



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES PROFUNDAS PARA SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**

**Sindy Paola Hernández Rodríguez**  
Asesorado por el Ing. Armando Fuentes Roca

Guatemala, noviembre de 2013



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES  
PROFUNDAS PARA SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**SINDY PAOLA HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ**

ASESORADO POR EL ING. ARMANDO FUENTES ROCA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA CIVIL**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2013



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES PROFUNDAS PARA SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha de octubre de 2012.



**Sindy Paola Hernández Rodríguez**



**Universidad de San Carlos de Guatemala**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Civil**

Guatemala, 20 de Agosto de 2013.

Ingeniero  
Ronald Galindo  
Coordinador del área de estructuras  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Ing. Galindo

La presente es para hacer de su conocimiento, que después de revisar la tesis de la estudiante de Ingeniería Civil, Sindy Paola Hernández Rodríguez, con carnet número 2008 18811, titulada "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES PROFUNDAS PARA SUB ESTACIONES ELECTRICAS", la cual está lista para ser presentada y avalada.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

MsC., Ingeniero.

Armando Fuentes Roca

Colegiado 2999

ARMANDO FUENTES ROCA  
Ingeniero Civil  
Col. 2999

C.c. Archivo.



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,  
23 de septiembre de 2013

Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director Escuela Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES PROFUNDAS PARA SUB ESTACIONES ELECTRICAS, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Sindy Paola Hernández Rodríguez, quien contó con la asesoría del Ing. Armando Fuentes Roca.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera  
Jefe del Departamento de Estructuras



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
ESTRUCTURAS  
USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San  
Carlos de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Unidad de Lingüística

Guatemala, 21 de noviembre de 2013  
Ling.11-15

Ingeniero Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director de la Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería, USAC

Señor director:

Por este medio hago de su conocimiento que la Unidad de Lingüística hace una modificación al título del trabajo de graduación del estudiante **Sindy Paola Hernández Rodríguez**, con número de carné: **2008-18811** el cual fue aprobado de acuerdo al protocolo como: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES PROFUNDAS PARA SUB ESTACIONES ELÉCTRICAS.**

La Unidad modifica el título del trabajo en virtud de que el mismo no está bien redactado y propone la siguiente forma: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES PROFUNDAS PARA SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.**

  
Licenciada Rosa Amelia González Domínguez  
Coordinadora de la Unidad de Lingüística



Cc. Archivo



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Armando Fuentes Roca y del Jefe del Departamento de Estructuras, Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera, al trabajo de graduación de la estudiante Sindy Paola Hernández Rodríguez, titulado **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES PROFUNDAS PARA SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

*[Handwritten Signature]*  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre de 2013.

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua

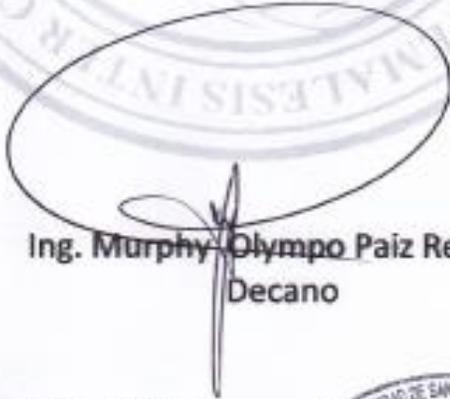




DTG. 850.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES PROFUNDAS PARA SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**, presentado por la estudiante universitaria: **Sindy Paola Hernández Rodríguez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 28 de noviembre de 2013

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por ser el supremo creador y haber guiado mis pasos desde mis primeros años, brindándome conocimiento, entendimiento, inteligencia, sabiduría y convertir hoy en una realidad lo que en mi niñez era un sueño.

### **Mi padre**

José Ángel Hernández Gómez, porque desde pequeña ha sido para mí el hombre al que siempre he admirado, por su incondicional confianza, apoyo, ejemplo ético y moral en mi formación personal y profesional.

### **Mi madre**

Eva Amabilia Rodríguez de Hernández, por ser un ejemplo de amor, responsabilidad, dedicación, esfuerzo, trabajo y por demostrar que no existe nada tan grande que nos pueda vencer si tenemos el deseo de luchar.

### **Mi hermana**

Angélica Amabilia Hernández Rodríguez, por estar en todos los momentos de mi vida y asumir un papel más que de una hermana.

### **Mis hermanos**

Cristian José y Paulo Alexander Hernández Pérez, por su cariño y por qué hoy puedan ver en mí una mujer de provecho.

**Mis padrinos**

Edgar Huertas, Alicia Hernández de Huertas, Erick Guzmán y Claudia Huertas de Guzmán, por su apoyo, cariño y ejemplo de perseverancia.

**Mi familia**

Por ser el complemento perfecto para mi desarrollo como persona dentro de esta sociedad.

**Mis amigos**

A los que me acompañaron, me acompañan y seguirán junto a mí, en este camino llamado vida, por su amistad sincera, conocimientos y cariño compartidos.

**Carlos Juárez Ramírez**

Por darme su amor, sus consejos y apoyo incondicional, pero en especial por ser quien complementa y llena de felicidad mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Alma máter de un pueblo que en ella deposita sueños y esperanzas y que ha sido mi proveedora del alimento intelectual.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por la excelente formación, tanto técnica como académica que nos brinda y que contribuye en el desarrollo profesional para el servicio del pueblo de Guatemala.
<b>Mi patria Guatemala</b>	Cuna de la eterna primavera que me vio nacer.
<b>Mis padres</b>	Porque gracias a su cariño, apoyo y consejos, he llegado a realizar dos de mis más grandes metas en la vida. La culminación de mi carrera profesional, lo cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir y el hacerlos sentir orgullosos de esta persona que tanto los ama.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Por los sueños que vivimos juntos, por cada día fortalecer esta amistad y por el cariño que nos une y me hace poderles llamar hoy mis hermanos.

**Ing. Armando Fuentes  
Roca**

Por ser mi maestro en el ámbito profesional y por brindarme sus conocimientos y apoyo incondicional en el desarrollo de este trabajo de graduación.

**Ing. Ronald Estuardo  
Galindo Cabrera**

Por su colaboración profesional e intelectual en el desarrollo de este trabajo de graduación.

**Constructora MEYCO  
S.A.**

Por permitir desarrollar este trabajo y mi crecimiento laboral.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. NOMENCLATURA Y DEFINICIONES .....	1
1.1. Nomenclatura .....	1
1.2. Definiciones .....	3
1.2.1. Cimentaciones profundas .....	3
1.2.2. Condiciones que requieren cimentaciones profundas.....	3
1.2.3. Tipos de pilotes y sus características estructurales .....	4
1.2.4. Cimentaciones profundas de concreto .....	5
2. DISEÑO.....	7
2.1. Convención de cargas para análisis y diseño.....	7
2.2. Cargas .....	8
2.3. Criterio para el análisis de estabilidad y diseño de la cimentación .....	9
2.3.1. Hipótesis para el diseño .....	9
2.3.2. Análisis de suelo.....	10
2.3.3. Análisis sísmico .....	13

2.3.4	Análisis de estabilidad ante esfuerzos verticales....	13
2.3.5.	Análisis de estabilidad al volcamiento .....	14
2.3.6.	Diseño estructural de la cimentación .....	15
2.4.	Combinación de cargas .....	22
2.5.	Especificaciones de materiales .....	24
2.6.	Resultados del análisis de estabilidad y diseño de las fundaciones en pilas.....	26
2.6.1	Ejemplo de diseño de una cimentación profunda ...	26
3.	CONSTRUCCIÓN .....	33
3.1.	Normas de seguridad industrial .....	34
3.1.1.	Normas de trabajo .....	35
3.1.2.	Normas de uso de herramientas manuales .....	37
3.1.3.	Seguridad personal.....	37
3.1.4.	Plan de emergencia.....	42
3.1.5.	Manejo y control ambiental.....	43
3.2.	Sistemas de control de calidad.....	44
3.2.1.	Concreto .....	45
3.2.2.	Acero .....	47
3.3.	Replanteo topográfico .....	48
3.3.1.	Tareas previas.....	49
3.4.	Excavaciones .....	50
3.4.1.	Excavación manual.....	50
3.4.2.	Excavación mecánica.....	52
3.4.3.	Excavación en suelo rocoso .....	55
3.5.	Realización de refuerzo de acero .....	57
3.6.	Ubicación de refuerzo de acero.....	64
3.7.	Fundación.....	67
3.7.1.	Primera fase .....	68

3.7.2.	Segunda fase.....	70
3.8.	Localización de pernos de anclaje.....	74
3.9.	Acabados finales .....	78
CONCLUSIONES .....		81
RECOMENDACIONES .....		83
BIBLIOGRAFÍA .....		85
APÉNDICES .....		87



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Convención de cargas.....	8
2.	Presión admisible versus profundidad S-1 .....	10
3.	Modelo de cargas verticales sobre el pilote .....	16
4.	Deflexión lateral versus longitud adimensional .....	20
5.	Distribución de pernos de anclaje y cilindro de pared delgada equivalente.....	21
6.	Dimensiones de torre .....	27
7.	Solicitaciones para la cimentación .....	28
8.	Montaje de torres sobre cimentaciones profundas en subestación eléctrica Palín - Escuintla.....	34
9.	Señalización mínima para áreas de trabajo .....	35
10.	Nivelación del lugar donde se ejecutará la obra.....	49
11.	Excavación manual de cimentación profunda .....	51
12.	Maquinaria para excavación .....	53
13.	Perforación de pozo para cimentación, extracción de material excavado con barreno dentado sin punta.....	54
14.	Excavación de pozo para cimentación en manto rocoso .....	56
15.	Banco de trabajo y almacenamiento de acero para cimentaciones profundas.....	58
16.	Doblado de refuerzo en molinete con forma espiral .....	60
17.	Inicio de armado de refuerzo para cimentaciones profundas.....	61
18.	Amarre doble de espirales a barras de refuerzo longitudinal .....	62

19.	Armado completo de refuerzo para cimentaciones profundas, dados colocados en la parte inferior y laterales de la armadura .....	63
20.	Transporte y colocación de armadura mediante grúa .....	65
21.	Colocación de armadura dentro de excavación con tensado a un costado para un mejor manejo y control de la verticalidad de la estructura .....	66
22.	Vaciado de concreto por medio de tubería hacia el fondo de la cimentación .....	69
23.	Vaciado de concreto con equipo de trompa de elefante. ....	70
24.	Formaleta en la parte superior de la cimentación y protección de pernos de anclaje, listo para fundición .....	72
25.	Limpieza de pernos de anclaje y platinas de nivelación, luego de la fundición .....	73
26.	Platina de nivelación .....	74
27.	Colocación de pernos con platina de nivelación e hilos guía .....	76
28.	Verificación de centrado de pernos en cimentaciones profundas .....	77
29.	Detalle de acabados finales para cimentaciones profundas .....	79
30.	Detalle superior de acabados finales en cimentaciones profundas.....	80

## **TABLAS**

I.	Estudios estratigráficos .....	11
II.	Cargas de servicio .....	23
III.	Cargas últimas .....	23

## LISTADO DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>cm</b>	Centímetro
<b>°</b>	Grados
<b>kg</b>	Kilogramo fuerza
<b>kN</b>	Kilo Newton
<b>psi</b>	Libra por pulgada cuadrada
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>MPa</b>	Mega pascales
<b>mm</b>	Milímetro
<b>%</b>	Porcentaje
<b>“</b>	Pulgadas
<b>s</b>	Segundos



## GLOSARIO

<b>ACI</b>	American Concrete Institute por sus siglas en inglés. Requisitos de reglamento para concreto estructural.
<b>AGIES</b>	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
<b>Asentamiento</b>	Es un descenso de algunos centímetros en la zona donde se apoya un elemento de gran peso, sufriendo un reajuste de su estructura granular.
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials por sus siglas en inglés. Es un organismo de normalización de los Estados Unidos de América.
<b>Cimentación</b>	Es la estructura encargada de transmitir al terreno las cargas del edificio que llegan a ella y soporta.
<b>Colapsable</b>	Disminución importante de la resistencia de un material al momento de exceder sus límites de resistencia.
<b>Compresión</b>	Es una presión que tiende a causar en algunos casos una reducción de volumen, siempre manteniendo una masa constante.

<b>Control de calidad</b>	Son todos los mecanismos, acciones, herramientas que se realizan para detectar la presencia de errores.
<b>Construcción</b>	Es todo aquello que exige, antes de hacerse, disponer de un proyecto y una planificación predeterminada para la fabricación de edificios e infraestructura.
<b>EPIS</b>	Equipo de Protección Individual de Seguridad.
<b>Estrato</b>	Es cada una de las capas en que se presentan divididos los sedimentos, las rocas sedimentarias y las rocas metamórficas que derivan de ellas, cuando esas capas se deben al proceso de sedimentación de los suelos.
<b>Estudio estratigráfico</b>	Es la interpretación de los estratos del suelo, la identificación, descripción, secuencia, tanto vertical como horizontal; cartografía y correlación de las unidades estratificadas de muestras.
<b>Estructura</b>	Es el conjunto de elementos resistentes, convenientemente vinculados entre sí, que accionan y reaccionan bajo los efectos de las cargas.
<b>Holgura</b>	Amplitud o anchura de una cosa, que hace que algo o alguien quepa en ella con espacio de sobras.
<b>Homogénea</b>	Formado por elementos con una serie de características comunes referidas a su clase o naturaleza que permiten establecer entre ellos una relación de semejanza.

<b>Isotrópico</b>	Es cuando el material del cual esta constituido un elemento estructural presenta propiedades invariables.
<b>NSE</b>	Normas de Seguridad Estructural.
<b>Metodología</b>	Conjunto de procedimientos racionales utilizados para alcanzar una gama de objetivos que rigen en una investigación científica.
<b>Pilote</b>	Elemento constructivo utilizado para cimentación de obras, que permite trasladar las cargas hasta un estrato resistente del suelo.
<b>Perno de anclaje</b>	Barra o perno embutido en el hormigón para sujetar, fijar o asegurar un elemento estructural.
<b>Platina de nivelación</b>	Placa metálica perforada con la ubicación de los pernos que se utiliza para ubicar y nivelar conforme el diseño los pernos de anclaje.
<b>PVC</b>	Policloruro de vinilo.
<b>Replanteo</b>	Trazar en el suelo o sobre un plano la planta de una obra ya proyectada.

<b>Sismo resistente</b>	Es cuando se diseña y construye con una adecuada configuración estructural, componentes de dimensiones apropiadas y materiales, una proporción y resistencia suficientes para soportar la acción de las fuerzas causadas por sismos frecuentes.
<b>Subestación eléctrica</b>	Instalación destinada a modificar y establecer los niveles de tensión de una infraestructura eléctrica, para facilitar el transporte y distribución de la energía eléctrica.
<b>Tensión</b>	Fuerza que aplica a un cuerpo elástico le produce o le tiende a producir una tensión. También llamada fuerza de tracción.

## RESUMEN

En la actualidad el crecimiento de la población ha llevado una expansión territorial, surgiendo la necesidad del desarrollo en la industria eléctrica, por lo que se ha planteado la construcción de subestaciones eléctricas en diferentes puntos del país. Siendo la problemática principal el tipo de suelo sobre el cual deben ser implementadas, ya que la zona sísmica en la que se encuentra localizada Guatemala es una zona tipo 4, siendo esta la más propensa a movimientos sísmicos, sumado a esto el tipo de cargas necesarias soportar, entre las cuales se puede mencionar la carga de montaje y mantenimiento de transformadores, cargas de viento, cargas de cortocircuito y de tensión y en si la estructural que transmitirá todas estas cargas hacia un suelo estable.

El presente trabajo pretende mostrar un diseño de cimentaciones profundas adaptable a los requerimientos de una subestación eléctrica, basándose en una metodología de diseño que tome todos los factores que pueden afectar en su construcción y funcionamiento. Así como también dar a conocer el proceso constructivo de las cimentaciones profundas, implementado normas de seguridad industrial y sistemas de control de calidad que se deben tener con todos los materiales involucrados en el desarrollo de la obra, de esta forma contribuyendo a ampliar los conocimientos constructivos del lector.



# OBJETIVOS

## General

Obtener un diseño adecuado y funcional, así como un método constructivo para cimentaciones profundas en subestaciones eléctricas.

## Específicos

1. Determinar una metodología para el diseño adecuado y funcional de las cimentaciones profundas, así como proporcionar criterios para el análisis de estabilidad de la cimentación.
2. Proporcionar un análisis de suelo en la región donde se tenga programada la construcción de una subestación eléctrica en Guatemala, para ser implementado en el diseño de las cimentaciones profundas.
3. Dar a conocer todas las posibles cargas que pueden actuar sobre las cimentaciones, sus diferentes combinaciones y aplicando los debidos factores de carga.
4. Dar a conocer las especificaciones de diseño para concreto y acero en las cimentaciones con base en los análisis de diseño proporcionado y a los requerimientos mínimos necesarios.

5. Proporcionar una metodología constructiva adecuada para cimentaciones profundas en subestaciones eléctricas.
6. Implementar sistemas de seguridad industrial en obra que se adecuen a la construcción de cimentaciones profundas en áreas para subestaciones eléctricas.
7. Determinar los sistemas de control de calidad necesarios para cumplir con los requisitos de construcción de los materiales especificados en el diseño de las cimentaciones.

## INTRODUCCIÓN

Las cimentaciones profundas son un tipo de cimentaciones que solucionan la trasmisión de cargas a los sustratos aptos y resistentes del suelo. Por lo que su utilización se opta cuando los esfuerzos transmitidos por la carga no pueden ser distribuidos suficientemente a través de una cimentación superficial, y en la solución probable se sobrepasa la capacidad portante del suelo. El diseño de las cimentaciones con pilotes o cimentaciones profundas es considerado un arte en vista de las incertidumbres implícitas al trabajar con las condiciones del subsuelo.

Para el presente trabajo, se realizará un diseño adecuado de cimentaciones profundas para subestaciones eléctricas. En el capítulo uno se desarrolla definiciones necesarias para el conocimiento y comprensión del tema a tratar así como la nomenclatura utilizada. El capítulo dos consiste en dar a conocer la metodología de diseño y los cálculos estructurales que se realizaran para el diseño de pilotes, verificando que resistan el momento de volteo aplicado, la carga de arrancamiento y la compresión del terreno causada por las cargas verticales y la compresión debida al efecto de volteo.

Por último en el capítulo tres se presenta una metodología de construcción que se desarrollo desde el replanteo topográfico hasta los acabados finales de las cimentaciones profundas y a ésta adaptando sistemas de control de calidad y seguridad industrial en campo.



# 1. NOMENCLATURA Y DEFINICIONES

## 1.1. Nomenclatura

A continuación se da a conocer una serie de términos técnicos utilizados en diferentes ecuaciones y abreviaturas, que se pueden encontrar en los cálculos de diseño así como en figuras y tablas que se presentan.

$\emptyset$	Ángulo de fricción
$A_{PILA}$	Área de la pila o pilote
$A_s$	Área de acero
$CC$	Cargas de cortocircuito
$CS_{ssx,y}$	Carga de servicio de sismo en X o Y
$CS_{ssz}$	Carga de servicio de sismo vertical
$CT$	Carga de tensión
$CV_{x,y}$	Cargas de viento en X o en Y
$P$	Carga puntual
$P_{perno}$	Carga puntual al perno
$Q$	Carga horizontal
$Q_p$	Carga tomada en la punta del pilote
$Q_s$	Carga por la fricción superficial desarrollada en los lados del pilote
$Q_u$	Carga última horizontal
$Q_{uv}$	Carga última vertical
$y_0$	Carga última horizontal
$K_p$	Coefficiente de empuje pasivo del suelo
$n_h$	Coefficiente de reacción lateral del suelo
$c$	Cohesión del suelo que soporta la punta del pilote

$x_0$	Deflexión permitida del pilote
$D$	Diámetro de pilote
$D_t$	Diámetro de tubo equivalente para pernos de anclaje
$\sigma_{MAX}$	Esfuerzo máximo
$\sigma_{RESISTENTE}$	Esfuerzo resistente
$\sigma_t$	Esfuerzo de tensión de tubo equivalente a pernos de anclaje
$t$	Espesor de tubo equivalente a pernos de anclaje
$N_c^*, N_q^*$	Factores de capacidad de carga
$b'$	Longitud de arco
$L$	Longitud del pilote
$E$	Módulo de elasticidad del material
$E_c$	Módulo de elasticidad
$k_h$	Módulo de reacción del suelo
$I$	Momento de inercia de la sección
$I_e$	Momento de inercia del exterior de tubo equivalente para pernos
$I_i$	Momento de inercia del interior de tubo equivalente para pernos
$I_{tubo}$	Momento de inercia del tubo equivalente para pernos de anclaje
$M_{max}$	Momento máximo
$M_u$	Momento de resistencia último de la sección del pilote
$M_x$	Momento en el eje x
$M_y$	Momento en el eje y
$N'$	Número de pernos de anclaje
$W$	Peso + carga de montaje y mantenimiento
$\gamma$	Peso específico del suelo
$q$	Presión admisible
$q_p$	Resistencia unitaria de punta
$R$	Radio de tubo equivalente para pernos de anclaje
$\eta$	Relación entre el módulo de reacción lateral del suelo y la rigidez

## **1.2. Definiciones**

En esta sección se trata de exponer de manera exacta los conceptos y definiciones de términos utilizados con mayor frecuencia, y que son de gran importancia para la comprensión y desarrollo del diseño y construcción de las cimentaciones profundas.

### **1.2.1. Cimentaciones profundas**

Las cimentaciones profundas son miembros estructurales llamados pilotes o pilas, los cuales pueden ser hechos de acero, concreto y madera, estos pueden tener un costo mayor que las cimentaciones superficiales, sin embargo el uso de pilotes es en muchos casos necesario para garantizar la seguridad estructural, dejando de lado el alto costo que puede llegar a tener.

### **1.2.2. Condiciones que requieren cimentaciones profundas<sup>1</sup>**

Las cimentaciones profundas son miembros estructurales hechos de acero, concreto o madera. A pesar que su costo es mayor a las cimentaciones superficiales, el uso de cimentaciones profundas, es a menudo necesario para garantizar la seguridad estructural.

- Cuando los estratos superiores del suelo son altamente compresibles y demasiado débiles para soportar la carga transmitida por la superestructura se usan pilotes para transmitir la carga al lecho rocoso o a una capa dura.

---

<sup>1</sup> DAS, Braja M. principios de ingeniería de cimentaciones. p.564-565

- Cuando están sometidas a fuerzas horizontales, las cimentaciones con pilotes resisten por flexión mientras soportan aún la carga vertical transmitida por la superficie.
- Si están presentes en el sitio de la estructura propuesta suelos expansivos y colapsables, y se extienden a gran profundidad por debajo de la superficie del terreno. Los suelos expansivos se hinchan y se contraen conforme el contenido de agua crece y decrece y su presión de expansión es considerable.
- Las cimentaciones de algunas estructuras, como torres de transmisión, plataformas fuera de la costa y losas de sótanos debajo del nivel freático, están sometidas a fuerzas de levantamiento y volteo, por lo que los pilotes tienen la capacidad para resistir estas fuerzas.
- Los estribos y pilotes de puentes son usualmente construidos sobre cimentaciones profundas o pilotes para evitar la posible pérdida de capacidad de carga que una cimentación superficial sufrirá por erosión del suelo en la superficie del terreno.

### **1.2.3. Tipos de pilotes y sus características estructurales**

En la construcción se utilizan diferentes tipos de cimentaciones profundas, las cuales dependen del tipo de carga que debe soportar, de las condiciones del suelo y de la localización del nivel freático. Las cimentaciones se dividen en la siguiente categoría:

## Acero, concreto, madera y pilotes compuestos

Se realizará una descripción detallada sobre las cimentaciones profundas de concreto para tener un conocimiento más amplio en las cimentaciones necesarias a utilizar en las subestaciones eléctricas.

### **1.2.4. Cimentaciones profundas de concreto**

Las cimentaciones profundas de concreto son pilotes en su mayoría con una sección transversal circular, por su facilidad en la construcción in situ. Estos se construyen perforando un agujero en el terreno, para luego colocar una armadura de refuerzo en base a lo estipulado por el diseño para terminar rellenando con concreto la excavación completa.



## **2. DISEÑO**

Los cálculos estructurales se realizan para el diseño de pilotes, verificando que resistan el momento de volteo aplicado, la carga de arrancamiento y la compresión del terreno causada por las cargas verticales y la compresión debidas al efecto de volcamiento. Para el diseño y definición de las dimensiones se considera la envolvente de las cargas máxima mayoradas para las combinaciones de carga indicadas en la sección 2,5 y que en general presentan un factor de seguridad mínimo de 1,3.

Para el diseño de las cimentaciones se requieren como datos básicos, las cargas aplicadas en la parte superior del pedestal (en la base de las patas), los parámetros básicos del suelo y las propiedades mecánicas de los materiales de construcción.

Para los diseños se utilizan las cargas últimas a nivel de pedestal, las cuales son transmitidas a la cimentación.

### **2.1. Convención de cargas para análisis y diseño**

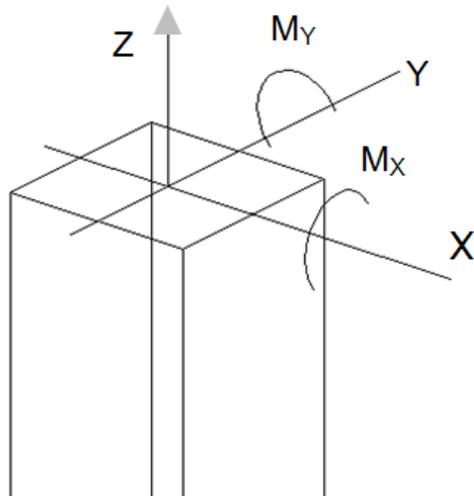
Para efectuar el análisis de cargas que actúa sobre una cimentación profunda, es necesario definir el sentido de las cargas por medio de ejes sobre un plano y de esta forma identificar de que manera reacciona el elemento. La convención de cargas utilizadas para el análisis y diseño de la cimentación es la que se muestra en la figura 1.

## 2.2. Cargas

Para los diseños se utilizan las cargas últimas a nivel de pedestal, toda vez que se usa el método Broms basado en la resistencia a la rotura. Para el soporte, se incluyen la disposición y los diseños de los pernos de anclaje a ser embebidos en la fundación.

Las fuerzas actuantes sobre los pedestales son transmitidas a la cimentación cuyos valores máximos se muestran a continuación.

Figura 1. **Convención de cargas**



Fuente: elaboración propia.

### **2.3. Criterios para el análisis de estabilidad y diseño de la cimentación**

El diseño de las cimentaciones tipo pilotes considera la resistencia por punta, para el cálculo de la capacidad de carga axial. El cálculo de la capacidad de carga horizontal es llevado a cabo en base a la metodología propuesta por Broms, la cual es una de las más utilizadas para el cálculo de pilotes sometidos a cargas laterales. Este es un método basado en la resistencia a la rotura y por tanto se debe calcular con las máximas reacciones con cargas mayoradas.

#### **2.3.1. Hipótesis para el diseño**

Para usar la metodología de Broms en el diseño de cimentaciones profundas, se debe tomar en cuenta las hipótesis que propuso, de las cuales a continuación se mencionan las principales utilizadas para el diseño en este trabajo:

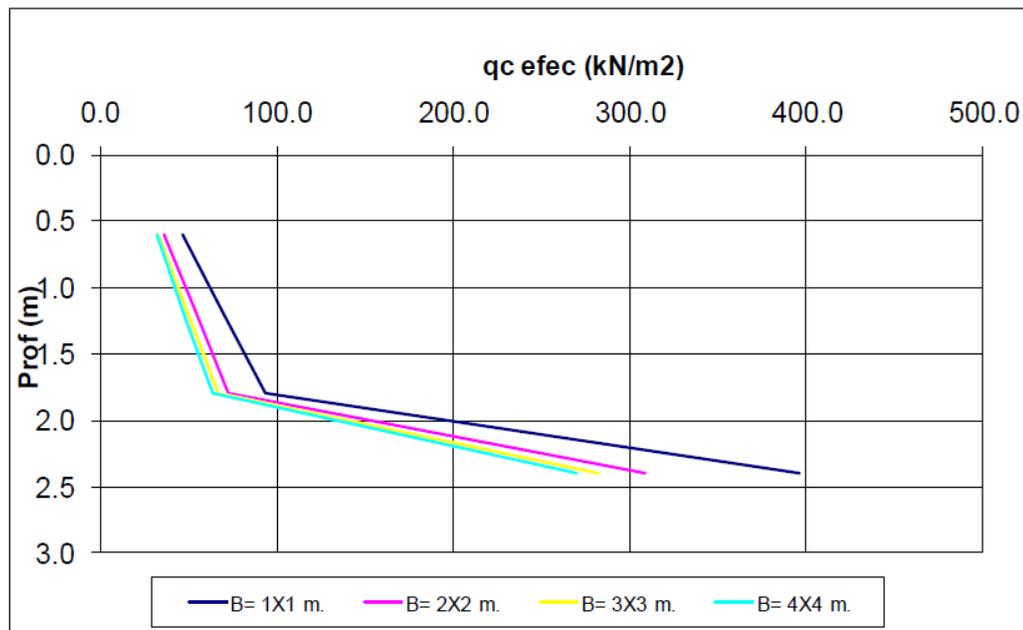
- El suelo puede modelarse por capas, las cuales son homogéneas e isotrópicas en todo su espesor.
- La pila o pilotes de concreto reforzado se comporta como un elemento rígido. Existe un centro de rotación, en el cual la resistencia pasiva del suelo invierte su dirección de aplicación.
- La resistencia última del suelo ante cargas mayoradas, es igual a tres veces la presión pasiva de Rankine en suelos granulares o nueve veces la resistencia al corte no drenada en suelos cohesivos.

- La fuerza de cohesión en las arcillas es igual a la mitad de la resistencia a la compresión no confinada.
- Ante cargas últimas, el acero de refuerzo de la pila o pilote es tal que no falla. La falla ocurre porque la resistencia última del suelo es excedida.

### 2.3.2. Análisis de suelo

Las cimentaciones se verifican para los siguientes parámetros de acuerdo con los datos de un estudio de suelos suministrado, se multiplica la capacidad de soporte de la gráfica por el factor de forma 0,9 indicado en el estudio de suelos para las cimentaciones en pilotes:

Figura 2. Presión admisible versus profundidad S-1



Fuente: elaboración propia.

Tabla I. Estudios estratigráficos

<b>E-1</b>		
Material	E-1 Arena Limosa color café claro	
clasificación Unificada:	SM	SUCS
Peso específico del suelo seco:	1186	kg/m <sup>3</sup>
Humedad	40,78	%
Coeficiente de permeabilidad	0,001	cm/s
Gravedad Específica de la partícula:	2,57	
Relación de Vacíos:	1,16	
Peso específico de partícula:	2565,46	kg/m <sup>3</sup>
Peso específico del suelo inicial:	1723,4	kg/m <sup>3</sup>
Limite Liquido:	NLL	%
Índice de plasticidad	NIP	%
Cohesión	16,68	kN/m <sup>2</sup>
Angulo de Fricción:	34°30'	
<b>E-2</b>		
Material	E-2 Arena Limosa con Grava	
clasificación Unificada:	SM	SUCS
Peso específico del suelo seco:	1427,04	kg/m <sup>3</sup>
Humedad	33,65	%
Coeficiente de permeabilidad	0,005	cm/s
Gravedad Específica de la partícula:	2,68	
Relación de Vacíos:	0,87	
Peso específico de partícula:	2675,09	kg/m <sup>3</sup>
Peso específico del suelo inicial:	1893,59	kg/m <sup>3</sup>

Continuación de la tabla I.

Limite Liquido:	NLL	%
Índice de plasticidad	NIP	%
Cohesión	1,96	kN/m <sup>2</sup>
Angulo de Fricción:	38°30'	
<b>E-3</b>		
Material	E-3 Arena Volcánica	
clasificación Unificada:	SM	SUCS
Peso específico del suelo seco:	1790	kg/m <sup>3</sup>
Humedad	29,15	%
Coeficiente de permeabilidad	0,005	cm/s
Gravedad Específica de la partícula:	2,51	
Relación de Vacíos:	0,4	
Peso específico de partícula:	2505,62	kg/m <sup>3</sup>
Peso específico del suelo inicial:	2075,61	kg/m <sup>3</sup>
Limite Liquido:	NLL	%
Índice de plasticidad	NIP	%
Cohesión	14,72	kN/m <sup>2</sup>
Angulo de Fricción:	39°	

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que en las zonas en donde existen rellenos estructurales, las puntas de los pilotes deberán estar a una profundidad en donde la capacidad de soporte sea menor que en los sitios en donde los pilotes estarán cimentada en zonas de corte, se debe verificar el pilote para la condición mas crítica, es decir, el pilote que tiene su punta a menor profundidad desde la cota de terreno natural.

### **2.3.3. Análisis sísmico**

La seguridad de una estructura sometida a cargas sísmicas se fundamenta en la comprensión del diseñador con respecto a la respuesta de la estructura al movimiento del terreno. El diseño sísmo resistente se diferencia del diseño para cargas gravitacionales y de viento en que se toma en cuenta la mayor sensibilidad relativa de las fuerzas inducidas por el sismo a la geometría de la estructura.

### **2.3.4. Análisis de estabilidad ante esfuerzos verticales**

El dimensionamiento del diámetro del pilote (D) depende de los esfuerzos máximos a compresión aplicados en el terreno y de las limitantes constructivas que se presentan al realizar la excavación. Se verifican los esfuerzos para la combinación de carga axial de compresión más cortante y carga axial de tracción más cortante. Por separado se verifica que el esfuerzo aplicado al terreno sea siempre menor que el esfuerzo admisible.

En el análisis de los esfuerzos verticales sólo se tiene en cuenta el efecto debido a las cargas verticales, toda vez que el momento flector es asumido en su totalidad por el terreno. En donde el esfuerzo máximo es la capacidad soporte del suelo.

$$\sigma_{\text{MAX}} = \frac{P}{A_{\text{PILA}}} = \sigma_{\text{RESISTENTE}} \quad \text{ecuación (1)}$$

En caso de que el esfuerzo aplicado exceda el esfuerzo admisible, es posible emplear la resistencia por fricción del pilote o se calcula el área

(diámetro) necesaria para que el esfuerzo aplicado no exceda el resistente del suelo a la profundidad necesaria.

Para el tipo de estructuras que se deben presentar en las subestaciones eléctricas, las cargas verticales son muy pequeñas y por consiguiente, no se requiere considerar la resistencia por fricción de los pilotes ya que básicamente se diseñan para obtener la profundidad requerida para resistir los momentos de volteo y solo se usarían los pilotes en caso de que las recomendaciones del estudio de suelos lo exijan y no por requerimiento de carga vertical.

### **2.3.5. Análisis de estabilidad al volcamiento**

Continuando con la metodología para este análisis propuesta por Broms, se trabaja con la teoría de capas, donde se calcula la resistencia de cada capa según las características del suelo y la profundidad del estrato.

La carga horizontal en la parte superior del pilote se calcula como la sumatoria algebraica de los aportes de cada estrato, esta fuerza corresponde a la máxima fuerza horizontal resistente del suelo antes de que se presente su falla. Para el cálculo del momento resistente del suelo, se suma algebraicamente los momentos generados por cada estrato con respecto a la parte superior de del pilote.

Con la metodología descrita anteriormente, es posible calcular la longitud mínima del pilote de forma tal que la fuerza horizontal y el momento flector resistente de los estratos del suelo sean mayores o iguales a las cargas aplicadas.

### 2.3.6. Diseño estructural de la cimentación

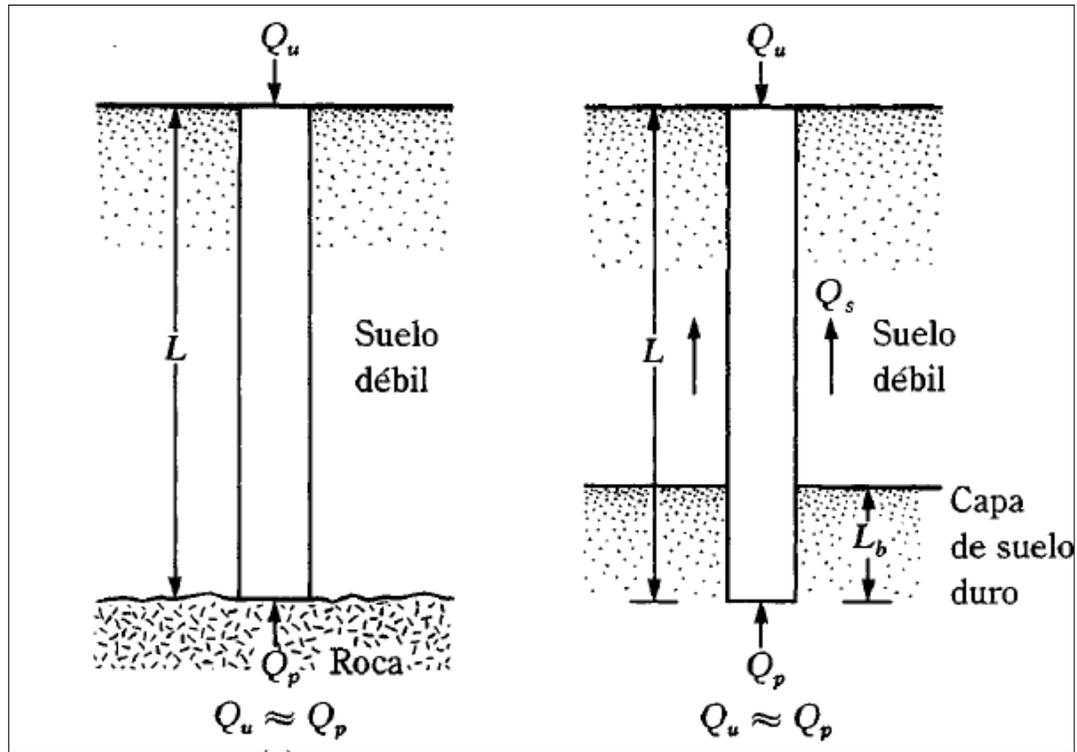
Para el diseño estructural de los elementos de la cimentación se utilizará el método de estados límites (método de resistencia última) considerando el factor de reducción por resistencia en los materiales y un factor de mayoración de la cargas de trabajo. Para más adelante presentar un ejemplo con resultados de diseño de pilotes.

Para las cargas obtenidas se modelará un pilote sometido a cargas laterales y a un momento flector en la parte superior.

Para la estimación de la longitud del pilote se debe conocer el tipo de suelo para lograr identificar de qué manera será la transferencia de cargas hacia una base solida o estable. Los pilotes se construyen sobre el lecho del estrato duro o bien a una profundidad considerable del estrato más estable, la carga última vertical del pilote se expresa así:

$$Q_{uv} = Q_p + Q_s, \quad \text{ecuación (2)}$$

Figura 3. **Modelo de cargas verticales sobre el pilote**



Fuente: DAS, Braja M. Principios de ingeniería de cimentaciones. p.574.

Si  $Q_s$  es muy pequeña, entonces:

$$Q_u \approx Q_p$$

$$Q_p = A_p q_p = A_p (cN_c + qN_q)$$

$$Q_p = A_p (cN_c^* + \gamma L N_q^*), \quad \text{ecuación (3)}$$

Los valores de  $N_c^*$  y  $N_q^*$  se encuentran en la figura 31 (apéndice a). De esta forma la longitud requerida del pilote se estima con una mayor precisión, al ya disponer del registro de estudio de suelos.

Para el caso en donde existan diferentes estratos de suelo, con diferentes parámetros de diseño ( $c$  y  $\phi$ ), se debe utilizar el método de Broms modificado por Tarun R. Naik y Alain H. Pierrot dependiendo de si el suelo es cohesivo o granular y por medio de iteraciones sucesivas se debe encontrar el punto de rotación y la profundidad necesaria para satisfacer la ecuación de equilibrio estático. El método permite estimar la resistencia última de pilotes sometidos a esfuerzos horizontales y recomienda la utilización de expresiones que permite estimar deflexiones para cargas de servicio en suelos granulares y cohesivos.

En el caso del módulo de reacción del suelo se debe asumir con variaciones lineales en profundidad hasta un máximo próximo al punto de rotación del pilote y en cambio, en suelos cohesivos el módulo permanece constante. Se asume que la falla en el pilote se produce una vez alcanzada la resistencia última del suelo o la fluencia de la sección de hormigón.

El comportamiento carga deflexión se establece según una relación entre longitud y un coeficiente  $T$  como pilotes largos o pilotes cortos. Si la relación  $L/T$  es mayor a 4 ( $L/T > 4$ ) se considera pilote largo y si es menor ( $L/T < 4$ ) se considera pilote corto.

- El coeficiente  $T$  se obtiene para arenas como:

$$T_{\text{arena}} = (EI/n_h)^{1/5}, \quad \text{ecuación (4)}$$

- El coeficiente  $T$  se obtiene para arcillas como:

$$T_{\text{arcilla}} = (EI/k_h)^{1/4}, \quad \text{ecuación (5)}$$

Siendo  $E$  el módulo de elasticidad del material, que compone al pilote,  $I$  el momento de inercia de la sección,  $n_h$  el coeficiente de reacción lateral del suelo y  $k_h$  el módulo de reacción del suelo.

En pilotes largos la falla se produce por rótula plástica a una distancia  $d$  de la cabeza del pilote. Por encima de ella las deflexiones laterales son de magnitud considerable y por debajo son pequeñas. Por lo que el método considera que la resistencia lateral pasiva del suelo se desarrolla completamente por encima de la rótula, y que por debajo de ella se desarrolla parcialmente. Las deflexiones laterales para cargas de servicio se estiman en base a los valores de  $n_h$ ,  $k_h$  y la carga de servicio.

Para el diseño de pilotes en este caso se analizaran pilotes largos cuya deflexión horizontal ( $y_0$ ) y carga última horizontal ( $Q_u$ ) y el momento máximo ( $M_{max}$ ) se calcula mediante las siguientes ecuaciones a desarrollar y para lo cual estará sometido el pilote de la siguiente manera.

$$y_0 = \frac{2.40Q}{n_h^{3/5}(EI)^{2/5}}, \quad \text{ecuación (6)}$$

$$Q_u = \frac{M_u}{e+0.54\sqrt{\frac{Q_u}{\gamma DK_p}}}, \quad \text{ecuación (7)}$$

$$M_{max} = Q_u(e + 1.5d + 0.5f), \quad \text{ecuación (8)}$$

La resistencia lateral última es igual a:

$$\frac{Q_u}{K_p \gamma D^3}, \quad \text{ecuación (9)}$$

El momento último es igual a:

$$M_u = \frac{M_y}{D^4 \gamma K_p}, \quad \text{ecuación (10)}$$

$$K_p = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right), \quad \text{ecuación (11)}$$

$$M_y = SF_y, \quad \text{ecuación (12)}$$

$$S = \frac{I}{\frac{d_1}{2}}, \quad \text{ecuación (13)}$$

La resistencia del material es  $F_y$  el cual varia dependiendo si es un pilote de concreto o un pilote de acero en este caso se maneja la resistencia del concreto  $F'_c = 3000$  psi.

Basado a la inercia la sección del pilote ( $I$ ) la distancia  $d_1$  que es igual a el diámetro del pilote. Donde  $K_p$  es el coeficiente de empuje pasivo del suelo,  $D$  es el diámetro del pilote y  $M_u$  el momento resistente último de la sección del pilote,  $Q$  la carga horizontal aplicada a la cabeza del pilote,  $\eta$  es la relación entre el módulo de reacción lateral del suelo y la rigidez flexural del pilote:

$$\eta = (T_{\text{arcilla}})^{-1}, \quad \text{ecuación (14)}$$

$$\eta = (n_h/EI)^{1/5}, \quad \text{ecuación (15)}$$

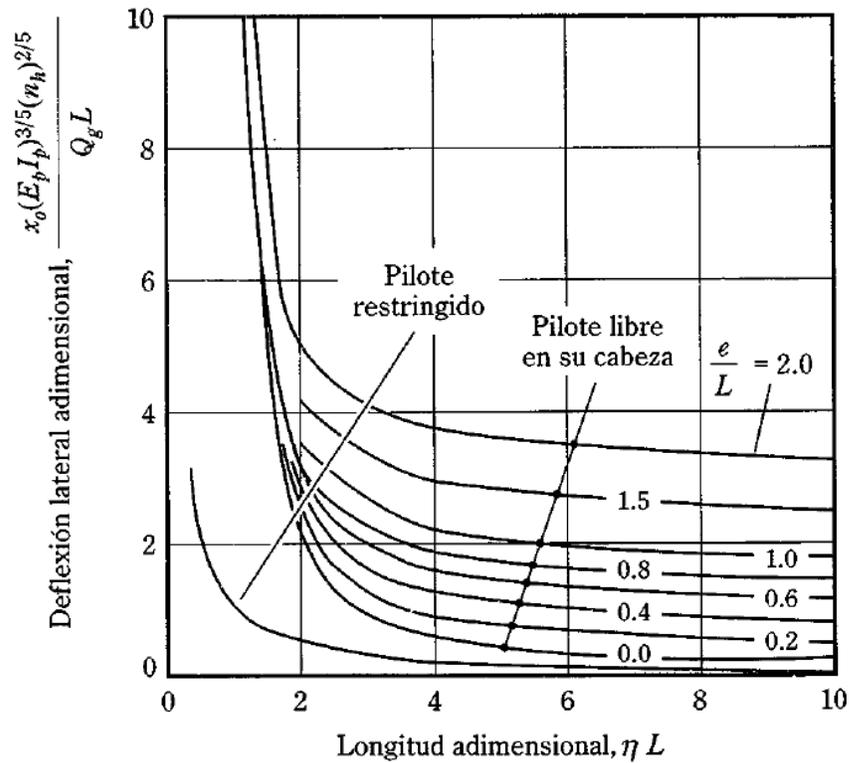
En donde el valor de  $n_h$  se obtiene de la tabla II (apéndice b) basado en el tipo de suelo sobre el cual se desea trabajar.

La deflexión lateral adimensional es igual a:

$$\frac{x_0(EI)^{3/5}(n_h)^{2/5}}{QL}, \quad \text{ecuación (16)}$$

En base al análisis de Broms se tiene la siguiente gráfica para estimar la deflexión de la cabeza de un pilote en suelo arenoso.

Figura 4. Deflexión lateral versus longitud adimensional

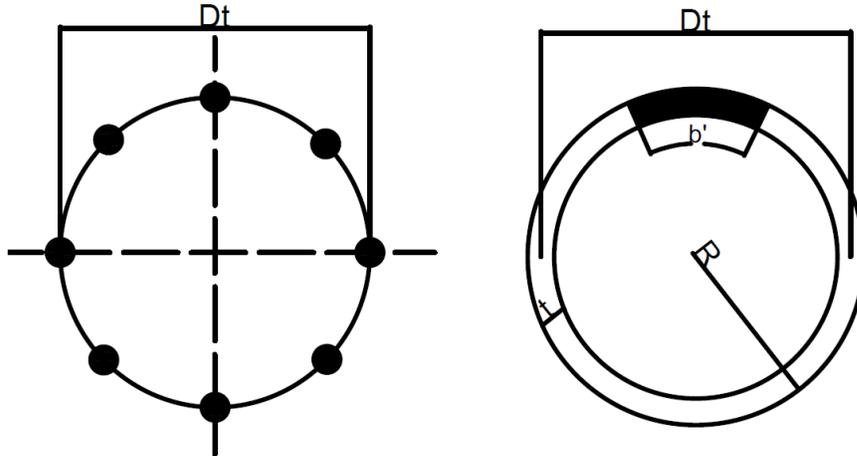


Fuente: DAS, Braja M. Principios de ingeniería de cimentaciones. p.632.

Diseños de pernos de anclaje:

Los esfuerzos de tensión se transmiten directamente a los pernos de anclaje los cuales para un buen funcionamiento deben ser como mínimo 4. Una manera más simple puede ser considerar un cilindro de pared delgada en lugar de los pernos de anclaje y encontrar los esfuerzos en éste, el cual va estar sujeto a una carga y un momento en su base.

Figura 5. **Distribución de pernos de anclaje y cilindro de pared delgada equivalente**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad 2011.

Cálculo de la inercia del tubo:

$$I_e = \frac{\pi(2R)^4}{64} = \frac{\pi R^4}{4}$$

$$I_i = \frac{\pi(2R-2t)^4}{64} = \frac{\pi(R-t)^4}{4}$$

$$I_{\text{tubo}} = I_e - I_i = \frac{\pi R^4}{4} - \frac{\pi(R-t)^4}{4}$$

$$I_{\text{tubo}} = \frac{\pi R^4 - \pi R^4 + 4\pi R^3 t - 6\pi R^2 t^2 + 4\pi R t^3 - \pi t^4}{4}$$

Dado que los últimos tres términos del numerador son demasiado pequeños se desprecian:

$$I_{\text{tubo}} = \frac{4\pi R^3 t}{4} = \pi R^3 t, \quad \text{ecuación (17)}$$

Los esfuerzos máximos de tensión el tubo son:

$$\sigma_t = \frac{Mc}{I} = \frac{MR}{\pi R^2 t} = \frac{4M}{\pi(D_t)^2 t}, \quad \text{ecuación (18)}$$

El área equivalente de un perno de anclaje es  $b't$ . La fuerza de tensión en un perno de anclaje es:

$$P = \sigma A = \frac{4M}{\pi(D_t)^2 t} (b't) = \frac{4Mb'}{\pi(D_t)^2}, \quad \text{ecuación (19)}$$

Si  $N'$  es el número de pernos de anclaje, entonces:

$$N' = \frac{\pi D_t}{b'} \rightarrow b' = \frac{\pi D_t}{N'}, \quad \text{ecuación (20)}$$

$$P = \frac{4M \frac{\pi D_t}{N'}}{\pi(D_t)^2} = \frac{4M}{D_t N'}, \quad \text{ecuación (21)}$$

El esfuerzo de compresión en cada perno de anclaje es:

$$P_c = \frac{\text{Peso de la estructura}}{N'} = \frac{W}{N'}$$

$$P_{\text{perno}} = \frac{4M}{D_t N'} - \frac{W}{N'}, \quad \text{ecuación (22)}$$

#### 2.4. Combinaciones de cargas

Los estados de carga se definen como las posibles cargas que se presentan durante la vida útil de la estructura. Existen estados de carga del uso normal de la estructura, cargas muertas y vivas; estados de carga temporales como aquellas de viento, sismo, o la misma construcción.

Tabla II. **Cargas de servicio**

$W + CT$
$W + CT + CVx$
$W + CT + CVy$
$W + CC + CVx$
$W + CC + CVy$
$W + CT + CSsx + CSsz$
$W + CT + CSsx - CSsz$
$W + CT + CSsy + CSsz$
$W + CT + CSsy - CSsz$
$W + CC + CSsx + CSsz$
$W + CC + CSsx - CSsz$
$W + CC + CSsy + CSsz$
$W + CC + CSsy - CSsz$

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Cargas últimas**

$1,4W + 1,7CT$
$1,2W + 1,3CT + 1,3CVx$
$1,2W + 1,3CT + 1,3CVy$
$1,2W + 1,0CC + 1,3CVx$
$1,2W + 1,0CC + 1,3CVy$
$1,2W + 1,3CT + 1,0CSsx + 1,0CSsz$
$1,2W + 1,3CT + 1,0CSsx - 1,0CSsz$
$1,2W + 1,3CT + 1,0CSsy + 1,0CSsz$
$1,2W + 1,3CT + 1,0CSsy - 1,0CSsz$
$1,2W + 1,0CC + 1,0CSsx + 1,0CSsz$
$1,2W + 1,0CC + 1,0CSsx - 1,0CSsz$
$1,2W + 1,0CC + 1,0CSsy + 1,0CSsz$
$1,2W + 1,0CC + 1,0CSsy - 1,0CSsz$

Fuente: elaboración propia.

## 2.5. Especificaciones de materiales

Los materiales de construcción son materia prima y con más frecuencia pueden ser un producto manufacturado, empleado en la construcción de obras civiles, por lo que debe tener disciplina en la combinación de los materiales para satisfacer las necesidades de diseño.

- Concreto

Se diseña la estructura tomando el módulo de elasticidad  $E_c$  como:

$$E_c = 12500 \times (f'c)^{1/2}$$

En la cual:  $f'c$  es 3000 psi. = 210 kgf/cm<sup>2</sup> = 21MPa

$$E_c = 181,142 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{Densidad del concreto} = 2400 \text{ kg/m}^3 = 24\text{kN/m}^3$$

- Diseño de mezcla para concreto

Se necesita que el concreto tenga una resistencia de  $f'c = 210$  kilogramo partido centímetro cuadrado y se piensa en un agregado de 3/8 pulgadas para facilitar el movimiento entre la armadura al momento de fundir.

El asentamiento recomendado para columnas es de 10 centímetros en condiciones medias y materiales adecuados, como la arena de río, según tabla IV que se encuentra en apéndices. Cantidad de agua según tabla V de apéndices es de 225 litros partido metro cúbico. Sabiendo que 1 metro de agua pesa 1 gramo. Entonces 225 litros partido metro cúbico pesan 225 kilogramos partido metro cúbico.

Cálculo:

Relación A/C = 0,60

$$\frac{225 \text{ kg/m}^3}{0,60} = C \rightarrow 375 \text{ kg/m}^3$$

$$2400 \text{ kg/m}^3 = A + C + \text{agregados}$$

$$2400 \text{ kg/m}^3 - 225 \text{ kg/m}^3 - 375 \text{ kg/m}^3 = \text{agregados}$$

$$\text{agregados} = 1800 \text{ kg/m}^3$$

Porcentaje de agregados en base al tamaño de agregado grueso según tabla VI.

$$\% \text{ de arena} = 48$$

$$\% \text{ de pedrín} = 52$$

$$\text{Arena} = 0,48 * 1800 \text{ kg/m}^3 = 864 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Pedrín} = 0,52 * 1800 \text{ kg/m}^3 = 936 \text{ kg/m}^3$$

Cálculo de proporciones

$$C = \frac{375}{375} = 1$$

$$A = \frac{864}{375} = 2,30$$

$$P = \frac{936}{375} = 2,50$$

$$a = \frac{225}{375} = 0,60$$

Cemento – arena – pedrín

$$1 - 2,30 - 2,50$$

- Acero

El acero de refuerzo utilizado en el diseño tiene como límite de fluencia mínimo  $f_y = 60 \text{ ksi} = 4\,200 \text{ kgf/cm}^2 = 420 \text{ MPa}$ .

Alternativamente puede usarse para el acero de refuerzo para los estribos, acero doblado en espiral, siempre y cuando se cumpla con la separación de los flejes que se indiquen en el diseño

## **2.6. Resultados del análisis de estabilidad y diseño de las fundaciones en pilas**

En esta sección se realizará el diseño de una cimentación profunda, en la cual se desarrollarán los análisis de estabilidad para determinar un diseño funcional en subestaciones eléctricas.

### **2.6.1. Ejemplo de diseño de una cimentación profunda**

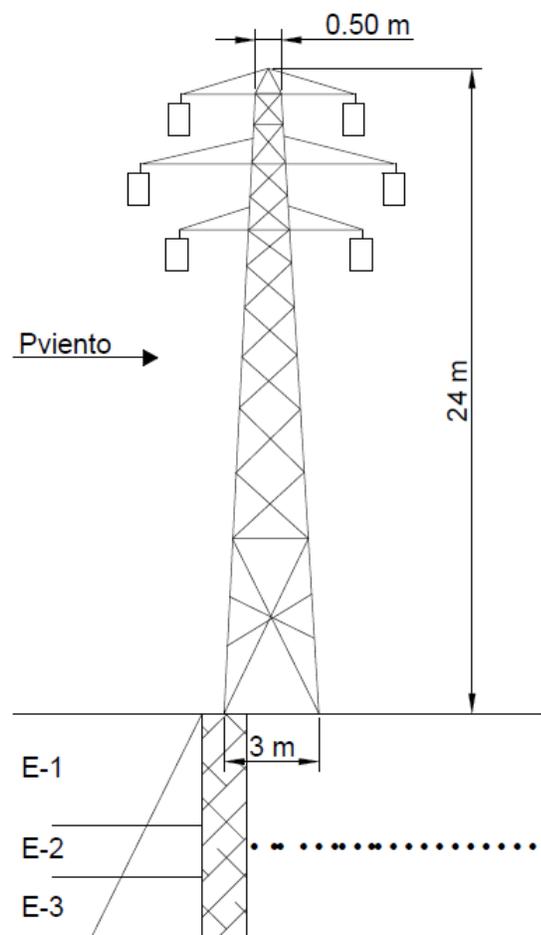
Diseñar la cimentación para una torre eléctrica que se encuentra en Escuintla de 24 metros de alto, la cual está compuesta de cuatro bases que distribuyen la carga con uniformidad hacia sus cimentaciones, la torre se encuentra anclada a las cimentaciones por medio de pernos. La carga de trabajo que llega a cada una de las bases de la torre es de 30 toneladas y un desplazamiento máximo  $x_0 = 5 \text{ mm}$ .

La presión de viento en el área del departamento de Escuintla según las normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la República de Guatemala, AGIES NSE 2-10 demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección. Es de 438 kilogramos sobre metro

cuadrado. Las características del suelo son determinadas del análisis de suelo proporcionado en la sección 2.3.2 y del estrato E-3 y son las siguientes:

- Arena volcánica
- Peso volumétrico ( $\gamma$ ) = 1 790 kg/m<sup>3</sup>
- $\Phi = 39^\circ$
- Capacidad soportes del suelo = 0,90 (31 Ton/m<sup>2</sup>) (figura 2)

Figura 6. Dimensiones de torre



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad 2011.

E – 1

Arena limosa color café claro

Peso volumétrico ( $\gamma$ ) = 1 186 kg/m<sup>3</sup>

$\Phi$  = 34°30'

c = 16,68 kN/m<sup>2</sup>

Profundidad del E – 1 = 1,50 m

Capacidad soporte del suelo = 7,0 Ton/m<sup>2</sup>

E – 2

Arena limosa con grava

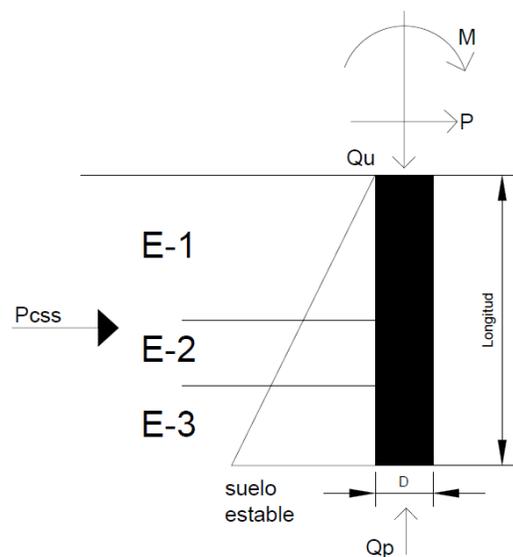
Peso volumétrico ( $\gamma$ ) = 1 427,04 kg/m<sup>3</sup>

$\Phi$  = 38°30'

c = 1,96 kN/m<sup>2</sup>

Profundidad del E – 2 = 2,00 m

Figura 7. **Solicitaciones para la cimentación**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad 2011.

Cálculo del diámetro (D) de la cimentación:

$$\sigma_{MAX} = \frac{P}{A_{PILA}} \leq \sigma_{RESISTENTE}$$

$$\sigma_{MAX} = q_{CSS}, \quad P = Q_{UV}$$

$$q_{CSS} = \frac{Q_{UV}}{A_{PILA}}$$

$$A_{PILA} = \frac{Q_{UV}}{q_{CSS}} = \frac{30 \text{ ton}}{0.90 \left( 31 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right)} = 1.07 \text{ m}^2$$

$$A_{PILA} = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = \sqrt{\frac{4(A_{PILA})}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(1.07)}{\pi}} = 1.16 \text{ m}$$

Por conveniencia del diseño y por el espacio ocupado para las cimentaciones el diámetro de la cimentación se dejara en 1,00 metro.

Cálculo de la longitud del pilote con el estrato de suelo E – 3:

$$Q_p = A_p (cN_c^* + \gamma L N_q^*), \text{ en donde:}$$

$$A_p = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 1^2}{4} = 0,79 \text{ m}^2$$

$$c = \frac{q_{CSS}}{2} = \frac{0.90(0.31)}{2} = 13,95 \text{ ton/m}^2$$

$$\gamma = 1,79 \text{ ton/m}^3$$

$$N_c^*, N_q^* = 67,87, 55,96 \quad (\text{Apéndice b, Tabla VI: Factores de seguridad de carga, Meyerhof}).$$

$$30 \text{ ton} = (0,79 \text{ m}^2) \left( \left( \frac{13,95 \text{ ton}}{\text{m}^2} \right) (67,87) + \left( \frac{1,79 \text{ ton}}{\text{m}^3} \right) 55,96 L \right)$$

$$\frac{37,97 \text{ ton}}{\text{m}^2} = \frac{946,79 \text{ ton}}{\text{m}^2} + \frac{100,17 \text{ ton}}{\text{m}^3} L$$

$$\frac{37,97 \text{ ton}}{\text{m}^2} - \frac{946,79 \text{ ton}}{\text{m}^2} = \frac{100,17 \text{ ton}}{\text{m}^3} L$$

$$L = - \left( \frac{908,82 \text{ ton}}{\text{m}^2} \right) / \left( \frac{100,17 \text{ ton}}{\text{m}^3} \right) = -9,07 \text{ m}$$

$$L = 9,10 \text{ m}$$

El comportamiento carga-deflexión establecido según la relación entre longitud y el coeficiente T como pilotes largos o pilotes cortos:

$$\left(\frac{L}{T} > 4\right) = \text{pilote largo}$$

$$T_{\text{arena}} = (EI/n_h)^{1/5}$$

$$E_c = 181,142 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 17763961,94 \text{ kN/m}^2$$

$$n_h = 17,000 \text{ kN/m}^3 \quad (\text{Arena densa, apéndice b, tabla V})$$

$$I = \frac{1}{4} \pi r^4 = \frac{1}{4} (\pi(0,50\text{m})^4) = 0,05\text{m}^4$$

$$T_{\text{arena}} = \left(\frac{(17763961,94)(0,05)}{17000}\right)^{1/5} = 2,20\text{m}$$

$$\frac{9,10\text{m}}{2,20\text{m}} > 4, \quad 4,13 > 4, \text{ por lo que se trata de un pilote largo.}$$

Determinando la carga lateral admisible:

$$M_y = SF_c$$

$$S = \frac{I}{\frac{d_1}{2}} = \frac{0,05\text{m}^4}{\frac{1\text{m}}{2}} = 0,05\text{m}^3$$

$$M_y = 0,05\text{m}^3 \left(\frac{21000000\text{kg}}{\text{m}^2}\right) = 105,000 \text{ kg} - \text{m} = 105 \text{ ton} - \text{m}$$

$$M_u = \frac{M_y}{D^4 \gamma K_p}$$

$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2}\right) = \tan^2 \left(45 + \frac{39^\circ}{2}\right) = 4,4$$

$$M_u = \frac{M_y}{D^4 \gamma K_p}$$

$$M_u = \frac{105}{1^4(1,79)(4,4)} = 13,33$$

De la figura 32 (apéndice a) para  $\frac{M_y}{D^4 \gamma K_p} = 13,33$ , la magnitud de  $\frac{Q_u}{K_p \gamma D^3}$ , para pilotes de cabeza libre con  $\frac{e}{D} = 0$ , es aproximadamente 10, por lo que:

$$\frac{Q_u}{K_p \gamma D^3} = 10$$

$$Q_u = 10(K_p \gamma D^3) = 10(4,4)(1,79)(1)^3 = 78,76 \text{ Ton}$$

Se revisa la deflexión de la cabeza del pilote:

$$\eta = (n_h/EI)^{1/5}$$

$$n_h = 17,000 \text{ kN/m}^3$$

$$\eta = \left( \frac{17,000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}}{(17763961,94 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2})(0,05\text{m}^4)} \right) = 0,45\text{m}^{-1}$$

$$\eta L = (9,10\text{m})(0,45\text{m}^{-1}) = 4,095$$

De la gráfica II, para  $\eta L = 4,095$ ,  $\frac{e}{L} = 0$  (pilotes libres en su cabeza)

$$\frac{x_0(EI)^{3/5}(n_h)^{2/5}}{QL} = 0,5$$

$$Q = \frac{x_0(EI)^{3/5}(n_h)^{2/5}}{0,5L}$$

$$= \frac{(0,005)[(17763961,94 \text{ kN/m}^2)(0,05\text{m}^4)]^{3/5}(17,000 \text{ kN/m}^3)^{2/5}}{0,5(9,10)}$$

$$= 200,56 \text{ kN} = 20,45 \text{ Ton}$$

Por consiguiente,  $Q = 20,45 \text{ Ton} (< Q_u = 78,76 \text{ Ton})$

Como la carga última horizontal del pilote es mayor a la carga horizontal aplicada al pilote el diseño de la cimentación es adecuado y funcional.

Cálculo del refuerzo:

En la cimentación es necesario colocar pernos de anclaje para conectar las torres, por lo que es necesario calcular los pernos de anclaje y el refuerzo de la cimentación.

El cálculo de la fuerza axial de tensión se efectúa como sigue:

Carga axial = 30 toneladas + placa base = 30,5 toneladas. Se propone un número de pernos de anclaje,  $N' = 4$ , se propone un diámetro del círculo de las anclas,  $D_t = 0,60$  metros y un espesor  $t = 6,35 \text{ Exp} - 3$  metros.

$$M_y = 105 \text{ ton} - \text{m}$$

$$P_{\text{perno}} = \frac{4M}{D_t N'} - \frac{W}{N'} = \frac{4(105)}{0,60(4)} - \frac{30,5}{4} = 167,38 \text{ ton}$$

$$\sigma_t = \frac{4M}{\pi(D_t)^2 t} = \frac{4(105)}{\pi(0,60)^2(0,00635)} = 58482,13 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$P = \sigma A \rightarrow A = \frac{P}{\sigma}$$

$$A = \frac{167,38 \text{ ton}}{58482,13 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}} = 0,003 \text{m}^2 \rightarrow 30 \text{cm}^2$$

Se usaran pernos de anclaje de 2 ½" cuya área es de 31,66 centímetros cuadrados.

Para el cálculo del refuerzo longitudinal de la cimentación se utilizara una cuantía de acero  $\rho = 0,01$ .

$$A_s = \rho A_p = 0,01 \left( \frac{\pi(100)^2}{4} \right) = 78,54 \text{cm}^2$$

Una varilla no. 6 tiene un área de 2,85 centímetros cuadrados por lo que se utilizan 28 varillas no.6 equivalentes a un área de 79,80 centímetros cuadrados. La separación será de  $\frac{\pi \times 85}{28} = 9,5$  centímetros a ejes de varilla.

Se colocaran anillos o espirales no. 5 @ 15 centímetros en toda la cimentación.

### **3. CONSTRUCCIÓN**

En la construcción de cimentaciones profundas se toma en cuenta una serie de elementos que constituyen una herramienta para adaptar una metodología constructiva adecuada. Entre los elementos se tiene el implemento de normas de seguridad industrial para el personal, área de trabajo y de materiales y zonas de construcción. La implementación de normas de seguridad industrial en la construcción se ha ido implementando en Guatemala cada vez con una mayor responsabilidad.

Es de suma importancia implementar sistemas de control de calidad de los materiales utilizados para la construcción de cimentaciones profundas, además de cumplir con todas las normas establecidas en los códigos y reglamentos, estos materiales deben adaptarse a las condiciones especiales de la construcción de pilotes, tales como trabajo a profundidades considerables, condiciones de mucha humedad, azolves del terreno.

Existen diferentes procesos constructivos para cimentaciones profundas, sin embargo a continuación se presenta un método constructivo desarrollado en una subestación eléctrica de Guatemala, donde se podrá conocer diferentes formas de desarrollo ante distintos estratos de suelo, equipo de apoyo y replanteo topográfico, ya que la localización exacta de cada cimentación es fundamental en una subestación eléctrica por el equipo que debe ser montado con exactitud sobre cada una, aunque son construidas de forma independiente su trabajo estructural se realiza en conjunto.

Figura 8. **Montaje de torres sobre cimentaciones profundas en subestación eléctrica Palín-Escuintla**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

### **3.1. Normas de seguridad industrial**

Las normas de seguridad son un conjunto de medidas destinadas a proteger la salud de todos los involucrados en el proceso constructivo, prevenir accidentes y enfermedades. Siendo un conjunto de prácticas de sentidos común y fomento de la responsabilidad en cada persona. Las normas de seguridad industrial en la construcción son un campo muy amplio, sin embargo se dará a conocer las que de mejor forma se adecúan a la construcción de subestaciones eléctricas.

Para el inicio de una obra es importante establecer normas de trabajo como primer paso para la prevención de accidentes y enfermedades laborales. La implementación de normas para el uso de herramientas manuales,

seguridad del personal, condiciones mínimas de seguridad, salud y manejo ambiental y un plan de emergencia adecuado a las necesidades del área en la que se ejecuta la obra, son de suma importancia para el buen desarrollo de subestaciones eléctricas junto a una adecuada señalización.

Figura 9. Señalización mínima para áreas de trabajo



Fuente: GIRÓN RODRÍGUEZ, Julieta. Seguridad industrial. [deyiseguridadindustrial.blogspot.com](http://deyiseguridadindustrial.blogspot.com). Consulta: 6 de junio de 2013.

### 3.1.1. Normas de trabajo

Las siguientes normas son las más fundamentales para el trabajo adecuado en subestaciones eléctricas, sin embargo su implementación puede variar dependiendo del lugar, equipo de trabajo y personal.

- Prohibida la caza de animales, toma de plantas, frutas u otros elementos que componen la flora y fauna del lugar.
- Prohibido encender fogatas y quemas en el dentro del proyecto.
- El equipo de protección es de uso personal, no debe ser prestado, además, es responsabilidad de cada individuo su cuidado y su uso es obligatorio.
- Prohibido el uso de drogas, alcohol y cigarrillos en el sitio de trabajo.
- No deben utilizarse joyas, para evitar que éstas se enganchen en objetos o herramientas.
- Los desechos generados en campo se deben recolectar en bolsas para su disposición final.
- Ningún trabajador utilizará máquinas o vehículos sin estar autorizado para ello.
- Se debe informar al supervisor inmediato o el representante de seguridad sobre cualquier condición insegura.
- Se debe llevar siempre una copia de los documentos de identificación personal, para ser utilizado en el caso de emergencia.
- Acatar las instrucciones, reglas y normas implementadas en la obra.
- El personal que ha sido capacitado en materia de seguridad y salud ocupacional debe ser responsable de su trabajo con seguridad.

### **3.1.2. Normas de uso de herramientas manuales**

A continuación se presentan las normas de herramientas manuales que se deben aplicar a los trabajadores en el área de la construcción, lo cual es de suma importancia para un desempeño de las labores de forma segura y con el menor porcentaje de riesgos posible.

- Utilizar las herramientas manuales solo para sus fines específicos, inspeccionando periódicamente.
- Dar aviso inmediato de la existencia de herramientas defectuosas y retirarlas de uso.
- No llevar herramientas en los bolsillos a menos que se encuentren adaptados para ello.
- Cuando no este utilizando las herramientas colocar en lugares donde no puedan producir accidentes.
- Las herramientas punzocortantes deben ser protegidas para evitar accidentes.

### **3.1.3. Seguridad personal**

La seguridad personal consiste en los sistemas de protección implementados para el personal, tanto como el equipo de protección personal como el conocimiento de los riesgos que se tiene en las distintas áreas de trabajo.

- Equipo de protección personal

Los elementos utilizados para la protección personal es el equipo destinado a ser llevado por el trabajador para que lo proteja de uno o varios riesgos que pueden amenazar su seguridad o su salud en el trabajo, así como cualquier complemento o accesorio destinado a tal fin. Generalmente proporcionan una barrera entre un determinado riesgo la persona, disminuyendo la gravedad de las consecuencias de un accidente y mejoran el resguardo de la integridad física del trabajador.

En la construcción de cimentaciones profundas, es de vital importancia su implementación y uso en todo momento, desde que se inicia con el corte de acero, excavaciones, como en el momento de la fundición de las cimentaciones. El equipo básico a utilizar es el siguiente:

- Casco de seguridad: en todo momento de la construcción de cimentaciones.
- Calzado de seguridad con punta reforzada de acero y suela antideslizante: es de vital importancia utilizarlas en el área de trabajo, ya que se maneja con objetos pesados o corto punzantes.
- Guantes de lona contra riesgos mecánicos y mejor trabajo con las herramientas manuales.
- Ropa impermeable, si en dado caso el clima es húmedo y propenso a lluvias.
- Arnés de seguridad de cuerpo completo, en el momento que sea necesario descender en la excavación de las cimentaciones para su limpieza o trabajos que se realicen cerca de la misma.
- Protectores auditivos, ya que el trabajo cerca de maquinaria es inevitable.

- Gafas industriales anti-proyecciones, las cuales disminuyen el riesgo de que las partículas dañen los ojos.
  - Mascarillas con filtro mecánico, por el polvo existente de las excavaciones y materiales de construcción implementados para las cimentaciones.
  - Escaleras, las cuales deben de tener un largo mayor a la excavación, saliendo de ella por lo menos 50 centímetro.
  - Cuerdas de rescate, de un largo suficiente para que la persona este sujeta y como para realizar líneas de vida en cada excavación.
- Seguridad en la construcción de cimentaciones profundas
 

Se describe el proceso constructivo, identificando los riesgos y las actuaciones que deben realizarse en relación con la prevención de riesgos laborales en la ejecución de cimentaciones profundas.

    - Identificación de riesgos
      - En el proceso de ejecución
        - ✓ Caídas a distinto nivel
        - ✓ Caídas al mismo nivel
        - ✓ Atrapamientos
        - ✓ Atropellos por parte de las máquinas
        - ✓ Atropellos por parte de vehículos auxiliares
        - ✓ Golpes y proyecciones
        - ✓ Electrocutión
        - ✓ Pisadas sobre objetos
        - ✓ Vuelcos de máquinas y vehículos

- ✓ Cortes con objetos y herramientas
- ✓ Aplastamientos por parte de las armaduras
- ✓ Caídas de cargas en suspensión
  
- Higiénicos
  - ✓ Inhalación de polvo
  - ✓ Dermatitis por contacto con el hormigón
  - ✓ Ruido
  - ✓ Vibraciones
  - ✓ Interferencia con conducciones de gas, electricidad, agua.
  
- A terceros
  - ✓ Los derivados por la interferencia en las conducciones de gas, electricidad, agua y teléfono.
  - ✓ Daños en estructuras de edificios adyacentes por las vibraciones.
  - ✓ Ruido.
  - ✓ Inhalación de polvo.
  
- Equipo y medios auxiliares
  - Maquinaria
    - ✓ Pilotadoras
    - ✓ Barrenos
    - ✓ Vibradores

- ✓ Rotomartillos
- ✓ Compresores
- ✓ Cabrias
- ✓ Barretas
- ✓ Lasos
- ✓ Cubetas
- ✓ Andamios
- ✓ Garruchas
- ✓ Piochas
- ✓ Asadones
- ✓ Palas
- ✓ Pulidora
- ✓ Vibrador
- ✓ Carretas
- ✓ Cobas
- ✓ Concreteira
- ✓ Generadores de electricidad
- ✓ Grifas

▪ Elementos de señalización

- ✓ Malla naranja de polietileno para acotamiento de zonas.
- ✓ Carteles de PVC, señalización de obligación sobre el uso de EPIS.
- ✓ Carteles de PVC, señalización de advertencia con indicación de riesgos.

- Procedimiento de trabajo
  - Ejecución
    - ✓ El personal debe estar especializado en ello, no debiéndose coger personal sin preparación adecuada.
    - ✓ Se prohibirá trabajar simultáneamente a distintos niveles.
    - ✓ Deben existir unas normas para el montaje de cables y poleas.
    - ✓ Las torretas llevarán plataforma prevista de barandilla, barra intermedia y rodapié.
    - ✓ Se acopiarán los útiles de perforación, no se dejarán en medio de la obra.
    - ✓ El manejo de los martinets así como su mantenimiento se realizarán según el manual de instrucciones del fabricante.
    - ✓ Los motores estarán protegidos con carcasas adecuadas para evitar atrapamientos.

#### **3.1.4. Plan de emergencia**

El plan de emergencia es el documento en el que se plasma el conocimiento de los agentes perturbadores y sus efectos sobre los trabajadores y su entorno, a fin de determinar el proceso regulador, es decir, aquellas actividades, procedimientos y acciones destinadas a la protección de los sistemas afectables.

En la construcción de cimentaciones para subestaciones eléctricas es de vital importancia el conocimiento de éste, ya que se tiene un manejo constante con equipo y material pesado y un trabajo constante dentro del proyecto.

El plan de emergencia debe cumplir con cinco principios básicos:

- Ser formulado por escrito, para evitar modificaciones e improvisaciones.
- Contar con la aprobación de la máxima autoridad de la empresa.
- Ser difundido ampliamente para su conocimiento.
- Asegurar el aprendizaje del contenido entre el personal capacitado.
- Realizar simulacros, con el fin de practicarlos regularmente.

Se debe definir los tipos de emergencias que se puede presentar en el proyecto, entre los cuales se encuentran:

- Ambientales: desastres naturales, inundación, terremoto, tormentas, deslaves, incendios.
- Accidentes laborales: quemaduras, heridas, fracturas, desmayos.
- Accidente vehicular.
- Seguridad física: robo, problemas con comunidades

En el plan de emergencia debe incluirse la forma de actuar en el momento que se presente cualquier inconveniente, como también los números de emergencia para dar aviso inmediato a las autoridades correspondientes.

### **3.1.5. Manejo y control ambiental**

El manejo y control ambiental es importante para disminuir los efectos sobre la comunidad que se encuentre cercana a la obra. Lo principal a tomar en cuenta sobre el ambiente es lo siguiente:

- Si existen fuentes de agua, se definirán las medidas requeridas para protegerlas e impedir que sean obstruidas, represadas o contaminadas.
- Para evitar el deterioro de las vías y alcantarillados de aguas pluviales, se debe atender las normas sobre aseo de banquetas, transporte y disposición de tierras y escombros.
- Definir el sitio donde se botaran los materiales resultantes de la limpieza y otros movimientos de tierras, obteniendo la autorización debida para ello de las autoridades correspondientes.

### **3.2. Sistemas de control de calidad**

El control de calidad tiene como objetivo verificar que los requisitos de construcción de los materiales especificados en el diseño de las cimentaciones profundas, se cumplan dentro de tolerancias especificadas o bien por códigos o normas de construcción considerados en diseño, debido a la variabilidad natural de los mismos<sup>2</sup>.

La calidad de los materiales es fundamental en la etapa constructiva para garantizar el buen funcionamiento de la estructura en el momento que se encuentran trabajando de forma combinada. Antes que el material entre en funcionamiento es necesario verificar que cumpla con las especificaciones de diseño propuestas para cada uno de sus componentes.

Como las cimentaciones profundas son estructuras de concreto reforzado, es necesario controlar la calidad de los materiales como la ejecución de la

---

<sup>2</sup> GONZALEZ CUEVAS, Robles Fernández. Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado. p. 61-64.

obra, especialmente en todo lo referente a dimensiones, recubrimiento mínimo del acero, detalles del refuerzo, exactitud topográfica en la colocación y centrado de pernos, adherencia en las distintas fases de fundición del concreto y los acabados finales necesarios, entre otros. Se debe tomar en cuenta que este control de calidad es realizado en obra y cualquier otro ensayo que sea necesario ser efectuado en laboratorio, debe ser con personal y equipo calificado.

El Reglamento del ACI 318-08 establece en el capítulo 3 las normas correspondientes para la aceptación y realización de ensayos en obras de concreto con el fin de determinar si los materiales corresponden a la calidad especificada en el diseño.

### **3.2.1. Concreto**

El concreto es la combinación de diferentes materiales por lo que es necesario llevar el control de calidad de cada uno de sus componentes para obtener como mínimo la resistencia solicitada en el diseño de mezclas.

- Arena: con la arena o agregado fino, es necesario verificar que haya sido tamizada con el tamaño indicado en el diseño, como también que sea extraída de un lugar no contaminado si es natural o bien conocer si ha llevado un proceso de trituración, que se encuentre libre de materia orgánica y cualquier otro componente que pueda afectar la resistencia del concreto. Debe tomarse en cuenta que en el momento de colocarla en obra debe ser en un lugar específico y evita el contacto con el suelo o contaminantes.

- Grava: la grava o agregado grueso debe tener el tamaño indicado en el diseño de mezclas, así como encontrarse libre de materia orgánica o contaminante que afecte la resistencia del concreto. Su almacenamiento en obra se realiza de la misma manera que con el agregado fino.
- Agua: el agua empleada en el mezclado del concreto debe cumplir con las disposiciones de la Norma ASTM C1602M.

Si la mezcla del concreto es realizada en obra, se debe cumplir con un concreto de calidad uniforme y satisfactoria, mezclando totalmente los materiales hasta que obtener una apariencia uniforme y todos sus componentes distribuidos. La frecuencia de las muestras para ensayos de resistencia de concreto colocado al día debe realizarse no menos de una vez al día, ni menos de una muestra por cada 110 metros de concreto.

Basado en el Reglamento del ACI 318-08 los cilindros para los ensayos de resistencia deben ser realizados por un laboratorio que cumpla con las Normas ASTM C31M y ASTM C39M, teniendo los cilindros dimensiones de 100 por 200 milímetros o de 150 por 300 milímetros.

Las juntas de concreto deben estar definidas donde causen el menor debilitamiento de la estructura, debiendo limpiar y dejar libre de lechada antes de la colocación de la siguiente etapa de concreto, mojando el área y quitando el agua empozada. Puede colocarse algún material que funcione como pegamento de concreto.

### **3.2.2. Acero**

El control de calidad del acero consiste en verificar que cumpla con las normas de construcción, garantizando la calidad al verificar que sea legítimo teniendo el sello de garantía, el cual indica el grado estructural, diámetro y empresa que se encarga de su fabricación de acuerdo a normas.

En el momento del doblado del acero es necesario que se realice con las medidas, diámetros y grado estructural especificado en el diseño. Cuando se encuentre ejecutando la armadura, luego de tener el acero necesario doblado, es necesario verificar que se esté cumpliendo con la cantidad de acero solicitada y el espaciamiento del refuerzo, tanto longitudinal como transversalmente, para evitar que la cimentación sufra daños estructurales.

La colocación de la armadura dentro de la excavación debe realizarse con la maquinaria adecuada evitando el daño de la misma y con el personal capacitado para la colocación, centrado y nivelación de la misma. Es necesario que en el momento que se ejecute se encuentre presente el equipo topográfico para cumplir con a exactitud los planos. El recubrimiento mínimo de la armadura se debe cerciorar que sea como mínimo 75 milímetros, pues se encuentra en contacto directo con el suelo.

Antes de colocar la armadura debe cerciorarse que la excavación tenga las dimensiones tanto longitudinal como el diámetro correcto y se encuentre libre de material. Debe evitarse el doblado de acero o cualquier otro daño en el momento que se funda la cimentación para evitar cualquier daño estructural que se le pueda ocasionar. Si la fundición es realizada en distintas fases, al finalizar cada fase de fundición se debe limpiar con agua el acero para evitar que quede con residuos de concreto.

El control de calidad de las cimentaciones profundas debe ser realizado a detalle para ejecutar con calidad la obra, el personal encargado debe tener los conocimientos y la capacidad en obras ejecutadas, para poder distinguir ejecución errónea y ser una fuente de apoyo para el residente encargado de obra.

### **3.3. Replanteo topográfico**

Para la construcción de cimentaciones profundas es necesario realizar un replanteo de la zona en la que se ubicaran, utilizando aparatos topográficos para localizar el centro de cada cimentación. Se colocan referencias topográficas, en las cuales se indica la ubicación, la profundidad de perforación y de desplante, dicha referencias deben permanecer vistas todo el tiempo en el que se encuentren en ejecución las cimentaciones.

El replanteo topográfico consiste en trasladar el dibujo a escala de los planos al terreno. Debe efectuarse a comenzar la obra, en el replanteo de cimentaciones profundas se marca la distribución de las mismas con cal, se hace con el objetivo de efectuar la excavación para las cimentaciones.

Para poder realizar el replanteo se utilizan puentes, esto consiste en colocar estacas de madera con forma de puente en cada cimentación, por lo general cada cimentación esta colocada en un eje, luego de que se alinea el terreno se colocan estos puentes conforme las medidas del proyecto, identificándose debidamente cada puente con el eje que lo identifica en planos.

Además en cada puente se debe colocar con la ayuda de aparatos topográficos para su exacta localización unos clavos de metal, los cuales servirán para color hilo plástico, esto se hace con la finalidad de localizar

exactamente donde se encuentran los ejes. Luego de que ya se ha colocado los puentes e hilos se traza la circunferencia con el diámetro de la cimentación, esté incluye el grosor de solado, el cual será como mínimo de cinco centímetros de espesor, con concreto pobre, este trazo se realiza con cal, se debe hacer lo más preciso posible para que las cimentaciones queden lo más precisas posible.

### **3.3.1. Tareas previas**

Limpiar y nivelar la superficie de trabajo, dejando una distancia conveniente para el trabajo de la maquinaria a utilizar. Debe realizarse una inspección de las construcciones aledañas a fin de comprobar que no haya servicios que impidan o afecten los trabajos de construcción de las cimentaciones. Una vez se realizan dichas tareas previas, se procede a con las actividades que componen el procedimiento desde el inicio de la construcción de las cimentaciones hasta su culminación.

Figura 10. **Nivelación del lugar donde se ejecutará la obra**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39 autopista Palín, Escuintla.

### **3.4. Excavaciones**

La excavación de cimentaciones profundas varia dependiendo de las características que presentan los suelos. Se dará a conocer los tres métodos más utilizados para la excavación de cimentaciones profundas en Guatemala.

#### **3.4.1. Excavación manual**

La excavación manual de cimentaciones profundas debe ser realizada por personal capacitado y utilizando el equipo adecuado en buen estado, para evitar cualquier daño o lesión, sin dejar de lado que el equipo de protección personal se encuentre completo y en buen estado. Este proceso de excavación es más lento ya que en su mayoría la fuerza utilizada es la del personal, dependiendo el tipo de suelo es necesario utilizar equipo manual más potente como ayuda.

Se inicia la excavación luego de marcada la circunferencia de la cimentación, quitando el material suelto, en cada excavación es necesario que se encuentren por lo menos dos personas, un albañil y un ayudante, para el manejo del material que sale de la excavación, conforme se avanza en la excavación es necesario ir extrayendo el material, colocándolo a una distancia de no menos de 1,00 metro de la excavación para evitar que caiga una roca o parte del material dentro del pozo lastimando al excavador o se ensucie la excavación.

Al ir avanzando la excavación la persona encargada debe verificar que no pierda la forma ni la medida del diámetro, como mínimo a cada 0,50 metros se debe medir el diámetro. El excavador es el encargado de llevar la verticalidad de la excavación, verificando con las referencias colocadas por el equipo de

topografía. Evitar la deformación de la excavación es de suma importancia para la colocación de la armadura y el concreto ya que implica un mayor consumo del mismo.

Figura 11. **Excavación manual de cimentación profunda**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

El método manual es sencillo de realizar en suelos poco rocosos, como arcillas y arenas, sin embargo se complica cuando se encuentra demasiado seco el suelo por lo que es necesario humedecerlo, para una mejor manejabilidad, evitando crear un material demasiado pastoso o una inundación en la excavación.

En el momento que la excavación alcanza 1,50 metros de profundidad es necesario tomar medidas de precaución, colocar un andamio de una sola torre alrededor de la excavación e instalar en el una garrucha para facilitar la extracción del material, como también funciona para colocar la línea de vida de la persona que se encuentra dentro, quien a su vez utiliza un arnés de seguridad al igual que la persona que le ayuda en la parte exterior.

### **3.4.2. Excavación mecánica**

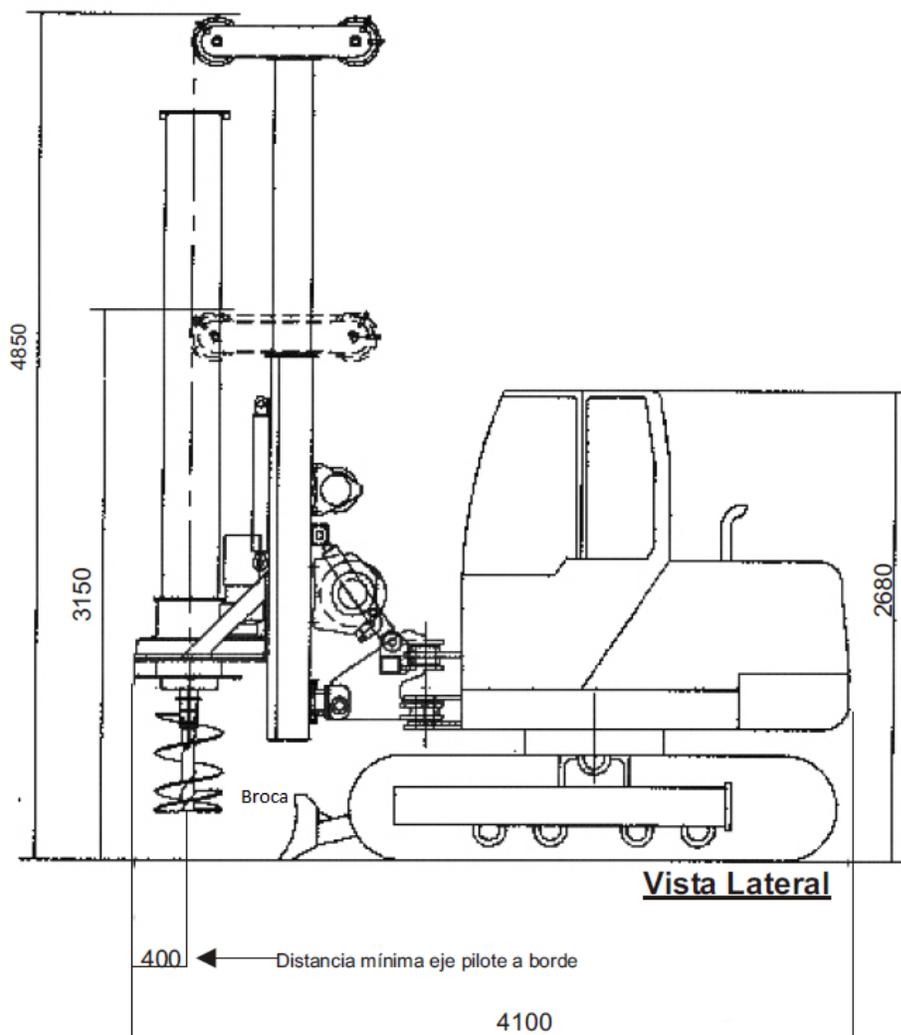
La maquinaria utilizada en la excavación de cimentaciones profundas es una perforadora que funciona con un método de rotación, la torsión se transmite por medio de una barra en cuyo extremo inferior se coloca una herramienta de avance tal como una broca o una hélice, por lo general se utiliza una broca del diámetro que se necesita la cimentación. La barra se hace girar con algún mecanismo.

Las brocas están equipadas con una orilla de corte que durante la rotación rompe el suelo, después de esto el suelo viaja a lo largo de las hélices, la broca se extrae entonces del hueco excavado y se vacía por rotación rápida en el exterior, si el suelo tiene alta plasticidad.

Hasta la terminación del proceso de perforación, las herramientas de perforación están entrando y saliendo del barreno para vaciar el material en el exterior. Las brocas tienen una punta inferior que previene los cabeceos en el momento que se encuentra con rocas o material más compactado. Las hélices de las brocas se diseñan cuidadosamente para que el material suelto pueda viajar hacia arriba, sobre la hélice sin resistencia.

La excavación de cimentaciones profundas con maquinaria es más sencilla y rápida de realizar, sin embargo es necesario que el personal a cargo se encuentre capacitado y la persona encargada del manejo de la excavadora tenga un ayudante que guíe la broca antes de iniciar la excavación y retire todo obstáculo o roca que pueda detener el funcionamiento al rotar.

Figura 12. **Maquinaria para excavación**



Fuente: sondeos cimentaciones recalces S. A.

Figura 13. **Perforación de pozo para cimentación, extracción de material excavado con barreno dentado sin punta**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

El tiempo aproximado de perforación en suelos arcillosos o limos es de aproximadamente 20 minutos, por lo que de muchas maneras este método de perforación tiende a ser más económico, sin embargo la potencia de la maquinaria tiene sus limitaciones, no permite la perforación en suelos demasiado rocosos, por lo que es necesario optar a otros métodos con equipo más potente.

### **3.4.3. Excavación en suelo rocoso**

En el momento que se presenta un suelo demasiado rocoso se complica de gran manera la excavación de cimentaciones, por lo que es necesario utilizar equipo especial para trabaja en roca. El personal empleado debe tener el conocimiento y capacitación para este equipo de trabajo.

Cuando se encuentra con este tipo de terreno lo que no hay que hacer nunca es intentar sacar trozos grandes de roca, además de dar más trabajo, se fuerza la maquinaria dándole un desgaste poco favorecedor. Lo ideal es realizar la excavación en pequeños trozos. El equipo utilizado para este tipo de excavación es: rotomartillos, compresores, barretas con punta, entre otros.

La excavación en roca puede ser alternada con la excavación manual o la excavación con maquinaria, ya que en la mayoría de veces el manto rocoso no tiene la profundidad de una cimentación, siendo este menor a la profundidad requerida. Con este método es necesario tener mayor precaución, pues al momento de soltar una roca puede esta caer sobre el excavador, o bien el equipo utilizado puede lesionar al personal sino se maneja adecuadamente.

El método en roca es parecido al método manual, se manejan las mismas técnicas de extracción de material y personal, la diferencia es el equipo y la potencia con que debe manejarse éste. El rotomartillo trabaja en conjunto con un compresor de aire, el cual ayuda para su funcionamiento, por la potencia que genera, es necesario que la persona que se encuentre manipulando lo asegure con una cuerda hacia un lugar fijo, para evitar que en dado caso se suelte de sus manos caiga de forma abrupta sobre él.

Figura 14. **Excavación de pozo para cimentación en manto rocoso**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

Para la extracción de las rocas se coloca desde el inicio el andamio alrededor de la excavación con la garrucha, de esta manera se atara la roca a una cuerda para ser extraída con una cuerda. Por el peso que puede llegar a tener las rocas en algunos casos es necesario un ayudante extra.

El control de la deformación de la excavación se complica en estos casos, pues dependiendo del tamaño o forma de la roca, algunas veces es necesario excavar más de lo necesario, así que se debe tomar en cuenta para la fundición de las cimentaciones ya que aumenta el volumen de concreto a utilizarse.

La excavación de cimentaciones profundas independientemente del método que sea necesario emplear, es un proceso que necesita la supervisión constante del encargado de obra y el control de calidad pertinente. En el momento de tener la profundidad requerida por el diseño de la cimentación, se procede a tomar las medidas de verificación, desde el diámetro, la profundidad, la limpieza de la perforación, como también un chequeo topográfico, para descartar cualquier cambio de ubicación que se pueda dar en el proceso de la cimentación.

Cuando se concluye la revisión se procede a colocar un solado con concreto pobre en la parte superior de la excavación, ésta evitará que caiga partículas sueltas del suelo con el paso de personal o maquinaria cerca.

### **3.5. Realización de refuerzo de acero**

Los pilotes generalmente trabajan a compresión, la armadura es similar a la de las columnas o pilares. Sin embargo, es necesario que la armadura sea capaz de soportar la flexión que se produce en el transporte del izado del pilote como también los esfuerzos por flexión producidos por las fuerzas horizontales. Para los detalles de refuerzo se utiliza como referencia el reglamento para concreto estructural ACI 318-08 capítulo 7.

El acero de refuerzo se debe proteger contra la oxidación y otro tipo de corrosión antes y luego del armado del refuerzo y antes de colocar el concreto en la cimentación, debe estar libre de suciedad, grasa, aceite u otros lubricantes o sustancias que puedan limitar su adherencia al concreto.

Para iniciar el refuerzo de acero de las cimentaciones, es necesario tener un área específica de trabajo y espacio suficiente para un mejor manejo de la

armadura. Para iniciar se realiza un banco de trabajo, en el cual se hará el doblado del acero, tanto para el longitudinal como el transversal, dependiendo de los grupos de trabajo que se destinen al trabajo de acero será el tamaño del banco.

Figura 15. **Banco de trabajo y almacenamiento de acero para cimentaciones profundas**



Fuente: subestación eléctrica Palín, Kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

En el banco de trabajo se realiza el corte de acero y doblado, para ello se debe tener la instalación de un circuito eléctrico adecuado para la maquinaria a utilizar, así como la instalación de herramientas que funcionan para el doblado del acero.

El refuerzo longitudinal de las cimentaciones mayores consta de barras con escuadras en ambos extremos, estas barras es mejor que sean continuas sin ninguna unión o traslape, si en dado caso fuera necesario una unión se debe apegar a las normas de construcción del ACI 318-08. El doblado de acero es realizado en frío, por el grado de resistencia del acero debe doblarse a una fuerza constante para evitar el quiebre de la barra.

El doblado del refuerzo transversal requiere un mayor trabajo por la forma que debe llevar la barra, se beben formar espirales con el diámetro requerido en el diseño, para esto se instala un molinete en el banco de trabajo, que facilita el doblado en espiral, una persona debe ejercer fuerza en las palancas del molinete mientras otra persona ejerce fuerza sobre la barra de acero para ir moldeándola. El diámetro del molinete es menor por lo menos 10 centímetros a el requerido para la cimentación.

Cuando ya se tiene completo el doblado de acero longitudinal y transversal, se procede al armado del refuerzo de acero, el cual es necesario realizarlo lo más cerca posible de la excavación de la cimentación ya que por su tamaño y peso es más complicado el transporte. Se coloca en un espacio accesible para la maquinaria que se hará cargo del manejo y colocación dentro del pozo de la armadura terminada.

Lo más complicado para en el armado es conseguir el diámetro requerido por el diseño. Se inicia colocando tres o cuatro aros de acero con el diámetro especificado, luego se introducen las barras de refuerzo longitudinal dentro de cada aro para iniciar el amarre de las barras con el espaciamiento indicado de diseño. Los aros son colocados uno en cada extremo y dos en el centro con un espaciamiento considerable para evitar la deformación de la armadura y asegurados con barras cortas en los costados para su exacta verticalidad.

Figura 16. **Doblado de refuerzo en molinete con forma espiral**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

Los espirales se van introduciendo en el momento que se colocan las barras longitudinales, de esta forma se evita la deformación de los espirales y es más complicado al terminar de colocar el refuerzo longitudinal.

En cada aro se coloca un trozo de madera para elevar la armadura y facilitar el manejo de los espirales. Cuando ya se tienen asegurada todas las barras longitudinales se procede al amarre de los espirales, los cuales se colocan con el espaciamiento de diseño especificado. El amarre se realiza con alambre doble para que resista el movimiento al de ser trasladada. Conforme se amarra cada hélice del espiral se debe mantener el espaciamiento entre barras longitudinales sin doblar barras ni deformar la armadura.

El refuerzo en espiral, cuando sea necesario empalmarlo, se realizara por traslape no menor a 0,30 metros. En el inicio de la armadura y en el final se debe colocar unida completamente al aro una vuelta completa del espiral y desde allí realizar el espaciamiento requerido del refuerzo transversal.

Figura 17. **Inicio de armado de refuerzo para cimentaciones profundas**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

Cuando se finaliza el amarre de todo el refuerzo transversal con las barras longitudinales hace falta poco para finalizar la armadura de refuerzo. Para dar por finalizado este proceso es necesario colocar en la base de la armadura dados que aseguren el recubrimiento del acero en el momento de fundición, estos deben tener el tamaño de recubrimiento mínimo el cual es de 7,5 centímetros, si se solicitara un solado de concreto pobre en las cimentaciones se puede omitir y colocar dados con un alto no más de 12 centímetros.

Como todo el refuerzo se encuentra bajo una superficie en contacto con el suelo se deben colocar dados alrededor de toda la armadura los cuales, aparte de asegurar el recubrimiento mínimo de concreto para el acero, ayudan a mantener la verticalidad y centrado del refuerzo dentro de la excavación y en el momento de introducirla en la excavación sirven como ruedas de transporte ya que los dados que se colocan en los costados tienen la forma de anillos y se colocan en el refuerzo transversal, dejando libre un movimiento rotatorio.

Figura 18. **Amarre doble de espirales a barras de refuerzo longitudinal**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

Al finalizar el refuerzo de acero para las cimentaciones es necesario realizar una inspección detallada, entre lo cual se debe verificar el espaciamiento entre cada una de las barras longitudinales, el espaciamiento entre el refuerzo transversal, que la cantidad de barras longitudinales sean las indicadas en el detalle y diseño de la cimentación, la cantidad de hélices en

toda la armadura se la indicada por el diseño, los amarres se hayan realizado en todas y cada una de las intersecciones de refuerzos, así como también deben ser dobles y la armadura se debe encontrar libre de óxido si en dado caso tuviese debe ser limpiada inmediatamente antes de su ubicación en la excavación con cepillos de acero.

Figura 19. **Armado completo de refuerzo para cimentaciones profundas, dados colocados en la parte inferior y laterales de la armadura**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

Al finalizar el refuerzo de acero para las cimentaciones es necesario realizar una inspección detallada, entre lo cual se debe verificar el espaciamiento entre cada una de las barras longitudinales, el espaciamiento entre el refuerzo transversal, que la cantidad de barras longitudinales sean las indicadas en el detalle y diseño de la cimentación, la cantidad de hélices en toda la armadura se la indicada por el diseño, los amarres se hayan realizado en todas y cada una de las intersecciones de refuerzos, así como también deben ser dobles y la armadura se debe encontrar libre de óxido si en dado caso tuviese debe ser limpiada inmediatamente antes de su ubicación en la excavación con cepillos de acero.

Es necesario verificar que los dados antes de ser colocados en la armadura no se quiebren con el peso de una persona ya que es necesario que resistan el peso completo de todo el refuerzo. Los dados que se encuentran a los costados de la armadura deben girar libremente para ayudar en la colocación en la excavación.

### **3.6. Ubicación de refuerzo de acero**

Cuando ya se tiene listo el elemento estructural se procede a transportarlo y ubicarlo dentro de la excavación de la cimentación. Por el tamaño de la armadura es necesario utilizar maquinaria que soporte el peso, ya que es demasiado para ser cargado por personas.

El transporte de la armadura hacia el lugar de la fundición debe hacerse con cuidado para evitar la deformación parcial o completa. Se tiene que atar en el extremo superior para levantarla lentamente con la máquina que funcionara para el transporte, esta máquina es la misma utilizada para la excavación de las cimentaciones, la cual cuenta con un mecanismo de grúa en la parte superior del sistema que soporta el barreno. Antes de ser levantada la armadura por la grúa es necesario asegurarla con cuerdas para evitar un movimiento oscilatorio y estas funcionar como guía para su colocación.

En el momento que se encuentra completamente vertical la estructura se procede a ubicarla dentro de la excavación de una forma lenta para evitar la deformación o desmoronamiento de las paredes de la perforación, ya que al encontrarse la estructura dentro de la excavación es imposible limpiar el material suelto.

Figura 20. **Transporte y colocación de armadura mediante grúa**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

Cuando la armadura se encuentra completamente dentro de la perforación se debe verificar los niveles de armadura requeridos en planos de diseño con el equipo topográfico y la completa verticalidad, para luego ser asegurada evitando el movimiento inesperado y el daño de las referencias colocadas.

Figura 21. **Colocación de armadura dentro de excavación con tensado a un costado para un mejor manejo y control de la verticalidad de la estructura**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

### **3.7. Fundación**

Para iniciar el proceso de colocado del concreto, se verifica si la perforación contiene material sedimentado en el fondo originados por la colocación de la estructura. Se realiza una limpieza cuidadosa en el fondo, mediante herramientas apropiadas, como por ejemplo utilizando un compresor que lanza aire a presión. El colocado se realiza por procedimientos que eviten la segregación del concreto y la contaminación del mismo con lodos o con derrumbes de las paredes de la excavación.

En la fundación de cimentaciones profundas se tiene la necesidad de realizarla en dos fases, ya que es necesario colocar pernos de anclaje en la parte superior de las cimentaciones para el futuro montaje de torres. La primera fase es fundida a una altura en la que no interfiera con la instalación de los pernos y brinde el espacio funcional para su libre colocación. Para la segunda fase se coloca el concreto a la altura indicada por las referencias topográficas, las cuales determinan en obra la altura de diseño en planos especificada.

Se han desarrollado, en la actualidad, mezclas de concreto y métodos de colocado especiales. Se utilizan mezclas de alta trabajabilidad y aditivos que permiten que el concreto fluya con facilidad entre el acero de refuerzo y el contacto con el suelo. Es de gran importancia que el agregado del concreto pase libre entre el acero de refuerzo logrando llenar todo el volumen excavado del pilote, sin dejar vacíos que debiliten la estructural. El tipo de concreto se indica en el diseño de mezclas de las cimentaciones, en el cual se toma en cuenta la fluidez que debe tener para su colocación y el tamaño del agregado para evitar atascamientos del mismo entre la estructura y las paredes de la excavación que se encuentre trabajando.

Para la colocación del concreto en cimentaciones profundas existen muchos métodos, los cuales se realizan por medio de recipientes especiales que descargan desde el fondo hacia arriba el concreto y para algunos es necesario movilizarlos con grúas u otro medio de transporte. En el momento que se tiene lista la cimentación para ser fundida, se procede a lo siguiente:

### **3.7.1. Primera fase**

Se debe colocar en la cimentación una tubería que ayude a conducir el concreto hasta el fondo, la cual evitara que el concreto tenga una caída demasiado alta y forme espacios de aire, en campo llamados ratoneras, quienes disminuyen la resistencia de la estructura, así como ayuda a que el concreto y sus agregados no golpeen contra el acero. En la parte superior de la tubería se debe colocar un recipiente en forma de cono, para que ayude en la caída del concreto dentro de la misma.

La tubería debe ser lisa o de poca rugosidad para facilitar la descarga de concreto. Conforme avanza la fundición de la cimentación el tamaño de la tubería debe ir disminuyendo, así que ésta debe ser seccionada y de fácil adaptación con el cono, el procedimiento se realiza de forma rápida para evitar que el concreto fragüe antes de continuar con el vaciado de concreto en la primera etapa.

En el momento que se va colocando el concreto debe irse vibrando para llenar de forma uniforme cada espacio y evitar dejar burbujas de aire que dañen la estructura. Este proceso de fundición es rápido y poco complicado, puede variar según el tipo de vaciado que se haga, el cual puede ser directo, el cual se realiza desde el camión o concreteira que se esté utilizando, como se muestra en la figura 22.

Figura 22. **Vaciado de concreto por medio de tubería hacia el fondo de la cimentación**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

El otro método es por medio de tuberías segmentadas llamadas comúnmente trompas de elefante. La trompa de elefante facilita el transporte del concreto cuando el lugar donde se encuentra la cimentación es de difícil acceso. El concreto que se utiliza es más fluido para que al ser transportado por medio de la tubería no se congestione ni provoque ningún tapón. La utilización de este tipo de equipo agiliza la fundición de las cimentaciones profundas, ya que no es tan necesaria la movilización de camiones o concreteteras dentro del área, pues este es un método más estático.

Al finalizar la fundición de la primera etapa se debe limpiar la armadura de cada cimentación, para evitar que en ella queden residuos de concreto y dificulten la adherencia en la segunda fase de fundición.

Figura 23. **Vaciado de concreto con equipo de trompa de elefante**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

### **3.7.2. Segunda fase**

La fundición de la segunda fase de una cimentación profunda es realizada luego de la colocación de los pernos de anclaje, lo cual se explicara más adelante. Para este procedimiento no es necesario utilizar el cono y la tubería de la primera fase, ya que la caída del concreto no es a una distancia grande, y ésta perjudicaría la alineación de los pernos. Aunque no sea necesario utilizar más equipo si se debe tener mayor cuidado en esta fase, por lo que el vaciado del concreto se realiza de una forma más lenta y supervisada, para evitar daños en alineaciones topográficas.

Es necesaria la colocación de formaleta en la parte superior de la cimentación ya que en la mayoría de veces del suelo hacia arriba es diseñada una forma diferente, en muchos casos puede ser cuadrada o rectangular. La

formaleta también ayuda a posibles deformaciones que se hayan ocasionado en la excavación y por la cual se tengan fugas de concreto. Por lo general esta formaleta es realizada con madera por su fácil manejo.

En el momento de tener lista la formaleta de la cimentación deben protegerse los pernos instalados con algún plástico para evitar que se ensucien de cemento y este dificulte la colocación de tuercas y roscas en el perno, así mismo evita que sean manipulados para su limpieza luego de fundidos y la ubicación de estos se dañe porque el concreto no ha fraguado.

El recubrimiento de los pernos es mejor que no sea retirado hasta el momento de realizar acabados finales y montaje de las estructuras que deben soportar las cimentaciones profundas.

Antes de iniciar el vaciado de concreto se coloca un aditivo que sirve para unir concreto viejo con el concreto nuevo que se va coloca. Por su función es un material que seca rápidamente por lo que se coloca minutos antes del vaciado. Este aditivo ayuda al buen funcionamiento de la estructura, evitando una futura falla en el área de la unión.

El vaciado de concreto en el momento que inicia debe ser vibrado de la misma forma que en la primera fase, para evitar las posibles ratoneras. El concreto en esta fase debe llegar por lo menos 5 centímetros abajo del nivel de concreto terminado requerido en los planos de diseño, pues se deja este espacio para la realización de acabados finales.

Figura 24. **Formaleta en la parte superior de la cimentación y protección de pernos de anclaje, listo para fundición**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

Al llegar a la altura inferior requerida de fundición se realiza un alisado sencillo, evitando todo lo posible tocar los pernos de anclaje, esto se realiza para que los acabados finales no necesiten demasiado trabajo. Por último es muy importante limpiar el concreto que haya manchado parte de los pernos, esto es mejor realizarlo con una brocha húmeda y al momento de terminar la fundición para evitar que se solidifique el concreto en los pernos.

La fundición de la segunda fase, si en dado caso fuera necesario ser realizada con la trompa de elefante, debe ser depositada el concreto primero en un recipiente o en un área preparada y luego colocado manualmente en la cimentación. Se realiza de esta manera pues la fuerza con que es expulsado el

concreto de la trompa de elefante puede dañar la ubicación de los pernos, ya que estos están colocados a una distancia topográficamente localizada entre ellos.

La fundición de cimentaciones profundas puede ser realizada en una sola etapa, si se tiene la certeza de que en el momento de la colocación del concreto no se tendrá ningún percance con los pernos.

Figura 25. **Limpieza de pernos de anclaje y platinas de nivelación, luego de la fundición**



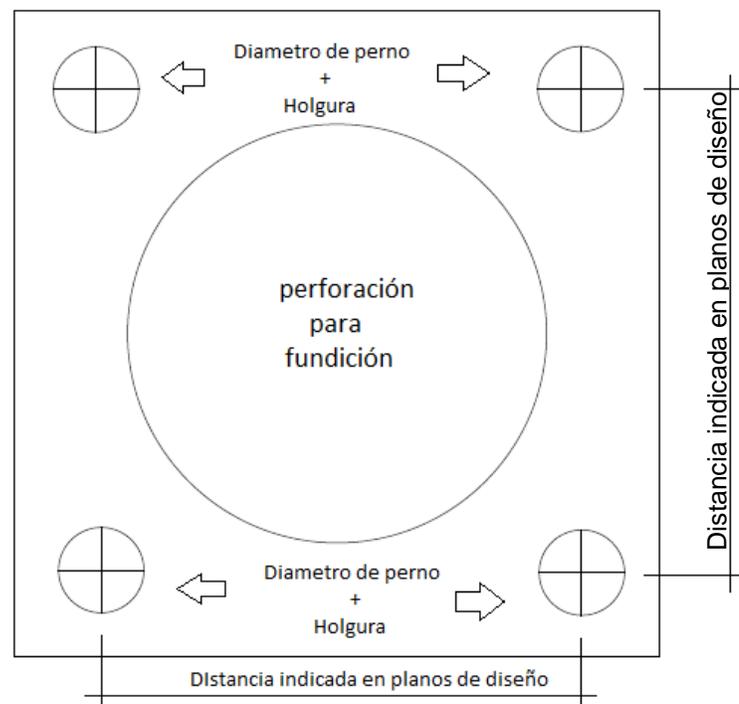
Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

### 3.8. Localización de pernos de anclaje

La localización de pernos en cimentaciones profundas es un trabajo que necesita demasiada precisión, por lo que la utilización permanente de un equipo topográfico es fundamental. Este trabajo por el detalle y la precisión que necesita es realizado de forma lenta y tiende a ser poco notado en el avance de la obra.

Para la colocación y nivelación de pernos existen diferentes métodos, en este caso se dará a conocer un método basado en platinas, estas platinas son de metal y suelen ser llamadas platinas de nivelación, las cuales tienen como función sujetar los pernos y ubicarlos milimétricamente uno del otro.

Figura 26. **Platina de nivelación**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad 2011.

Las platinas de nivelación se realizan en base a la ubicación de pernos requerida en los planos de diseño, son placas de metal con perforaciones del diámetro de los pernos, dejando unos milímetros de holgura, la cantidad de perforaciones varia según la cantidad de pernos solicitados en cada cimentación. En el centro de la platina puede dejarse una perforación con un diámetro mayor, la cual facilitara el paso del concreto en el momento de la fundición en segunda fase de la cimentación.

Antes comenzar la colocación de pernos, es necesario ubicar las platinas en cada una de las cimentaciones, para esto es necesario que el equipo topográfico coloque guías de trabajo, en las cuales se indique la ubicación de los pernos y en base a estas colocar las platinas de nivelación. Las platinas de nivelación son aseguradas a la armadura de la cimentación con barras de acero, las cuales levantan la platina a una distancia sobre el nivel del suelo y de la armadura que servirá para facilitar el manejo de los pernos y ayudará a tenerlos al nivel requerido por planos.

Cuando la platina de nivelación se encuentra completamente asegurada se procede a la colocación de los pernos de anclaje, se introducen en los agujeros de la platina y se aseguran con sus propias tuercas. Luego de asegurar los pernos se procede a nivelarlos, los pernos deben estar completamente verticales y alineados topográficamente unos de otros. Para este procedimiento es necesario colocar hilos para ambos lados, los cuales ayudaran a localizar el centro de cada perno y servirán de guía para la ubicación exacta.

Con las guías colocadas por el equipo topográfico se colocan los hilos, los hilos son colocadas a la altura sobre el nivel del suelo a la que deben quedar los pernos de anclaje, esta altura es proporcionada por los planos de diseño.

Colocar los pernos a la altura indicada es de suma importancia para el anclaje de las estructuras que deben soportar, esto no da mayor dificultad, sin embargo se debe tomar en cuenta que no solo se necesitan a una altura indicada sino también completamente verticales, cuando ya se tienen los pernos colocados a la altura deseada se procede con la nivelación.

Figura 27. **Colocación de pernos con platina de nivelación e hilos guía**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

La nivelación vertical de los pernos es realizada con un nivel magnético, el cual debe ser de 10 a máximo 20 centímetros de largo, para facilitar la movilidad dentro de la armadura de la cimentación. La nivelación de los pernos es un trabajo minucioso el cual necesita ser verificado cada vez que se muevan los pernos, por necesidad o error.

Cuando ya se han colocado los pernos se procede a tomar medidas tanto con el equipo topográfico como con la cinta métrica o manómetro para verificar su colocación y las medidas se encuentre lo más exactas posibles. Con los distintos métodos que se utilizan para tomar medidas, estos pueden variar unos de otros, por lo que se tiene como máximo tres milímetros más o menos de la medida indicada.

Figura 28. **Verificación de centrado de pernos en cimentaciones profundas**



Fuente: subestación eléctrica Palín, kilómetro 39, autopista Palín, Escuintla.

Si se encuentra de acuerdo con la nivelación y colocación de los pernos, se deben asegurar sus tuercas a la platina para evitar cualquier desplazamiento y en la parte inferior de los pernos pueden ser asegurados para evitar perder la nivelación vertical en el momento de la fundición. Esto se puede hacer con barras de acero No. 2, ya que no tienen ninguna función estructural para la cimentación. Luego de estar completamente seguros los pernos se encuentran listos para ser fundidos. Debe tomarse en cuenta que si no estuvieran colocados correctamente el procedimiento se repite hasta tener el resultado deseado.

Aunque los pernos no formen completamente parte del diseño estructural de las cimentaciones profundas, su buen funcionamiento depende de estos, ya que los pernos son los encargados de transmitir y sujetar la carga que debe soportar la cimentación. Por lo que es de suma importancia que los pernos se encuentren correctamente fundidos en la cimentación y con una distancia dentro de la misma que evite el volcamiento del perno.

### **3.9. Acabados finales**

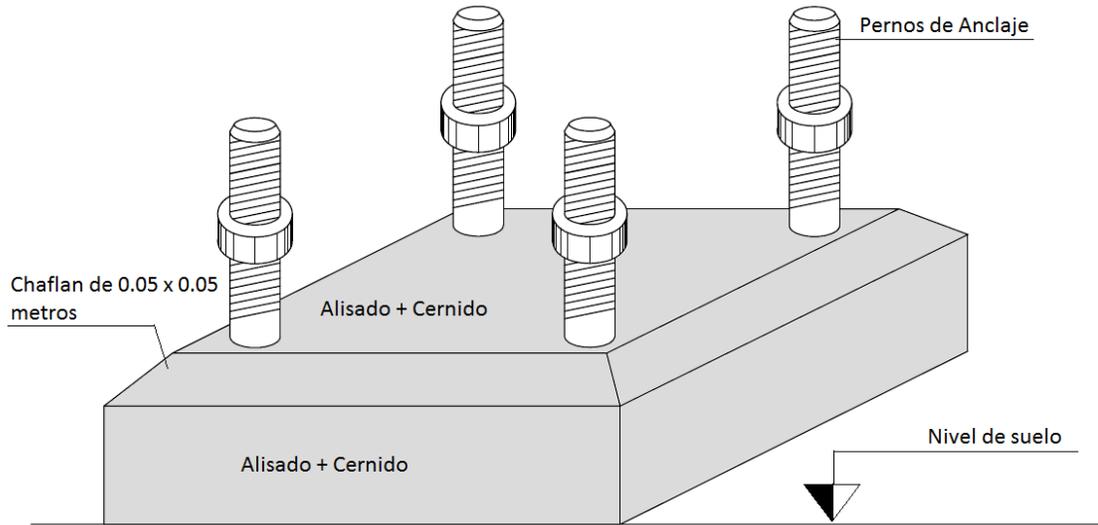
Los acabados son el arte final de las cimentaciones profundas, es la parte expuesta y visible para el ojo humano que se convierte en la presentación de la estructura que se encuentra bajo el suelo. El trabajo estructural termina en el momento que se tienen fundidos los pernos de anclaje a la cimentación, esto hecho se da en la fundición de segunda fase que se realiza a la cimentación.

La cimentación bajo el nivel del suelo trae una forma estructural circular, sin embargo, del nivel del suelo hacia arriba es fundida de forma rectangular, se realiza de esta manera con el fin de dar una mejor presentación. En la fundición de la segunda fase la parte que se encuentra sobre el nivel del suelo es fundida de forma rustica, ésta sobre sale cinco centímetros del diámetro de la cimentación.

El detalle que se da en la parte superior de la cimentación es un acabado con cernido más alisado blanco, para mejorar la estética, puede agregarse un corte de esquinas de la parte superior, también llamado chaflán. El cual se realiza con un corte a 45 grados, procurando en lo posible no interferir con la rosca del perno.



Figura 30. **Detalle superior de acabados finales en cimentaciones profundas**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad 2011.

## CONCLUSIONES

1. Para el diseño de cimentaciones profundas se ha basado en la metodología propuesta por Broms, la cual es utilizada para el cálculo de pilotes sometidos a cargas últimas laterales ya que las cimentaciones profundas en subestaciones eléctricas están sometidas constantemente a cargas horizontales.
2. La información proporcionada por el estudio de suelos determinar el tipo de estrato sobre el cual funcionara la cimentación, así como la capacidad soporte, el peso específico, el ángulo de fricción, entre otros resultados del estudio estratigráfico siendo este fundamental para el desarrollo de un diseño funcional de cimentaciones.
3. Al utilizar el método de Broms basado en la resistencia a la rotura, en el diseño de la cimentación se utilizan las cargas últimas mayoradas a nivel de pedestal, entre las cuales se encuentra la fuerza de volcamiento, la fuerza de viento y la presión que ejerce el estrato del suelo a la cimentación.
4. Para el diseño estructural de los elementos de la cimentación se considera el factor de reducción por resistencia en los materiales y un factor de mayoración de las cargas de trabajo de esta forma se tiene un diseño con los materiales soportando los esfuerzos sin llegar a un colapso temprano.

5. Se desarrolla una metodología de construcción tomando en cuenta una serie de elementos que constituyen una herramienta adaptable a los requerimientos de las cimentaciones profundas en subestaciones eléctricas que se desarrolla de forma ordenada y clara para una efectiva ejecución de la obra.
6. La implementación de un sistema de seguridad industrial en la construcción es un conjunto de medidas destinadas a proteger la salud, prevenir accidentes y enfermedades, siendo una práctica de sentido común y fomento de la responsabilidad de cada persona.
7. El sistema de control de calidad implementado abarca todo material relacionado con la construcción de cimentaciones profundas y los ensayos mínimos para identificar si es apto para su utilización detallando los procedimientos a seguir según sea el caso.

## RECOMENDACIONES

1. Tomar en cuenta que el método de diseño de Broms es una solución simplificada para pilotes cargados lateralmente suponiendo una flexión del pilote gobernada por la resistencia de fluencia de la sección del pilote.
2. Realizar un análisis de suelo es de gran importancia tanto para el diseño de las cimentaciones como para evitar problemas en el proceso de construcción o incluso al terminar la obra.
3. Al realizar un diseño de cimentaciones profundas el análisis de las cargas debe ser realizado detalladamente y tomando en cuenta cada una de las combinaciones proporcionadas en este trabajo y la carga última será la más crítica resultante de las distintas combinaciones.
4. En la realización del diseño estructural de una cimentación al momento de determinar las especificaciones de los materiales a utilizarse, debe hacerse en base a los reglamentos o códigos de construcción vigentes en la región, en dado caso no se cuente con ello el código del ACI proporciona requisitos para el diseño y construcción de concreto estructural.

5. La metodología de construcción desarrollada en este trabajo es una guía de campo organizada y no un código estricto de pasos a seguir, por lo que puede variar dependiendo del lugar donde se realice, los materiales a utilizar o las especificaciones constructivas de diseño proporcionadas.
6. Implementar un programa de educación para seguridad industrial en el personal relacionado en la construcción es importante para la prevención de riesgos laborales y facilita la adaptación de este sistema generando una cultura de prevención en el campo de la construcción en Guatemala.
7. Como constructora de un proyecto la utilización de un sistema de control de calidad es fundamental para garantizar la calidad del proyecto y evitar contratiempos al momento de ser supervisada la obra.

## BIBLIOGRAFÍA

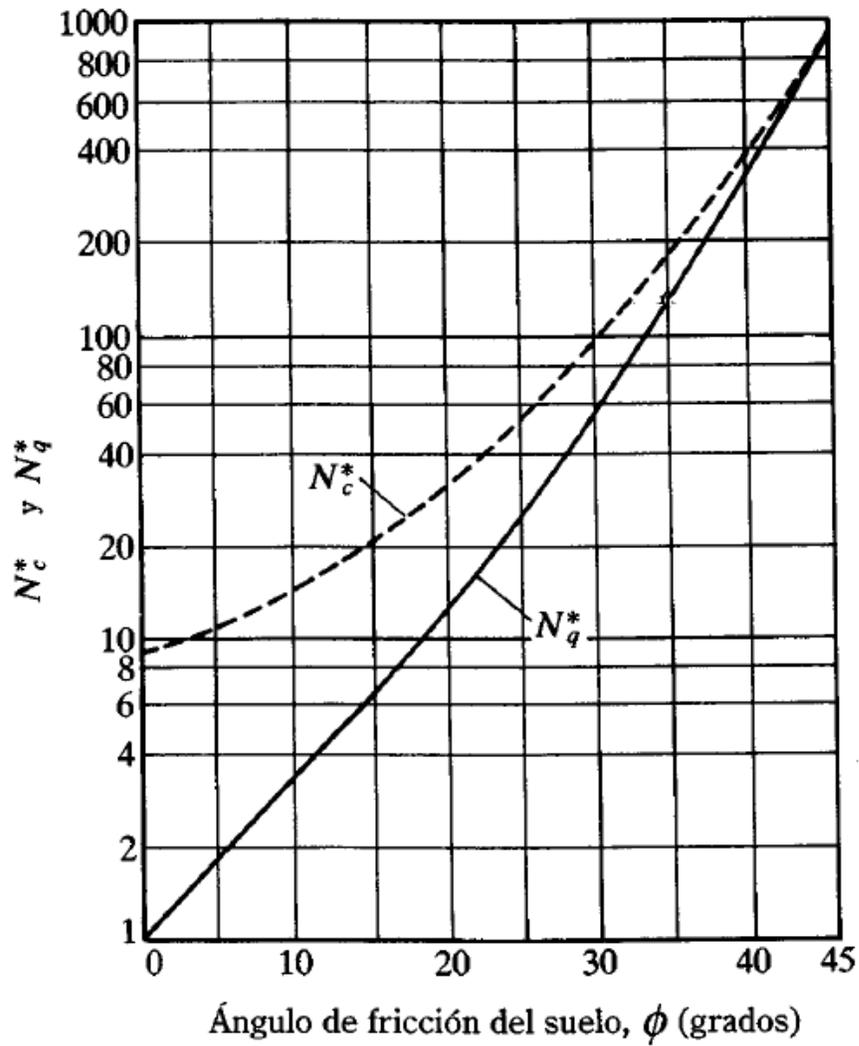
1. ALVA HURTADO, Jorge E. *Cimentaciones profundas, en: Cimentaciones de estructuras*. Comité Peruano de Mecánica de Suelos, Fundaciones y Mecánica de Rocas. Perú: CISMID –FIC, Universidad Nacional de Ingeniería, 2003. 37 p.
2. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-08) Y Comentario*. ACI 318-08. Edición 318-08. Publicado en enero de 2008.
3. ARALDA MALTEZ, Luis. *Métodos alternativos para diseñar cimentaciones para estructuras monotubulares*. Director: Ricardo González. Trabajo de graduación para Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Estructural. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, 1998. 110 p.
4. ARRÚA, Pedro A. *Método probabilístico aplicado al diseño de pilotes sometidos a solicitaciones laterales*. Argentina: Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional de Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional 2006. 7 p.

5. ASOCIACIÓN GUATEMALTECA DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA. *Normas de seguridad estructural de edificación y obras de infraestructura para la república de Guatemala*. AGIES NSE 2-10 Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección. 2a. ed. Guatemala: AGIES, 2002.
6. DAS, Braja M.; DE LA CERA, José Alonso. *Principios de ingeniería de cimentaciones*. 4a. ed. México: Internacional Thomson, 2001. 880 p. ISBN 0-534-95403-0.
7. GONZÁLEZ CUEVAS, Oscar M. ROBLES FERNÁNDEZ, Francisco. *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*. 4a. ed. México: Limusa. 2005. 802 p. ISBN 968-18-6446-8.
8. PARKER, Harry; AMBROSE, James. *Diseño simplificado de concreto reforzado*. 3a. ed. México: Limusa Wile, 2008. 352 p. ISBN-13: 978-968-18-5190-3.
9. VALENCIA VERA, Francisco; PASTELLÉ, Segastíá Olivella; GARCÍA TORNEL, Alejandro Josa. *Cimentaciones y estructuras de contención*. Barcelona: Edicions UPS, 1999. 106 p.

## **APÉNDICES**

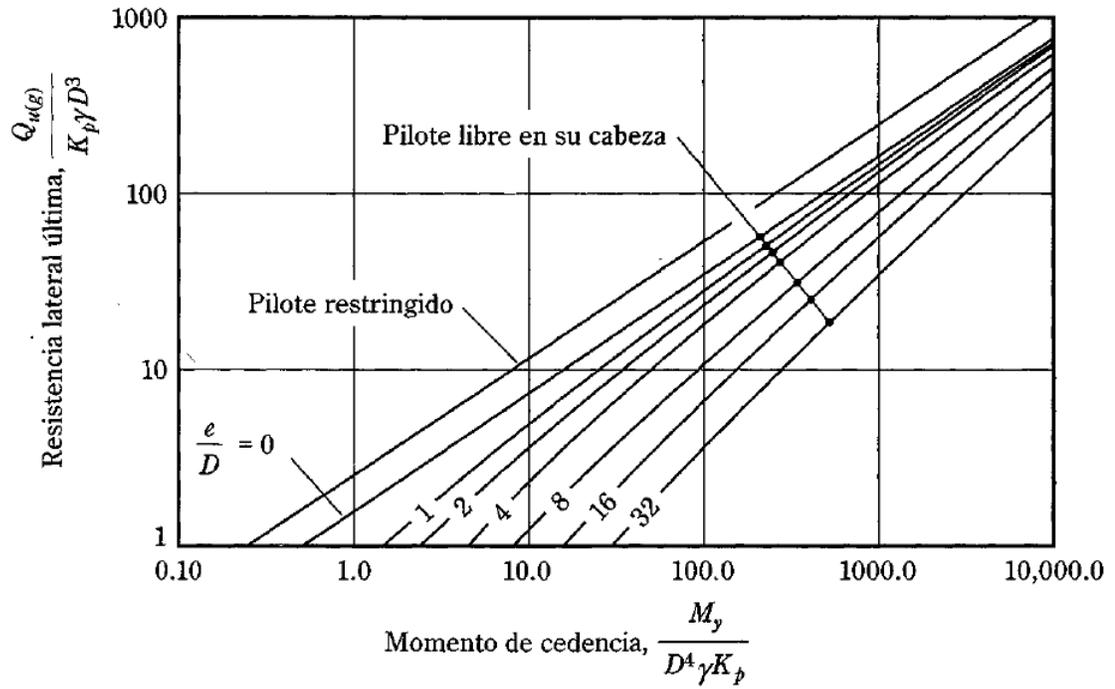


Figura 31. Variación de los valores máximos de  $N_c^*$  y  $N_q^*$  con el ángulo de fricción del suelo  $\phi$ .



Fuente: DAS, Braja M. Principios de ingeniería de cimentaciones. p.604.

Figura 32. Solución de Broms para la resistencia lateral última de pilotes largos en arena



Fuente: DAS, Braja M. Principios de ingeniería de cimentaciones. p.649.

Tabla IV. Para la determinación de  $d_1$  en base a I

Designación: tamaño (mm) × peso (kN/m)	Profundidad $d_1$ (mm)	Área de sección ( $m^2 \times 10^{-3}$ )	Espesor $w$ de patín y alma (mm)	Ancho de patín $d_2$ (mm)	Momento de inercia ( $m^4 \times 10^{-6}$ )	
					$I_{xx}$	$I_{yy}$
HP 200 × 0.52	204	6.84	11.3	207	49.4	16.8
HP 250 × 0.834	254	10.8	14.4	260	123	42
× 0.608	246	8.0	10.6	256	87.5	24
HP 310 × 1.226	312	15.9	17.5	312	271	89
× 1.079	308	14.1	15.49	310	237	77.5
× 0.912	303	11.9	13.1	308	197	63.7
× 0.775	299	10.0	11.05	306	164	62.9
HP 330 × 1.462	334	19.0	19.45	335	370	123
× 1.264	329	16.5	16.9	333	314	104
× 1.069	324	13.9	14.5	330	263	86
× 0.873	319	11.3	11.7	328	210	69
HP 360 × 1.707	361	22.2	20.45	378	508	184
× 1.491	356	19.4	17.91	376	437	158
× 1.295	351	16.8	15.62	373	374	136
× 1.060	346	13.8	12.82	371	303	109

Fuente: DAS, Braja M. Principios de ingeniería de cimentaciones. p.856.

Tabla V. Valores representativos de  $n_h$ .

Suelo	$n_h$	
	lb/ pulg <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>
Arena seca o húmeda		
Suelta	6.5–8.0	1800–2200
Media	20–25	5500–7000
Densa	55–65	15,000–18,000
Arena sumergida		
Suelta	3.5–5.0	1000–1400
Media	12–18	3500–4500
Densa	32–45	9000–12,000

Fuente: DAS, Braja M. Principios de ingeniería de cimentaciones. p.628.

Tabla VI. Factores de seguridad de carga, Meyerhof

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$N_q/N_c$	$\tan \phi$	$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$N_q/N_c$	$\tan \phi$
0	5,14	1,00	0,00	0,20	0,00	26	22,25	11,85	12,54	0,53	0,49
1	5,38	1,09	0,07	0,20	0,02	27	23,94	13,20	14,47	0,55	0,51
2	5,63	1,20	0,15	0,21	0,03	28	25,80	14,72	16,72	0,57	0,53
3	5,90	1,31	0,24	0,22	0,05	29	27,86	16,44	19,34	0,59	0,55
4	6,19	1,43	0,34	0,23	0,07	30	30,14	18,40	22,40	0,61	0,58
5	6,49	1,57	0,45	0,24	0,09	31	32,67	20,63	25,99	0,63	0,60
6	6,81	1,72	0,57	0,25	0,11	32	35,49	23,18	30,22	0,65	0,62
7	7,16	1,88	0,71	0,26	0,12	33	38,64	26,09	35,19	0,68	0,65
8	7,53	2,06	0,86	0,27	0,14	34	42,16	29,44	41,06	0,70	0,67
9	7,92	2,25	1,03	0,28	0,16	35	46,12	33,30	48,03	0,72	0,70
10	8,35	2,47	1,22	0,30	0,48	36	50,59	37,75	56,31	0,75	0,73
11	8,80	2,71	1,44	0,31	0,19	37	55,63	42,92	66,19	0,77	0,75
12	9,28	2,97	1,69	0,32	0,21	38	61,35	48,93	78,03	0,80	0,78
13	9,81	3,26	1,97	0,33	0,23	39	67,87	55,96	92,25	0,82	0,81
14	10,37	3,59	2,29	0,35	0,25	40	75,31	64,20	109,41	0,85	0,84
15	10,98	3,94	2,65	0,36	0,27	41	83,86	73,90	130,22	0,88	0,87
16	11,63	4,34	3,06	0,37	0,29	42	93,71	85,38	155,55	0,91	0,90
17	12,34	4,77	3,53	0,39	0,31	43	105,11	99,02	186,54	0,94	0,93
18	13,10	5,26	4,07	0,40	0,32	44	118,37	115,31	224,64	0,97	0,97
19	13,93	5,80	4,68	0,42	0,34	45	133,88	134,88	271,76	1,01	1,00
20	14,83	6,40	5,39	0,43	0,36	46	152,10	158,51	330,35	1,04	1,04
21	15,82	7,07	6,20	0,45	0,38	47	173,64	187,21	403,67	1,08	1,07
22	16,88	7,82	7,13	0,46	0,40	48	199,26	222,31	496,01	1,12	1,11
23	18,05	8,66	8,20	0,48	0,42	49	229,93	265,51	613,16	1,15	1,15
24	19,32	9,60	9,44	0,50	0,45	50	266,89	319,07	762,89	1,20	1,19
25	20,72	10,66	10,88	0,51	0,47						

Fuente: DAS, Braja M. Principios de ingeniería de cimentaciones. p.176.

Tabla de diseño de mezcla de concreto

Datos requeridos:

$$F'C = \text{Kg/cm}^2$$

Tipo de elemento

Tamaño de agregado = según conveniencia y costo

Tabla VII. **Asentamiento recomendados**

ELEMENTO	ASENTAMIENTO
Cimientos, vigas, columnas, Muros reforzados	10 centímetros
Losas, pavimentos	8 centímetros
Concreto masivo	5 centímetros

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Cantidad de agua en litro sobre metro cúbico basado en el asentamiento utilizado**

asentamiento	CANTIDAD DE AGUA EN LT/MT3				
	Agregado 3/8"	Agregado 1/2"	Agregado 3/4"	Agregado 1"	Agregado 1 1/2"
3 cm a 5 cm	205	200	185	180	175
8 cm a 10 cm	225	215	200	195	180
15 cm a 18 cm	240	230	210	205	200

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Relación de agua/cemento basado en la resistencia del concreto**

Resistencia Kg/cm <sup>2</sup>	Relación A/C
352	0.47
316	0.50
281	0.54
246	0.57
210	0.60
176	0.64

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Porcentaje de agregado fino según tamaño de agregado grueso**

Tamaño de agregado grueso	% de arena	% de grueso
3/8"	48	52
1/2"	46	54
3/4"	44	56
1"	42	58
1 1/2"	40	60

Fuente: elaboración propia.