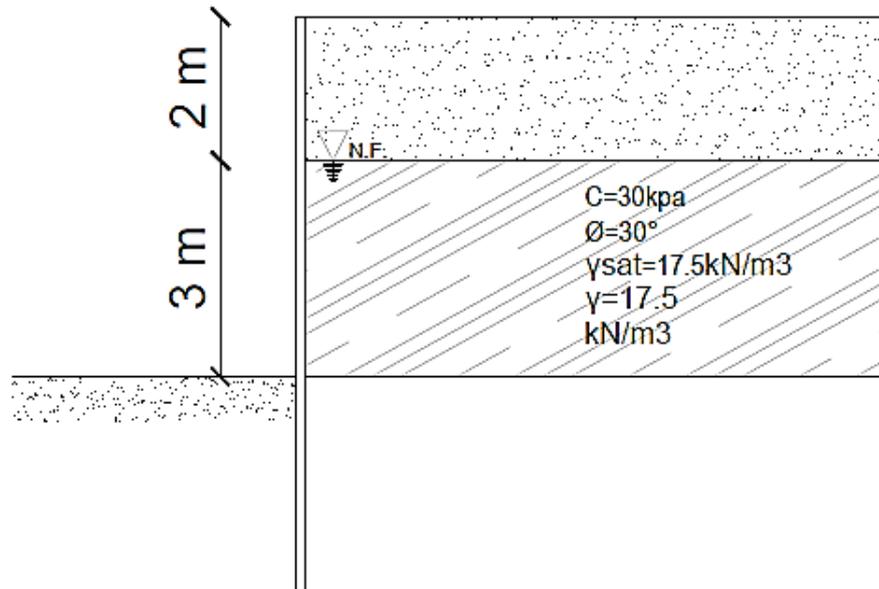


Ilustración 30. Perfil Estratigráfico

Fuente: (Jiménez, 2021).

5.4. Método de Braja M. Das

De acuerdo con las características del perfil estratigráfico. Ver (*Ilustración 30*). Se desarrolla el método de Braja M. Das. Se presenta el paso a paso de todos los cálculos en el (Anexo I).

El procedimiento de cálculo para el método de Braja M. Das es el siguiente:

Mediante la teoría de Rankine y conociendo el ángulo de fricción del suelo, se puede obtener el coeficiente de presión activa ver ecuación (3.14) y coeficiente de presión pasiva ver ecuación (3.22) del terreno.

Teniendo en cuenta que el valor del ángulo de fricción es igual a: $\phi' = 30^\circ$. A continuación, se calcula el coeficiente de presión pasiva de Rankine.

$$k_a = 0.33$$

Se calcula el coeficiente de presión pasiva de Rankine, para cálculos posteriores.

$$k_p = 3$$

Se calcula la presión σ'_1 , mediante la ecuación (4.1). Al encontrarse sobre el nivel freático, el peso específico del suelo utilizado será el natural.

$$\sigma'_1 = 11.67 \text{ kPa}$$

Se determina el peso efectivo del suelo ver (Anexo I).

$$\gamma' = 7.69 \text{ kPa}$$

Una vez obtenido el peso específico del suelo, se calcula la presión σ'_2 representada en la (Ilustración 26).

$$\sigma'_2 = 19.36 \text{ kPa}$$

Nota: Los valores de L1 y L2 representan las profundidades de cada estrato, por lo tanto, serán datos.

Se calcula la distancia L3. Ver (Ilustración 26). Mediante la ecuación (4.10).

$$L_3 = 0.94 \text{ m}$$

Se calcula la fuerza P, realizando momentos en el punto B. Ver (Ilustración 26).

$$P = 67.34 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Se calcula \bar{z} , ver (Ilustración 26) para obtener el valor de \bar{z} , se realiza momento respecto al punto E.

$$\bar{z} = 2.49 \text{ m}$$

Se calcula σ'_5 con la ecuación (4.15).

$$\sigma'_5 = 193.57 \text{ kPa}$$

Se calcula los valores de A_1, A_2, A_3, A_4 con las ecuaciones (4.21), (4.22), (4.23), (4.24) respectivamente.

$$A_1 = 9.44 \text{ m}$$

$$A_2 = 26.27 \text{ m}$$

$$A_3 = 283.99 \text{ m}$$

$$A_5 = 505.73 \text{ m}$$

Se determina el valor de L_4 reemplazando los valores de A_1, A_2, A_3, A_4 en la ecuación (4.20).

$$L_4 = 5.85 \text{ m}$$

Se determina la longitud teórica de la tablestaca mediante la ecuación (4.16).

$$D_{teorica} = 6.8 \text{ m}$$

Se determina la longitud total de la tablestaca, teniendo en cuenta que se debe incrementar un 30% a la longitud teórica. Entonces, la longitud total de la tablestaca se determina mediante la suma de $L_1+L_2+1.3(L_3+L_4)$.

$$D_{total} = 13.84 \text{ m}$$

Se calcula la distancia z' a la que se encuentra el M_{max} con la ecuación (4.26), el momento máximo de empotramiento M_{max} con la ecuación (4.27).

$$M_{max} = 282.54 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$z' = 2.56 \text{ m}$$

5.5. Método de Blum.

De acuerdo con las características del perfil estratigráfico. Ver (Ilustración 28). Se desarrolla el método de Blum. Se presenta el paso a paso de todos los cálculos en el (Anexo II).

El procedimiento de cálculo para el método de Blum es el siguiente:

Mediante la teoría de Rankine y conociendo el ángulo de fricción del suelo, se puede obtener el coeficiente de presión activa ver ecuación (3.14) y coeficiente de presión pasiva ver ecuación (3.22) del terreno.

De igual manera el valor del ángulo de fricción es igual a: $\phi'=30^\circ$. A continuación, se calcula el coeficiente de presión pasiva de Rankine.

$$k_a = 0.33$$

Se calcula el coeficiente de presión pasiva de Rankine.

$$k_p = 3$$

Se calcula el coeficiente de presión pasiva de Rankine, este será afectado por los valores de γ_E ver (*Ilustración 27*). Obteniendo:

$$k_{pm} = 1.8$$

De acuerdo con la ecuación ($t_o = \frac{h}{\sqrt[3]{\frac{k_{pm}}{k_a}-1}}$ Ecuación 4.29), se

calcula la profundidad en el punto de giro.

$$t_o = 6.63 \text{ m}$$

Una vez calculado el valor de t_o , se puede calcular la longitud de clava añadida. Se debe tener en cuenta que la longitud de clava añadida Δt_o , debe ser afectada por un incremento del 20%.

$$\Delta t_o = 1.33 \text{ m}$$

Encontrados los valores de t_o y Δt_o , se realiza la suma para poder encontrar la longitud teórica de la tablestaca.

$$D_{teorica} = 7.95 \text{ m}$$

La longitud total de la tablestaca será la suma de la longitud teórica encontrada en el paso anterior más la altura h ver (*Ilustración 30*).

$$D_{total} = 12.95 \text{ m}$$

Para obtener el valor de la fuerza C , primero se debe calcular el valor del empuje activo y pasivo mediante las ecuaciones ($t_o = \frac{h}{\sqrt[3]{\frac{k_{pm}}{k_a}-1}}$

Ecuación 4.29 y (4.31) respectivamente.

Empuje activo.

$$p_a = 394.34 \text{ m}$$

Empuje pasivo.

$$p_p = 691.84 \text{ m}$$

La Fuerza C, se obtiene realizando la sumatoria de fuerzas horizontales, es decir, la resta entre el empuje activo y pasivo.

$$C = 297.49 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

El momento flector máximo de la tablestaca, según el método de Blum, se obtiene con la ecuación (4.33).

$$M_{max} = 374.48 \text{ kN} * \text{m/m}$$

El valor de z_{max} será la profundidad a la que se encuentra el momento flector máximo.

$$z_{max} = 8.78 \text{ m}$$

Esfuerzo de corte máximo.

$$Q_{max} = 89.49 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Profundidad donde se encuentra el esfuerzo de corte máximo.

$$Z_1 = 0.63 \text{ m}$$

5.6. Método de Equilibrio Limite.

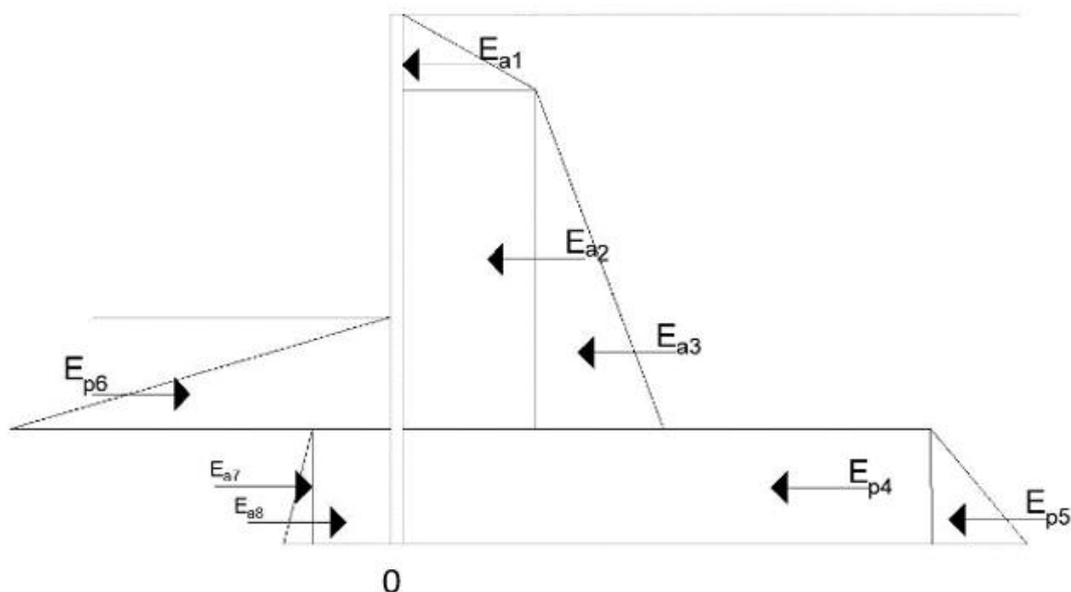


Ilustración 31. Empujes activos y pasivos sobre la tablestaca.

Fuente: (Jiménez, 2021).

De acuerdo con las características del perfil estratigráfico. Ver (Ilustración 28). Se desarrolla el método de equilibrio limite. Se presenta el paso a paso de todos los cálculos en el (Anexo III).

El procedimiento de cálculo para el método de equilibrio limite es el siguiente:

Mediante la teoría de Rankine y conociendo el ángulo de fricción del suelo, se puede obtener el coeficiente de presión activa ver ecuación (3.14) y coeficiente de presión pasiva ver ecuación (3.22) del terreno.

De igual manera el valor del ángulo de fricción es igual a: $\phi' = 30^\circ$. A continuación, se calcula el coeficiente de presión pasiva de Rankine.

$$k_a = 0.33$$

Se calcula el coeficiente de presión pasiva de Rankine, para cálculos posteriores.

$$k_p = 3$$

Se determina las ecuaciones de los empujes activos y pasivos que actúan sobre la tablestaca. Mediante la *Ilustración 31*, se pueden desarrollar las siguientes ecuaciones:

- Sumatoria de fuerzas horizontales: $\Rightarrow \sum F_h = 0$
- Sumatoria de momentos respecto al punto 0: $\Leftrightarrow \sum M_o = 0$

Se obtiene un sistema de 10 ecuaciones y 10 incógnitas. Al resolver se obtienen los siguientes resultados:

$$E_{a1} = 11.67 \frac{kN}{m}$$

$$E_{a2} = 105.18 \frac{kN}{m}$$

$$E_{a3} = 104.16 \frac{kN}{m}$$

$$E_{a4} = 182.95 \frac{kN}{m}$$

$$E_{a5} = 3.94 \frac{kN}{m}$$

$$E_{a6} = 417.35 \frac{kN}{m}$$

$$E_{a7} = 9.01 \frac{kN}{m}$$

$$E_{a8} = 0.44 \frac{kN}{m}$$

Conjuntamente al resolver el sistema de ecuaciones se puede obtener la longitud teórica de la tablestaca.

$$D_{teorica} = 6.6 \text{ m}$$

Una vez, obtenido la longitud teórica de la tablestaca, se puede calcular la longitud total: $df_1 + df_2 + D_{teorica}$.

$$D_{total} = 11.60 \text{ m}$$

Para determinar la flexión de la tablestaca se debe considerar que los momentos son nulos en los extremos de la tablestaca.

Las presiones a diferentes profundidades son determinadas mediante las siguientes ecuaciones: (4.48), (4.49), (4.50), (4.51), (4.52), (4.53), (4.54).

Se resuelve el nuevo sistema de ecuaciones reemplazando los valores de D y z obtenidos en el paso anterior.

$$C_1 = 11.67 \frac{kN}{m^2}$$

$$C_2 = 33.72 \frac{kN}{m^2}$$

$$C_3 = 303.47 \frac{kN}{m^2}$$

$$C_4 = 314.57 \frac{kN}{m^2}$$

$$C_5 = 129.26 \frac{kN}{m^2}$$

$$C_6 = 14.36 \frac{kN}{m^2}$$

$$C_7 = 15.60 \frac{kN}{m^2}$$

El valor del momento flector máximo obtenido es:

$$M_{max} = 144.60 \frac{kN}{m} m$$

Para obtener el momento flector máximo se modela la tablestaca en el programa Sap2000. (Anexo III).

5.7. ProSheet.

A continuación, se presenta la modelación en el software ProSheet, utilizando la geometría del terreno mostrada en la *Ilustración 30*.

Se asumirá una altura de 5 metros, en este caso el nivel del agua será interpretado como la profundidad a la que se encuentra en Nivel freático. Al tratarse el análisis de tablestacas en voladizo, el soporte de tierra será escogido “cantilever”. Ver (*Ilustración 32*).

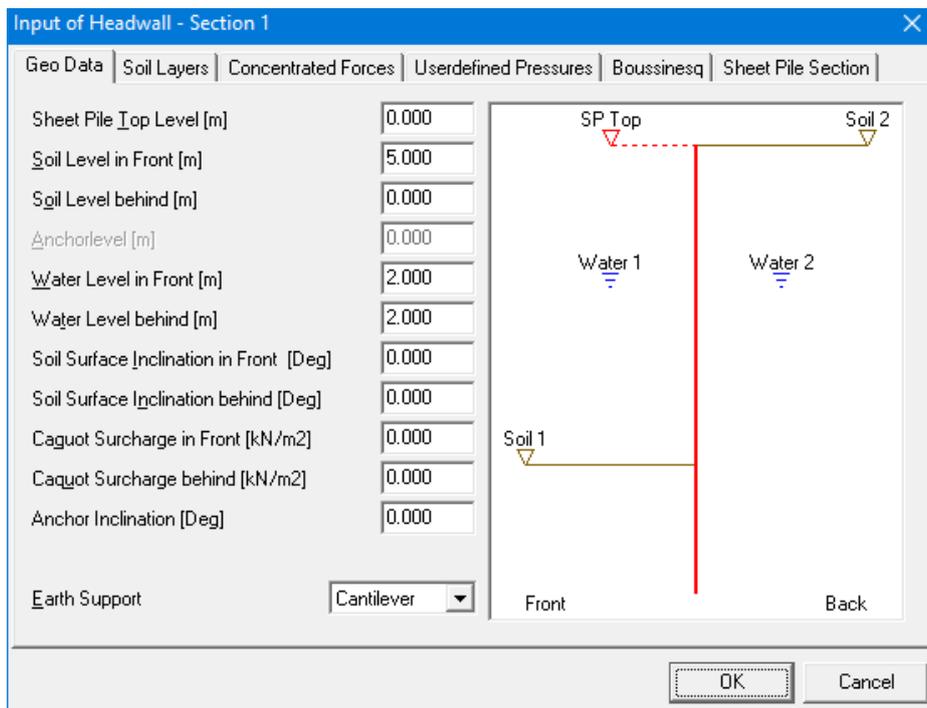


Ilustración 32. Medidas Geométricas del sistema de retención.

Fuente: (ProSheet,2021)

Los parámetros utilizados son los descritos en la (*Tabla 3*). En este caso los valores de los coeficientes de presión activa y pasiva pueden ser calculados automáticamente por el programa, se requiere únicamente conocer el valor del ángulo de fricción del suelo. Ver. (*Ilustración 33*).

Input of Headwall - Section 1

Geo Data | Soil Layers | Concentrated Forces | Userdefined Pressures | Boussinesq | Sheet Pile Section

Layers in Front

	Layer Tip [m]	Density Moist [kN/m ³]	Density Submerged [kN/m ³]	Kph	Phi [Deg]	Delta [Deg]	Cohesion [kN/m ²]
Layer 1	15.000	17.500	17.500	3.000	30.000	0.000	0.000

Automatic Kph Values + -

Layers behind

	Layer Tip [m]	Density Moist [kN/m ³]	Density Submerged [kN/m ³]	Kah	Phi [Deg]	Delta [Deg]	Cohesion [kN/m ²]
Layer 1	15.000	17.500	17.500	0.333	30.000	0.000	0.000

Automatic Kah Values + - Copy from Above

OK Cancel

Ilustración 33. Propiedades del suelo.

Fuente: (ProSheet,2021)

Se obtiene las presiones tanto en el trasdós como en el intradós de la tablestaca. Además de la longitud total de la tablestaca. Ver (*Ilustración 34*)

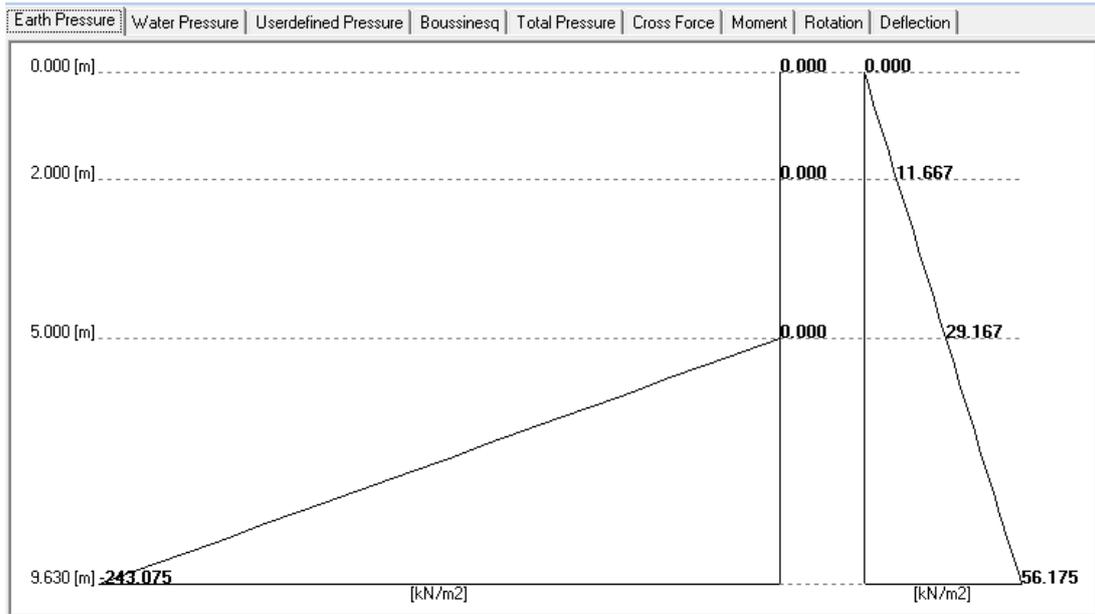


Ilustración 34. Profundidad de la tablestaca.

Fuente: (ProSheet,2021).

Se obtiene el momento flector máximo.

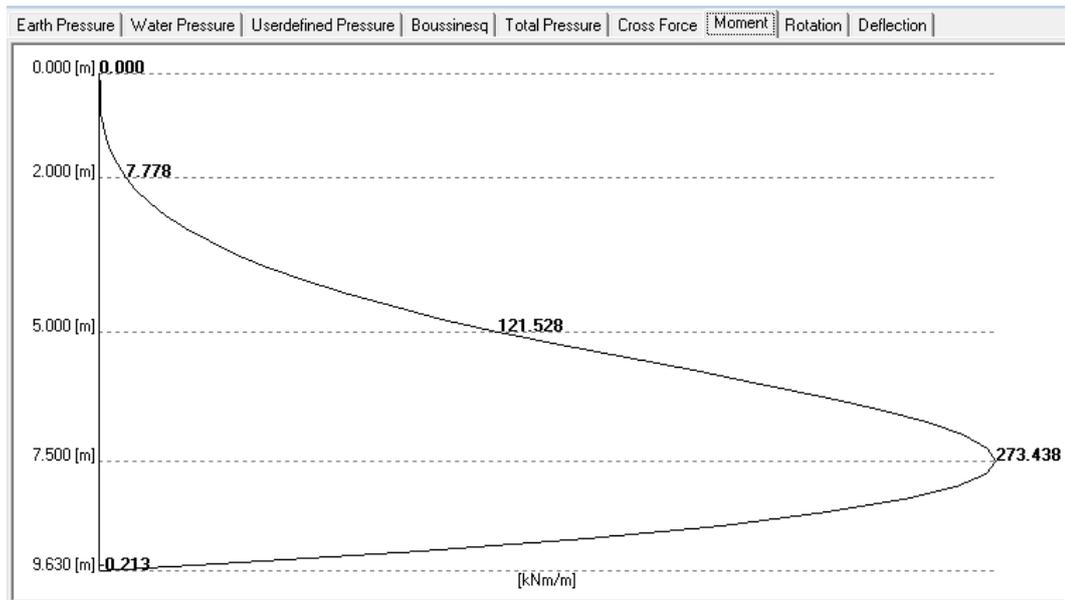


Ilustración 35. Momento flector máximo.

Fuente: (ProSheet,2021).

6. Capítulo VI: Resultados Obtenidos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los métodos de Braja M. Das, Blum, Equilibrio límite y ProSheet. En cada uno de ellos se representa los valores obtenidos para los diferentes parámetros de comparación como: son la profundidad de clava y en momento flector máximo. Además, se incluyen los valores de la longitud total de la tablestaca.

Método	Braja Das	Blum	Equilibrio límite	ProSheet
Profundidad de clava (m)	6.80	7.95	6.60	4.63
Momento flector máximo (kN*m)	282.54	374.48	144.60	273.44
Profundidad momento flector máximo (m)	8.5	8.78	5.8	7.5
Longitud total de la tablestaca (m)	13.84	12.95	11.60	9.63

Tabla 4. Resultados obtenidos.

(Jiménez, 2021).

Se desarrollará el análisis en dos casos donde la variación de la altura se analizará respecto al momento flector y la profundidad de clava. Además, se comparará la variación de la profundidad de clava y el ángulo de fricción de los diferentes métodos desarrollados.

La comparación entre los diferentes métodos requiere que los parámetros y datos sean los mismos para poder realizar su análisis.

Cabe recalcar que el análisis es para tablestacas en voladizo lo cual se considera una altura máxima de tablestacado de 6.00 metros.

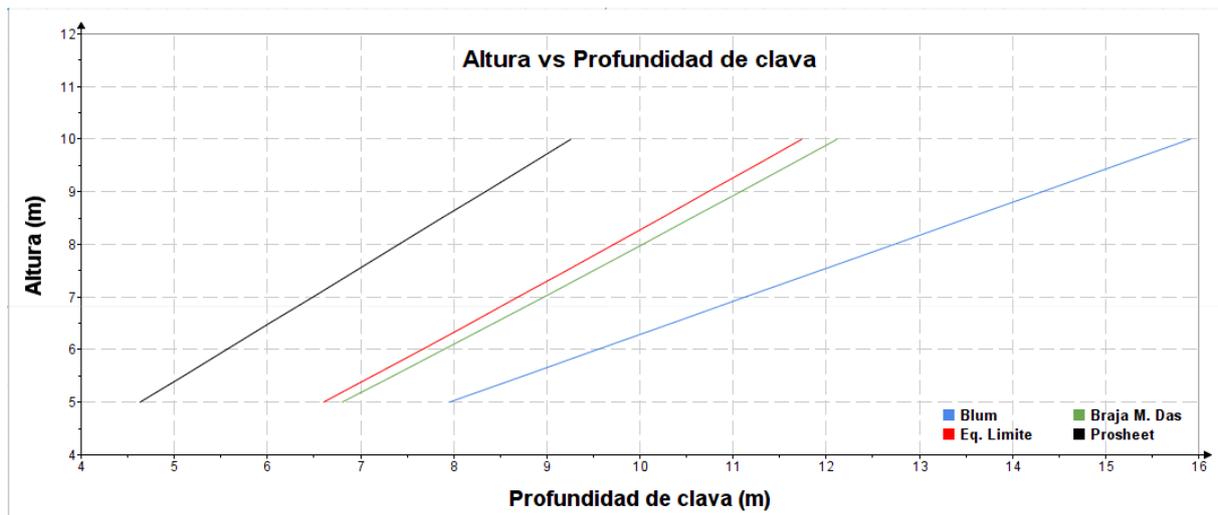


Ilustración 36. Altura vs Profundidad de clava

Fuente: (Jiménez, 2021).

El método que presenta una profundidad de clava menor en la relación entre la altura de la tablestaca y la profundidad de clava es el método de ProSheet, presentando una profundidad de clava igual a 4.63 metros a diferencia del método de Blum, que presenta una profundidad de clava de 7.95 metros.

La diferencia entre estos métodos se presenta en los factores considerados en el coeficiente de presión pasiva minorado (k_{pm}) y la longitud añadida del 20% en el método de Blum, lo que representa un incremento en la profundidad de clava.

El método de Braja M. Das presenta en sus cálculos un incremento del 30%, debido que no se considera ningún otro incremento, como se realizó en el método de Blum, afectando el coeficiente de presión pasiva.

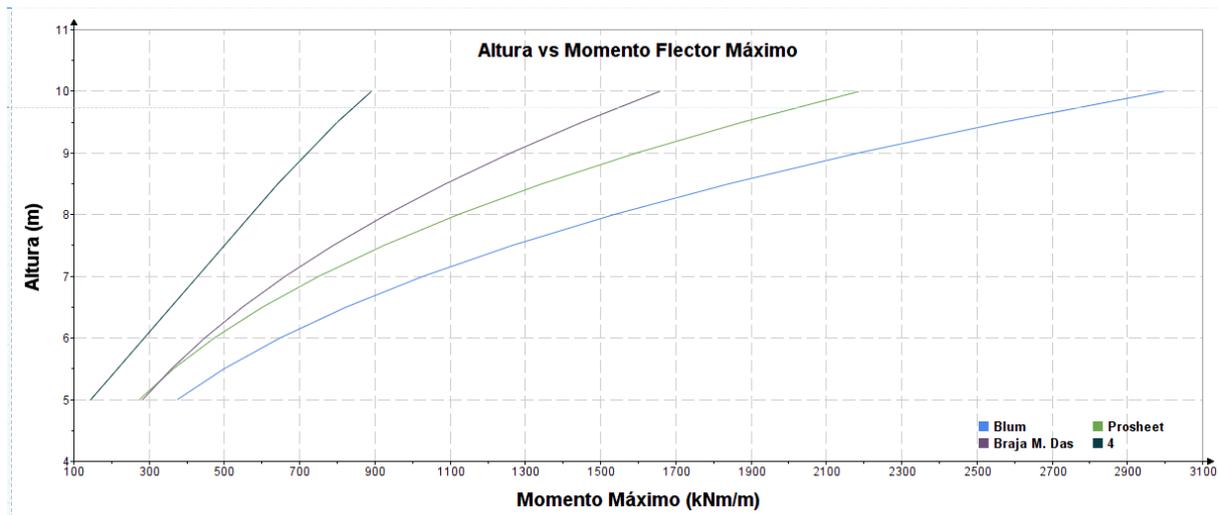


Ilustración 37. Altura vs Momento Flector máximo

Fuente: (Jiménez, 2021).

La variación de los valores de momento flector máximo según ProSheet nos presenta valores menores respecto a los presentados por el método de Blum, a medida que aumenta la altura de la tablestaca el momento va aumentando.

Si bien la profundidad de clava en ProSheet representaba una ventaja sobre los otros métodos, ahora se vería afectada debido que empieza a presentar un aumento en el momento flector. Ahora bien, el método de Braja M. Das presenta una ligera diferencia con ProSheet para una altura de 5 metros, esta diferencia va incrementando a partir de los 5.50 metros. Por lo tanto, estos dos métodos serían los más adecuados hasta una altura de 6 metros.

Evidentemente, a medida que la altura aumente esta diferencia incrementara, lo que desembocara en el uso de una sección transversal mayor.

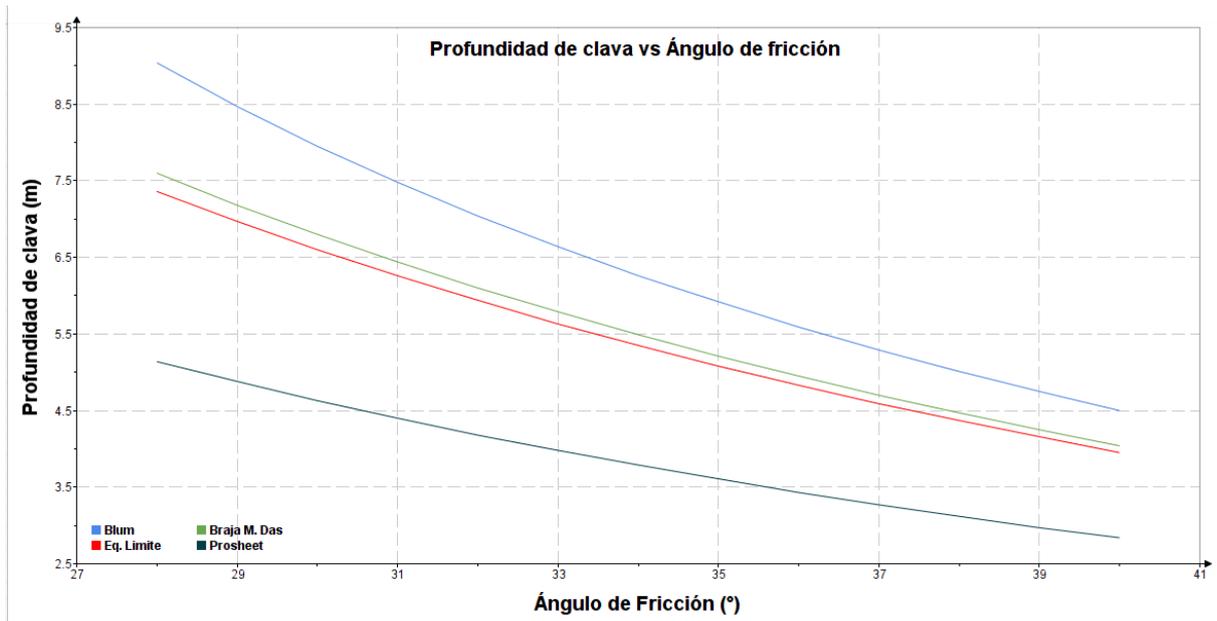


Ilustración 38. Profundidad de clava vs Ángulo de fricción

Fuente: (Jiménez, 2021).

La variación de la profundidad de clava respecto al ángulo de fricción evidencia que, para el método de equilibrio límite y ProSheet, presentan profundidades menores a diferencia de los otros dos métodos.

Mientras ocurre una disminución del ángulo de fricción la profundidad de clava en todos los métodos sigue la tendencia a aumentar, es decir, en casos de arenas sueltas que posean ángulos de fricción muy bajos, la profundidad de clava se reflejaría en grandes distancias. Por lo cual, el sistema de tablestacado en voladizo no sería recomendable.

7. Capitulo VII: Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

- Los sistemas tablestacados con el aumento de la altura se vuelven ineficientes, debido que requieren satisfacer grandes demandas de momentos flectores. Por tal razón, conllevaría que las tablestacas tengan secciones transversales robustas para poder mantener deformaciones pequeñas. El método de Braja M. Das y el software ProSheet presentan momentos flectores menores, en alturas de 5 hasta 5.50 metros, favoreciendo sustancialmente al diseño debido a que evita tener tablestacas con grandes secciones.
- El desempeño de las tablestacas se podrá mejorar con el diseño de anclajes, debido a que las tablestacas en voladizo son utilizadas en longitudes de hasta 6 metros. En el caso de los cuatro métodos la longitud de la tablestaca fue superior a los 6 metros
- Para profundidades de clava entre los 5.50 y 6 metros el método de Braja M. Das y ProSheet proporcionan resultados aun aceptables, donde los momentos flectores y las profundidades de clava presentan valores que también resultarían poco deformables y secciones poco robustas.
- Blum al asumir en su teoría una fuerza resultante en el pie de la tablestaca, evita la rotación y la traslación del elemento, esto demuestra que la estabilidad del muro está dada por condiciones de soporte fijo para mantener un equilibrio horizontal y vertical.
- En el método de Blum, las consideraciones tomadas en los parámetros del coeficiente de presión pasiva y en la profundidad de clava marcan una gran diferencia en los valores de momento y longitud total de la tablestaca. Al no ser considerados con sus respectivos incrementos los resultados serían iguales al software ProSheet.
- Las secciones robustas no siempre serán una desventaja, debido a que estos elementos estructurales son hincados por golpes lo que los vuelve muy

propensos a deformarse, por lo tanto, hincar una tablestaca de dimensiones grandes evitaría deformaciones grandes en estos elementos.

- La filosofía de diseño del programa ProSheet está dada por euro códigos estructurales. Está basada en los principios de estados límite, en los cuales se ha toma en cuenta los estados últimos de servicio y estado límite ultimo para su diseño.
- El método de Blum arroja valores menos conservadores para el caso de estudio a partir de un ángulo de fricción de 40° . Los valores de profundidad de clava empiezan a disminuir y se empiezan a igualar a medida que el ángulo de fricción aumenta.
- Al considerar la diferente geografía del Ecuador y los diferentes usos de las tablestacas en contención de muros, muelles, etc. Teniendo en cuenta un análisis de costos el método de equilibrio limite será recomendado para su diseño. Pues, presenta momentos flectores menores, lo que representa tener una sección transversal menor de la tablestaca.

7.2. Recomendaciones

- Se recomienda tener en cuenta todos los parámetros de modelación y sus respectivos factores de incremento, debido que estos pueden alterar de manera drástica los resultados obtenidos.
- Se recomiendo estudiar tablestacas ancladas y comparar su desempeño con las tablestacas en voladizo, considerando las deformaciones de las tablestacas al ser sometidas a cargas sísmicas.
- En el ámbito constructivo se recomienda revisar el plomo de la máquina y de la tablestaca, esto garantiza que las tablestacas queden en el lugar y verticalidad indicados.

- Se recomienda proteger la parte superior de la tablestaca al momento del hincado para evitar deformaciones en el proceso de instalación.

Bibliografía

- Alvarado Franco, J. P. (2011). *Tablestacas: Construcción, diseño y aplicación. Revisión bibliográfica*. Universidad de los Andes, Bogota.
- ArcelorMittal. (2019). *Tablestacas de ArcelorMittal*. Recuperado el 16 de Mayo de 2021, de <https://constructalia.arcelormittal.com/es/productos/tablestacas>
- arquitectura+acero. (s.f.). *TABLESTACAS. Una colaboración efectiva del acero en obras civiles y de edificación*. Recuperado el 17 de 05 de 2021, de <http://www.arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/soluciones-constructivas/tablestacas-una-colaboracion-efectiva-del>
- Braja M., D. (2012). *Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones*. Mexico, D.F.: Cengage Learning.
- CimentaJON. (2010). *Blog de Ingeniería Geotécnica*.
- CIMTRONIC DESING &ENGINEERING. (2020). Obtenido de http://cimtronic.com.ar/es/proyectos_servicios/tablestacado/
- (s.f.). *Documento antiguo de Obras Públicas de Andalucía sobre hinca de pilotes y tablestacas*.
- Eco, H. (1998). *Como se hace una Tesis*. Barcelona: Gedisa.
- Henriquez Caceres, M. A. (2010). "MUELLES DE TABLESTACA, COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO DE DINAMARCA, JAPÓN, ESPAÑA Y ESTADOS UNIDOS". Repositorio Institucional, Concepción.
- Joseph E. Bowles, P. S. (1997). *Foundation Analysis and Desing* (Vol. Fifth). Singapore: McGraw-Hill.
- Juarez Badillo, E., & Rico Rodriguez, A. (1978). *Teoría y aplicaciones de la Mecánica de suelos* (Vol. Tomo II). Mexico: Limusa.
- (17 de Diciembre de 2015). *Muros de contención y tablestacas*. Instituto Politécnico Nacional.
- Padilla Jaimes, L. P. (2009). *Empuje de tierras, diseño de tablestacas y eurocodigo 7. Implementación de Cam-Clay Modificado*. Universidad de los Andes.

- San Martin Velez, R. (2011). *Análisis comparativo de tablestacados con distintas condiciones de borde, parámetros de suelos, solicitaciones de carga y propiedades mecánicas, con la finalidad de determinar la longitud de diseño del tablestacado.*[Tesis de Grado, Universidad Católica]. Repositorio Institucional, Guayaquil.
- Sanmartin Carrillo, A. (2009). *Recintos de tablestacas según Eurocódigo 3* [Tesina de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya]. Repositorio Institucional.
- (20 de Diciembre de 2019).Seguridad estructural Cimientos. *DB-SE-C*. Ministerio de Fomento.
- Skyline Steel. (s.f.). *Skyline*. Recuperado el 17 de 05 de 2021, de <https://www.nucorskyline.com/es/globalnav/productos/tablestacas-de-acero/tipo-u>
- TERRA Trenchless Technologies*. (2006). Obtenido de <http://de.terra-eu.eu/grabenlose-rohrverlegung/1-0-impressum>
- Tituaña Puente, J. S. (2015). *Análisis de interacción suelo-tablestacado en entibados apuntalados sobre pilotes* [Tesis de Grado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. Repositorio Institucional, Guayaquil.

Anexo I

Método de cálculo de Braja M. Das

Cálculo coeficiente de presión activa de Rankine.

$$k_a := \tan\left(45^\circ - \frac{\phi'}{2}\right)^2$$

$$k_a = 0.333$$

$$k_a = 0.33$$

Cálculo coeficiente de presión pasiva de Rankine.

$$k_p := \tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right)^2$$

$$k_p = 3$$

Cálculo de presión σ'_1 a una profundidad.

$$\sigma'_1 := \gamma \cdot df_1 \cdot k_a$$

$$\sigma'_1 = 11.667 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_1 = 11.67 \text{ kPa}$$

Cálculo de peso efectivo del suelo.

$$\gamma' := \gamma_{sat} - \gamma_w$$

$$\gamma' = 7.69 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$\gamma' = 7.69 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Cálculo de presión bajo el nivel Freático.

$$\sigma'_2 := (\gamma \cdot df_1 + \gamma' \cdot df_2) \cdot k_a$$

$$\sigma'_2 = 19.357 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_2 = 19.36 \text{ kPa}$$

Cálculo de la distancia L_3 .

$$L_3 := \frac{\sigma'_2}{\gamma' \cdot (k_p - k_a)}$$

$$L_3 = 0.944 \text{ m}$$

$$L_3 = 0.94 \text{ m}$$

Cálculo De fuerza P, realizando momentos en el punto B.

$$P := \left(\frac{1}{2} \cdot \sigma'_1 \cdot df_1 \right) + (\sigma'_1 \cdot df_2) + \left(\frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_1) \cdot df_2 \right) + \left(\frac{1}{2} \cdot \sigma'_2 \cdot L_3 \right)$$

$$P = 67.34 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Se calcula z, realizando momento respecto al punto E.

$$\begin{aligned} \Sigma M_E := & \left(\left(\frac{1}{2} \sigma'_1 \cdot df_1 \right) \cdot \left(\left(\frac{1}{3} \cdot df_1 \right) + df_2 + L_3 \right) \right) + \left((\sigma'_1 \cdot df_2) \cdot \left(\left(\frac{1}{2} df_2 \right) + L_3 \right) \right) \downarrow = 167.5 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \\ & + \left(\left(\frac{df_2}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_1) \right) \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot df_2 + L_3 \right) \right) + \left(\left(\frac{1}{2} \sigma'_2 \cdot L_3 \right) \cdot \left(\frac{2}{3} L_3 \right) \right) \end{aligned}$$

$$z := \frac{\Sigma M_E}{P} = 2.49 \text{ m}$$

$$z = 2.49 \text{ m}$$

Se calcula σ'_5 .

$$\sigma'_5 := (\gamma \cdot df_1 + \gamma' \cdot df_2) \cdot k_p + \gamma' \cdot L_3 \cdot (k_p - k_a)$$

$$\sigma'_5 = 193.57 \text{ kPa}$$

Calculo de A_1, A_2, A_3, A_4 .

$$A_1 := \frac{\sigma'_5}{\gamma' \cdot (k_p - k_a)}$$

$$A_1 = 9.44 \text{ m}$$

$$A_2 := \frac{8P}{\gamma' \cdot (k_p - k_a)}$$

$$A_2 = 26.27 \text{ m}^2$$

$$A_3 := \frac{6 \cdot P \cdot (2 \cdot z \cdot \gamma' \cdot (k_p - k_a) + \sigma'_5)}{\gamma'^2 \cdot (k_p - k_a)^2}$$

$$A_3 = 283.99 \text{ m}^3$$

$$A_4 := \frac{P \cdot (6 \cdot z \cdot \sigma'_5 + 4 \cdot P)}{\gamma'^2 \cdot (k_p - k_a)^2}$$

$$A_4 = 505.73 \text{ m}^4$$

Se determina el valor de L_4 .

$$L_4^4 + (A_1 \cdot L_4^3) - (A_2 \cdot L_4^2) - (A_3 \cdot L_4) - A_4 = 0$$

Se resuelve la ecuación reemplazando los valores de A_1, A_2, A_3, A_4 .

$$L_4 = 5.85 \text{ m}$$

Longitud Teórica de la tablestaca.

$$D_{teorica} := L_3 + L_4$$

$$D_{teorica} = 6.8 \text{ m}$$

Longitud Total de la tablestaca.

$$D_{total} := df_1 + df_2 + 1.30 (L_3 + L_4)$$

$$D_{total} = 13.84 \text{ m}$$

$$D_{total} = 13.84 \text{ m}$$

Cálculo del momento Máximo de empotramiento M_{max} y distancia a la que se encuentra z' .

$$z' := \sqrt{\frac{2P}{\gamma' \cdot (k_p - k_a)}}$$

$$z' = 2.56 \text{ m}$$

$$M_{max} := P \cdot (z + z') - \left(\left(\frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot z'^2 \cdot (k_p - k_a) \right) \cdot \frac{z'}{3} \right)$$

$$M_{max} = 282.54 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

Anexo II

Método de cálculo de Blum

Se calcula el coeficiente de seguridad.

$$\gamma_e := 0.6$$

Cálculo del coeficiente de presión activa de Rankine.

$$k_a := \tan\left(45^\circ - \frac{\phi'}{2}\right)^2$$

$$k_a = 0.33$$

Cálculo del coeficiente de presión pasiva de Rankine.

$$k_p := \tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right)^2$$

$$k_p = 3$$

Cálculo del Coeficiente de presión pasiva de Rankine minorado.

$$k_{pm} := \tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right)^2 \cdot \gamma_e$$

$$k_{pm} = 1.8$$

Se calcula la profundidad en el punto de giro con los valores del coeficiente de presión activa y pasiva obtenidos anteriormente. El Valor de h es dato.

$$t_o := \frac{h}{\sqrt[3]{\frac{k_{pm}}{k_a} - 1}}$$

$$t_o = 6.63 \text{ m}$$

Posteriormente se calcula la longitud de Clava añadida.

$$t_o = 6.63 \text{ m}$$

$$\Delta_{to} := 0.2 \cdot t_o$$

$$\Delta_{to} = 1.33 \text{ m}$$

Cálculo de la longitud teórica de la tablestaca.

$$D := t_o + \Delta_{to}$$

$$D = 7.95 \text{ m}$$

Cálculo de la Longitud total.

$$D_{total} := D + h$$

$$D_{total} = 12.95 \text{ m}$$

Cálculo del empuje activo.

$$p_a := k_a \cdot \gamma \cdot \frac{(h + t_o)^2}{2}$$

$$p_a = 394.34 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

Cálculo del Empuje pasivo.

$$p_p := k_{pm} \cdot \gamma \cdot \frac{(t_o)^2}{2}$$

$$p_p = 691.84 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

Se realiza sumatoria de fuerzas Horizontales, para obtener la componente C.

$$C := p_p - p_a$$
$$C = 297.496 \frac{1}{m} \cdot kN$$

Se calcula el momento máximo.

$$M_{max} := \frac{1}{6} \cdot \gamma \cdot k_{pm} \cdot \frac{h^3}{\left(\sqrt{\frac{k_{pm}}{k_a}} - 1 \right)^2}$$
$$M_{max} = 374.48 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

Se calcula Profundidad del momento máximo.

$$z_{max} := \frac{h}{\sqrt{\frac{k_{pm}}{k_a}} - 1} + h$$
$$z_{max} = 8.78 \text{ m}$$

Anexo III

Método de cálculo de equilibrio límite

Cálculo coeficiente de presión activa de Rankine

$$k_a := \tan\left(45^\circ - \frac{\phi'}{2}\right)^2$$

$$k_a = 0.333$$

$$k_a = 0.33$$

Cálculo coeficiente de presión pasiva de Rankine

$$k_p := \tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right)^2$$

$$k_p = 3$$

Determinación de los empujes activos y pasivos que actúan sobre la tablestaca

Esfuerzo a cualquier profundidad.

$$\sigma_a = k_a \cdot \gamma \cdot h$$

Formula de empuje activo.

$$E_a = \frac{\sigma_a \cdot h}{2}$$

Se reemplaza el esfuerzo en la formula del empuje activo, para empezar a obtener los diferentes empujes que actúan sobre la tablestaca.

$$E_{a1} = \frac{1}{2} \cdot k_a \cdot \gamma \cdot df_1^2$$

$$E_{a2} = k_a \cdot \gamma \cdot df_1 \cdot (df_2 + D - z)$$

$$E_{a3} = \frac{1}{2} k_a \cdot \gamma' \cdot (df_2 + D - z)^2$$

$$E_{p4} = (k_p \cdot \gamma \cdot df_1 + k_p \cdot \gamma' \cdot (df_2 + D - z)) \cdot z$$

$$E_{p5} = \frac{1}{2} k_p \cdot \gamma' \cdot (z)^2$$

$$E_{p6} = \frac{1}{2} k_p \cdot \gamma' \cdot (D - z)^2$$

$$E_{a7} = (k_a \cdot \gamma' \cdot (D - z)) \cdot z$$

$$E_{a8} = \frac{1}{2} \cdot k_a \cdot \gamma' \cdot z^2$$

Sumatoria de fuerzas horizontales.

$$E_{a1} + (E_{a2} + E_{a3}) + (E_{p4} + E_{p5}) - E_{p6} - (E_{a7} + E_{a8}) = 0$$

Sumatoria de momentos respecto al punto 0.

$$E_{a1} \cdot \left(\frac{df_1}{3} + df_2 + D\right) + E_{a2} \cdot \left(\frac{df_2 + D - z}{2} + z\right) + E_{a3} \cdot \left(\frac{df_2 + D - z}{3} + z\right) + E_{p4} \cdot \left(\frac{1}{2} z\right) + E_{p5} \cdot \left(\frac{1}{3} z\right) - E_{p6} \cdot \left(\frac{D - z}{3} + z\right) - E_{a7} \cdot \left(\frac{1}{2} z\right) - E_{a8} \cdot \left(\frac{1}{3} z\right) = 0$$

Se debe resolver el sistema de ecuaciones para obtener la longitud teórica de la tablestaca.

$$D := f_{9,1} = 6.6 \text{ m}$$

Se calcula la longitud total de la tablestaca.

$$D_{total} := 1.3 D + df_1 + df_2$$

$$D_{total} = 13.58 \text{ m}$$

Las ecuaciones obtenidas de las cargas son las siguientes:

$$C_1 = k_a \cdot \gamma \cdot df_1$$

$$C_2 = k_a \cdot \gamma \cdot df_1 + k_a \cdot \gamma' \cdot (df_2 + D - z)$$

$$C_3 = k_p \cdot \gamma \cdot df_1 + k_p \cdot \gamma' \cdot (df_2 + D - z)$$

$$C_4 = k_p \cdot \gamma \cdot df_1 + k_p \cdot \gamma' \cdot (df_2 + D - z) + k_p \cdot \gamma' \cdot z$$

$$C_5 = k_p \cdot \gamma' \cdot (D - z)$$

$$C_6 = k_a \cdot \gamma' \cdot (D - z)$$

$$C_7 = k_a \cdot \gamma' \cdot (D - z) + k_a \cdot \gamma' \cdot z$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, se obtiene los valores de cada carga:

$$C_1 := P_{1,1} = 11.667 \frac{kN}{m^2}$$

$$C_2 := P_{2,1} = 33.719 \frac{kN}{m^2}$$

$$C_3 := P_{3,1} = 303.471 \frac{kN}{m^2}$$

$$C_4 := P_{4,1} = 314.568 \frac{kN}{m^2}$$

$$C_6 := P_{6,1} = 14.362 \frac{kN}{m^2}$$

$$C_5 := P_{5,1} = 129.261 \frac{kN}{m^2}$$

$$C_7 := P_{7,1} = 15.595 \frac{kN}{m^2}$$

Se calcula el momento flector máximo en Sap2000. Obteniendo un valor de:

$$M_{max} = 144.60 \frac{kN}{m} m$$

Se define el material con el que se modelara, en este caso escogimos, “otro”, porque no incluiremos el peso propio

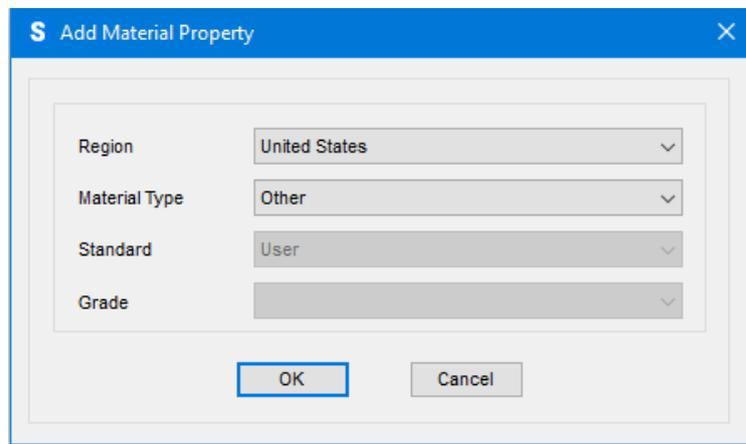


Ilustración 39. Definir material

Fuente: (Sap2000, 2021)

El peso propio se asumira igual a cero, al igual que el modulo de elasticidad.

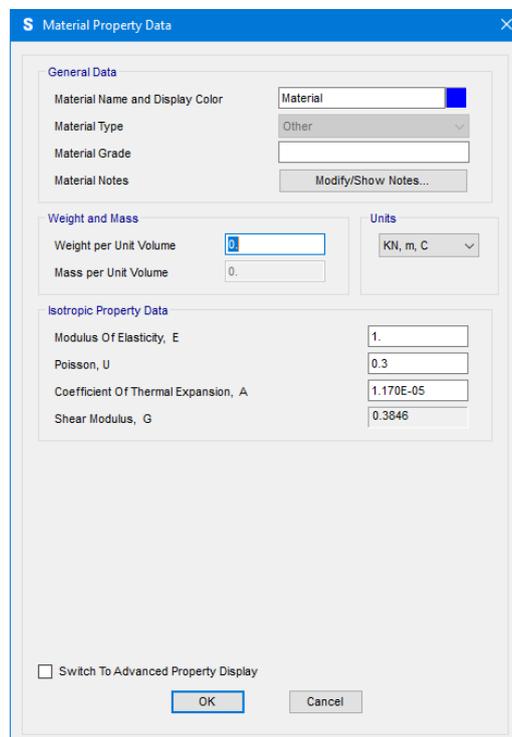


Ilustración 40. Propiedades del material

Fuente: (Sap2000, 2021)

Las dimensiones de la sección no se tomarán en cuenta, debido a que en el material ya se había predeterminado que es igual a cero. Por lo tanto, las dimensiones no influirán.

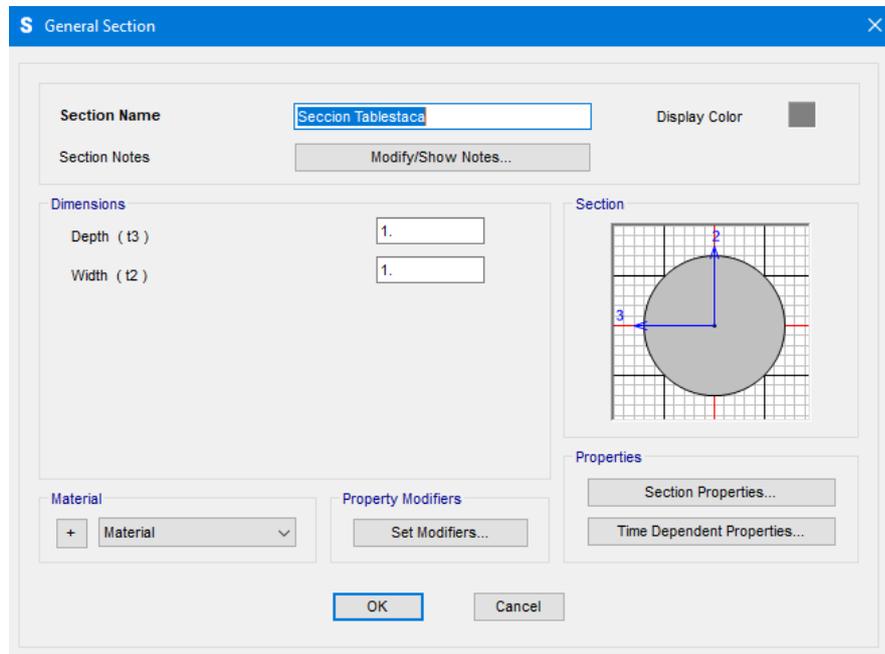


Ilustración 41. Propiedades de la sección.

Fuente: (Sap2000, 2021)

Debido que en la modelación se tendrá inercia en los ejes x,z los valores serán 1. De igual manera la sección tenga valor de 1.

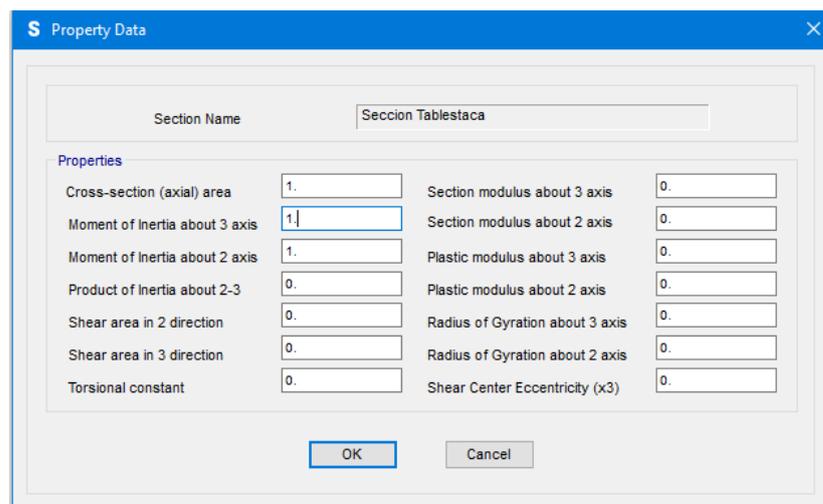


Ilustración 42. Propiedades de sección

Fuente: (Sap2000, 2021)

S Assign Frame Distributed Loads

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Load Direction: X

Load Type: Force

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Uniform Load

0 kN/m

Trapezoidal Loads

	1.	2.	3.	4.
Absolute Distance	0	0.58	0.58	9.02
Loads	-314.57	-303.47	-33.72	-11.67

Relative Distance from End-I
 Absolute Distance from End-I

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Ilustración 43. Ingreso de cargas.

Fuente: (Sap2000, 2021)

S Assign Frame Distributed Loads

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Load Direction: X

Load Type: Force

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Uniform Load

0 kN/m

Trapezoidal Loads

	1.	2.	3.	4.
Absolute Distance	9.02	11.6	0	0
Loads	-11.67	0	0	0

Relative Distance from End-I
 Absolute Distance from End-I

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Ilustración 44. Ingreso de cargas.

Fuente: (Sap2000,2021)

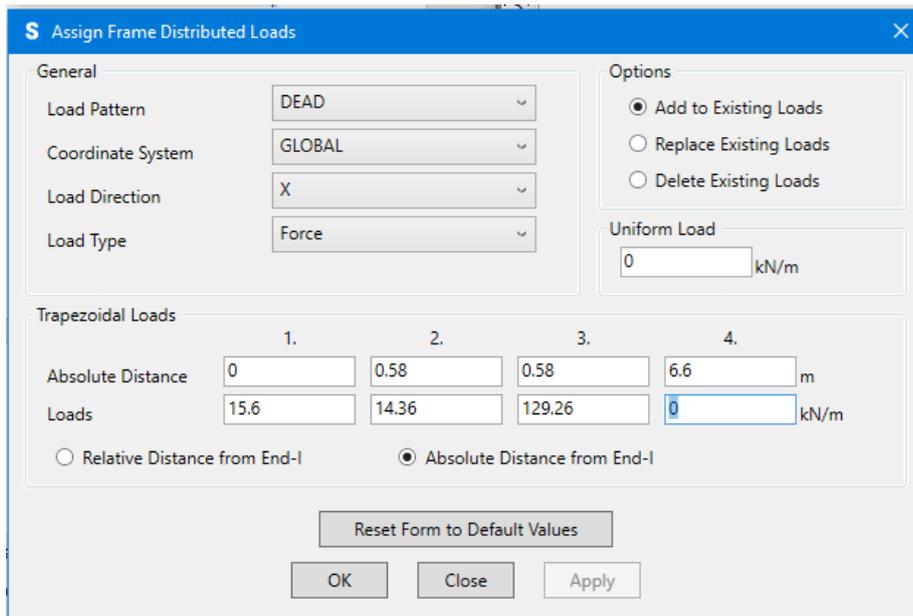


Ilustración 45. Ingreso de cargas.

Fuente: (Sap2000, 2021)

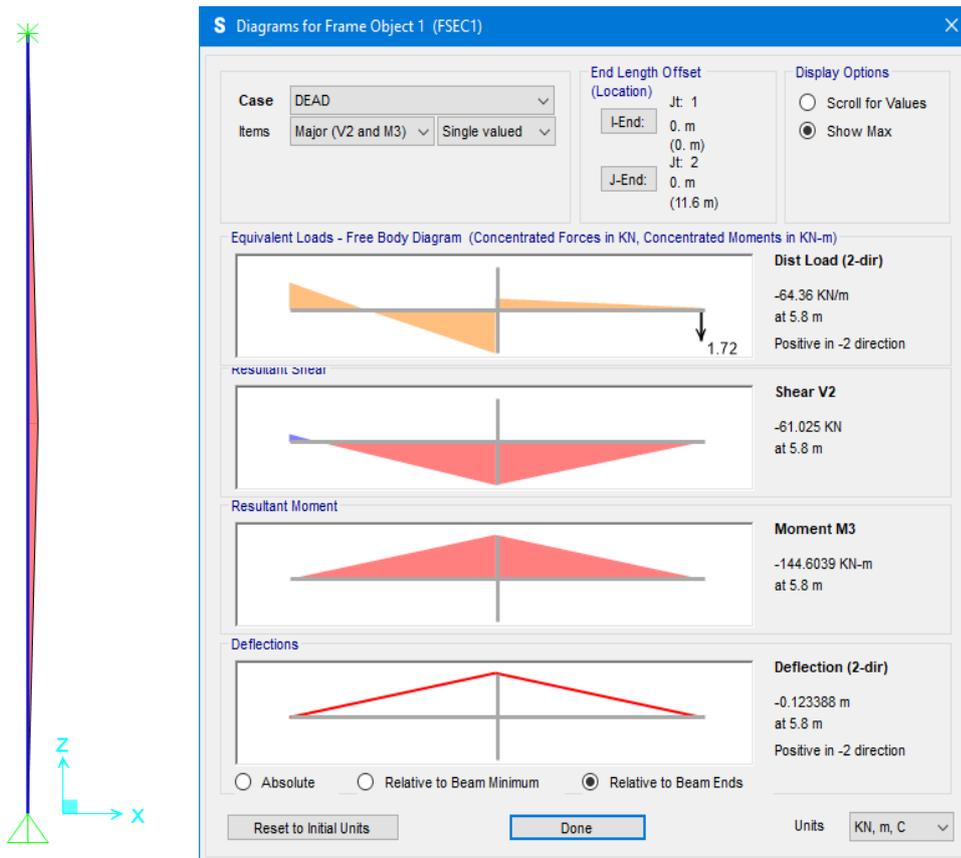


Ilustración 46. Diagrama de momentos.

Fuente:(Sap2000, 2021)