



Escuela de Ingeniería Civil

Trabajo de graduación para optar al grado académico de Licenciatura en
Ingeniería Civil

**Proceso de inducción del sistema *Top-Down* de estacionamiento con tablestaca
dirigido a profesionales de la construcción en Costa Rica**

Estudiante

Jimmy Gentilini Salazar

Nombre del tutor

Ing. Lincoln Sánchez Hernández

Tabla de contenidos

CAPÍTULO I	4
Introducción	5
Planteamiento del problema.....	6
Objetivo principal	7
Objetivos específicos	7
Justificación	8
Antecedentes	9
La empresa constructora Cosapi, Construye edificio con sistema <i>Top-Down</i>	9
Construcción de 3 niveles de sótano sin anclajes de <i>Top-Down</i>	12
Inicia construcción de nuevo paso a desnivel en Guadalupe.....	15
Construcción tradicional de sótanos.	18
Sistema <i>Top-Down</i> de estacionamiento con tablestaca	25
Materiales más utilizados para producir tablestaca	31
Tablestaca de aluminio.	31
Tablestaca de PVC.....	34
Tablestaca de acero	37
Proyecciones y limitaciones.....	39
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	40
Estudios preliminares.....	41
Metodología de diseño usada para la super estructura.....	51

Metodología de diseño de tablestaca en voladizo en suelos arcillosos.....	55
Tablestaca en Voladizo que penetran suelos arenosos.	58
Listado de ecuaciones utilizadas.....	62
Maquinaria recomendada para el proceso constructivo.....	66
Hincado de tablestaca.	66
Maquinaria recomendad para perforación de las pilas de fundación.....	70
Recomendación para el colado de pilas y colocado de columnas.	71
Maquinaria recomendada para el proceso de extracción de material en los sub niveles de sótano.....	73
CAPÍTULO III: Marco Metodológico.....	75
Diseño de la superestructura.	76
Diseño de columna en compresión.	79
Capacidad nominal en flexión para una viga con sección W12x16	81
Metodología de diseño de tablestaca en voladizo en suelos arcillosos.....	83
Cálculo de pilas de fundaciones.....	93
CAPÍTULO IV:	100
ANÁLISIS DE RESULTADOS	100
Análisis de resultados.	101
CAPÍTULO V: Conclusiones	105
Conclusiones	106
Referencias.....	107
Tabla de ilustraciones	110

CAPÍTULO I

Introducción

La industria de la construcción civil está siempre en constante cambio: se busca mejorar las técnicas para hacerlas más seguras y eficientes. Es así como se generan nuevos procesos constructivos.

La presente investigación busca ser una guía para un nuevo proceso constructivo, aplicable a proyectos donde se requiera construir edificios con sótanos. El propuesto es un sistema que rompe el orden tradicional de construcción ya que no se inicia por la excavación masiva del sótano.

Cada construcción presenta retos distintos, algunos serán físicos o geológicos y otros serán legales, sociales o políticos. Luego de analizar el presente trabajo, el profesional a cargo de un proyecto podrá valorar si el nuevo proceso de construcción denominado *Top – Down* de construcción de sótanos con tablestaca, se puede usar según las condiciones donde se desarrolla la construcción.

Planteamiento del problema

Para la construcción típica de sótanos, cualquiera que sea el fin, tales como estacionamientos, espacios de bodega o cualquier otro, el procedimiento normal es iniciar con la excavación del área y solamente ese trabajo se puede hacer; es decir, deja en espera toda la construcción de la superestructura.

Es posible enumerar infinidad de problemas asociados con la excavación de sótanos; no obstante, algunos son más evidentes y directos que otros: se interviene de manera directa en la cohesión natural del terreno, desequilibra el terreno circundante, es un punto de acumulación de aguas pluviales y se requiere estabilizar los taludes para evitar desplazamientos de propiedades vecinas, entre muchos otros.

Usando el procedimiento de construcción tradicional, claramente, el edificio no se iniciará hasta que sea terminada la excavación, procesos de colado de paredes perimetrales, estabilización de terrenos, colado de todas las losas, columnas, vigas, según la cantidad de sub-niveles del diseño, y el tiempo de fraguado necesario para comenzar a partir de la losa del contrapiso del primer nivel.

Además, se tiene el contratiempo del agua, sea que se construya en estación húmeda o que el nivel freático haga fluir agua a la zona de construcción. En cualquiera de los casos, complica la extracción del material.

Dependiendo de la zona donde se construye el sótano, se van a tener edificaciones justo en el límite de la propiedad, tomando en cuenta el tipo de suelo, el nivel de saturación de este y el peso de los edificios vecinos, se podría tener problemas de deslizamiento de terreno, siendo quizá el peor de los casos. En este posible evento, no es solamente las reparaciones físicas del edificio afectado es, también, todo el problema legal generado.

Objetivo principal

Desarrollar un modelo de diseño, para utilizar la tablestaca de acero como elemento estabilizador de suelos y ser usada en el proceso *Top-Down* de construcción de sótanos.

Objetivos específicos

1. Identificar los códigos de diseño aplicables al proceso constructivo *Top-Down* de estacionamiento subterráneo con tablestaca.
2. Identificar los estudios preliminares necesarios para el proceso constructivo.
3. Generar un modelo de análisis mecánico de la tablestaca para la aplicación del sistema constructivo *Top-Down*.
4. Identificar la tablestaca como elemento constructivo, su origen y usos más comunes.
5. Aplicar la tecnología de tablestaca a un caso típico para su análisis y la verificación de su factibilidad como elemento constructivo.

Justificación

Con la idea de estar en la línea de innovación y de buscar opciones para los procesos constructivos que se llevan a cabo en Costa Rica, es que nace el presente trabajo de investigación.

Tomando como idea base un proceso constructivo denominado Sistema de edificio de estacionamiento de Skyline Steel (Steel, 2012), se busca definir el proceso de diseño adecuado para el uso de la tablestaca en la construcción de sótanos.

Como se puede apreciar en la parte de referencias, la tablestaca es un elemento muy usado en Europa y Norteamérica, no obstante, en Costa Rica, su uso es muy limitado.

La utilización de la tablestaca en el diseño de sótanos, sería el elemento estructural de contención de suelos (totalmente autosustentable, no transfiere cargas a las losas de subniveles), paredes estéticas del sótano y sello hidráulico del nivel freático, si existiese.

Antecedentes

La empresa constructora Cosapi, construye edificio con sistema *Top-Down*
(Revista Constructivo, 2018).



Ilustración 1. Sótano construido con el sistema *Top-Down* con tablestaca en Perú.

Por primera vez en la historia de la ingeniería y la construcción del Perú, Cosapi logró levantar un edificio de 19 pisos y ocho niveles de sótano con el método *Top-Down*, que permite construir simultáneamente los niveles superiores e inferiores con una reducción de 26% en el tiempo de ejecución del proyecto.

Creado en los países desarrollados, Cosapi adaptó el sistema tradicional *Top-Down* a la tecnología disponible en el Perú para implementarlo en la construcción de cualquier proyecto que tenga varios niveles de sótano y pisos superiores y que deban concluirse en un tiempo menor que el del sistema tradicional.

Este moderno sistema de construcción fue propuesto por el Estudio Allende Arquitectos de España al considerar que no se disponía de mucho tiempo como para utilizar el sistema constructivo tradicional en la edificación del sótano y de los niveles superiores del edificio.

El proyecto construido con esta tecnología es el edificio de oficinas Primera Visión, ubicado en la cuarta cuadra de la avenida Juan de Aliaga, en Magdalena del Mar, donde se está generando un atractivo polo de oficinas modernas. Este moderno edificio, de 27 452,12 m² de área construida sobre un terreno de 1318 m², se encuentra en su fase final.

Para la construcción de este edificio se utilizaron máquinas de gran tamaño (excavadoras especiales) con las que se hicieron las zanjas de casi 28 metros de profundidad para la construcción de las paredes estructurales en los ocho niveles de sótano. Por esa área excavada se colocó la estructura metálica y, luego, se vació el concreto armado. De manera simultánea se colocaron pilotes de más de 32 metros para los ocho niveles de sótano y se vació el concreto armado para dejarlos listos.

El diseño del proyecto, así como de las vigas, muros pantallas de los sótanos y las estructuras verticales fue elaborado por la empresa española Gogaite Ingenieros Consultores SLP y adaptado al sistema peruano por Prisma Ingenieros del Perú. Además, a pedido de la empresa propietaria del proyecto del edificio Primera Visión, la empresa Pilotes Terratest Perú se encargó de la construcción de los muros pantalla y los pilotes del sótano.

Una vez concluidas las paredes y los pilotes del sótano, se inició el proceso de excavación a cargo de la empresa Posada Perú S.A.C., por el primer nivel del sótano, para la ejecución de las vigas de coronación que conectan dichos elementos con la losa del techo y la estructura del edificio que estará sobre la superficie; posteriormente, se colocó el techo del primer nivel del sótano y empezó la ejecución del casco tanto sobre la superficie como debajo de ella.

Para la ejecución bajo la superficie, se emplearon miniexcavadoras y un elevador de carga que fue instalado en un ducto de la estructura de sótano ya construido, y se aprovechó la existencia de los niveles de los sótanos previos, a fin de poder ingresar en cada nivel al nuevo nivel de excavación. El proceso de excavación requiere una alternancia de etapas de excavación y etapas de colocación de la losa de cada nivel de sótano; para que dicho proceso no fuera tan largo en el tiempo, se decidió excavar los niveles de dos en dos, por lo que, luego de cada excavación, se ejecutó el vertido de concreto en la losa de fondo contra terreno y, luego de tensada esta, se continuó con los siguientes dos niveles de excavación. Paralelamente, se ejecutó la losa intermedia encofrándola convencionalmente.

Todo este proceso se repitió en los niveles de los sótanos 2 – 3 y 4 – 5; para el resto, se ejecutaron los tres niveles de excavación en una sola etapa, previa autorización del ingeniero estructural.

Para la construcción de los pisos superiores se emplearon muros, columnas y vigas estructurales, como si se tratara del sistema convencional de construcción, que se usa actualmente en todo el país.

Este sistema ha permitido al proyecto ahorrar 9 meses, saldo de tiempo que hubiera tomado construir, adicionalmente, los ocho niveles de sótano para comenzar la construcción de los niveles superiores. Esta situación representa una gran oportunidad para el cliente y para Cosapi por el ahorro de tiempo y porque el proyecto puede empezar a operar mucho antes que con los otros sistemas constructivos (Revista Constructivo, 2018).

Construcción de 3 niveles de sótano sin anclajes de *Top-Down* para edificación de viviendas en el centro de Bera de Bidasoa, Navarra (Payer, 2014).



Ilustración 2. Excavación de subnivel utilizando el sistema *Top-Down* (Payer, 2014).

La ejecución de la excavación mediante sistema *Top-Down* permitió evitar el uso de anclajes al terreno y se acodó la contención mediante los propios forjados de los sótanos que se construyeron a medida que se profundizaba el hueco.

La obra se sitúa en el casco urbano del municipio Navarro de Bera de Bidasoa. Se trata de una parcela rectangular aproximadamente de 700 m² y un desnivel de 4m, en la que se había proyectado la ejecución de un edificio de viviendas de 4 plantas de altura y 3 plantas de sótano con excavaciones hasta de 10 m de profundidad, por parte de Lekuona Arkitektura.

El sistema de construcción *Top-Down*, como se puede ver en esta referencia, no solo se hace con tablestaca. Eventualmente se pueden encontrar sistemas hechos con muros y columnas armadas, vigas y columnas de acero, muros de retención o algún otro sistema que sea culturalmente aceptado en el país donde se esté construyendo.

En el caso de esta construcción, en Bera, España, los directores de obra prefieren colar muros y columnas de concreto armado (véase Ilustración N. 3), en lugar de usar tablestaca, lo cual es estructuralmente correcto y aceptado. El hecho de que se quieran buscar otros materiales para la contención del terreno con el fin de trabajar el sótano y la superestructura al mismo tiempo, habla muy bien del proceso constructivo, tiempos de obra, ahorro de costos, entre otros. Además, dadas las condiciones del terreno, podría ser de carácter obligatorio la estabilización de las paredes previa excavación, sea con sistema *Top – Down* o con excavación tradicional (Payer, 2014).

En los últimos años, Costa Rica ha visto un gran crecimiento en la construcción de grandes edificios para la vivienda en medio de nuestras ciudades ya establecidas. Ello implica que estas grandes edificaciones se construyen junto a otras, en algunos casos muy antiguas; con el estado de nuestro sistema de calles y carreteras, debemos enfrentar el proyecto con las limitantes urbanas que esto genera. La misma situación se repite en diversas latitudes como en Sudamérica, donde Chile ha tenido que optar por novedosos sistemas constructivos a la hora de edificar sótanos. Es común que el desarrollador se enfrente a suelos complicados para construir, y es aquí donde el ingenio del profesional debe solucionar (Rojo Pizarro, 2016) afirma:

“En Chile debido al crecimiento demográfico se construyen en la actualidad edificios de gran envergadura destinados principalmente a vivienda, sector comercial y oficinas.

Para optimizar el espacio de la obra se desarrollan subterráneos, destinados principalmente a estacionamientos de automóviles y bodegas. De esta forma, la superestructura de la obra se destina a su función principal.

La construcción de subterráneos implica la excavación bajo la cota del primer piso del edificio. Al excavar el suelo, se producen cortes verticales de este, generalmente en los linderos de la propiedad. Los cortes deben ser estables para evitar desprendimientos o desmoronamiento de suelo hacia el interior del solar de la obra.

Para ayudar en la estabilidad de los cortes, se utilizan diversos sistemas de sostenimiento de suelo. Correspondiente a construcciones capaces de evitar el desmoronamiento e inestabilidad de las paredes laterales de una excavación.

En este trabajo se analizarán únicamente las estructuras flexibles de sostenimientos, considerando la limitación de espacios disponibles o la imposibilidad de intervención en el trasdós de la fortificación.

Estas estructuras se materializan antes o durante la excavación, siendo parte esencial de toda obra de edificación.

La variedad de sistemas de sostenimiento existentes, permiten afrontar de mejor manera las condiciones de terreno particulares existentes en el lugar donde se construirá un edificio, admitiendo materializar la obra en presencia de agua” (Rojo Pizarro, 2016).

Inicia construcción del nuevo paso a desnivel en Guadalupe (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2020)



Ilustración 3. Paso a desnivel en el cruce de la antigua Gallito, en Guadalupe.

“Este jueves 16 de enero de 2020, quedó formalizado el inicio de obras para la construcción del nuevo paso a desnivel de Guadalupe y de una rotonda nueva con diseños paisajísticos, que sustituirá la intersección semaforizada ubicada en el lugar.

En el acto participó el presidente de la República, Carlos Alvarado, el ministro de Obras Públicas y Transportes, Rodolfo Méndez Mata, autoridades de CONAVI, de la Oficina de Naciones Unidas de Servicios para Proyectos (UNOPS) y de la empresa constructora Puentes y Calzadas.

Esta obra forma parte de las intervenciones que se ejecutan en distintos puntos de la Circunvalación que buscan agilizar el tránsito sobre la Ruta Nacional 39, como el paso a desnivel de Garantías Sociales –próximo a concluir– y la nueva rotonda de La Bandera.

“Estamos desatando los nudos que nos impedían avanzar en proyectos que son neurálgicos para el desarrollo y bienestar de las personas”, comentó el presidente Alvarado.

Y agregó: “El inicio de esta obra es la materialización de nuestro compromiso por construir confianza desde la base de hechos concretos”.

El ministro Méndez Mata indicó que este proyecto es parte de los numerosos frentes de trabajo que estarán en ejecución este año.

“La eliminación de esta intersección de semáforos nos permitirá construir en este sitio una rotonda bajo la cual habrá un paso a desnivel que permitirá que los 50 mil vehículos que transitan diariamente por Circunvalación puedan desplazarse sin interrupción”, detalló el jerarca del MOPT.

El nuevo paso a desnivel de Guadalupe tendrá 790 metros de longitud, cuatro carriles en el paso a desnivel (dos por sentido). La rotonda contará con dos carriles por sentido para permitir el acceso hacia las localidades aledañas.

También se construirán aceras a ambos lados, bahías para autobuses, un puente peatonal y una alcantarilla ampliada sobre el río Torres.

Alejandro Rossi, representante de UNOPS Costa Rica, reafirmó el compromiso de esta entidad de impulsar una nueva obra de calidad para el Gran Área Metropolitana, asegurando que será ejecutada con los más altos estándares técnicos, procurando la menor interferencia del tránsito vehicular y molestias para los vecinos, garantizando la participación comunitaria y el enfoque de género en el marco de la gestión pública justa y equitativa.

Según lo estipulado en el contrato, la construcción de esta obra se desarrollará en 14 meses, contados a partir de este mes de enero. Se invierten \$19,5 millones, recursos provenientes del empréstito con el Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE). Será ejecutada por la empresa Puentes y Calzadas Grupo de Empresas y gestionada por la UNOPS, en coordinación con la Unidad Ejecutora del CONAVI” (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2020).

Es natural que todos los partidos políticos, cuando llegan al Gobierno, buscan que sus proyectos sean terminados dentro de su periodo de mandato, lo cual se denomina: Proyecto con oportunidad política.

Es así como se dice que los proyectos políticamente hablando tiene una variable llamada oportunidad política. Esto significa que el plan se mide en tiempo y se espera que termine dentro del período del gobierno de turno.

Entonces, la oportunidad política es sinónimo de eficiencia en tiempo, por lo que un sistema constructivo como el *Top-Down* de estacionamiento con tablestaca, sería atractivo a la hora de medir esta oportunidad.

El sistema constructivo *Top-Down* de estacionamiento con tablestaca, no solamente se puede usar en la construcción de un sótano, la oportunidad para usar este procedimiento es simplemente cuando se tiene la necesidad de excavar, y arriba de la parte superior de esa excavación, es decir, el nivel de calle, vamos a tener alguna otra estructura. En el caso de un paso desnivel, se tendría una rotonda, carreteras, rampas, puentes peatonales, zonas verdes, etcétera.

El mercado actual, cualquiera que sea el nicho en el que se esté viviendo o trabajando, va a requerir de inmediatez y eficiencia económica. Así que cualquier sistema constructivo que mejore el tiempo, o baje costos, merece el esfuerzo que se le dedique para su análisis.

Construcción tradicional de sótanos

El alcance de esta investigación no explicará de manera detallada la construcción tradicional de sótanos, sin embargo, con el fin de poner en perspectiva el sistema constructivo tradicional de construcción de sótanos, se incluirá una breve reseña, iniciando con reglamentos de la legislación costarricense que se deben cumplir.

Antes de iniciar el proceso de construcción y, como parte de la labor administrativa, el director de proyecto velará por cumplir el Reglamento General de Seguridad en Construcciones, elaborado por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (MTSS), Ministerio de Salud (MSCR) y el Consejo de Salud Ocupacional de Costa Rica (CSO). Además, en el Reglamento de Construcciones del Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (2018), publicado en el alcance de La Gaceta N.º 54 del 22 de marzo del 2018, en su artículo N.º XXV, Construcción de zanjas y estructuras subterráneas, indica que:

“ARTÍCULO 425. Normas y especificaciones aplicables. Para toda construcción de zanjas se debe cumplir con el Reglamento de Seguridad en Construcciones, Decreto Ejecutivo N.º 25235-MTSS y sus reformas o la normativa que lo sustituya”.

El Reglamento General de Seguridad en Construcciones (1996), en el capítulo IV, De las excavaciones, referente a excavaciones a cielo abierto, dispone lo siguiente:

Artículo 39. Antes de iniciar una excavación la persona profesional responsable ante el CFIA debe realizar un reconocimiento del lugar y contar con un estudio para determinar las medidas de seguridad que se deben implementar, según el tipo de suelo.

Artículo 40. En toda excavación se debe garantizar la estabilidad de los taludes, construyéndolos con una inclinación acorde con la naturaleza y condiciones del terreno, así como la forma de realización de los trabajos. Si por cualquier circunstancia la excavación se

ejecuta con taludes más acentuados que los requeridos, se debe disponer de ademes que, por su forma, materiales empleados y secciones, ofrezcan seguridad a las personas trabajadoras.

Artículo 41. Los taludes de la excavación, cercanas a todas las estructuras que puedan ser afectadas por la excavación, deben ser apuntalados y revisados diariamente.

Artículo 42. La excavación debe ser inspeccionada en forma periódica, a efectos de comprobar si prevalecen las condiciones iniciales o, si han sido alteradas por:

- a) Presencia de fuentes cercanas de vibración,
- b) Presencia de agua,
- c) Cualquier otra situación que pueda afectar la seguridad de las personas trabajadoras.

Además, toda excavación debe permanecer señalizada y delimitada en todo el perímetro, para impedir el ingreso de personas no autorizadas y/o advertir sobre la presencia de esta.

Artículo 43. En las excavaciones con más de un metro con cincuenta centímetros (1,50 m) de profundidad, las personas trabajadoras deben disponer de escaleras, rampas u otra manera segura de ingresar y salir del lugar o área de trabajo. Estos accesos deben estar a una distancia no mayor de siete metros con cincuenta centímetros (7,50 m) entre uno y otro.

Artículo 44. La persona profesional responsable de la obra ante el CFIA, previo estudio del terreno, decidirá cuándo usar ademes horizontales o verticales.

Artículo 45. El diseño del ademe es responsabilidad de la persona profesional de la obra ante el CFIA, de acuerdo con las condiciones de estabilidad del terreno. Para anchuras menores de tres metros con cincuenta centímetros (3,50 m) la sección de los codales o largueros será de quince por quince centímetros (15 cm x 15cm) y si el ancho es mayor de tres metros con cincuenta centímetros (3,50m) la sección será de veinte por veinte centímetros (20 cm x 20 cm). La revisión de estos ademes se debe realizar de forma diaria para verificar la estabilidad de tierra, nivel freático principalmente en temporada de invierno.

Artículo 46. Los tablonos o láminas metálicas deben estar en perfecto contacto con el terreno y, si hay cavidades, se deben ajustar con cuñas. Los arriostres no se apoyarán directamente sobre el suelo, se intercalarán cuñas y una base resistente.

Artículo 47. Nunca se deben apuntalar fosos o zanjas de talud no vertical empleando codales horizontales. En estos casos se escalonará con gradas, tanto de anchura mínima como de altura máxima, de un metro con treinta centímetros (1,30 m), de manera que queden preferiblemente cortes verticales.

Artículo 48. Para la protección de las obras hasta de siete metros (7,00 m) de altura vecinas a una excavación, se deben emplear ademes en los siguientes casos:

a) Cuando la profundidad de la excavación sea mayor que la profundidad del cimiento vecino y la distancia entre ambas sea mayor de seis metros (6,00 m).

b) Cuando la profundidad de la excavación sea igual a la del cimiento vecino y la distancia entre ambas sea mayor a cuatro metros (4,00 m).

c) Cuando la profundidad de la excavación sea menor que la del cimiento vecino y la distancia entre ambas sea mayor a tres metros (3,00 m).

Artículo 49. Las cargas o sobrecargas ocasionales, así como las posibles vibraciones, deben ser tomadas en consideración para determinar la inclinación de los taludes y el cálculo del apuntalamiento.

Artículo 54. Cuando se realicen trabajos de excavación o similares, aunque no sea mayor de metro con cincuenta centímetros (1,50 m) de profundidad, al pie de taludes inestables o cuyo ángulo de inclinación sea mayor que el ángulo de reposo natural del terreno, por razones constructivas, debe proporcionarse una protección colectiva a las personas trabajadoras.

Artículo 55. Cuando se utilice maquinaria en excavaciones a dos niveles diferentes, en el nivel superior los bordes de la excavación deben protegerse con retenes para evitar la caída de maquinaria a un nivel inferior.

Artículo 56. Durante la permanencia de personas en la excavación no debe utilizarse la maquinaria ni se debe estacionar a una distancia menor a 1.5 veces la profundidad de la excavación.

Artículo 57. Cuando se usen excavadoras para el movimiento de la tierra, la zona de peligrosidad, respecto a la máquina será, como mínimo, de cinco metros (5,00 m) más de radio, respecto al radio de giro de la máquina. Cuando el operador cuente con puntos ciegos, debe tener un ayudante que monitoree durante el trabajo.

Artículo 58. En aquellas excavaciones de gran envergadura, donde por las condiciones mismas de la excavación sea difícil o imposible ademar, se deben usar protecciones móviles en el punto exacto de trabajo (Reglamento General de Seguridad en Construcciones, 1996).

Luis Roberto Moscozo Barrios (2011) detalla el sistema de construcción tradicional de sótanos. Esta actividad tiene como principal fin la extracción del material de donde se espera construir el sótano. Diversos factores determinarán la complejidad, tales como tiempo, maquinaria, personal, implicaciones legales, permisos y demás situaciones relacionadas.

Igual que en toda construcción, son necesarios los estudios de suelo, primordiales en la construcción de un sótano. Antes de iniciar el proceso de excavación se debe tener plenamente identificados los diferentes estratos de suelo, con el fin de saber cuáles son las alturas de estos, su calidad y cantidad, los cuales pueden hacer variar el precio del proyecto.

El nivel freático es otro tema que se debe conocer perfectamente, ya que esta es una variante muy importante en la dificultad y el proceso de extracción de material.

Se iniciará siempre con la excavación masiva (Ilustración N. 17), lo cual es el volumen de tierra que se debe extraer según diseño de la estructura. Es aquí donde se utiliza la maquinaria más pesada, dependiendo la envergadura del proyecto.

Si bien es una parte de poca exactitud al menos al principio, una vez que se empieza a excavar, casi de inmediato se debe iniciar con la estabilidad de los taludes. Y naturalmente el terreno debe estar previamente alineado y delimitado para no invadir propiedades vecinas.



Ilustración 4. Excavación masiva de sótano (*Moscozo, 2011*).

Esta parte requiere de mucho dinamismo de maquinaria pesada, ya que excavadoras, quizá de Gran tamaño, estén removiendo material y cargando vagonetas, las cuales deberán estar entrando y saliendo durante todas las horas laborales del proyecto. Es de suma importancia colaborar con los operarios de las vagonetas al momento de salir y entrar de la obra en construcción y así evitar posibles accidentes.

Esta primera etapa requiere un trabajo administrativo muy importante, y es buscar el lugar apropiado para dejar el terreno que sale de la excavación.

Este será tan complicado y caro como grande sea el sótano que se está construyendo, tomando en cuenta además que el volumen de extracción tiene un factor multiplicador de 1.3.

Una vez que se ha extraído el principal núcleo de terreno, y los taludes según necesidad y tipo de suelo estén estabilizados, con el método constructivo escogido por los responsables del trabajo, se inicia con la excavación estructural (véase Ilustración N. 12). Se refiere al proceso de excavación para las zanjas de cimentación, estas requieren mayor cuidado al momento de realizarla. Es común que este tipo de excavación se haga a mano, pero también se puede utilizar maquinaria de bajo tonelaje como las mini excavadoras. Es indispensable que exista el alineamiento preciso verificado por los responsables. En este momento inicia la construcción de la cimentación del edificio y las obras de los subniveles. Hasta ahora, no se ha iniciado la construcción del edificio, y está lejos de empezar.



Ilustración 5. Excavación estructural (Moscozo, 2011).

Durante todo el proceso de excavación y extracción de material, tendremos el problema de la suciedad que acarrearán las vagonetas al entrar y salir del sótano en construcción.

Todo ese material va a ser movido por las aguas pluviales hacia los cordones pequeños y, luego, hacia el sistema de alcantarillado de las aguas pluviales, así que el proceder del proyecto podría causar problemas de obstrucciones.

Es así que se debe tener una limpieza continua en la zona y, si bien se debe ser responsable y evitar al máximo que el material caiga en los sistemas de acarreo de aguas pluviales, también se deberá tomar en cuenta la zona en que se está trabajando. No es lo mismo trabajar en un parque industrial que, en una zona residencial, donde los vecinos se podrían estar quejando de la suciedad en las carreteras y esto implicaría un trabajo mucho más detallado, que subiría los costos de la operación (Moscozo, 2011).

Luego de terminado el zanjado para las cimentaciones escogidas por los profesionales del proyecto, es entonces donde se inicia con los trabajos permanentes de contención de muros, losas, columnas, vigas, según la cantidad de subniveles que tendrá el proyecto.

La tablestaca es un elemento constructivo común en algunos países, sobre todo en Europa y Asia, de donde provienen los principales productores del mundo.

Es posible que muros de tablestacas hechos en madera se usaran hace cientos de años en diferentes culturas alrededor del mundo, pero por ser un material biodegradable, es sumamente difícil rastrear sus primeros usos.

En 1902, el topógrafo Noruego Tryggve Larssen (Green Walls, 2018), inventa los muros de tablestacas hechas de acero, con perfiles laminados y sección transversal en forma de canal. Hoy este tipo de tablestaca se conoce como tablestaca Larssen.

Con el pasar de los años y la evolución en la técnica de procesamiento del hierro y su transformación en acero, se han logrado obtener tablestacas con diferente grado de resistencia perfiles y diversas aplicaciones.

Actualmente la tablestaca más usada es la que está fabricada de acero. No obstante, podemos encontrar en el mercado hechos de aluminio y de PVC. El presente trabajo abordará de manera superficial los elementos hechos de aluminio y PVC. Esto dado que el sistema de construcción *Top-Down* de estacionamiento con tablestaca utiliza láminas de acero.

Sistema *Top-Down* de estacionamiento con tablestaca

Seguidamente, se dará el paso a paso de la construcción de sótanos con el proceso constructivo denominado *Top-Down*. Se le recomienda al lector, que luego de leer esté apartado, vea el video descrito en la siguiente referencia: (Steel, 2012).

El paso a paso no es un rígido manual del proceso constructivo. Es más bien, una guía para tomar en cuenta.

Paso #1

Como cualquier otro proyecto de construcción es indispensable el estudio de suelos. Se recomienda el estudio SPT, ASTM D1586. En el capítulo 2, Marco Teórico, se detalla el ensayo.

Paso #2

Hincado de la tablestaca en todo el perímetro del área donde existirá el sótano. En la ilustración número 6, se aprecia la tablestaca instalada en el perímetro y además la vista en corte del terreno. Es necesario aclarar que para este método constructivo se requiere usar tablestaca de acero, ya que es el material con mayor resistencia estructural.

Para esto se requiere estar claro de:

- El largo necesario de la tablestaca. Es la sumatoria de la profundidad de sótano y la profundidad de empotramiento necesaria de la tablestaca para lograr su

estabilidad. Este cálculo se puede estudiar con detalle en el marco teórico y metodológico del presente estudio.

- El perímetro del sótano. La tablestaca no le limita la figura del sótano, es capaz de adaptarse a cualquier huella necesaria, es decir, no se requiere de ángulos rectos, sin problema se adaptaría a radios o cualquier otra figura.
- Maquinaria requerida. En el capítulo 2, Marco Teórico, bajo el apartado “Maquinaria necesaria para el proceso constructivo”, se encuentra la información necesaria para elegir la maquinaria para el hincado de la tablestaca. En el apartado “Materiales más utilizados para producir tablestaca”, se puede tomar referencia respecto a la tablestaca de aluminio y PVC, y sus usos más comunes en aplicaciones más ligeras.



Ilustración 6. Tablestaca instalada en el perímetro de la construcción (Steel, 2012).

Paso #3

Excavación y colocado de columnas. La maquinaria necesaria se ve en el capítulo 2 “Maquinaria necesaria para el proceso constructivo”.

Este paso es flexible, ya que se podría variar el proceso según el criterio de los profesionales a cargo. En esta investigación se decide utilizar pilas de fundación como cimentación para las columnas. El cálculo de este tipo de cimentación se puede estudiar en el capítulo 3, Marco Metodológico.

Nuevamente la profundidad de la excavación depende de la profundidad del sótano y el alto total de la pila, arrojado por el diseño estructural. La recomendación en este caso es utilizar columnas de acero. Luego de hecho el agujero (quizá sea necesario el encamisado temporal del agujero) se debe introducir la columna, la cual debe tener ya unida la placa y la armadura de acero que tendrá la pila de fundación (Véase Imagen #7). Para mejor comprensión, analizar el apartado: Recomendación para el colado de pilas y colocado de columnas, del Marco Teórico.

Para el proceso de colocado de columnas, es indispensable la precisión a la hora de su colocación, para evitar el contacto del acero con el fondo del agujero, dejando así el recubrimiento de concreto necesario indicado por la parte estructural. Para efectos del colado de concreto, se recomienda utilizar un conducto de caída para el concreto, véase Imagen #8.

Pasos 2 y 3 podrían llevarse a cabo al mismo tiempo, si es que el área de construcción es lo suficientemente grande para albergar toda la maquinaria necesaria, y no se obstaculicen entre sí.

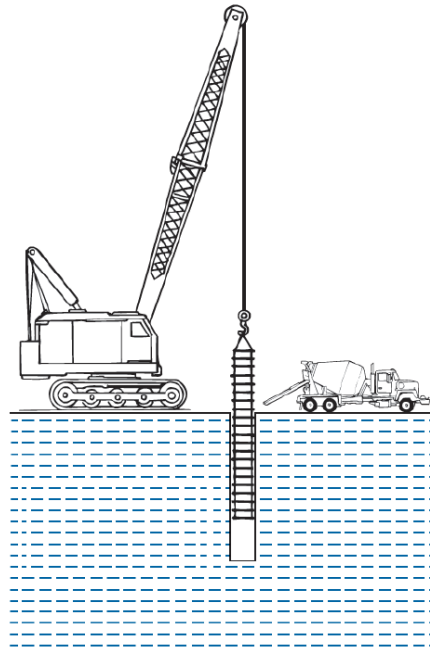


Ilustración 7. Colocado de columna con armadura de pila (Das, 2012).

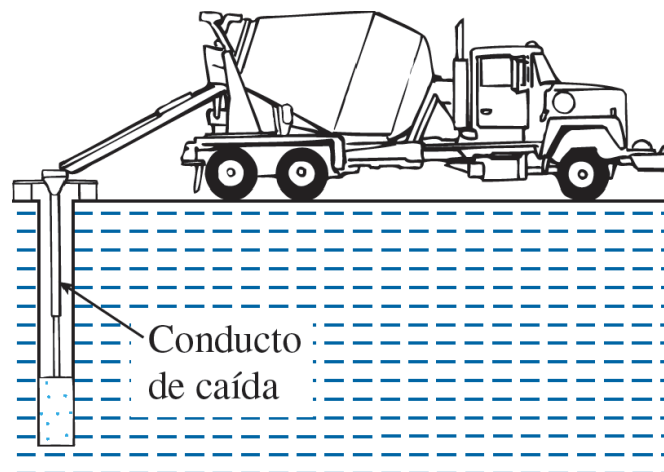


Ilustración 8. Conducto de caída para concreto (Das, 2012).

Paso #4

Excavación estructural para el colocado de las vigas del primer nivel de la superestructura. Una vez que se tenga el zanjeado, se procede a colocar las vigas que unirán entre si todas las columnas y darán soporte a la losa del primer nivel de la superestructura. Es el equivalente del zanjeado para una cimentación superficial.

Esta fase es flexible ya que depende del diseño estructural que decidiera el grupo de profesionales a cargo. Este trabajo se repetirá en todos los sub niveles del sótano.

Paso #5

Colado de la losa del primer piso de la superestructura. Ese proceso no tiene nada especial, es seguir el diseño estructural y estético definido. Sería importante colocar algún tipo de polietileno sobre el suelo para evitar que se el concreto se pegue a este. De esta manera, se tendrá un buen acabado del lado del fondo de la losa. Esto maximiza la eficiencia del proceso constructivo, ya que no será necesario darle un acabado extra una vez se excave el primer subnivel.

Es importante seguir los planos constructivos, y dejar libre el punto de acceso al primer subnivel.

Paso #6

Excavación masiva del primer sub nivel. En este punto puede darse inicio al trabajo de la superestructura. Además, se inicia con la excavación del primer subnivel solamente, utilizando mini equipos de movimiento de tierras. Véase ilustración #9.

Para esta fase, es indispensable, tener claro lo siguiente:

- Altura de la excavación. Este debe corresponder al nivel de la losa del primer subnivel, es decir, la altura total del subnivel.
- El nivelado del suelo debe tener una norma de control muy fina, ya que se comportará como encofrado para la losa, y se requiere que sea muy lineal.
- Al igual que en el paso #5, se debe colocar algún tipo de polietileno sobre el suelo, para evitar que se el concreto se pegue al terreno, y tener buen acabado.
- Recordar que el terreno está totalmente confinado, por lo que nunca se tendrán taludes expuestos, lo cual es una gran ventaja del proceso constructivo. El límite del sótano está dado por la tablestaca, previamente instalada.
- Para la unión de la losa con la tablestaca, se deja a criterio del grupo diseñador, podría ser por medio de conectores de cortante, viguetas de apoyo en acero, o cualquier otro.

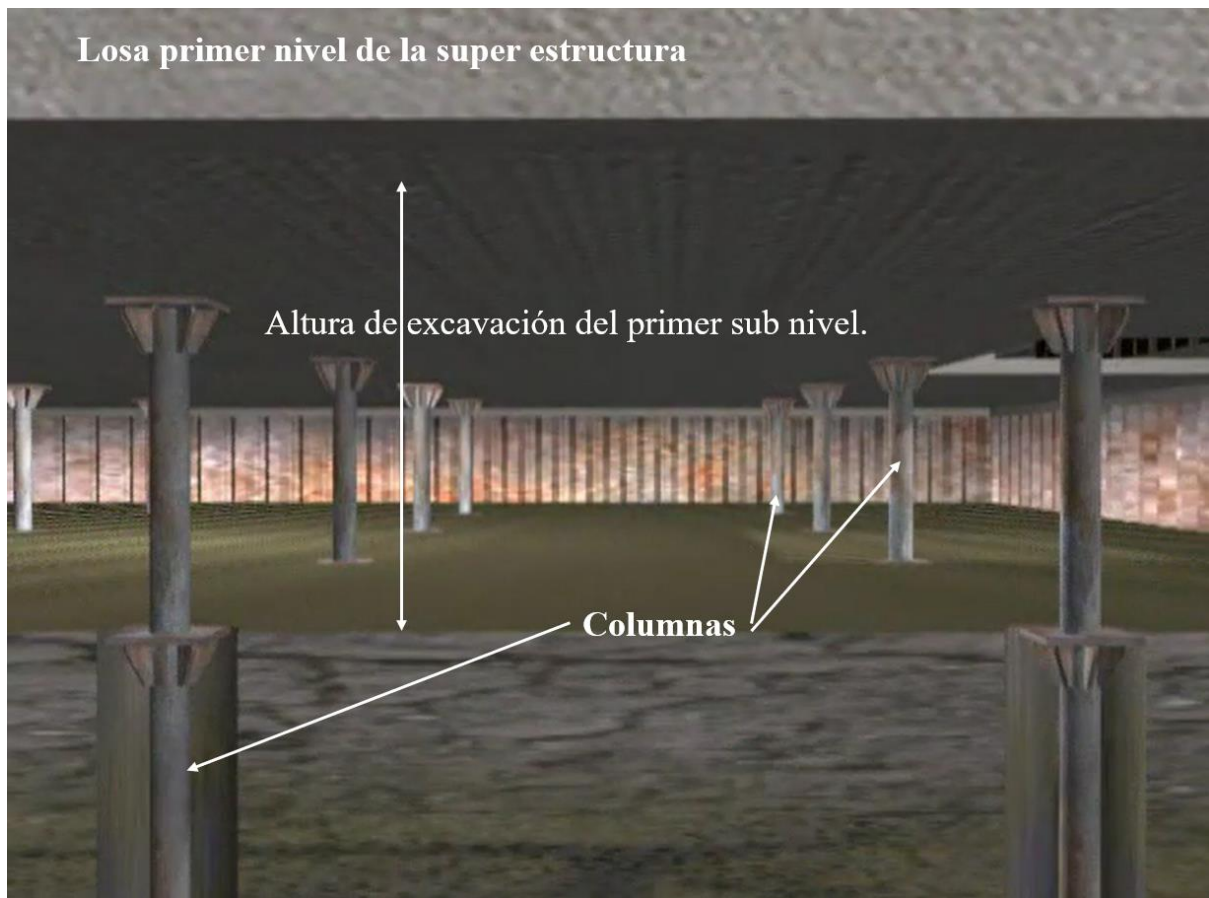


Ilustración 9. Excavación primer sub nivel (Steel, 2012).

Paso #7

En este momento se repite el paso #4, Excavación estructural para el colocado de las vigas. Y, luego, se repite el paso #5 Colado de la losa, las veces que sea necesario según la cantidad de subniveles del proyecto.

Paso#8

En algún momento deben elaborarse las rampas de acceso de los subniveles, lo cual se podría hacer al final de colados todas las losas de entresijos, o conforme se vayan terminando los subniveles. Esto es flexible y es decisión de los profesionales a cargo.

Materiales más utilizados para producir tablestaca

Tablestaca de aluminio

El aluminio es un elemento químico con símbolo Al y número atómico 13. Es un metal no ferromagnético y es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Este metal se extrae únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita. Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería de materiales, tales como su baja densidad, la cual es de $2812,5 \text{ kg/m}^3$ y su alta resistencia a la corrosión. Es buen conductor de la electricidad y del calor, se mecaniza con facilidad y es muy barato. Por todo ello es desde mediados del siglo XX es el metal que más se utiliza después del acero.

Fue aislado por primera vez en 1825 por el físico danés H. C. Orsted. El principal inconveniente para su obtención reside en la elevada cantidad de energía eléctrica que requiere su producción. Sin embargo, este problema se compensa por su bajo costo de reciclado, su extendida vida útil y la estabilidad de su precio.



Ilustración 10. Muro de tablestaca de aluminio en contención de erosión del terreno en límite marítimo terrestre.

Dada su resistencia a la corrosión, las tablestacas de aluminio se han utilizado ampliamente en trabajos de contención en el límite marítimo terrestre. Sea como muros de retención, rompeolas, control de erosión del terreno (tal como se ve en la imagen número 5), o cualquier otra aplicación marina, se tiene el aluminio como opción. No obstante, no se utiliza en obras de gran envergadura, ya que su resistencia estructural (que si bien es mejor en peso / resistencia que el acero) y su precio, hacen al acero la primera opción a utilizar.

Nanjing Grand Steel Piling, empresa productora de tablestaca y una de las más grandes del mundo, tiene al menos 40 años de producir en aluminio. Tal como el comercio actual lo requiere, su mercado meta es los trabajos de contención en el límite marítimo terrestre, dada la propiedad del aluminio de presentar muy alta resistencia a la corrosión por el contacto con agua salada.

Según indica Nanjing Grand Steel Piling (2020), Productos / Tablestacas de aluminio.

En su página principal, se destacan 4 ventajas principales;

- Resistencia a la corrosión.
- El peso volumétrico del aluminio es menor que el del acero, por lo que se podría ahorrar costos de transporte y manejo.
- La hoja de aluminio puede ser anodizada¹, por lo que puede dar una apariencia estética mucho mejor.
- Tienen gran cantidad de accesorios, como tapas, sombrerillos (protectores para el hincado), tirantes roscados, anclajes. Así que igualan a las tablestacas de acero en cuanto a factibilidad y facilidad de uso (Nanjing Grand Steel Piling , 2020).

1. El proceso de anodizado es un tratamiento superficial del aluminio que consiste en la formación de una capa de óxido de aluminio de forma controlada, en el cual se hace pasar una corriente continua a través de la superficie del aluminio. Permite tintar el metal durante el proceso de forma muy duradera y consiguiendo una amplia variedad de terminaciones.

(Alumitran, 2014)

Tablestaca de PVC

El policloruro de vinilo, mejor conocido como PVC, es una combinación química de carbono, hidrógeno y cloro. Sus componentes provienen del petróleo, un 43% y de la sal un 57%. Es el plástico con menos dependencia del petróleo. Actualmente, solo el 4% del consumo total del petróleo se utiliza para fabricar materiales plásticos y de ellos, únicamente una octava parte corresponde al PVC.



Ilustración 11. Tablestaca de PVC en fábrica (CETEAU, 2020).

El PVC ocupa un lugar privilegiado en la familia de los plásticos por su interesante conjunto de propiedades, pues es un material ligero, resistente, inerte y completamente inocuo, con buen comportamiento al fuego, ya que no propaga la llama, es autoextinguible, impermeable, aislante térmico, eléctrico y acústico, resistente a la intemperie, de elevada transparencia, protege los alimentos, tiene una buena relación calidad/precio, es fácil de transformar y es totalmente reciclable.

Se obtiene por polimerización del cloruro de vinilo, cuya fabricación se realiza a partir de cloro y etileno. Es un material termoplástico, es decir, bajo la acción del calor entre 140 a 205 °C, se funde pudiendo moldearse fácilmente; cuando se enfría, recupera la consistencia inicial conservando la nueva forma.

El PVC se utiliza mayoritariamente en aplicaciones de larga duración, solamente la industria de la construcción absorbe el 55% de la producción total de PVC.

El 64% de sus aplicaciones tienen una vida útil entre 15 y 100 años, tales como tubos, ventanas, puertas, persianas, muebles, entre otros.



Ilustración 12. Usos tablestaca de PVC (Green Walls, 2018).

El continente de procedencia mayoritariamente de la tablestaca, independientemente el material del que esté fabricada, es Europa. En el caso de la tabla Estaca de PVC, no es la excepción, su procedencia también es europea.

En Italia se encuentra la fábrica de Green Walls PVC Sheet Pile, la cual es uno de los más grandes proveedores a nivel mundial de tablestaca en PVC.

Sus usos son muy variados y presentan importantes ventajas, según indica Green Walls PVC Sheet Pile (2018). Vía Bedesco Italia.

“Actualmente, la mayoría de los bancos, mamparos y estructuras de control de agua están hechos de acero, hormigón o madera. Estos productos tradicionales son costosos y requieren un mantenimiento continuo.

El hormigón puede agrietarse exponiendo el núcleo de hierro a la oxidación. El acero se oxida y requiere un mantenimiento constante. La madera, si se trata, provoca la liberación del tratamiento químico en el suministro de agua y también requiere un mantenimiento constante para limitar los daños por exposición a los rayos ultravioleta y al agua salobre”.

Un importante uso de la tablestaca de PVC está en los trabajos de impermeabilización de muros de concreto que están expuesto al agua salada, como se aprecia en la ilustración número 13 (Green Walls, 2018).

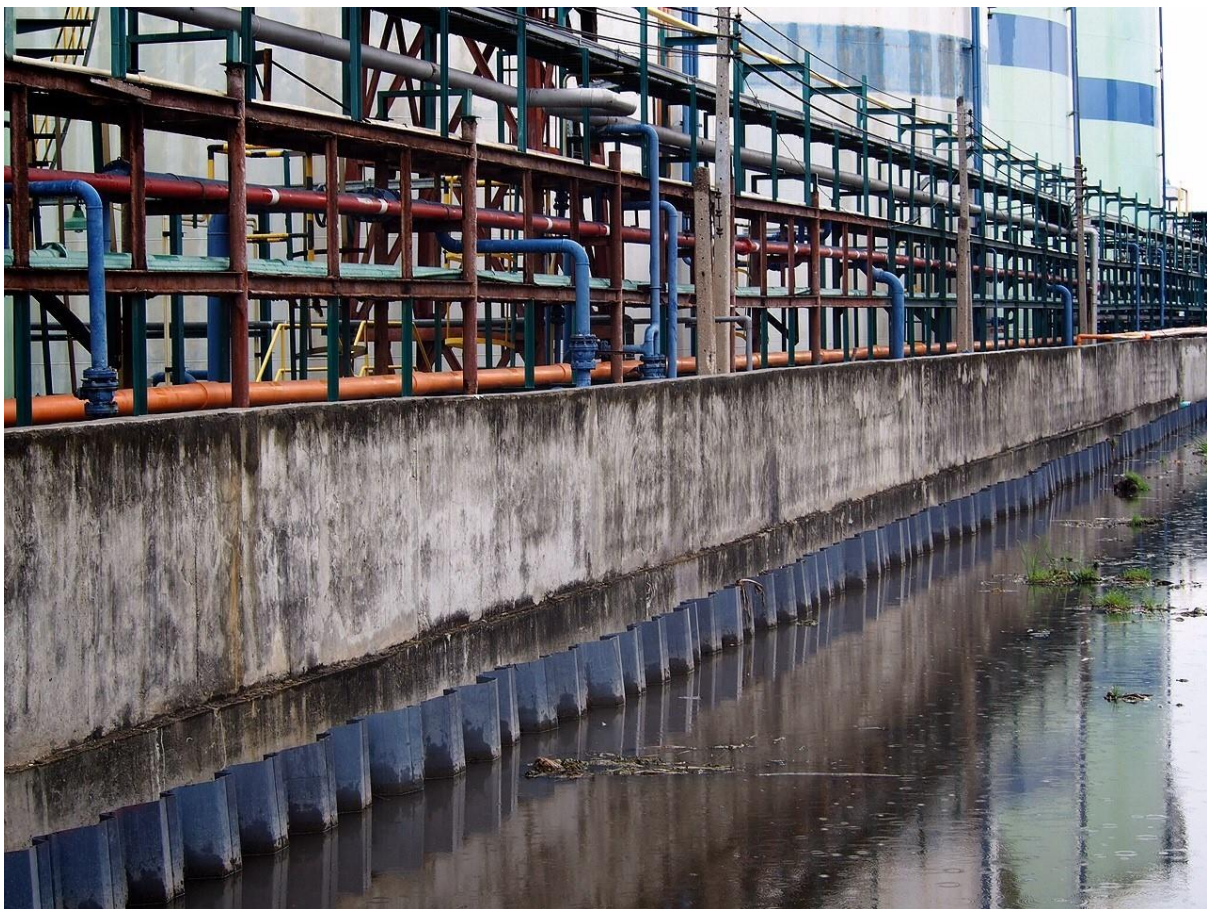


Ilustración 13. Tablestaca de PVC, usada para aislar del agua salada un muro de concreto armado (CETEAU, 2020).

Tablestaca de acero

Una tablestaca metálica es un elemento estructural fabricado en acero que sirve como elemento de contención en diferentes obras civiles. La aplicación que se le puede dar a estos elementos es muy variada, desde la construcción de terminales portuarias hasta la utilización en pasos a desnivel en carreteras.



Ilustración 14. Tablestaca hincada en el suelo al 90% de su altura (CETEAU, 2020).

El uso de tablestacas no es reciente, tal como se menciona en el artículo de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Técnico de Costa Rica (Artavia, 2017), pues alrededor de 1900 se utilizaban fabricadas en madera o en hierro fundido. Las tablestacas actuales empezaron a surgir con el desarrollo de la tecnología de laminación.

El primer proyecto en que se aplicaron fue el puerto Black Rock, en Estados Unidos en donde se usaron 6600 toneladas de tablestacas. En la actualidad el consumo a nivel mundial se estima en dos millones de toneladas al año. Los mayores mercados consumidores se encuentran en Europa, Estados Unidos, Medio Oriente y el sudeste de Asia. Los mercados antes mencionados son de esperar pues, generalmente, se usan tablestacas en obras relativamente grandes (puertos, puentes, astilleros, etc.), las cuales no son muy frecuentes en países con un menor desarrollo económico.

A pesar de que la utilización de tablestacas podría hacer más rápida, eficaz y segura la construcción de una obra, el precio de estos elementos hace que se limite su uso en proyectos de bajo presupuesto o tamaño (Artavia, 2017).

Tal como lo indica el productor de tubo de acero AINOX (2020), el acero es un metal que se obtiene mediante la aleación de hierro (Fe) y carbono (C). Con un contenido de Carbono entre 0,035% y 2,14%. Suelen incluirse en la aleación otros materiales como el cromo (Cr), el níquel (Ni) o el manganeso (Mg) con el fin de brindarle al acero ciertas propiedades específicas, éstos son llamados aceros aleados.

Para conseguir esta aleación se deben fundir el hierro, carbono y demás minerales, cociéndolos en un alto horno a muy altas temperaturas, eliminando las impurezas presentes en el hierro. Con la ilustración número diez, se aclara el proceso de producción de acero y se muestra el diagrama del alto horno.

Proyecciones y limitaciones

El presente trabajo es una investigación con el fin específico de crear un modelo analítico, donde se diseñe un muro de tablestaca para ser usado como límite de un sótano. Sirviendo así, como contención del suelo, nivel freático, pared estética del sótano y adaptarlo al proceso constructivo denominado *Top-Down*.

El sistema *Top-Down* de estacionamiento subterráneo con tablestaca, implica la excavación de suelos. Este estudio no tiene un carácter geotécnico, así que no indagará en los tipos de suelo, ventajas, limitaciones, de cada uno de ellos. Mas sí explicará cuáles son los estudios de suelo necesarios para utilizar el sistema constructivo en mención.

El presente estudio se basa en la construcción al mismo tiempo del sótano y la superestructura. Y tendrá un ejemplo práctico de un edificio con 100m² de huella, cuatro pisos de superestructura y dos subniveles de sótano para parqueo.

Para efectos de obtener cargas últimas para diseño de cimentaciones, el presente estudio cuneta con una reseña del diseño de un edificio de cuatro pisos en acero, el cual tiene cargas típicas aplicadas. El único objetivo de este espécimen es el de tomar datos para los cálculos del ejemplo práctico del marco metodológico.

Este sistema no incluye análisis de estados límites como estabilidad global, hundimiento, erosión interna, expansividad, socavación o cualquier otro tipo de falla, aplicado al muro de tablestaca.

No está enfocado en diseño de estructuras de concreto reforzado ni de acero.

Este estudio es de carácter investigativo y no contempla estudios de suelo reales. Las propiedades geotécnicas aplicadas en el modelo de análisis serán propuestas de manera académica, basadas es ejemplos típicos de libros de texto como “Fundamentos de ingeniería de cimentaciones” (Das, 2012). No se tendrán en cuenta comparaciones de costos o requerimientos logísticos respecto a otras técnicas constructivas.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Estudios preliminares

Método de prueba estándar (SPT)

Según ASTM International, (American Society of Testing Materials, 2020) el SPT o prueba de penetración estándar (por sus siglas en inglés Standart Penetration Test), es el estudio de perforación y exploración subterránea más utilizada en todo el mundo, y su norma técnica es la ASTM D1586.

La prueba proporciona muestras con fines de identificación y muestra una medida de resistencia a la penetración que se puede utilizar para fines de diseño geotécnico. Muchas correlaciones ampliamente publicadas relacionan el recuento de golpes, o valor N, con propósitos de ingeniería geotécnica.

El ensayo de penetración estándar (SPT por sus siglas en inglés: Standart Penetration Test) consiste en la hincada por golpes de un muestreador con geometría cilíndrica, de 60cm de longitud, fabricado en acero y seccionado longitudinalmente.

El ensayo cuenta con un recorrido limitado a la longitud del muestreador (la hincada se limita a 45 cm o a 60 cm (Véase Imagen N. 15). Por esta razón, se debe ejecutar en el fondo de una gaveta excavada, que deberá tener una profundidad no menor al nivel de la excavación estructural aproximada que se ejecutará, según los requerimientos de la parte estructural del proyecto.

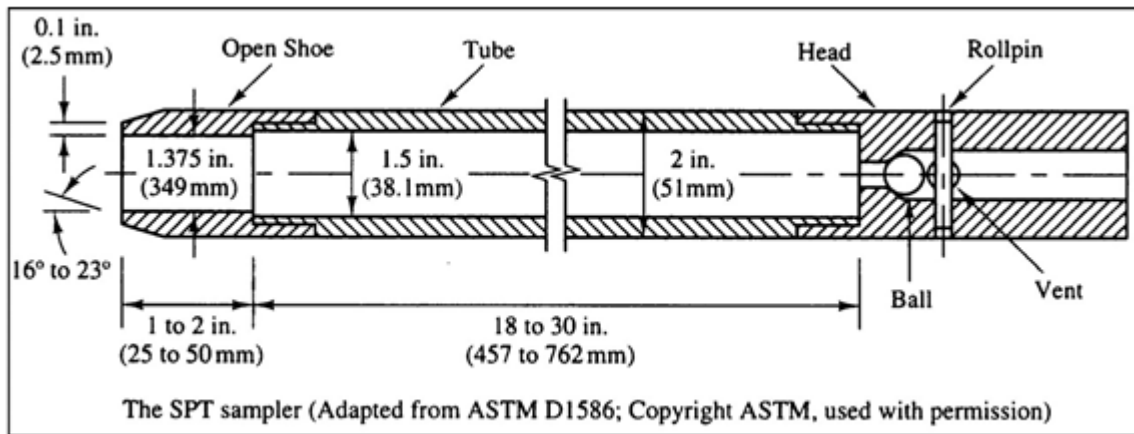


Ilustración 15. Muestreador o toma muestras (American Society of Testing Materials, 2020).

La energía para hincar el tubo se consigue mediante una maza de 63,5 Kg (Véase Ilustración #16) que cae desde 76 cm de altura sobre un yunque (caída libre, sin aceleración inicial), unida al varillaje que transmite el golpe a la punta (sea dividida o sólida), situado este en el fondo de la perforación.

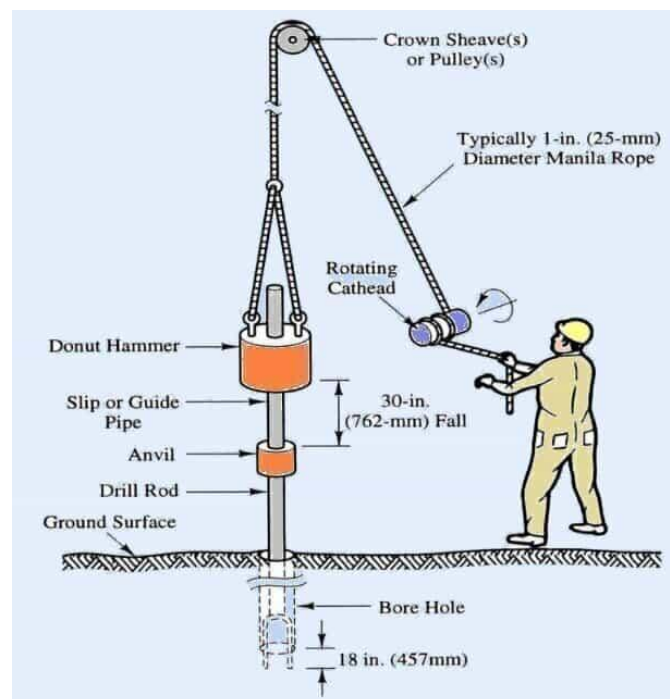


Ilustración 16. Procedimiento de hincado de tomamuestras (American Society of Testing Materials, 2020).

La longitud de la hinca es de 45 cm, dividida en tres tramos de 15cm, para cada uno de los cuales se toma nota del número de golpes necesarios para alcanzar esa profundidad. El primer conteo, correspondiente a la hinca del primer tramo de 15cm, se desprecia, pues el fondo de la perforación puede encontrarse alterado por la ejecución del sondeo. Tal como se muestra en la imagen número 17, el resultado del ensayo corresponde a la suma de los conteos de la segunda y tercera tanda (30 cm).

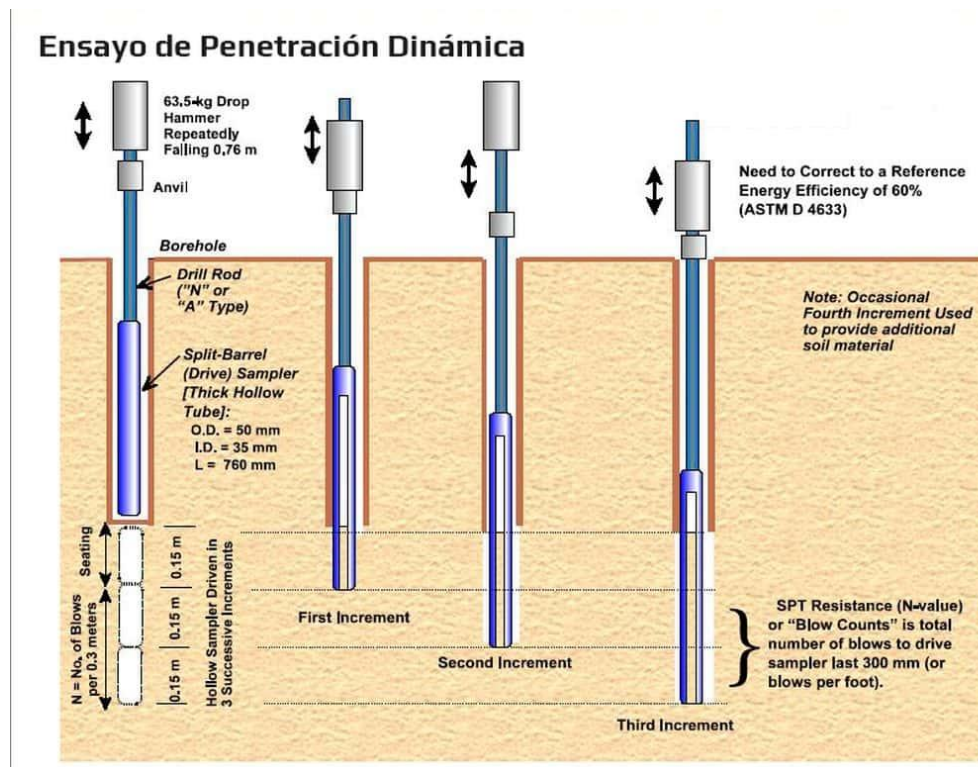


Ilustración 17. Modo de muestreo de suelos (American Society of Testing Materials, 2020).

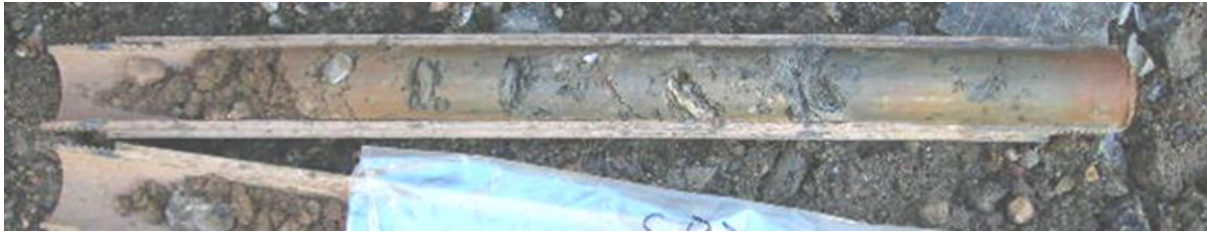


Ilustración 18. Muestra de suelo obtenida por medio del ensayo SPT (American Society of Testing Materials, 2020).

En la Imagen N. 18, se puede observar una muestra obtenida de un ensayo SPT hincado a 60cm de profundidad. Es común que no se alcance a llenar todo el muestreador pues la resistencia de la muestra a la fricción o la adhesión de las paredes interiores del toma muestras supera la resistencia a la penetración de la punta.

Para evitar la caída de la muestra del tubo en operaciones bajo el nivel freático por empuje del agua se coloca en la parte superior del toma muestras una válvula de bola (Véase Imagen N. 19, “ball”) que hace asiento en la cabeza del tubo e impide que el agua descienda y presione la muestra; por encima de la bola se ubican dos agujeros por donde se expulsa el agua.



Ilustración 19. Despiece completo del toma muestras SPT (American Society of Testing Materials, 2020).

La punta ciega cónica se utiliza en el ensayo de suelos de granulometría muy gruesa (gravas) o muy duros (rocas blandas), donde resulta inviable la recuperación de muestra, o

donde el toma muestras estándar podría resultar dañado (American Society of Testing Materials, 2020).

Cómo se puede observar en la Norma ASTM D 1586, existe un muy específico procedimiento para realizar la prueba SPT. No obstante, la norma no indica cuántas perforaciones se deben hacer por metro cuadrado, por complejidad de construcción, o cualquier otro tipo de variable en que se pueda pensar.

Comercialmente hablando, en Costa Rica, los laboratorios dedicados al análisis de suelos, tienden a recomendar una cantidad de perforaciones que va entre los 10 y 12 por cada seis mil metros cuadrados de construcción. También es común que la asesoría para proyectos de menos envergadura, como una casa de habitación, se recomienden cinco perforaciones, distribuidas en las cuatro esquinas del terreno (o lo más aproximado dependiendo la forma del lote) y una en el centro.

El código de cimentaciones de Costa Rica (2002), en el capítulo 2, cuadro 2.1, hace una recomendación respecto a la cantidad mínima de perforaciones según magnitud de la obra y complejidad geotécnica. No obstante, su cuarta magnitud de obra sería la especial, indicando esta: que el profesional a cargo deberá definir el nivel de exploración geotécnica necesaria (Código de Cimentaciones de Costa Rica, 2002).

Cuadro 2.1	Requisitos para la exploración de campo					
Magnitud de la obra	Complejidad geotécnica					
	Baja		Media		Alta	
Baja	Nmín:	2	Nmín:	3	Nmín:	4
	E máx:	60m	E máx:	40m	E máx:	30m
	P mín:	Df + 2m	P mín:	Df + 3m	P mín:	Df + 4m
Media	Nmín:	2	Nmín:	3	Nmín:	4
	E máx:	50m	E máx:	35m	E máx:	25m
	P mín:	Df + 3m	P mín:	Df + 3m	P mín:	Df + 4m
Alta	Nmín:	2	Nmín:	3	Nmín:	4
	E máx:	40m	E máx:	30m	E máx:	20m
	P mín:	Df + 4m	P mín:	Df + 3m	P mín:	Df + 5m
Especial	La campaña de exploración de campo depende del proyecto y será definida por el ingeniero geotecnista					

Tabla 1. Cuadro 2.1, Requisitos para la exploración de campo (Código de Cimentaciones de Costa Rica, 2002).

Siendo:

N mín: Número mínimo de perforaciones o puntos de exploración.

E Máx: Espaciamiento máximo entre puntos de sondeo, en metros.

P mín: Profundidad mínima de los sondeos, en metros.

Df. Profundidad de desplante estimada de cimentaciones, en metros.

Para efectos de la implementación del sistema constructivo *Top-Down* de estacionamiento subterráneo con tablestaca, se usará la prueba de penetración estándar o SPT, como estudio de suelos; esta prueba arroja un número N de golpes y con estos es posible generar correlaciones matemáticas en la toma de los valores como: ángulo de fricción (ϕ), capacidad soportante del suelo (σ_{perm}), profundidad de nivel freático, peso volumétrico (γ) de los estratos de suelo. Lo cual será usado para el diseño de cimentaciones y de la tablestaca.

El presente estudio contará, a manera de ejemplo, con el diseño estructural de un edificio con cuatro pisos de superestructuras y dos subniveles para parqueo. Con una huella de 100m², 10m de lado, lo cual lo hace una estructura simétrica.

La distribución de las perforaciones se recomienda que se realice como se muestra en la ilustración número 10. En total se deberían hacer 5 perforaciones. De la uno a la cuatro, tendrán el objetivo de explorar el terreno donde serán hincadas las tablestacas perimetrales, y la número cinco va a coincidir con la columna que tendrá la mayor área tributaria de cargas axiales, situada al centro de la edificación.

En el caso de trabajar con un edificio asimétrico, se recomienda hacer que las perforaciones calcen con la o las columnas críticas. Además, el distanciamiento entre perforaciones de una misma línea, no debería superar los 30 metros de distancia, según lo indica la tabla número 2.1 de (Código de Cimentaciones de Costa Rica, 2002).

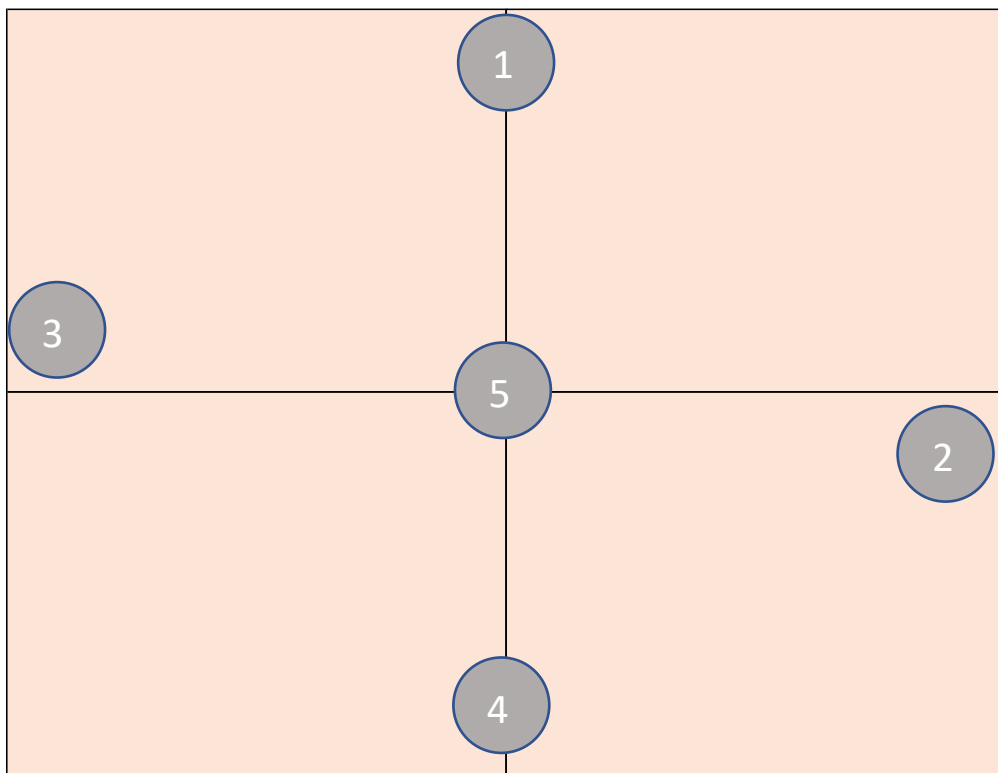


Ilustración 20. Distribución de perforaciones para estudio SPT.

Profundidad de perforación

En el caso expuesto, contará con dos subniveles de sótano, así que se deberá llegar a la profundidad de cimentación de la estructura. Usando la tabla número 1 (Código de Cimentaciones de Costa Rica, 2002), se tomarán los datos de la siguiente forma:

Magnitud de obra: Alta

Complejidad geotécnica: Alta.

Lo cual indica usar: $D_f + 5m$. Siendo D_f , la profundidad de desplante de la cimentación. Tomando en cuenta que los suelos tienden a mejorar conforme se profundiza y sabiendo que se deberá extraer gran cantidad de material, los dos subniveles propuestos de 3.5m de altura cada uno (7m en total), se usará la siguiente ecuación para definir la profundidad del estudio SPT:

$7m + \text{altura de la pila} = \text{Profundidad requerida del SPT}$.

Para saber datos y procedimiento de diseño de la pila de fundación, ver el marco metodológico.

El suelo que se requiere conocer sus propiedades físico mecánicas, inicia a partir de 7m de profundidad y va hasta la altura de la pila requerida. Esta específica situación requiere de combinar el sistema rotacional con el STP. Es decir, se debe perforar hasta los 7m de profundidad (coincidiendo con la profundidad de sótano), y luego iniciar con la prueba geotécnica. No obstante, también será requerido saber el tipo de suelos donde será hincada la tablestaca, así que se deben sacar núcleos de las perforaciones 1 a la 4 (Véase Ilustración N. 20).

Parámetros de mayor importancia

Ángulo de fricción ϕ

El ángulo de fricción interno del suelo es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física. El ángulo de fricción en suelos granulares secos coincide con el ángulo de reposo. Todos los suelos poseen fricción.

El ángulo de fricción depende de una gran cantidad de factores. Algunos son:

- Tipo de mineral constitutivo de las partículas.
- Tamaño de los granos o partículas. A mayor tamaño de partículas es mayor ϕ .
- Forma de los granos o partículas. ϕ es mayor para partículas angulosas.
- Distribución de los tamaños de granos o partículas. En suelos bien gradados, ϕ es mayor que en suelos uniformes.
- Fábrica o microestructura (organización de las partículas).
- Densidad.
- Permeabilidad (facilidad de drenaje).
- Presión normal, o de confinamiento.
- Presión de pre consolidación.
- Tipos y condiciones de carga que llevan a la falla.
- El ángulo de fricción es el resultado de la combinación

El ángulo de fricción es el resultado de la combinación de todos los factores. Por ejemplo, el ángulo de fricción es mayor al aumentar la densidad; pero, si las presiones normales son muy altas, el ángulo de fricción tiende a disminuir. En arcillas el ángulo de fricción efectivo depende de las condiciones de pre-consolidación.

Cohesión c

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión del terreno en la mecánica de suelos es la cualidad por la cual las partículas del terreno se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas, que dependen, entre otras cosas, del número de puntos de contacto que cada partícula tiene con sus vecinas.

En consecuencia, la cohesión es mayor cuanto más finas son las partículas del terreno. En los suelos no saturados se puede dar el fenómeno de “cohesión aparente”. Esta cohesión es producida por las fuerzas capilares entre partículas de suelo: la tensión debida a la succión del agua en los poros produce un fenómeno de adherencia entre partículas por presión negativa o fuerzas capilares.

Simplificando el concepto, el cual también es el utilizado comúnmente, en suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a cero y a estos suelos se les denomina suelos friccionantes o “no cohesivos” ($C = 0$).

Estudios prácticos de correlación en arcillas

Estudiosos en geotécnica se han dedicado a establecer teorías, pruebas y correlaciones que relacionen características propias de la prueba SPT con las características geomecánicas del suelo en estudio.

Fletcher (1965), reporta que el factor humano; es decir, la habilidad de los perforadores no es un aspecto que afecte de forma considerable los datos obtenidos.

Pruebas realizadas por Gibbs y Holtz en 1957 indica, que el largo de la varilla de penetración no tiene gran importancia en los resultados obtenidos al final.

En 1948, Terzaghi y Peck encontraron relaciones entre los valores NSPT, la consistencia del suelo y la resistencia a la compresión simple. Para obtener estas relaciones, se realizaron pruebas estándar en estratos accesibles donde se pueden obtener muestras de suelo inalteradas, confiables, y a las que se les pueda determinar los valores de los conceptos señalados por los métodos usuales de laboratorio. Haciendo suficiente número de pruebas y comparaciones se pueden obtener correlaciones con alto grado de confiabilidad estadística.

EL siguiente cuadro muestra la correlación para pruebas en arcillas según Terzaghi y Peck (1948).

Consistencia	No. De golpes N_{spt}	Resistencia a la compresión simple
Muy blanda	<2	<0.25
Blanda	2 – 4	0.25 – 0.50
Media	4 – 8	0.50 – 1
Firme	8 – 15	1 – 2
Muy firme	15 – 30	2 – 4
Dura	>30	>4

Metodología de diseño usada para la superestructura

Todos los elementos serán diseñados mediante la metodología establecida en el AISC 360-10 (AISC-360-10) tomando en cuenta elementos en flexión y compresión específicamente los capítulos E y F.

Diseño de elementos en flexión

Las longitudes no arriostradas L_b , serán definidas a partir de la longitud entre bracones o clavadores según sea el caso.

La capacidad nominal en flexión de una sección “w” doblemente simétrica y que cumpla con las ecuaciones anteriores es:

$$\phi M_n = \phi f_y Z_x \quad (1)$$

Donde:

$$\phi: 0.9$$

Z_x : es del módulo plástico de sección con respecto al eje x .

Sin embargo, dependiendo de la luz libre, o longitud no abrazada de la sección sometida a flexión, la capacidad se reduce, debido al pandeo lateral torsional, por lo que debe revisarse

este estado límite. Para ello, la longitud no abrazada debe clasificarse en tres zonas. La capacidad de la sección se calcula según dónde se encuentre (AISC, 360-10 Specification for Steel Structural Building, 2010).

Zona 1

Se le denomina zona de pandeo plástico. En ella se encuentran las secciones cuya longitud no abrazada, l_b , sea menor que l_p , siendo:

$$L_p = 1.7R_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2)$$

De esta manera, la capacidad nominal se calcula con la ecuación

$$\phi M_n = \phi f_y Z_x$$

Zona 2

A esta zona, por el comportamiento que presenta una sección en ella, se le denomina zona de pandeo inelástico. En ella se encuentran las secciones tales que:

$$L_p < L_b < L_r$$

$$L_r = 1.95r_{ts} * \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{J_c}{S_{xho}} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{S_{xho}}\right)^2 + \left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \quad (3)$$

Donde:

$c = 1$ para secciones doblemente simétricas

h_o , es la distancia entre centroides de las alas

J , es el momento polar de inercia

S_x , es el módulo de sección respecto al eje x

E , es el módulo de elasticidad del acero

$F_r = 0.3F_y$. Es el esfuerzo residual en compresión del ala

I_y , es el momento de inercia respecto al eje y

cb , es el gradiente de momento.

Para la Zona 2, la capacidad en flexión es

$$\phi M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_r} \right) \right] \leq \phi M_p \quad (4)$$

Para el cálculo del gradiente de momento el, AISC 360-10 establece la siguiente ecuación:

$$C_b = \frac{12.5M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_a + 4M_b + 3M_c} \quad (5)$$

Donde:

M_{max} , valor absoluto del miembro máximo dentro de un segmento sin arriostrar de la viga.

M_A , valor absoluto a $\frac{1}{4}$ del segmento.

M_B , valor absoluto a $\frac{1}{2}$ del segmento.

M_C , valor absoluto a $\frac{3}{4}$ del segmento.

No se realizará ningún diseño en Zona III.

Diseño en compresión

Cálculo del esfuerzo crítico F_{cr} . Una vez obtenidos los valores anteriores, se calcula el esfuerzo crítico al considerar los efectos de la esbeltez de los elementos:

$$\text{Si } \frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow F_{cr} = \left(0.658 \frac{F_y}{F_e}\right) F_y \quad (6)$$

$$\text{Si } \frac{KL}{r} \geq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow F_{cr} = 0.877 F_e \quad (7)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (8)$$

Cálculo de la capacidad nominal

La capacidad nominal en compresión de la sección se calcula con la ecuación:

$$\phi P_n = \phi F_{cr} A_g \quad (9)$$

Este procedimiento se realizará para el diseño de vigas y columnas.

Metodología de diseño de tablestaca en voladizo en suelos arcillosos

Procedimiento para obtener el diagrama de presión (Das, 2012)

Paso #1

Utilizando la ecuación número 1, se calcula el coeficiente de presión activa de Rankine

K_a .

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\sigma'}{2}\right) \quad (10)$$

Paso #2

Calcular la intensidad de las presiones netas σ'_1 y σ'_2 . Utilizando las ecuaciones 3 y 4.

$$\sigma'_1 = \gamma L_1 K_a \quad (11)$$

$$\sigma'_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a \quad (12)$$

Paso #3

Se calcula la magnitud de P_1 (ecuación número 5), el área del diagrama de presión ACDE y \bar{Z}_1 (ecuación número 12) distancia del centro de presión ACDE. Medida desde el nivel de excavación.

$$P_1 = \frac{1}{2} \sigma'_1 L_1 + \sigma'_1 L_2 + \frac{1}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_1) L_2 \quad (13)$$

$$Z' = \frac{P_1}{\sigma_7} \quad (14)$$

Paso #4

Se calcula el valor de profundidad teórica de empotramiento, utilizando la ecuación número 7.

$$D = \frac{D^2(4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2))}{4c} - 2DP_1 - \frac{P_1(P_1 + 12c\bar{Z}_1)}{(\gamma L_1 + \gamma' L_2) + 2c} \quad (15)$$

Paso #5

Se calcula la longitud de L_4 .

$$L_4 = \frac{D(4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)) - P_1}{4c} \quad (16)$$

Paso #6

Calcular la presión neta de izquierda a derecha (ecuación número 9) σ_6 y presión neta de izquierda a derecha (ecuación número 10) σ_7 .

$$\sigma_6 = 4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2) \quad (9)$$

$$\sigma_7 = 4c + (\gamma L_1 + \gamma' L_2) \quad (17)$$

Paso #7

Es momento de dibujar el diagrama de distribución de la presión. Véase Imagen N. 21 como referencia.

Paso #2

Obtenido Z' , se puede calcular la magnitud del momento máximo con la ecuación número 13.

$$M_{m\acute{a}x} = P_1(Z' + \bar{Z}_1) - \frac{\sigma_7 Z'^2}{2} \quad (20)$$

Una vez que se conoce el momento flexionante máximo, es posible determinar el módulo de la sección de la tablestaca, utilizando la ecuación número 14.

$$S = \frac{M_{m\acute{a}x}}{\sigma_{perm}} \quad (21)$$

Una vez obtenido el módulo de la sección, se pueden consultar los manuales de producto de los fabricantes de tablestaca. Solamente a nivel de ejemplo, la tabla número 2, muestra la forma en que la empresa Skyline muestra la información técnica de sus productos.

producto	ancho (mm)	Altura (mm)	Espesor		Sección transversal (cm ² /m)	Peso (Kg/m ²)	Módulo de sección		Momento de inercia Cm ⁴ /m
			Patín (mm)	Alma (mm)			Elástico (cm ³ /m)	Plástico (cm ³ /m)	
NZ14	770	340	9.5	9.5	135.4	106.3	1379	1640	23447

Tabla 2. Manual técnico de productos Skyline Nucor (Skyline, 2019).

Tablestaca en voladizo que penetran suelos arenosos

Método de diseño del nivel de empotramiento de la tablestaca en suelos arenosos (Das, 2012).

Vea imagen número 22, para ubicar fuerzas y dimensiones.

Vea procedimiento de empotramiento en suelos arcillosos para mayor de talle de los valores obtenidos y nomenclatura por las siguientes ecuaciones.

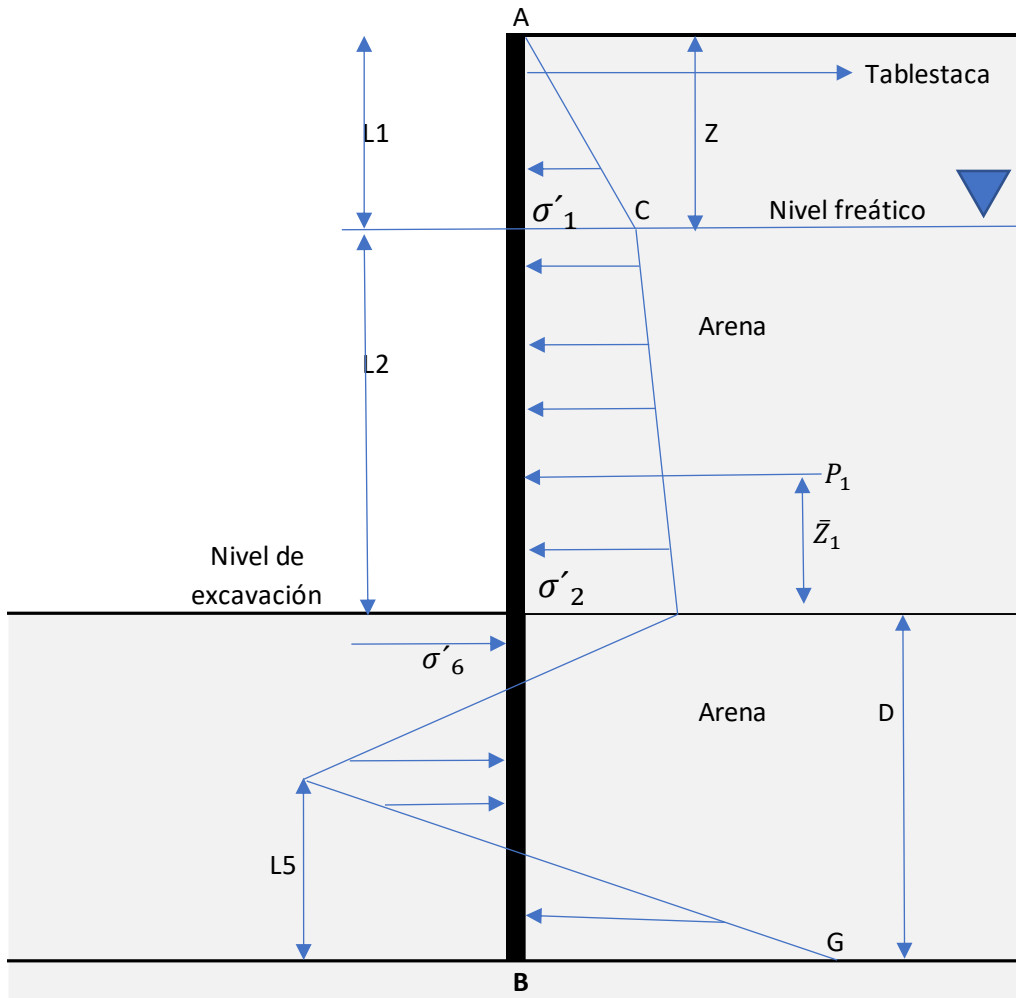


Ilustración 22. Tablestaca empotrada en suelo arenoso.

Hallar K_a ,

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (22)$$

Hallar K_p ,

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) \quad (23)$$

Hallar σ'_1 y σ'_2

$$\sigma'_1 = \gamma L_1 K_a \quad (24)$$

$$\sigma'_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a \quad (4)$$

Hallar distancia L3

$$\sigma'_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a \quad (4)$$

Hallar P

$$P_1 = \frac{1}{2} \sigma'_1 L_1 + \sigma'_1 L_2 + \frac{1}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_1) L_2 + \frac{1}{2} \sigma'_1 L_3$$

Hallar la profundidad \bar{Z}_1

$$\bar{Z}_1 = \frac{\sum M}{P_1} \quad (6)$$

Hallar σ'_5

$$\sigma'_5 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_p + \gamma' L_3 (K_p - K_a)$$

Hallar distancia L4

$$L_4^4 + A_1 L_4^3 - A_2 L_4^2 - A_3 L_4 - A_4 = 0$$

Donde:

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

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

$$A_3 = \frac{6P(2\bar{Z}\gamma(Kp - Ka) + \sigma'_5)}{\gamma'^2(Kp - Ka)^2}$$

$$A_4 = \frac{P(6\bar{Z}\sigma'_5 + 4P)}{\gamma'^2(Kp - Ka)^2}$$

La profundidad de empotramiento teórico es

$$D_{teórica} = L_3 + L_4$$

Entonces el largo total de la tablestaca es

$$L_1 + L_2 + 1.3(L_3 + L_4)$$

Obtenidos los valores anteriores, se puede calcular el momento flexionante máximo y el módulo de elasticidad requerido de la tablestaca para poder seleccionar la tablestaca correcta para la aplicación buscada.

$$Z' = \sqrt{\frac{2P}{(Kp - Ka)\gamma'}}$$

$$P(\bar{Z} + Z') - \left(\frac{1}{2}\gamma'Z'^2(Kp - Ka)\right)\frac{Z'}{3}$$

El módulo elástico de la sección sería:

$$S = \frac{M_{máx}}{\sigma_{perm}}$$

Listado de ecuaciones utilizadas

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (1)$$

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

$$\sigma'_1 = \gamma L_1 K_a \quad (3)$$

$$\sigma'_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a \quad (4)$$

$$P_1 = \frac{1}{2} \sigma'_1 L_1 + \sigma'_1 L_2 + \frac{1}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_1) L_2 \quad (5)$$

$$\bar{Z}_1 = \frac{\sum M}{P_1} \quad (6)$$

$$D = D^2(4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)) - 2DP_1 - \frac{P_1(P_1 + 12c\bar{Z}_1)}{(\gamma L_1 + \gamma' L_2) + 2c} \quad (7)$$

$$L_4 = \frac{D(4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)) - P_1}{4c} \quad (8)$$

$$\sigma_6 = 4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2) \quad (9)$$

$$\sigma_7 = 4c + (\gamma L_1 + \gamma' L_2) \quad (10)$$

$$D_{real} \approx 1.5D_{teórica} \quad (11)$$

$$Z' = \frac{P_1}{\sigma_7} \quad (12)$$

$$M_{máx} = P_1(Z' + \bar{Z}_1) - \frac{\sigma_7 Z'^2}{2} \quad (13)$$

$$S = \frac{M_{máx}}{\sigma_{perm}} \quad (14)$$

$$\sigma_p = [\gamma L_1 + \gamma' L_2 + \gamma' D] + 2c \quad (15)$$

$$FS = V \frac{W_i h_i}{\sum_{K=1}^N W_k h_K} \quad (16)$$

$$C = \frac{a_{ef} * i * FED}{SR} \quad (17)$$

$$V = C * W \quad (18)$$

$$Mu = \frac{Wl^2}{8} \quad (19)$$

$$mu = \phi f_y Z_x \rightarrow Z_x = \frac{mu}{\phi f_y} \quad (20)$$

$$\phi P_n = \phi 0.8 [0.85 F'_c (A_g - A_{st})] + F_y A_{st} \quad (21)$$

$$A_g = \frac{\pi\phi^2}{4} \rightarrow \sqrt{\frac{4 * A_g}{\pi}} = \phi \quad (22)$$

$$\rho_s = \frac{0.12f'_c}{f_{yh}} \quad (23)$$

$$\rho_s = \frac{0.45f'_c}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \quad (24)$$

$$S_0 = 10 + \left(35 - \frac{h_x}{3} \right) \quad (25)$$

$$Q_{\text{última}} = \frac{\pi\Phi h C'}{FS} + \frac{Ab C' \pi}{FS} \quad (26)$$

$$Q_p = A_p C_u N_c \quad (27)$$

$$Q_s = \alpha_* P_p (C_{u1} L1 + C_{u2} L2) \quad (28)$$

$$Q_w = \frac{Q_p + Q_s}{FS} \quad (29)$$

$$\alpha_* = 0.21 + 0.25 \left(\frac{P_a}{C_u} \right) \leq 1 \quad (30)$$

$$\phi Mn = \phi f_y Z_x \quad (31)$$

$$L_p = 1.7R_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (32)$$

$$L_r = 1.95r_{ts} * \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{J_c}{S_{xho}} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{S_{xho}}\right)^2 + \left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \quad (33)$$

$$\phi M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq \phi M_p \quad (34)$$

$$\text{Si } \frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow F_{cr} = \left(0.658 \frac{F_y}{F_e} \right) F_y \quad (35)$$

$$\text{Si } \frac{KL}{r} \geq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow F_{cr} = 0.877 F_e \quad (36)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} \quad (37)$$

$$\phi P_n = \phi F_{cr} A_g \quad (38)$$

$$C_b = \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_a + 4 M_b + 3 M_c} \quad (39)$$

$$L_3 = \frac{\sigma_2}{\gamma' (K_p - K_a)} \quad (40)$$

Maquinaria recomendada para el proceso constructivo.

Hincado de tablestaca

El vibrohincador es el accesorio encargado de generar la vibración para lograr que la tablestaca penetre el suelo (Ilustración N. 23). Esta técnica de hincado se basa en la reducción de la fricción de las partículas del terreno por medio de la vibración. Es tan eficiente que la velocidad con que se hincan es muy alta, solo algunos segundos por metro lineal de la tablestaca, dependiendo del suelo.

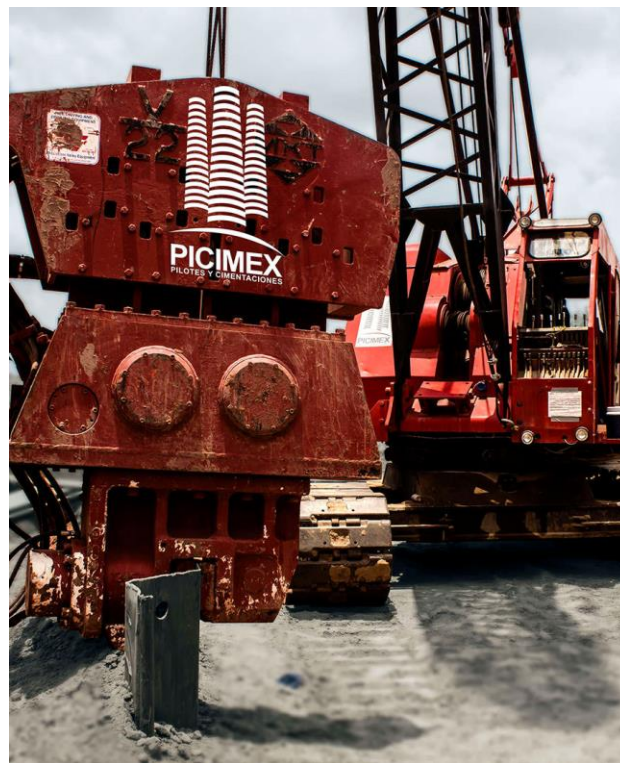


Ilustración 23. Vibrohincador (Codocsa, 2020).

Los hay eléctricos, neumáticos e hidráulicos. Siendo el hidráulico el más usado, por su simplicidad de operación. Además, los hidráulicos no requieren de equipo adicional, como compresores, generadores eléctricos, o plantas de energía hidráulica, ya que usan las mismas funciones hidráulicas que la máquina trae.

Un vibrohincador es capaz de generar frecuencias desde los 5Hz hasta los 110Hz. Este proceso puede usarse en suelos granulares o cohesivos, saturados o secos, usando frecuencias menos altas en suelos arenosos y mayores en arcillas.

El vibrohincador se usa tanto para hincar como para extraer las tablestacas si fuese necesario.

Para el proceso de hincado se necesita una sola máquina. Donde estará instalado el vibrohincador. Puede ser una grúa móvil autopropulsada en sitio, como la de la Imagen 24. En este caso, es necesario utilizar una fuente de poder hidráulico externa, ya que la grúa no posee líneas hidráulicas que viajen junto con los cables de sujeción.



Ilustración 24. Grúa autopropulsada en sitio de construcción (*Nanjing Grand Steel Piling*, 2020).

En la Ilustración N. 25, vemos otro tipo de grúa autopropulsada, que también podría usarse para el proceso de hincado, siempre que se use una planta de energía hidráulica externa.



Ilustración 25. Grúa autopropulsada en carretera (*Nanjing Grand Steel Piling*, 2020).

También es muy común el uso de excavadoras. Algunas preparadas de fábrica como la de la Ilustración N. 26. Es decir, pensadas solamente para el proceso de hincado.



Ilustración 26. Excavadora con vibrohincador (*TIEFBAUTECHNIK*, 2020).

No obstante, el vibrohincador es un simple accesorio hidráulico, así que se puede montar y remover de sencilla manera, en cualquier equipo que tenga líneas hidráulicas.

Una vez que está suspendida, la tablestaca debe alinearse para que calce con las líneas de unión o “machimbrado”, siempre cuidando el nivel en los dos ejes.

En la Ilustración N. 27, la tablestaca está suspendida por una grúa móvil y se procede a alinearle con el “machimbrado”.



Ilustración 27. Alineamiento de la tablestaca (*Shunli Steel Group*, 2015).

Para efectos de hincado de la tablestaca, el proceso podría ser tan eficiente como el de usar solamente una excavadora y una planilla de dos trabajadores, uno como operario de la excavadora y otro alineando la tablestaca a la hora de colocarla. En la Ilustración N. 28, se puede ver el proceso.



Ilustración 28. Colocación de tablestaca (*Heavy Construction Equipment Channel*).

El mercado costarricense tiene varias opciones de empresas que se dedican a la hincado de tablestaca y/o pilotes. Como referencia, se puede analizar la empresa CODOCSA (Codocsa, 2020), da el servicio de hincado de tablestaca con las máquinas descritas en esta sección.

Maquinaria recomendada para perforación de las pilas de fundación

En el mercado de perforaciones existen gran variedad de maquinaria. Típicamente se pueden perforar agujeros desde 0.4m hasta 3m de diámetro, y a profundidades que llegan a los 60m, para mencionar solo los equipos portátiles. Además, que existen herramientas para

hacer perforaciones acampanadas en el fondo, lo cual aumenta el área de contacto en punta de la pila o zapata.

Es posible que sea necesario encamisar la perforación para evitar el desprendimiento de material hacia el fondo del agujero. Si fuese así, los cilindros de acero utilizados son totalmente recuperables. Sea inmediato luego de colar la cimentación, o de previo al inicio de la excavación por subniveles.



Ilustración 29. Perforadoras para pilotes o pilas (Codocsa, 2020).

Recomendación para el colado de pilas y colocado de columnas

La cimentación de un edificio que utiliza el sistema constructivo *Top-Down* de estacionamiento subterráneo con tablestaca, no deja al descubierto el área de cimentación, es decir, no tiene una excavación masiva del sótano a cielo abierto. Por lo tanto, para esta tesis se usarán como ejemplo práctico pilas de fundación, cuyo procedimiento de instalación se recomienda de manera rápido en este apartado.

Cabe indicar que no es objetivo de esta investigación el análisis operativo de la instalación de columnas y pilas de fundación.

En el marco metodológico, se puede examinar el detalle del diseño de las pilas. Se requiere unir cada columna junto con la placa de unión a la armadura de acero, tal como se puede visualizar en la imagen número 31, bajarla por el agujero previamente hecho.

Seguidamente se cuela el concreto en el agujero donde ya estará la columna nivelada y la altura precisa. Es recomendable usar un conducto de caída como se aprecia en la ilustración número 30.

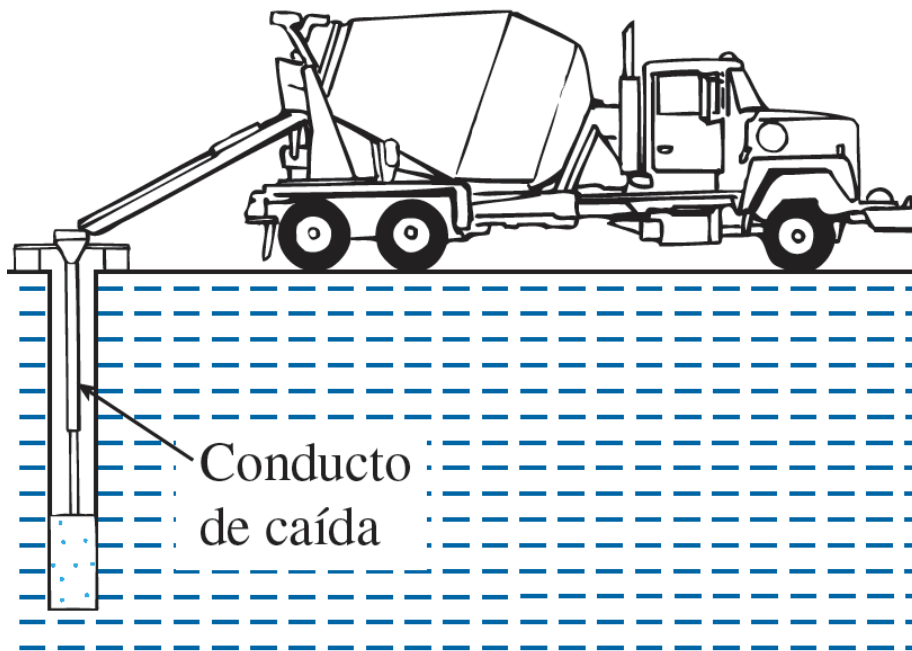


Ilustración 30. Conducto de caída para cimentación profunda.

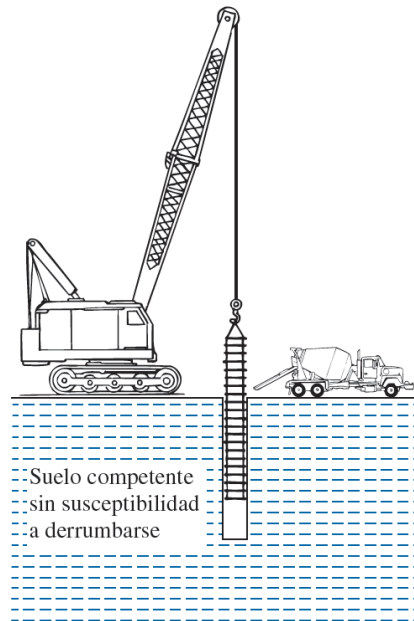


Ilustración 31. Colocado de vigas junto con armadura.

Maquinaria recomendada para el proceso de extracción de material en los subniveles de sótano

El sistema de construcción *Top-Down* de estacionamiento subterráneo con tablestaca tiene la particularidad que la extracción de material del sótano se hace de un subnivel a la vez, mediante un proceso simple y seguro. Así las cosas, se tendría solamente alrededor de 3,5m de altura libre para la excavación. Esta limitante en la altura hace necesario usar miniexcavadoras para la extracción de material. Actualmente, el mercado cuenta con gran variedad de equipo para alquiler y venta de estas máquinas. Se recomienda revisar la página

web de la empresa luma Systems (Aluma Systemas, s.f.), la cual dispone de todo el equipo necesario para cubrir las necesidades del proceso constructivo.

La empresa Payer ingeniería del suelo, subsuelo y arquitectura, construyó en Navarra España, un edificio de apartamentos, utilizando el sistema Top-down. En la ilustración número 32 se aprecia una miniexcavadora trabajando en uno de los subniveles de sótano (Payer, 2014).



Ilustración 32 (Payer, 2014).

CAPÍTULO III:
MARCO METODOLÓGICO

Diseño de la superestructura

Capacidad nominal en flexión de una sección W16x45, utilizada como columnas para toda la estructura.

Datos del perfil		
Mux	4.24	Tonf
Zx	82.3	In3
Fy	50	Ksi
Rx	6.65	In3
j	1.11	in
c	1	
Sx	72.7	in
ho	15.6	in
rts	1.88	in
E	29000	Ksi
Lb	137.80	in
Lb	3.5	m
ø	0.9	
cb	1	
Ry	1.57	in3

Datos obtenidos de SAP2000		
Pu	167.89	tonf
Mx	4.24	tonf
My	0.87	tonf

Capacidad nominal en flexión en el eje X, de un sección W16x45

$$\phi M_n = \phi f_y Z_x \quad 3,703.50 \text{ Ksi} \quad 42.59 \text{ Ton*m}$$

Verificar Zona 1

Se le denomina zona de pandeo plástico. Aquí se encuentran las secciones cuya longitud no abrazada, L_b , sea menor que L_p , siendo L_p :

$$L_p = 1.76 R_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad L_p = 66.55 \text{ in}$$

Verificar zona 2

Zona de pandeo inelástico. Se encuentran las secciones tales que: $L_p < L_b < L_r$

$$L_r = 1.95 r_{ts} * \frac{E}{0.7 F_y} \sqrt{\frac{J_c}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7 F_y}{E}\right)^2}}$$

$L_r = 198.39 \text{ in}$

Para la zona 2, la capacidad en flexión es

$$M_p = F_y Z_x \quad 4,115.00 \text{ Kips*in} \quad 232.27 \text{ ton*m}$$

$$\phi M_n = \phi C_b \left[M_p - (M_p - 0.7 F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq \phi M_p$$

$$\phi M_n = 1,237.55 \text{ kips*in} \quad 14.23 \text{ ton*m}$$

Datos del perfil		
Zy	14.5	ln3
Fy	50	Ksi
Ry	1.57	ln3
j	1.11	in
c	1	
Sy	9.34	in
ho	15.6	in
rts	1.88	in
E	29000	Ksi
Lb	137.80	in
Lb	3.5	m
ø	0.9	
cb	1	
Rx	6.65	in
Pu	117	tonf
Mx	4.24	tonf
My	0.87	tonf

Capacidad nominal en flexión en el eje Y, de un sección W16x45

$$\phi Mn = \phi f_y Z_y \quad 652.50 \text{ Ksi} \quad 7.50 \text{ Ton*m}$$

Verificar Zona 1

Se le denomina zona de pandeo plástico. Aquí se encuentran las secciones cuya longitud no abrazada, Lb, sea menor que Lp, siendo Lp:

$$Lp = 1.76 R_x \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad Lp = 281.87 \text{ in}$$

Verificar zona 2

Zona de pandeo inelástico. Se encuentran las secciones tales que: $Lp < Lb < Lr$

$$Lr = 1.95 r_{ts} * \frac{E}{0.7 F_y} \sqrt{\frac{Jc}{Sxho} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{Sxho}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7 F_y}{E}\right)^2}}$$

$$Lr = 382.51 \text{ in}$$

Diseño de columna en compresión

L	137.8	in
K	1	
Ry	1.57	in
E	29000	Ksi
Fy	50	KSi
Ø	0.9	
A	13.3	in ²

Fuerza axial

$$\frac{KL}{Ry} = 87.77$$

Esfuerzo al pandeo elástico

$$Fe = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad Fe = 37.12$$

Cálculo del esfuerzo crítico Fcr

Una vez obtenidos los valores anteriores, se calcula el esfuerzo crítico al considerar los efectos de la esbeltez de los elementos:

$$4.71 \sqrt{\frac{E}{Fy}} = 113.43$$

$$Si \frac{Kl}{Ry} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{Fy}} \rightarrow Fcr = \left[0.658 \frac{Fy}{Fe}\right] Fy \quad Fcr = 28.45$$

$$Si \frac{Kl}{r} \geq 4.71 \sqrt{\frac{E}{Fy}} \rightarrow Fcr = 0.877 Fe \quad Fcr =$$

Cálculo de la capacidad nominal

La capacidad nominal en compresión de la sección se calcula con la ecuación

$$\phi P_n = \phi F_{cr} A_g$$

$$\begin{array}{ll} 340.56 & \text{Kips} \\ 3.92 & \text{Tonf} \end{array}$$

$$F_{cr} \text{ utilizado} \quad 28.45$$

$$P_u = \quad 117 \text{ Tonf}$$

$$\frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2 \quad 29.87$$

$$\frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2$$

Comprobación de flexocompresión

$$\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \right) \leq 1.0 \quad 30.24$$

$$\frac{P_u}{2\phi P_n} \left(\frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \right) \leq 1.0 \quad 15.30$$

Capacidad nominal en flexión para una viga con sección W12x16

Datos		
Mux	4.24	Tonf
Zx	20.1	In3
Fy	50	Ksi
RY	0.773	In3
j	0.103	in
c	1	
Sx	17.1	in
ho	11.7	in
rts	0.982	in
E	29000	Ksi
Lb	78.74	in
Lb	2	m
ø	0.9	
cb	1	

Capacidad nominal en flexión para una viga con sección W12x16

$$\phi Mn = \phi f_y Z_x \quad 904.50 \text{ Ksi} \quad 10.40 \text{ Ton*m}$$

Verificar Zona 1

Se le denomina zona de pandeo plástico. Aquí se encuentran las secciones cuya longitud no abrazada, Lb, sea menor que Lp, siendo Lp:

$$L_p = 1.76 R_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad L_p = \quad 32.76$$

Verificar zona 2

Zona de pandeo inelástico. Se encuentran las secciones tales que: $L_p < L_b < L_r$

$$L_r = 1.95 r t s * \frac{E}{0.7 F_y} \sqrt{\frac{J_c}{S_x h o} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{S_x h o}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7 F_y}{E}\right)^2}}$$

$$L_r = \quad 96.44 \quad \text{in} \quad \quad \quad 2.45 \quad \text{m}$$

Para la zona 2, la capacidad en flexión es

$$M_p = F_y Z_x \quad \quad \quad 1,005.00 \quad \text{Kips*in} \quad \quad \quad 11.56 \quad \text{ton*m}$$

$$\phi M_n = \phi C_b \left[M_p - (M_p - 0.7 F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq \phi M_p$$

$$\phi M_n = \quad \begin{array}{l} 391.80 \quad \text{kips*in} \\ 4.51 \quad \text{ton*m} \end{array} \quad \quad \quad \left[\left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] = \quad \quad \quad 0.72$$

$$\phi M_n < \phi M_p$$

Metodología de diseño de tablestaca en voladizo en suelos arcillosos

Procedimiento para obtener el diagrama de presión (Das, 2012)

Información del proyecto.			
Peso específico suelo sobre NF	g	15.9	KN/m3
Peso específico del suelo saturado	g	19.33	KN/m3
Peso específico del suelo seco	g'	9.52	KN/m3
Ángulo de fricción terreno (grados)	Ø	32	
L1 (m)	L1	2	m
L2 (m)	L2	5	m
Cohesión de la arcilla	C'	47	Kn/m ²

Paso #1.		
Utilizando la ecuación número 1, se calcula el coeficiente de presión activa de Rankine K_a .		
Ecuación #1		
$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$	0.307	

Paso #2		
Calcular la intensidad de las presiones netas σ'_1 y σ'_2 . Utilizando las ecuaciones 3 y 4.		
Ecuación #3		
$\sigma'_1 = \gamma L_1 K_a$	9.77	Kn/m ²
Ecuación #4		
$\sigma'_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a$	24.40	Kn/m ²

Paso #3.			
Se calcula P_1 (ecuación número 5), el área del diagrama de presión ACDE y (Z_1) (ecuación número 12) distancia del centro de presión ACDE. Medida desde el nivel de excavación.			
Ecuación #5			
$P_1 = \frac{1}{2}\sigma'_1 L_1 + \sigma'_1 L_2 + \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1)L_2$	$P_1 =$	95.19	Kn/m
$P_1 = 9.77 + 48.85 + 36.56$	Valores ecuación #5		
	9.77	48.85	36.56

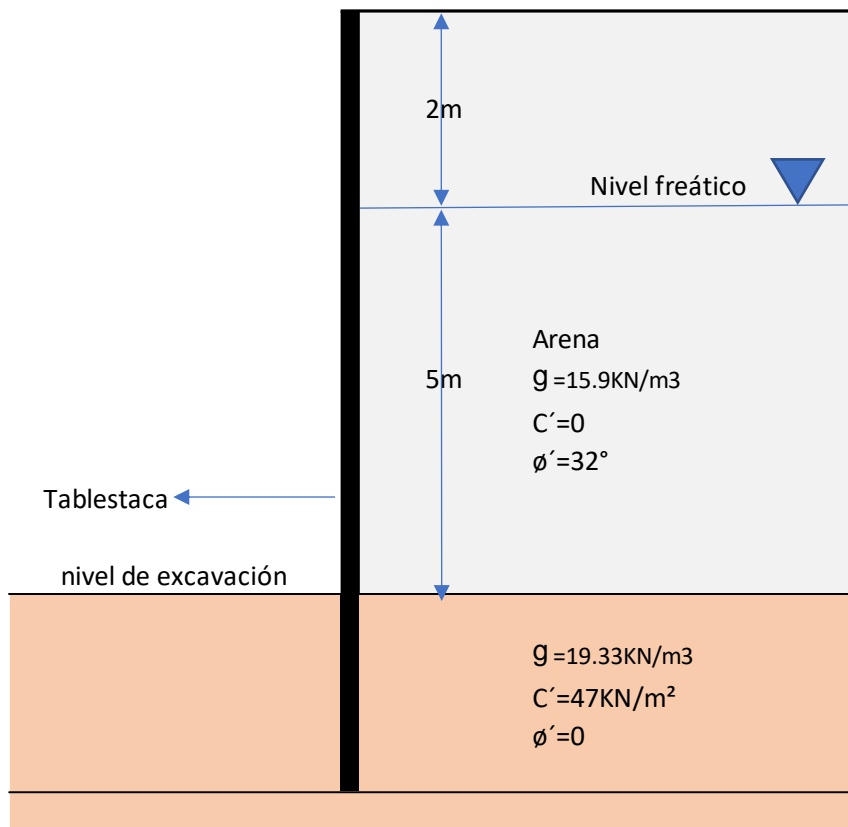


Ilustración 33. Diagrama cuerpo libre del muro tablestaca.

Ecuación #12		
$\bar{Z}_1 = \frac{\sum M}{P_1}$	1.74	m
$\bar{Z}_1 = \frac{1}{95.19} \left[9.77 \left(5 + \frac{2}{3} \right) + 48.85 \left(\frac{3}{2} \right) + 36.56 \left(\frac{3}{3} \right) \right]$		

Paso #4.
Se calcula el valor de profundidad teórica de empotramiento, utilizando la ecuación número 7.
Ecuación #7.
$D^2(4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)) - 2DP_1 - \frac{P_1(P_1 + 12c\bar{Z}_1)}{(\gamma L_1 + \gamma' L_2) + 2c} = 0$

$$D = 1.60 \text{ m}$$

Paso #5

Cálculo de fuerza de sismo

Calcular el empuje sísmico que experimenta la tablestaca.

Utilizando el manual de productos de Skyline Nucor (Skyline, 2019), se usa la tablestaca NZ14, la cual tiene una inercia $I_x = 23447 \text{ Cm}^4$.

			Espesor				Módulo de sección		Momento de inercia Cm ⁴ /m
Sección / Producto	ancho (mm)	Altura (mm)	Patín (mm)	Alma (mm)	Sección transversal (cm ² /m)	Peso (Kg/m ²)	Elástico (cm ³ /m)	Plástico (cm ³ /m)	
NZ14	770	340	9.5	9.5	135.4	106.3	1379	1640	23447

Análisis del espesor equivalente

Para efectos de analizar la fuerza de sismo, se requiere tener un muro equivalente para modelarlo en SAP 2000 (Computers and Structures, Inc., 2020).

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{I_x 12}{b}}$$

lx=	23447	Inercia de la tablestaca en Cm ⁴ .
b=	100	Base, 1m (100Cm) de muro en este caso.
h=	?	espesor equivalente del muro, para modelar en SAP 2000.
h=	14.12	Cm.

Modelado en (Computers and Structures, Inc., 2020), el muro equivalente de 14.12Cm de espesor, 7m de altura y 1m de ancho. Con esto, es posible saber la deriva del muro.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{Wm}{g}}$$

Wm	744 Kg	Peso de un metro de muro de tablestaca.
g	10	Aceleración gravitacional
T	54.17	Periodo de vibración.

$$K = \frac{1}{\Delta}$$

K	10 KN/m
Δ	0.10 KN/m

$$F = K\Delta$$

$\Delta_{unit} =$	0.0000025 m
Deformación del muro equivalente.	

$$K = \frac{1}{\Delta_{unit}}$$

K=	400,000.0 N/m
----	---------------

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{Wm}{K}}$$

T=	0.27 seg	Periodo vibración
----	----------	-------------------

De la ley de Hooke

$$F_r = K\delta(m) \rightarrow K = \frac{N}{m}$$

Rigidez lateral

N	744 Kg	Peso de un metro de muro de tablestaca.
m	9.8	
K	54.72	

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}}$$

T=	2.65770 seg	Periodo de vibración
FED	1.118	Factor Espectral dinamico
Aef	0.36	Según la Tabla 2,3 del CSCR en Zona III y suelo S3.
C	0.20	$C = \frac{a_{ef} * i * FED}{SR}$ Coeficiente Sismico.
I	1	Factor de Importancia, según la Tabla 4,1 del CSCR el ejemplo académico del presente estudio se ubicaría en Grupo D, I= 1.
SR	2	Factor Sobrerresistencia, según el capítulo 5 del CSCR, indica que para estructuras tipo muro SR =2.
FS	1.47 KN	Fuerza de sismo que actúa sobre el muro de tablestaca $FS = CW$
Wm	744 Kg	Peso de un metro de muro de tablestaca.

En la Imagen N. 34 se muestra el diagrama de cuerpo libre de la fuerza de sismo, la cual, en este caso, llega a ser de 1,47KN.

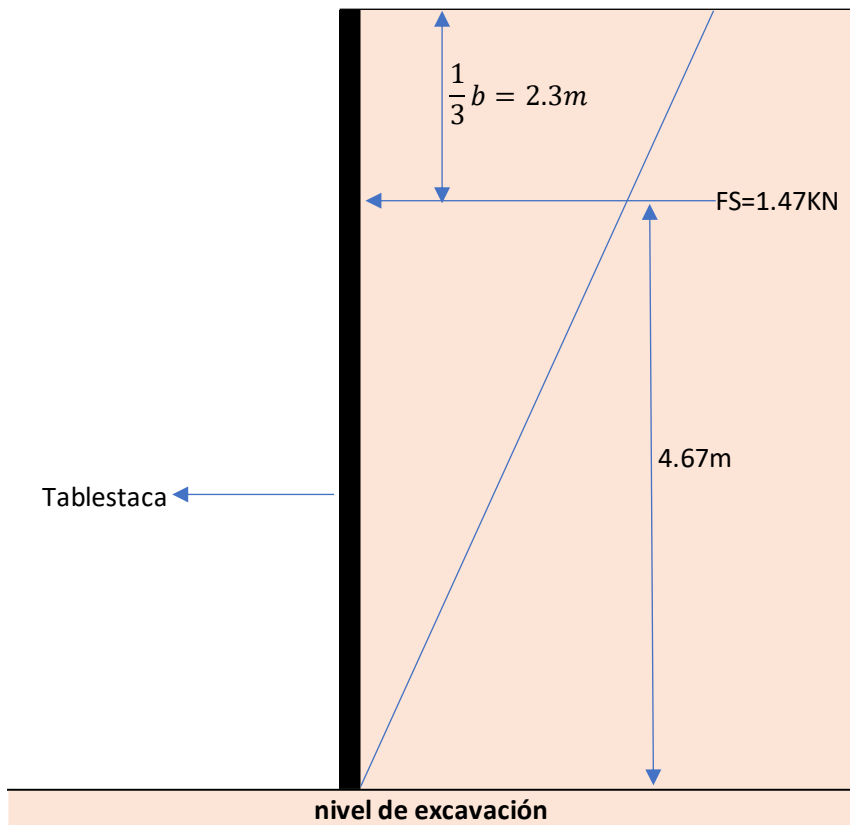


Ilustración 34. Diagrama de cuerpo libre de la fuerza de sismo de la tablestaca.

Paso #6

Se calcula la longitud L4.

$L_4 = \frac{D(4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)) - P_1}{4c}$	0.42	m
---	------	---

Paso #7.

Calcular la presión neta de izquierda a derecha (ecuación número 9) σ_6 y presión neta de izquierda a derecha (ecuación número 10) σ_7 .

Ecuación #9.

$\sigma_6 = 4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)$	108.6	Kn/m ²
--	-------	-------------------

Ecuación #8.

$\sigma_7 = 4c + (\gamma L_1 + \gamma' L_2)$	267.4	Kn/m ²
--	-------	-------------------

Paso #8.

Calcular la profundidad de penetración real, con la fórmula número 11.

Ecuación #14.

$D_{real} \approx 1.5D_{teórica}$	2.40	m
-----------------------------------	------	---

La Ilustración N. 35 muestra el diagrama final del muro de tablestaca, con toda la información obtenida en el desarrollo del modelo.

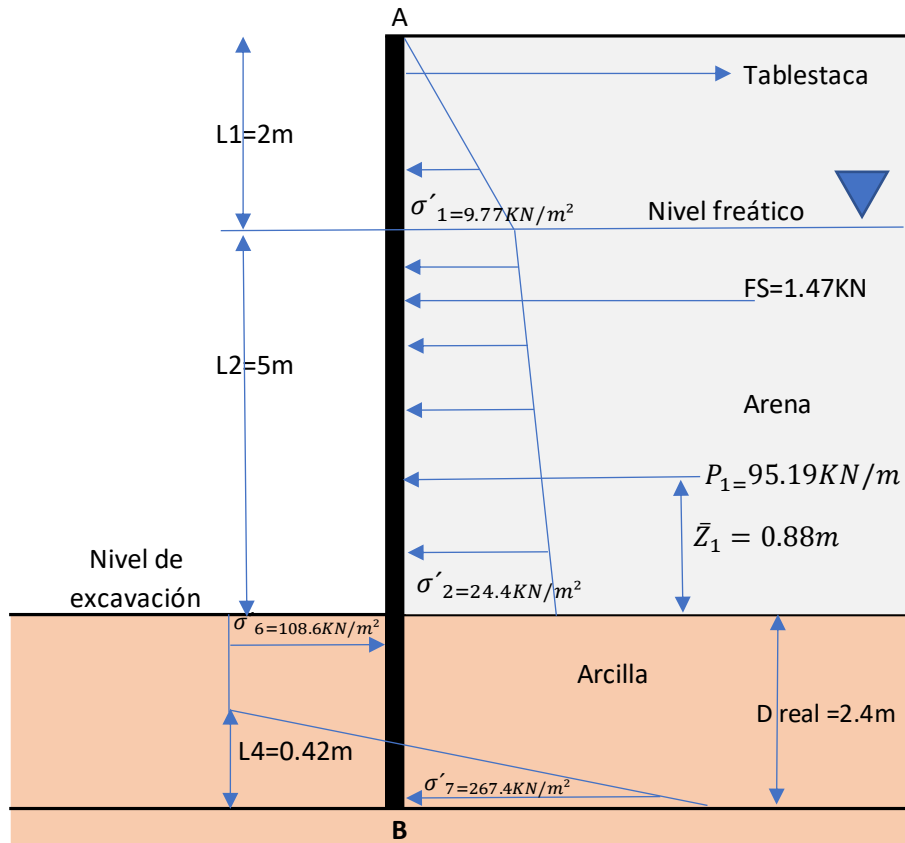


Ilustración 35. Diagrama de fuerzas aplicadas a la tablestaca.

Momento flexionante máximo

El último cálculo necesario, es el momento flexionante máximo. El resultado del esfuerzo al cual estará sometida la tablestaca, y, además, proporcionará uno de los dos valores necesarios para hallar el módulo de sección correspondiente a la tablestaca requerida.

$Z' = \frac{P_1}{\sigma_7}$	0.88 m
-----------------------------	--------

Paso #2.		
Obtenido Z' , se puede calcular la magnitud del momento máximo con la ecuación número 13.		
Ecuación #13.		
$M_{m\acute{a}x} = P_1(Z' + \bar{Z}_1) - \frac{\sigma_7 Z'^2}{2}$	206.93	Kn-m/m

Esfuerzo permisible de la tablestaca. σ Permisible.	172.5	MN/m ²
--	-------	-------------------

Una vez que se conoce el momento flexionante máximo, es posible determinar el módulo de la sección de la tablestaca, utilizando la ecuación número 14.		
Ecuación #14.		
$S = \frac{M_{m\acute{a}x}}{\sigma_{perm}}$	1.2E-03	m ³ /m del
	1,199.57	cm ³ /m

El dato del módulo de elasticidad S , requerido para cumplir con el diseño propuesto es de $1199,57\text{Cm}^3/\text{m}$, se refiere al manual de productos de la marca preferida por el diseñador. Para el presente estudio se usa el manual de Skyline Nucor, (Skyline, 2019). En atención a la tabla N. 2, se identifica que la tablestaca NZ14, cumple con los requerimientos necesarios.

producto	ancho (mm)	Altura (mm)	Espesor		Sección transversal (cm^2/m)	Peso (Kg/m^2)	Módulo de sección		Momento de inercia Cm^4/m
			Patín (mm)	Alma (mm)			Elástico (cm^3/m)	Plástico (cm^3/m)	
NZ14	770	340	9.5	9.5	135.4	106.3	1379	1640	23447

Tabla 3. Manual técnico de productos Skyline Nucor (Skyline, 2019).

Cálculo de pilas de fundaciones

Para el presente estudio, es requerido usar pilas de fundación como soporte para las columnas de la superestructura. El modelo constructivo *Top-Down* de estacionamiento subterráneo con tablestaca así lo requiere.

El procedimiento utilizado para el cálculo de las dimensiones de la pila, sigue el método de Braja Das, de su libro “Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones” (Das, 2012).

Se inicia con el cálculo de la altura necesaria de la pila, para poder soportar el esfuerzo transmitido por las columnas de la superestructura. Para esto es necesario calcular la capacidad soportante de la pila tanto en fricción como en punta.

Estimación de la capacidad soportante de la pila de fundación.

Datos necesarios			
Diámetro pila	F	1.20	m
Radio de la pila	Rp	0.60	m
Perímetro pila	Pp	3.77	m
Área base Ab	Ab	1.13	m ²
Factor de capacidad de carga	Nc	35.00	
Cohesión no drenada 1	Cu1	80.00	KN/m ²
Cohesión no drenada 2	Cu2	80.00	KN/m ²
Factr reductor de capacidad en fricción.	a *	0.52	
Longitud 1	L1	1.50	
Longitud 2	L2	1.50	
Factor de seguridad	FS	3.00	
h = alto de la pila		3.00	m
Presión atmosférica aproximada	Pa	100.00	KN/m ²

El valor del factor de capacidad de carga Nc, se toma del (Código de Cimentaciones de Costa Rica, 2002). En la figura 4.1, muestra el gráfico donde conociendo el ángulo de fricción del terreno, se puede conocer el valor de Nc. Véase Ilustración número 27.

Verificación de área gruesa A_g y diámetro mínimo de la pila

ϕP_n para elementos en compresión	ϕP_n	0.65	
Resistencia a la compresión	F'_c	310	Kg/cm ²
Punto de fluencia del acero	F'_y	4200	Kg/cm ²
Esfuerzo último transmitido a la pila por la columna.	P_u	120	Ton/f
Área de acero recomendada	A_{st}	0.01	de A_g
Área gruesa	A_g	675.49	cm ²

Utilizando la ecuación #21, se logra conocer área gruesa A_g mínima.

$$\phi P_n = \phi 0.8 [0.85 F'_c (A_g - A_{st})] + F_y A_{st}$$

$$A_g = 675.5 \text{ Cm}^2$$

Utilizando la ecuación #22, se logra conocer el al diámetro mínimo.

$$A_g = \frac{\pi \phi^2}{4} \rightarrow \sqrt{\frac{4 * A_g}{\pi}} = \phi$$

Diámetro mínimo requerido $\phi = 29.3 \text{ Cm}$

Acero longitudinal			
Diámetro de la Pila		120.00	Cm
Recubrimiento mínimo acero		7.50	Cm
Área gruesa	Ag	11,304.00	Cm ²
Área de acero	Ast	113.04	Cm ²

Propuesta de varillas longitudinales (ASTM A-615-92b, 2020)			
Número de varilla elegido	8	Área varilla (Cm ²)	5.1
Cantidad requerida para cumplir con Ast			23
Área del núcleo interior confinado	Ac	117.3	Cm ²

Ver tabla número 4 para verificación de dimensiones y área de corte de la varilla número 7, según la norma ASTM A-615, (ASTM A-615-92b, 2020).

Norma ASTM A-615-92b para barras corrugadas dimensiones y pesos nominales (ASTM A-615-92b, 2020)				
# Varilla	Diámetro (mm)	Área (cm ²)	Perímetro (mm)	Peso unit. Kg/m
3	9.52	0.71	29.9	0.56
4	12.7	1.29	39	0.994
5	15.88	2	49.9	1.552
6	19.05	2.84	59.8	2.235
7	22.22	3.87	69.8	3.042
8	25.4	5.1	79.8	3.973
9	28.65	6.45	90	4.96
10	32.26	8.19	101.4	6.403
11	35.81	10.06	112.5	7.906

Tabla 4. Pesos y dimensiones de varillas de acero (ASTM A-615-92b, 2020).

Verificación por confinamiento. Cap 8, sección 8.3.4.i de Código sísmico de Costa Rica

(CFIA,2010) La razón del volumen de refuerzo en espiral o aros circulares, ρ_s , respecto al volumen del núcleo confinado por dicho refuerzo (medido de extremo externo a extremo externo del aro) no puede ser menor que:

$$\rho_s = \frac{0.12f'_c}{f_{yh}} \quad 0.00886 \text{ m}^2$$

$$88.6 \text{ Cm}^2$$

$$\rho_s = \frac{0.45f'_c}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \quad 0.00035 \text{ m}^2$$

$$3.5 \text{ Cm}^2$$

Esfuerzo de cedencia del acero transversal f_{yh}

Se cumple por cuantía de acero longitudinal mínima.

Verificación por confinamiento. Cap 8, sección 8.3.4.c del Código sísmico de Costa Rica

La separación s máxima entre aros no debe exceder el menor de:

0.25 de la dimensión mínima de la	30	Cm
seis veces el diámetro de la barra	30.6	Cm
$S_0 = 10 + (35 - \frac{h_x}{3})$	11.67	Cm
Distancia máxima horizontal, centro a centro, entre ganchos	h_x	100
		Cm
Separación de aros utilizada =	10	Cm

CAPÍTULO IV:
ANÁLISIS DE RESULTADOS

Análisis de resultados

En esta tesis se desarrolló un modelo de diseño, con el fin de utilizar la tablestaca de acero como elemento estabilizador de suelos, para ser aplicada en el proceso de construcción denominado *Top-Down*. Por esta razón, en el apartado de análisis de resultados, no se tendrán observaciones basadas en herramientas de factibilidad de diseño o construcción o factibilidad del proyecto.

El uso de la tablestaca, como se puede ver el apartado de referencias, es extendido más en Europa y Asia. En la región centroamericana no es muy conocido ya que las grandes productoras de tablestaca aún no explotan de manera directa la región.

Con la presente investigación se logró conocer que la empresa Arcelormittal (Arcelormittal, 2019) tiene oficina regional en Costa Rica y está en proceso de iniciar con la comercialización del producto en la región.

En el marco teórico del presente estudio, se profundiza claramente en el método de diseño de la tablestaca, con el fin de ser usado en el proceso constructivo *Top-Down* de estacionamiento con tablestaca.

El marco metodológico demuestra, por medio del desarrollo de un ejemplo académico, la aplicación de la tablestaca en la construcción de sótanos. Claramente se entiende que el proceso es viable y su implementación es posible en cualquier lugar, siempre que exista la disponibilidad de la maquinaria necesaria y el producto.

Esta tesis si bien no tuvo como objetivo el estudio del mercado nacional, para identificar los proveedores de maquinaria y materiales, si se recomiendan empresas que pueden proporcionar las maquinarias y los productos necesarios. A manera solamente de referencia, sin interés de incluir, de ninguna manera comercial o legal, a ninguna organización en la presente redacción, se pueden consultar algunas empresas como Arcelormittal (Arcelormittal,

2019) (con oficina regional en Costa Rica) o Skyline Europa (Steel, 2012), para efectos de adquirir materiales. La empresa (Aluma Sistemas, s.f.) y (Codocsa, 2020), que están dedicada al negocio de renta de maquinaria y/o al empotramiento de pilotes y tablestacas.

A manera de resumen, el proceso constructivo *Top-Down* de estacionamiento con tablestaca, se podría ver del siguiente modo:

1. Análisis de suelos, compatible con la construcción de sótanos. Véanse estudios preliminares en capítulo II, Marco Teórico.
2. Diseño de la tablestaca necesaria para el procedimiento. Véase capítulo III, Marco metodológico.
3. Elegir un método de cimentación para las columnas. En este ejemplo académico se utilizan pilas de fundación, y su diseño está en capítulo III, Marco metodológico.
4. Elección de maquinaria necesaria para el proceso constructivo. Véase guía para este caso en capítulo II, Marco Teórico.
5. Inicio de construcción. En el capítulo I, véase apartado: Sistema *Top-Down* de estacionamiento con tablestaca. El cual le da una flexible guía del sistema constructivo.

Para efectos de la aplicación del sistema constructivo en Costa Rica, la presente investigación no encuentra ninguna limitante desde el punto de vista técnico ni logístico ya que, como se explica en este mismo apartado, se logra conseguir fácilmente la maquinaria y la tablestaca. Si bien la tablestaca no es un producto que se mantenga en *stock* en Costa Rica, se puede ordenar con el fabricante, con los requerimientos técnicos necesarios, sean dimensiones o de protección de anticorrosión, por ejemplo.

El método de hincado de la tablestaca es sumamente rápido, tal como se puede ver en los videos de los trabajos de la empresa Mexicana Ciasamex (CIASAMEX, 2012). Es más que

evidente que el tiempo utilizado para la instalación de las tablestacas es, por mucho, menor al tiempo utilizado para construir muros de contención. Además, el sistema *Top-Down*, le permite trabajar al mismo tiempo la superestructura y el sótano, lo da un alto rendimiento en tiempo.

Propiamente como ventajas del sistema constructivo sobre el proceso tradicional, se pueden enumerar varias indiscutibles:

- Ahorro en tiempo de ejecución de la obra. Dependiendo del tipo de suelo, el hincado por metro lineal de tablestaca, es de tan solo unos segundos.
- Nunca se expone al personal a taludes. La altura máxima de excavación es igual a la altura máxima de un subnivel. Además de estar absolutamente confinado.
- Nula probabilidad para desestabilizar el terreno vecino.
- Es un procedimiento muy limpio comparado con un muro de contención. En todo el proceso de colocado, no es necesario ni una gota de agua, aceite, desmoldante, o cualquier otro agente contaminante. No se requiere de ningún tipo de formaleta.
- La tablestaca utiliza materias primas recicladas.
- La instalación de la tablestaca podría hacerse con solamente una excavadora que tenga instalado el vibrohincador y dos personas, una como operario de la máquina y otra en alineado de la tablestaca. Véase capítulo II, Marco teórico, apartado de hincado de tablestaca para mejor análisis.
- El muro de tablestaca es absolutamente impermeable; así que, si el nivel freático está dentro de la profundidad del sótano, no representará ningún problema.
- No es necesario el anclado de la tablestaca, por lo que no se invadirá el terreno vecino.
- Es una opción para el método tradicional de construcción de sótanos. En esta no se requiere mano de obra especializada en el tema y además, el único material nuevo es la tablestaca, la cual se consigue fácilmente.

- Ahorro absoluto en formaleta y encofrado en general, ya que las losas de los subniveles, descansan sobre el terreno (tierra).

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

Conclusiones

- 1- En esta tesis se desarrolló un modelo de diseño con el fin de utilizar la tablestaca de acero como elemento estabilizador de suelos, para ser usada en el proceso de construcción de sótanos, siguiendo el sistema constructivo denominado *Top-Down*.
- 2- Se logró identificar los estudios de suelo preliminares necesarios para el proceso constructivo *Top-Down*. Por medio de la aplicación de la prueba SPT o prueba de penetración estándar, es posible saber las características necesarias del suelo y, así, ejecutar una correcta cimentación. En el caso del modelo académico desarrollado, se utilizaron pilas para cimentar las vigas del edificio. No obstante, con la revisión del apartado de cimentación, y revisar el equipo necesario para la perforación, podrá valorar otras opciones.
- 3- Como resultado de la investigación en diseño, se generó un modelo de análisis mecánico de la tablestaca para la aplicación del sistema constructivo *Top-Down*. De esta manera, la tablestaca de acero, se utiliza en el proyecto como elemento estabilizador de suelos, como pared estética del sótano y, además, como sello hidráulico dadas sus capacidades de impermeabilidad.
- 4- Se indagó sobre la procedencia de la tablestaca, y se hizo una reseña de los materiales más comunes y sus usos. Con esto, el lector podrá tener un panorama más amplio en cuanto al uso de la tablestaca como elemento constructivo.
- 5- Se logró aplicar la tecnología de tablestaca a un caso académico para su análisis y la verificación de su factibilidad como elemento constructivo.

Referencias

- AINOX. (2020). *AINOX SAS*. Obtenido de <https://www.ainoxsas.com/como-se-fabrica-el-acero/>
- AISC-360-10. (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*. Estados Unidos: Asociación Latinoamericana del Acero.
- Aluma Systemas. (s.f.). *Aluma Systemas*. Obtenido de https://www.aluma.cr/products/equipos_mecanicos/alquiler_venta/mini_excavadoras_bobcat
- Alumitran. (2014). *ALUMITRAN SL*. Recuperado el 09 de Noviembre de 2020, de ALUMITRAN SL: <https://www.avalumitran.com/nuestros-procesos-a-fondo-el-anodizado-de-aluminio/>
- American Society of Testing Materials. (2020). *astm.org*. Obtenido de <https://www.astm.org/>
- Arcelormittal. (2019). *Costa Rica Arcelormittal*. Obtenido de <https://costarica.arcelormittal.com/>
- Artavia, A. (2017). Tablestacas metálicas. *Escuela Ingeniería en Construcción*.
- ASTM A-615-92b*. (2020).
- CETEAU. (2020). *CETEAU*. Obtenido de <https://ceteau.com/es/products/tablestacas-pvc/>
- CFIA. (2010). *Código Sísmico Costa Rica*. San José: Editorial tecnología de Costa Rica.
- CIASAMEX (Productor). (2012). [Película]. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=7tq4sFdlqpU>
- Código de Cimentaciones de Costa Rica. (2002). *CÓDIGO DE CIMENTACIONES DE COSTA RICA*. San José, San José, Costa Rica.
- Codocsa. (2020). *Codocsa hinca de tablestaca*. Obtenido de <https://codocsa.com/es/Project/summary/2>
- Computers and Structures, Inc. (2020). *SAP2000*. Walnut Creek, Estados Unidos.

- Das, B. M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. México D.F: Cengage Learning.
- Green Walls. (2018). *Green Walls PVC*. Obtenido de <http://www.greenwallpvc.com/it/applicazioni.aspx>
- Heavy Construction Equipment Channel. (s.f.). Etec 826 with ICE 428B. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=Gkzyph0MCqY>
- Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo INVU. (2018). *Reglamento de Construcciones*. San José: Imprenta Nacional.
- Junntan. (2021). *Junntan*. Obtenido de <https://junntan.com/es/productos/equipos-de-hincado-de-pilotes/>
- McCormac, J., & Csernak, S. (2013). Diseño de estructuras de acero. En J. C. McCormac, & S. F. Csernak, *Diseño de estructuras de acero*. Ciudad De México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- METALCO. (2017). *Manual Técnico Metaldeck*. San José CR. .
- Ministerio De Obras Públicas Y Transportes. (16 de Enero de 2020). *mopt.go.cr*, <https://www.facebook.com/CasaPresidencial/posts/3458402417519560/>. Obtenido de <https://www.mopt.go.cr/wps/portal/Home/noticias!/ut/p/z0/fcy9DoIwFAXgV9HBsbkVCtqR-BeVqHHCLubaFILFFqEqvr0kxsTJ6eQk5zsgIANh8WEK9MZZLLt-EPFxuVvQ4ZrRdBHvpzThaRrNtzRkyxBWIP4Pugdzvt1EAqLCQhOIG1NYyHau9lj2Zq3XtXUDunHeSIMTd61K7fHXSWe9bj1k1cforzG2I11KrGt3b3TZC2hAB1>
- Moscozo, L. R. (2011). Metodología para la ejecución y control de excavaciones en sótanos para edificios. *Metodología para la ejecución y control de excavaciones en sótanos para edificios*. Universidad de San Carlos de Guatemala, GUATEMALA.
- Nanjing Grand Steel Piling . (2020). *Nanjing Grand Steel Piling* . Obtenido de <https://www.china-steelpiling.com/about.html>

- National Gypsum Company. (2020). *Guía de Construcción con Yeso*. Charlotte, NC:
National Gypsum Company. Obtenido de <https://nationalgypsum.com/>
- Panasonic A/C. (s.f.). *Panasonic.com*. Obtenido de
<https://www.panasonic.com/pa/consumo/aires-acondicionados/residencial.html>
- Payer, J. (26 de Agosto de 2014). *Obras Urbanas*. Obtenido de obrasurbanas.es:
<https://www.obrasurbanas.es/niveles-sotano-anclajes/>
- Reglamento General de SegMnisterio De Trabajo y Seguridad Social, Ministerio De Salud y Consejo de Salud Ocupacional de Costa Rica. (1996). *Reglamento General de Seguridad en Construcciones*. San José: Imprenta Nacional (Gaceta).
- Revista Constructivo. (2018). *Constructivo.com*. Obtenido de
<https://constructivo.com/actualidad/cosapi-construye-edificio-con-sistema-Top-Down-que-permite-construir-a-la-vez-el-sotano-y-pisos-superiores-1527708034>.
- Rojo Pizarro, G. I. (2016). *ESTUDIO DE SISTEMAS DE SOSTENIMIENTO DE SUELO EN EXCAVACIONES EN EDIFICIOS*. Santiago, Chile.
- Shunli Steel Group . (2015). *Shunli Steel* . Obtenido de <https://www.sheet-piles.com/History-of-sheet-piling-id6602696.html>
- Skyline. (2019). *Manual técnico de productos*. Illinois U.S.
- Steel, S. (Dirección). (2012). *Sistema de edificio de estacionamiento de Skyline Steel* [Película]. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=WDJJK4EwCo>
- Terzaghi, K., & Peck, R. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*.
- TIEFBAUTECHNIK. (2020). *TIEFBAUTECHNIK*. Obtenido de <https://twf-tiefbautechnik.de/es/alquiler-d/pilotes-y-perforacion-d/vibradores-colgados-de-grua-d>
- Yepes Piqueras, V. (2019). *Universidad Politécnica de Valencia España*. Obtenido de
<https://riunet.upv.es/handle/10251/119475>

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1. Sótano construido con el sistema top - down con tablestaca en Perú.....	9
Ilustración 2. Excavación de sub nivel utilizando el sistema <i>Top-Down</i> . (Payer, 2014).....	12
Ilustración 3. Paso a desnivel en cruce del antiguo Gallito, en Guadalupe.	15
Ilustración 4. Excavación masiva de sótano. (Moscozo, 2011).....	22
Ilustración 5. Excavación estructural. (Moscozo, 2011).....	23
Ilustración 6. Tablestaca instalada en el perímetro de la construcción. (Steel, 2012)	26
Ilustración 7. Colocado de columna con armadura de pila. (Das, 2012)	28
Ilustración 8. Conducto de caída para concreto. (Das, 2012)	28
Ilustración 9. Excavación primer sub nivel. (Steel, 2012).....	30
Ilustración 10 Muro de tablestaca de aluminio en contención de erosión del terreno en límite marítimo terrestre.....	32
Ilustración 11. Tablestaca de PVC en fábrica. (CETEAU, 2020)	34
Ilustración 12. Usos tablestaca de PVC. (Green Walls, 2018)	35
Ilustración 13. Tablestaca de PVC, usada para aislar del agua salada un muro de concreto armado. (CETEAU, 2020)	36
Ilustración 14. Tablestaca hincada en el suelo al 90% de su altura. (CETEAU, 2020).....	37
Ilustración 15. Muestreador o tomamuestras. (American Society of Testing Materials, 2020)	42
Ilustración 16. Procedimiento de hincado de tomamuestras. (American Society of Testing Materials, 2020)	42
Ilustración 17. Modo de muestreo de suelos. (American Society of Testing Materials, 2020)	43
Ilustración 18. Muestra de suelo obtenida por medio del ensayo SPT. (American Society of Testing Materials, 2020)	44

Ilustración 19. Despiece completo del tomamuestras SPT. (American Society of Testing Materials, 2020)	44
Ilustración 20. Distribución de perforaciones para estudio SPT.....	47
Ilustración 21. Tablestaca en voladizo hincada en arcilla. (Das, 2012).....	57
Ilustración 22. Tablestaca empotrada en suelo arenoso.....	59
Ilustración 23. Vibrohincador. (Codocsa, 2020).....	66
Ilustración 24. Grúa autopropulsada en sitio de construcción. (Nanjing Grand Steel Piling , 2020)	67
Ilustración 25. Grúa autopropulsada en carretera. (Nanjing Grand Steel Piling , 2020)	68
Ilustración 26. Excavadora con vibrohincador. (TIEFBAUTECHNIK, 2020)	68
Ilustración 27. Alineamiento de la tablestaca. (Shunli Steel Group , 2015).....	69
Ilustración 28. Colocación de tablestaca. (Heavy Construction Equipment Channel)	70
Ilustración 29. Perforadoras para pilotes o pilas. (Codocsa, 2020).	71
Ilustración 30. Conducto de caída para cimentación profunda.....	72
Ilustración 31. Colocado de vigas junto con armadura.....	73
Ilustración 32. (Payer, 2014).....	74
Ilustración 33. Diagrama cuerpo libre del muro tablestaca.	84
Ilustración 34. Diagrama de cuerpo libre de la fuerza de sismo de la tablestaca.	88
Ilustración 35. Diagrama de fuerzas aplicadas a la tablestaca.	90
Ilustración 36. Factores de capacidad de carga (Código de Cimentaciones de Costa Rica, 2002)	95