



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
*La Universidad Católica de Loja*

## **ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

### **“IMPLEMENTACIÓN DE OCHO HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EN OBRAS CIVILES EN EL LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA (LVIG)”**

**TRABAJO DE FIN DE CARRERA  
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

#### **DATOS GENERALES**

**AUTOR:**

Diego Fernando Urgilés González

**DIRECTOR:**

Ing. José Hurtado Hurtado

**LOJA - ECUADOR**

**2010**



**Ing. José Cristóbal Hurtado Hurtado**

DIRECTOR DE TESIS

**CERTIFICA:**

*Haber dirigido y revisado la tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Civil, realizada por el Profesional en formación: Diego Fernando Urgilés González, cuyo título es: **“IMPLEMENTACIÓN DE OCHO HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE PROBLEMAS GEOTÉCNICOS PARA OBRAS CIVILIES EN EL LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA (LVIG)”**; tema que cumple con las características exigidas por la reglamentación de la Escuela de Ingeniería Civil, por tanto, autorizo su presentación.*

---

**Ing. José Cristóbal Hurtado Hurtado**



## **AUTORÍA**

*El contenido en general; conceptos, análisis, criterios, y desarrollo del programa es de exclusiva responsabilidad del autor.*

---

**Diego Fernando Urgilés González**



## **CESIÓN DE DERECHOS**

Yo, *Diego Fernando Urgilés González*, declaro ser autor del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la universidad”.

---

***Diego Fernando Urgilés González***



## **AGRADECIMIENTO**

En mi vida existen tantas personas a las que tengo que agradecer el haber compartido tiempo y espacio conmigo y que han contribuido a mi crecimiento como hijo, hermano, amigo, compañero y el día de hoy como profesionalista. Por siempre los llevare en mi corazón.

A Dios que me ha dado y me seguirá dando fortaleza para continuar con la labor que se me ha encomendado.

A mis queridos padres quienes con su esfuerzo y sacrificio me concedieron acceder a estudios académicos, y por ser ejemplo auténtico para fijar sólidos principios y valores morales.

A mi hermano por apoyarme cuando más lo necesito, por compartir alegrías, sufrimientos, privaciones y por estar ahí cuando yo no estoy.

Al Ingeniero José Hurtado, Director de Tesis, por brindar desinteresadamente sus conocimientos y su valioso tiempo, durante el transcurso del presente trabajo investigativo.

A todos mis amigos gracias por su apoyo a lo largo de la carrera y su aportación a este trabajo de tesis; cada uno de ustedes está presente y contribuyó en gran parte para su culminación.

**Diego Fernando Urgilés González**



## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de tesis a las personas que han estado conmigo incondicionalmente en los momentos más difíciles de mi vida y que han hecho de mí lo que hoy soy.

Con todo mi amor y cariño:

*A MIS PADRES:*

*Dr. Raúl W. Urgilés Abarca y Lic. Blanca B. González Quezada*

*A MI HERMANO:*

*John Paúl*

Las personas que amo y por las que existo

***Diego Fernando Urgilés González***



## RESUMEN

La elección del tipo de cimentación depende especialmente de las propiedades del suelo, posición del nivel freático y también de la magnitud de las cargas existentes. A partir de todos esos datos se calcula la capacidad portante, que junto con la homogeneidad del terreno aconsejan usar un tipo u otro diferente de cimentación. Siempre que es posible se emplean cimentaciones superficiales, ya que son el tipo de cimentación menos costoso y más simple de ejecutar. En el caso cuando el suelo superficial posee características inadecuadas para cimentar se busca otras alternativas entre ellas está cimentaciones profundas.

La presente investigación ha permitido desarrollar ocho aplicaciones web de análisis de problemas geotécnicos en obras civiles de las cuales, cuatro se centra en la aplicación de tensión efectiva, obtención de tensiones en terrenos estratificados en condiciones hidrostáticas e hidrodinámicas. Las siguientes dos aplicaciones web analizan y ofrecen una visión general de los asentamientos por consolidación primaria y cálculo del coeficiente de consolidación y las dos últimas se encuentran en la misma aplicación web que trata sobre el diseño de pilotes hincados y perforados por factores de carga y resistencia (LRFD) por estados límites, que es un método de diseño en el cual las cargas de diseño se mayoran y las resistencias de diseño se minoran multiplicando por factores mayores y menores que la unidad respectivamente, empleando: el lenguaje de programación de *Visual Basic.Net 2005*, distintos controles de *Ajax*, y lenguaje de *Java script*.

Estas aplicaciones permiten reducir considerablemente el tiempo de diseño de cimentaciones superficiales y profundas. Además, dentro de la escuela de Ingeniería Civil, constituyen un aporte para el entorno enseñanza – aprendizaje, ya que las herramientas pueden ayudar a los estudiantes, a corroborar las metodologías de cálculo para el análisis de problemas geotécnicos en Obras Civiles.

Entre las herramientas desarrolladas tenemos:



- ✓ Herramienta “*Tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales en un terreno estratificado*”, se ha elaborado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúan las tensiones en el suelo en un terreno estratificado compuesto de tres estratos, que a su vez se apoya sobre un macizo rocoso impermeable, con el propósito de construir una losa de cimentación para lo cual se realizará una excavación. La presente herramienta permite determinar y graficar las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales antes y después de la excavación.
  
- ✓ Herramienta “*Tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales bajo la cimentación del pilón de un puente*”, se ha diseñado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúan las tensiones en el suelo bajo la cimentación de un pilón de un puente de hormigón armado que a su vez se cimenta en el cauce de un río apoyándose sobre la superficie de un estrato. El nivel de agua en el río puede variar sobre la superficie del estrato. La presente herramienta permite determinar las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales a cualquier profundidad bajo el centro de la cimentación del pilón, en las siguientes condiciones: cuando el nivel de agua en el río coincide con la superficie del estrato y cuando el nivel de agua en el río está sobre la superficie del estrato.
  
- ✓ Herramienta “*Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos*”, se ha diseñado con la finalidad de conocer si la estructura del pilón va a sufrir un asentamiento cuando el nivel del agua del río varíe con la superficie del estrato, para lo cual se realiza un análisis de cómo actúan las tensiones en el suelo cuando se desea construir una edificación sobre una losa de cimentación que transmite presión uniforme sobre el terreno, para esto se necesita realizar una excavación en el estrato arcilloso apoyado sobre un estrato de arena gruesa que contiene agua subterránea, para esto se han tomado datos de campo. Un piezómetro insertado en el contacto entre dos estratos el mismo que registra el nivel de agua artesiana sobre la superficie del terreno. La presente herramienta permite determinar el caudal que se filtra hacia la superficie del terreno y el factor



de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos al finalizar la excavación y después de construir la losa de cimentación.

- ✓ Herramienta “*Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos mejorados*”, se ha diseñado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúan las tensiones en el suelo cuando se va a proceder a la construcción de una losa de cimentación en un terreno estratificado compuesto principalmente de dos estratos que a su vez se apoyan sobre un estrato de arena media. Para lo cual se va a realizar una excavación, después se mejorará el terreno interior con una inyección de *grout* (agua y cemento). La presente herramienta permite determinar el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos de mejoramiento, en las siguientes condiciones: cuando el suelo mejorado se considera impermeable y permeable. Además se determinará el caudal que se filtrará hacia la zona excavada.
  
- ✓ Herramienta “*Determinación del asentamiento por consolidación primaria en una arcilla*”, se ha diseñado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúa la superficie de un terreno estratificado compuesto principalmente de tres estratos siendo el del medio una arcilla donde se va a construir una edificación y este proceso impondrá un incremento en la presión vertical en los suelos generando un asentamiento el mismo que es medible en la mitad de la capa de arcilla. La presente herramienta permite determinar el asentamiento por consolidación primaria en la mitad de la capa de arcilla y el índice de vacíos final en la arcilla.
  
- ✓ Herramienta “*Determinación de la curva de asentamiento por consolidación primaria en una arcilla*”, se ha diseñado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúa la superficie de un estrato de arcilla, que se apoya sobre un macizo granítico impermeable, donde se va a construir una edificación que a su vez transmitirá una presión uniforme generando un asentamiento que es medible en la mitad de la capa de arcilla. La presente herramienta permite determinar la curva de asentamientos instantáneos y



corregidos por consolidación primaria de la arcilla, con el propósito de tener en cuenta el asentamiento de la cimentación provocado por la consolidación primaria de la arcilla, generado en diversos tiempos a lo largo de la vida útil de la obra.

- ✓ Herramienta “*Diseño de pilotes hincados y perforados por Estados Límites*”, se ha diseñado con la finalidad de proponer un método de diseño por Estados Límites para Pilotes Hincados y Perforados que está basado en un estudio racional de los métodos de diseño en base a la probabilidad. En particular, se utiliza el Diseño por Factores de Carga y Resistencia para facilitar la metodología de Diseño por Estados Límites. La presente herramienta permite determinar factores de resistencia para resistencia friccional y de punta, en base a las propiedades de los suelos y a diseño directo (ensayos in situ).

Además se elaboraron manuales de usuario para cada una de las herramientas, para lo cual se ha tomado como referencia diferentes metodologías cuyo proceso de cálculo es de carácter analítico.

Con el fin de hacer más agradable la interfaz visual de las herramientas, y de proporcionar cierta ayuda al usuario durante el ingreso de datos, se han incorporado: esquemas de cimentación para cada una de las aplicaciones, valores recomendados para distintos parámetros, y en varios casos, gráficas que ayudan a la interpretación de resultados obtenidos.

Todas estas aplicaciones han sido satisfactoriamente implementadas en el *Laboratorio virtual de ingeniería geotécnica (LVIG)*. Para poder hacer uso de estas herramientas se debe ingresar gratuitamente, como usuario registrado del LVIG, vía online a través de la dirección [www.utpl.edu.ec/vleg](http://www.utpl.edu.ec/vleg), en la sección de ANÁLISIS.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|  | Pág. |
|--|------|
| CERTIFICACIÓN  | i    |
| AUTORÍA  | ii   |
| CESIÓN DE DERECHOS   | iii  |
| AGRADECIMIENTO   | iv   |
| DEDICATORIA  | v    |
| <br>   |      |
| <b>CAPITULO I</b>  |      |
| <b>PERFIL DEL PROYECTO</b>   |      |
| 1.1 INTRODUCCIÓN.....  | 2    |
| 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....  | 2    |
| 1.3 SOLUCIÓN.....  | 3    |
| 1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....   | 3    |
| 1.4.1 General.....   | 3    |
| 1.4.2 Específicos.....   | 3    |
| 1.5 METODOLOGÍA.....   | 4    |
| <br>   |      |
| <b>CAPITULO II</b>   |      |
| <b>ESTADO ACTUAL DE HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EN OBRAS CIVILES</b>                  |      |
| 2.1 INTRODUCCIÓN.....  | 6    |
| 2.2 MEJORAS CON LA IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTAS .....   | 6    |
| <br>   |      |
| <b>CAPITULO III</b>  |      |
| <b>DESARROLLO DE LAS HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EN OBRAS CIVILES</b>                 |      |
| 3.1 INTRODUCCIÓN.....  | 9    |
| 3.2 COMPONENTE GEOTÉCNICO.....   | 9    |
| 3.2.1 Tensiones en el suelo .....  | 9    |
| 3.2.1.1 Tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales en un terreno estratificado.....                | 10   |
| 3.2.1.2 Tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales bajo la cimentación del pilón de un puente..... | 14   |
| 3.2.1.3 Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos.....                               | 17   |



|         |  |    |
|---------|--|----|
| 3.2.1.4 | Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos mejorados.....                | 22 |
| 3.2.2   | Consolidación primaria en una arcilla.....   | 27 |
| 3.2.2.1 | Asentamiento por consolidación primaria en una arcilla.....                              | 28 |
| 3.2.2.2 | Determinación de la curva de asentamiento por consolidación primaria de una arcilla..... | 33 |
| 3.2.3   | Diseño de pilotes hincados y perforados por Estados Límites.....                         | 37 |
| 3.2.3.1 | Diseño de pilotes hincados en arena.....   | 39 |
| 3.2.3.2 | Diseño de pilotes hincados en arcilla.....   | 46 |
| 3.2.3.3 | Diseño de pilotes perforados en arena.....   | 51 |
| 3.2.3.4 | Diseño de pilotes perforados en arcilla.....   | 52 |
| 3.3     | COMPONENTE INFORMÁTICA.....  | 53 |

## CAPITULO IV

### EJEMPLOS DE VERIFICACIÓN

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.1 | TENSIONES VERTICALES TOTALES, EFECTIVAS E INTERSTICIALES EN UN TERRENO ESTRATIFICADO.....                | 57 |
| 4.2 | TENSIONES VERTICALES TOTALES, EFECTIVAS E INTERSTICIALES BAJO LA CIMENTACIÓN DEL PILÓN DE UN PUENTE..... | 63 |
| 4.3 | FACTOR DE SEGURIDAD EMPLEADO EN EL LEVANTAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS.....                               | 69 |
| 4.4 | FACTOR DE SEGURIDAD EMPLEADO EN EL LEVANTAMIENTO DE SUELOS MEJORADOS.....                                | 73 |
| 4.5 | DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA EN UNA ARCILLA....                             | 78 |
| 4.6 | DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA EN UNA ARCILLA.....                 | 83 |
| 4.7 | DISEÑO DE PILOTES HINCADOS Y PERFORADOS POR ESTADOS LÍMITES.....   | 88 |

## CAPITULO V

### MANUALES DE USUARIO

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 5.1 | INTRODUCCIÓN.....  | 96  |
| 5.2 | CÁLCULO DE: TENSIONES VERTICALES TOTALES, EFECTIVAS E INTERSTICIALES EN UN TERRENO ESTRATIFICADO.....                | 96  |
| 5.3 | CÁLCULO DE: TENSIONES VERTICALES TOTALES, EFECTIVAS E INTERSTICIALES BAJO LA CIMENTACIÓN DEL PILÓN DE UN PUENTE..... | 107 |
| 5.4 | CÁLCULO DE: FACTOR DE SEGURIDAD EMPLEADO EN EL LEVANTAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS.....                               | 119 |
| 5.5 | CÁLCULO DE: FACTOR DE SEGURIDAD EMPLEADO EN EL LEVANTAMIENTO DE SUELOS MEJORADOS.....                                | 129 |
| 5.6 | DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA EN UNA ARCILLA..   | 142 |



|   |     |
|---|-----|
| 5.7 DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA EN UNA<br>ARCILLA..... | 153 |
| 5.8 DISEÑO DE PILOTES HINCADOS Y PERFORADOS POR ESTADOS LÍMITES.....                            | 165 |

## **CAPITULO VI**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 6.1 CONCLUSIONES.....    | 192 |
| 6.2 RECOMENDACIONES..... | 193 |

## **CAPITULO VII**

|  |            |
|--|------------|
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b> | <b>195</b> |
|--|------------|



## ÍNDICE DE FIGURAS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Figura 3.1 | Principio de tensión efectiva.....   | 10 |
| Figura 3.2 | Profundidad de análisis.....   | 11 |
| Figura 3.3 | Zona de excavación.....  | 13 |
| Figura 3.4 | Altura de nivel de agua del río.....   | 17 |
| Figura 3.5 | Definición de la ley de Darcy.....   | 18 |
| Figura 3.6 | Altura de presión artesiana.....   | 21 |
| Figura 3.7 | Altura de presión.....   | 24 |
| Figura 3.8 | Carga de flujo, recorrido ascendente del agua y espesor.....   | 25 |
| Figura 3.9 | Estado tensional en el centro de la arcilla.....   | 28 |
| Figura 4.1 | Datos del ejemplo de aplicación (Tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales en un terreno estratificado) .....               | 57 |
| Figura 4.2 | Datos del ejemplo de aplicación (Tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales bajo la cimentación del pilón de un puente)..... | 64 |
| Figura 4.3 | Datos del ejemplo de aplicación (Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos).....                               | 70 |
| Figura 4.4 | Datos del ejemplo de aplicación (Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelo mejorados).....                                 | 74 |
| Figura 4.5 | Datos del ejemplo de aplicación (Determinación del asentamiento por consolidación primaria en una arcilla).....                            | 79 |
| Figura 4.6 | Datos del ejemplo de aplicación (Determinación de la curva de asentamiento por consolidación primaria en una arcilla).....                 | 83 |
| Figura 4.7 | Datos del ejemplo de aplicación (Diseño de pilotes hincados y perforados por Estados Límites).....   | 88 |

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Gráfica 4.1 | Representación gráfica de las tensiones antes de la excavación.....  | 60 |
| Gráfica 4.2 | Representación gráfica de las tensiones después de la excavación .....   | 63 |
| Gráfica 4.3 | Representación gráfica de las tensiones cuando el nivel de agua en el río coincide con la superficie de la arena.....      | 67 |
| Gráfica 4.4 | Representación gráfica de las tensiones cuando el nivel de agua en el río alcanza 3 m sobre la superficie de la arena..... | 69 |
| Gráfica 4.5 | Curva de asentamientos instantáneos.....   | 86 |
| Gráfica 4.6 | Curva de asentamientos corregidos.....   | 87 |



## ÍNDICE DE CUADROS

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Cuadro 3.1  | Valores de pesos unitarios.....  | 12 |
| Cuadro 3.2  | Valores de coeficientes de permeabilidad.....  | 26 |
| Cuadro 3.3  | Valores de peso específico relativo.....   | 29 |
| Cuadro 3.4  | Valores de índice de vacíos.....   | 30 |
| Cuadro 3.5  | Valores de índice de compresión.....   | 32 |
| Cuadro 3.6  | Valores de coeficiente volumétrico de compresibilidad.....                             | 34 |
| Cuadro 3.7  | Valores del grado de consolidación medio $U_v$ y factor de tiempo vertical $T_v$ ..... | 34 |
| Cuadro 3.8  | Valores de densidad relativa.....  | 40 |
| Cuadro 3.9  | Valores de ángulo de fricción.....   | 41 |
| Cuadro 3.10 | Valores de resistencia al corte no drenado.....  | 47 |
| Cuadro 3.11 | Valores de cohesión.....   | 47 |
| Cuadro 3.12 | Factores empíricos.....  | 49 |
| Cuadro 3.13 | Número de golpes del ensayo SPT.....   | 50 |
| Cuadro 4.1  | Valores para la curva de asentamientos instantáneos.....                               | 85 |
| Cuadro 4.2  | Valores para la curva de asentamientos corregidos.....                                 | 87 |



# **CAPÍTULO I**

## **PERFIL DEL PROYECTO**



## 1.1 INTRODUCCIÓN

La Geotecnia tiene como objetivo el estudio del comportamiento y características particulares y generales de las rocas y suelos, ante el desarrollo de obras de ingeniería civil inmersas en estos elementos, para observar, diagnosticar, prevenir, enfrentar y resolver el o los problemas geotécnicos en la construcción de grandes obras, por ejemplo: vías terrestres, presas, edificaciones, puentes, etc., sobre la base del análisis científico e interdisciplinario de dichos problemas en una determinada obra civil (*Ramos Bautista Adán, 2005*).

Para realizar análisis de problemas geotécnicos en Obras civiles no es común encontrar herramientas disponibles para la resolución de un problema en específico, razón por la cual se ha escogido ocho problemas que he considerado de suma importancia para el análisis.

En la resolución de los problemas he tenido que aceptar hipótesis razonables que bien pueden cuestionarse con conocimientos geotécnicos teóricos más profundos. A pesar de ello, creo que este es el camino más conveniente para iniciarse en el razonamiento geotécnico e interesarse por esta disciplina.

Estoy convencido de que esta elección de problemas geotécnicos facilitará a los estudiantes de Ingeniería Civil a su inicio en las asignaturas geotécnicas.

## 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Hoy en día existen diversas herramientas útiles para realizar análisis y diseños relacionados con análisis de problemas geotécnicos en Obras Civiles, mejorando así la calidad tanto de enseñanza como de aprendizaje, y además de ello reducen el tiempo de diseño en comparación a métodos convencionales.



En la UCG (Unidad de Ingeniería Civil, Geología y Minas) de la Universidad Técnica Particular de Loja, se está llevando a cabo la implementación de un laboratorio virtual de Ingeniería Geotécnica (LVIG), el cual no posee una herramienta para el análisis de problemas geotécnicos en Obras Civiles: siendo esta un medio de gran aporte tecnológico para el entorno de aprendizaje, y además como una herramienta de diseño para los estudiantes universitarios y profesionales en general.

### **1.3 SOLUCIÓN**

Como solución al problema antes planteado se pretende realizar ocho herramientas de análisis de problemas geotécnicos en obras civiles e implementarlas en el laboratorio virtual mediante la utilización del software Visual Basic.NET.

### **1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.4.1. General**

- Desarrollar ocho herramientas para el análisis de problemas geotécnicos en obras civiles e implementarlas en el Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica (LVIG), mediante la utilización de herramientas informáticas.

#### **1.4.2. Específicos**

- Determinar las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales en un terreno estratificado antes y después de la excavación.
- Determinar el factor de seguridad mínimo frente al levantamiento de suelos arcillosos y de mejoramiento.



- Analizar y ofrecer una visión general de los asientos por consolidación primaria.
- Proponer un método de diseño por Estados Límites para Pilotes Hincados y Perforados que está basado en Factores de Carga y Resistencia.

## 1.5 METODOLOGÍA

La metodología comprenderá los siguientes puntos:

- Recopilación de información acerca del análisis de problemas geotécnicos en obras civiles.
- Capacitación y aprendizaje de programa Visual Basic.net.
- Estudio de los análisis de problemas geotécnicos en obras civiles.
- Desarrollo de la aplicación del análisis de los ocho problemas geotécnicos en obras civiles en Visual Basic.net.
- Implementación de las aplicaciones del análisis de los ocho problemas geotécnicos en obras civiles en el Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica.
- Desarrollo de los ocho manuales de usuario de las aplicaciones del análisis de problemas geotécnicos en obras civiles.
- Verificación del correcto funcionamiento de las ocho herramientas del análisis de problemas geotécnicos en obras civiles.



# **CAPÍTULO II**

## **ESTADO ACTUAL DE HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EN OBRAS CIVILES**



## 2.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad se puede encontrar varias herramientas para el Analizar Problemas Geotécnicos en Obras Civiles. Pero en la mayoría de los casos es difícil encontrar para un problema geotécnico en específico, asimismo las licencias de las aplicaciones son muy costosas, y no están sujetas a fines educativos, sino únicamente profesionales. Además, se produce cierta incertidumbre al momento de ingresar datos, ya que en algunos casos el programa requiere parámetros, que para un usuario sin acceso a información especializada y con conocimientos teóricos limitados, serán difíciles de obtener o interpretar, ya que las aplicaciones carecen de tablas, coeficientes, ábacos, gráficas, nomogramas, etc.

En lo que respecta a herramientas web y de código abierto, hasta el momento no se ha desarrollado ninguna aplicación para el análisis de problemas geotécnicos en Obras Civiles en el contexto nacional. Por lo tanto esta herramienta constituye un nuevo instrumento de aprendizaje para los estudiantes de Ingeniería Civil de la UTPL y para profesionales en general en el área de Geotecnia, para las demás ramas de la Ingeniería civil ya se están incorporándose laboratorios virtuales vía on-line acorde al avance investigativo y científico.

## 2.2 MEJORAS CON LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS

En la Universidad Técnica Particular de Loja, la Escuela de Ingeniería Civil, ha venido trabajando en la creación del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line, en la cual se encontrarán herramientas de análisis y diseño, las mismas que serán de gran ayuda a los estudiantes y profesionales interesados en temas específicos de carácter geotécnico.

Dentro de este laboratorio virtual se encuentran las herramientas para el Análisis de Problemas Geotécnicos en Obras Civiles, la misma que se desarrolló en base a metodologías geotécnicas basadas en distintos textos



especializados, como *Ejercicios Resueltos de Geotecnia* de Matías Sánchez, *Principios de Ingeniería de Cimentaciones* de Braja M. Das, *Geotechnical Engineering principles and practices* de Donald Coduto, *Diseño de Fundaciones Profundas por Estados Límites de la Universidad de Purdue West Lafayette Indiana* realizado por Rodrigo Salgado, Kevin Foye y Grace Abou Jaoude, *The Foundation Engineering Handbook* de Manjriker Gunaratne y la norma americana ASTM A 6/A 6M – 07.

Todas las metodologías empleadas para los procesos de cálculo, se describen en el manual respectivo.

Las interfaces web de varias aplicaciones presentan tablas que permiten al usuario observar valores recomendados para distintos parámetros a ingresarse para el cálculo. Además cada herramienta posee un ejercicio que ejemplifica el proceso de diseño y comprueba el correcto funcionamiento de la aplicación.

Finalmente las herramientas de Análisis de Problemas Geotécnicos en Obras Civiles son un instrumento web, que puede ser actualizado continuamente, conforme al avance investigativo y científico de metodologías, normas y técnicas referentes al diseño de cimentaciones superficiales y profundas. También se podrá mejorar la interface visual de acuerdo a las necesidades que surjan.



# **CAPÍTULO III**

## **DESARROLLO DE LAS HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EN OBRAS CIVILES**



### 3.1 INTRODUCCIÓN

Las presentes herramientas de análisis, tiene como finalidad calcular, en base a las propiedades geotécnicas del suelo y las características de los materiales en el que se encuentra inmerso, los diferentes parámetros como: tensiones en el suelo tanto en terrenos estratificados como bajo la cimentación de un puente, asentamiento por consolidación primaria de la arcilla, y además el Diseño de pilotes hincados y perforados por Estados Límites.

Para la realización de las herramientas se utilizaron dos componentes importantes, como es el componente geotécnico (Ingeniería Civil) y el componente informático (Ingeniería Informática).

### 3.2 COMPONENTE GEOTÉCNICO

Los cálculos se basan en las metodologías propuestas por: *Ejercicios Resueltos de Geotecnia* de Matías Sánchez, *Principios de Ingeniería de Cimentaciones* de Braja M. Das, *Geotechnical Engineering principles and practices* de Donald Coduto, *Diseño de Fundaciones Profundas por Estados Límites de la Universidad de Purdue West Lafayette Indiana* realizado por Rodrigo Salgado, Kevin Foye y Grace Abou Jaoude, *The Foundation Engineering Handbook* de Manjriker Gunaratne y la norma americana ASTM A 6/A 6M – 07.

A continuación se describen todas las metodologías que la herramienta utiliza para el análisis de problemas geotécnicos en Obras Civiles.

#### 3.2.1. Tensiones en el suelo

Las tensiones en el suelo se basan en el análisis de las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales que actúan sobre un perfil del terreno, tomando en cuenta el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos e incluyendo el efecto de la filtración del agua.

Terzaghi (1936), demostró el *principio de tensión efectiva* para un suelo en general (Figura 3.1), el cual se determina mediante la siguiente ecuación que consiste en la diferencia entre de la tensión vertical total y la tensión intersticial.

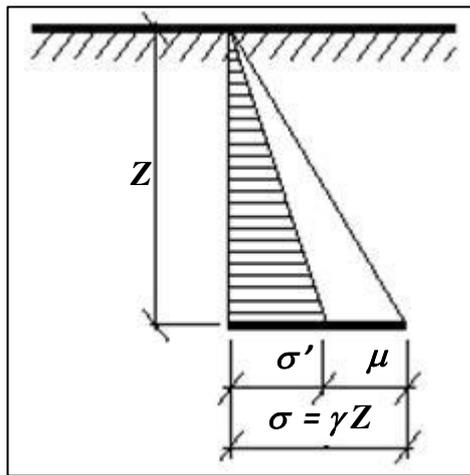


Figura 3.1 PRINCIPIO DE TENSIÓN EFECTIVA

Fuente: Ejercicios Resueltos de Geotecnia, SANCHÉZ Matías, 2008

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

Ec. 1

Donde:

$\sigma'$  = tensión efectiva (KN/m<sup>2</sup>)

$\sigma$  = tensión vertical total (KN/m<sup>2</sup>)

$\mu$  = tensión intersticial (KN/m<sup>2</sup>)

### 3.2.1.1. Tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales en un terreno estratificado

Es importante realizar un análisis de las tensiones del suelo en un terreno estratificado para conocer las presiones que produce el suelo al



momento de cimentar una obra civil para que no ocurra un levantamiento o hundimiento de la misma.

Las tensiones antes de la excavación servirán para tener una idea de cómo se encuentra el suelo con respecto al nivel freático debido a que durante la excavación entrará agua en la misma produciéndose una descarga de las tensiones que afectará a la cimentación provocando fisuras o deslizamientos.

### - Antes de la excavación

Las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales se las calcula en puntos significativos a lo largo de la profundidad del perfil del terreno con el principio de tensión efectiva propuesto por Terzaghi (*Ecuación 1*). Ahora definiremos las expresiones para determinar la tensión vertical total e intersticial, en donde actúa la profundidad de análisis para el cálculo de las tensiones anteriormente mencionadas.

La profundidad de análisis  $Z$  (Figura 3.2), es aquella distancia desde la superficie del terreno hasta cada uno de los puntos de análisis. Como resultado los puntos se ubicarán ya sea al final del estrato o en el centro del mismo.

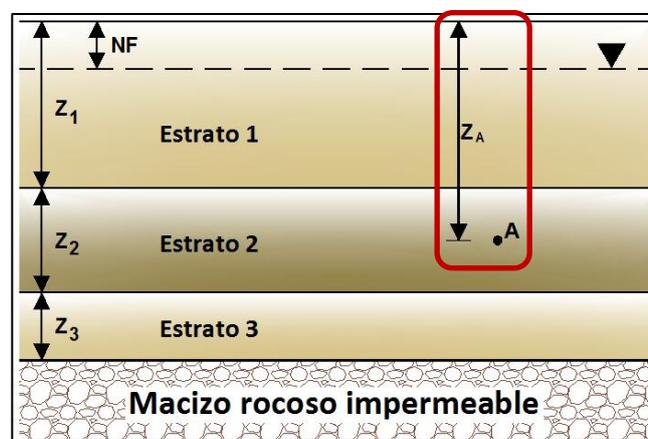


Figura 3.2 PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS

Fuente: El autor



$$\sigma = \sum \gamma \times Z$$

Ec. 2

Donde:

$\sigma$  = tensión total vertical (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  = peso específico del estrato (KN/m<sup>3</sup>)

$Z$  = profundidad de análisis (m)

El (Cuadro 3.1) proporciona valores representativos de pesos específicos típicos en base a la clasificación de suelos de la SUCS.

| PESOS UNITARIOS TÍPICOS ( $\gamma$ ) |                                 |  |   |
|--------------------------------------|---------------------------------|--|---|
| Tipo de suelo                        | Clasificación SUCS (ASTM D2487) | Sobre el nivel freático (KN/m <sup>3</sup> ) | Bajo el nivel freático (KN/m <sup>3</sup> ) |
| Gravas mal gradadas                  | GP                              | 17.5 - 20.5                                  | 19.5 - 22.0                                 |
| Gravas bien gradadas                 | GW                              | 17.5 - 22.0                                  | 19.5 - 23.5                                 |
| Gravas limosas                       | GM                              | 16.0 - 20.5                                  | 19.5 - 22.0                                 |
| Gravas arcillosas                    | GC                              | 16.0 - 20.5                                  | 19.5 - 22.0                                 |
| Arenas mal gradadas                  | SP                              | 15.0 - 19.5                                  | 19.0 - 21.0                                 |
| Arenas bien gradadas                 | SW                              | 15.0 - 21.0                                  | 19.0 - 23.0                                 |
| Arenas limosas                       | SM                              | 12.5 - 21.0                                  | 17.5 - 22.0                                 |
| Arenas arcillosas                    | SC                              | 13.5 - 20.5                                  | 17.5 - 21.0                                 |
| Limos baja plasticidad               | ML                              | 11.5 - 17.5                                  | 12.5 - 20.5                                 |
| Limos alta plasticidad               | MH                              | 11.5 - 17.5                                  | 11.5 - 20.5                                 |
| Arcillas baja plasticidad            | CL                              | 12.5 - 17.5                                  | 11.5 - 20.5                                 |
| Arcillas alta plasticidad            | CH                              | 12.5 - 17.5                                  | 11.0 - 19.5                                 |

Cuadro 3.1 VALORES DE PESOS UNITARIOS

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

$$\mu = \gamma_w \times (Z - NF)$$

Ec. 3

Donde:

$\mu$  = tensión intersticial (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_w$  = peso específico del agua (KN/m<sup>3</sup>)

$Z$  = profundidad de análisis (m)

$NF$  = profundidad del nivel freático (m)

Para tener una visión general de las tensiones en cualquier punto de la profundidad del terreno es necesario representar gráficamente las tensiones antes de la excavación para lo cual se ubica en el eje de las  $X$  las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales y en el eje de las  $Y$  se ubica la profundidad de análisis.

### - Después de la excavación

Las tensiones en el suelo para este caso será el mismo que el anterior aplicando el principio de tensión efectiva propuesto por Terzagui. Se calculará en varios puntos significativos con la única diferencia que se restará la *descarga de las tensiones* ( $\Delta\sigma$ ) o zona de excavación en cada una de las tensiones totales verticales, efectivas e intersticiales (Figura 3.3).

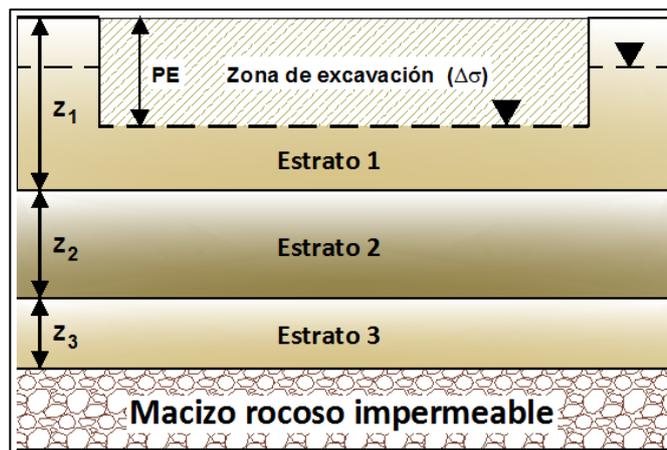


Figura 3.3 ZONA DE EXCAVACIÓN

Fuente: El autor

Al realizar la excavación, se produce una descarga de las tensiones que se la obtiene con la siguiente expresión:



$$\Delta\sigma = \gamma \times PE$$

Ec. 4

Donde:

$\Delta\sigma$  = descarga de las tensiones (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  = peso específico del estrato (KN/m<sup>3</sup>)

$PE$  = profundidad de excavación (m)

Ya realizada la excavación se obtendrá la siguiente expresión para calcular la tensión vertical total para los cinco puntos de análisis.

$$\sigma = [\sum \gamma \times Z] - \Delta\sigma$$

Ec. 5

Ahora definiremos la expresión para la tensión intersticial, con la (Ecuación 1) se obtiene las tensiones efectivas.

$$\mu = (\gamma_w \times Z) - \Delta\sigma$$

Ec. 6

Para tener una visión general de las tensiones en cualquier punto de la profundidad del terreno es necesario representar gráficamente las tensiones después de la excavación para lo cual se ubica en el eje de las X las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales y en el eje de las Y se ubica la profundidad de análisis.

### **3.2.1.2. Tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales bajo la cimentación del pilón de un puente**

Cuando el nivel de agua en el río varía con la superficie del estrato se produce un cambio en la tensión intersticial que da como resultado una disminución en la tensión efectiva provocando que la estructura del pilón sufra cambios significativos produciéndose como resultado el asentamiento de la estructura e inclusive el colapso de la misma.



- **Cuando el nivel de agua del río coincide con la superficie del estrato**

Las tensiones en el suelo como son la tensión total vertical, efectiva e intersticial se las calcula en puntos significativos a lo largo de la profundidad del estrato con el principio de tensión efectiva propuesto por Terzagui (*Ecuación 1*).

Para el cálculo de la tensión vertical total se adicionará la tensión de la cimentación aportada por el pilón y el tablero cuyas expresiones son las siguientes:

$$\sigma_{tab} = \frac{P_{tab}}{A} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$\sigma_{tab}$  = presión transmitida por el tablero a la cimentación (KN/m<sup>2</sup>)

$P_{tab}$  = carga transmitida (KN)

$A$  = área de apoyo del pilón (m<sup>2</sup>)

$$\sigma_{pilón} = \frac{W_{pilón}}{A} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$\sigma_{pilón}$  = presión transmitida por el peso del pilón a la cimentación (KN/m<sup>2</sup>)

$W_{pilón}$  = carga del pilón (KN)

$A$  = área de apoyo del pilón (m<sup>2</sup>)

$$\sigma_{cim} = \sigma_{tab} + \sigma_{pilón} \quad \text{Ec. 9}$$



Donde:

$\sigma_{cim}$  = presión transmitida a la cimentación (KN/m<sup>2</sup>)

Ya obtenidas las presiones aplicadas a la cimentación se indicará la expresión para el cálculo de la tensión total vertical.

$$\sigma = \sigma_{cim} + (\gamma_e \times Z) \quad \text{Ec. 10}$$

Para determinar la tensión intersticial se utiliza la siguiente expresión.

$$\mu = \gamma_w \times Z \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$\mu$  = tensión intersticial (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_w$  = peso específico del agua (KN/m<sup>3</sup>)

$Z$  = profundidad de análisis (m)

Para tener una visión general de las tensiones en cualquier punto de la profundidad del estrato es necesario representar gráficamente las tensiones cuando el nivel de agua del río coincide con la superficie del estrato se ubica en el eje de las X las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales y en el eje de las Y se ubica la profundidad de análisis.

- **Cuando el nivel de agua del río está sobre la superficie del estrato**

Las tensiones en el suelo para este caso será el mismo que el anterior aplicando el principio de tensión efectiva propuesto por Terzagui (Ecuación 1). Se calculará varios puntos significativos a lo largo de la profundidad del estrato, con la única diferencia que en la tensión

intersticial se aumentará la altura de nivel de agua del río sobre la superficie del estrato  $Z_s$  (Figura 3.4).

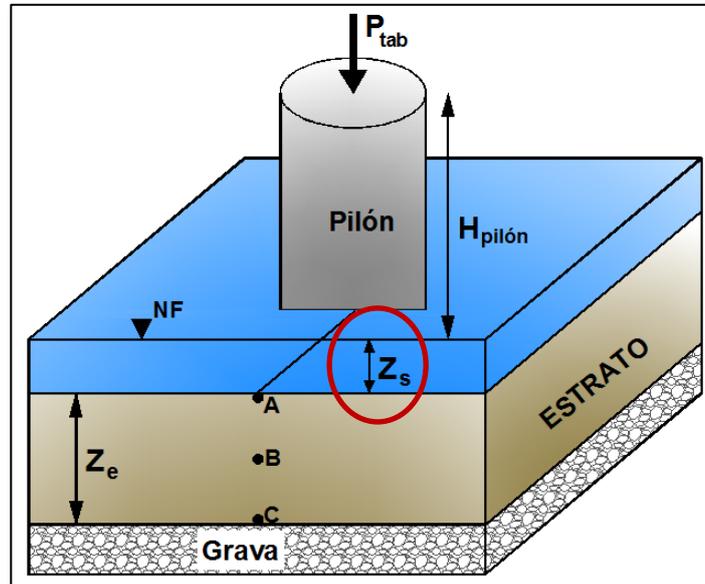


Figura 3.4 ALTURA DE NIVEL DE AGUA DEL RÍO.

Fuente: El autor

$$\mu = \gamma_w \times (Z + Z_s)$$

Ec. 12

Donde:

$Z_s$  = altura de nivel de agua del río (m)

Para tener una visión general de las tensiones en cualquier punto de la profundidad del estrato es necesario representar gráficamente las tensiones cuando el nivel de agua del río está sobre la superficie del estrato se ubica en el eje de las X las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales y en el eje de las Y se ubica la profundidad de análisis.

### 3.2.1.3. Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos.

Antes de construir una edificación es importante tener en cuenta el factor de seguridad debido a que en suelos arcillosos el coeficiente de permeabilidad es muy pequeño ya que podría aumentar la pérdida de carga produciéndose un levantamiento de la cimentación, con lo que luego de construida la edificación el peso mismo ayudará a la estabilización permitiendo que no ocurra daños a la estructura.

El factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos será el cociente entre la tensión total vertical - aplicada hacia abajo- y la tensión intersticial -ejercida hacia arriba-.

$$FS_{lev} = \frac{\sigma}{\mu} \quad \text{Ec. 13}$$

$FS_{lev}$  = factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos

$\sigma$  = tensión vertical total (KN/m<sup>2</sup>)

$\mu$  = tensión intersticial (KN/m<sup>2</sup>)

- **Caudal que se filtra hacia la superficie del terreno**

Darcy (1956) propuso la siguiente ecuación para calcular la velocidad de flujo de agua a través de un suelo (Figura 3.5).

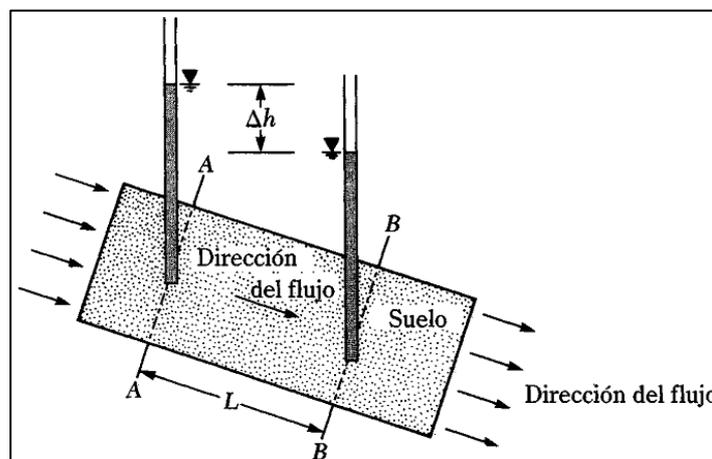


Figura 3.5 DEFINICIÓN DE LA LEY DE DARCY.

Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001



$$v = k \times i$$

Ec. 14

Donde:

$v$  = velocidad de Darcy (m/s)

$k$  = permeabilidad hidráulica del suelo (m/s)

$i$  = gradiente hidráulico

El gradiente hidráulico  $i$  se define como:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Ec. 15

Donde:

$\Delta h$  = diferencia de carga piezométrica (m)

$L$  = longitud (m)

Reemplazando la Ecuación 15 en la Ecuación 14 se obtiene la ecuación que se utilizará para el cálculo de la velocidad de flujo.

$$v = k \times \frac{\Delta h}{L}$$

Ec. 16

Para calcular el caudal que se filtra hacia la superficie del terreno se utiliza la ecuación de continuidad.

$$Q = v \times A$$

Ec. 17

Donde:

$Q$  = caudal [ $m^3/s(m^2)$ ]

$v$  = velocidad de Darcy (m/s)

$A$  = área por metro cuadrado ( $A = 1 m^2$ )



Como el caudal se lo calculará en las unidades de  $m^3/año$ , se añadirá la conversión  $1 año = 31536000$  s dando como resultado lo siguiente:

$$q = Q \times 31536000 \quad Ec. 18$$

- **Factor de seguridad al finalizar la excavación**

Luego de finalizada la excavación se procede a calcular las tensiones totales verticales e intersticiales.

Para calcular la tensión total vertical necesitamos conocer el peso específico saturado de la arcilla.

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \times \gamma_w \quad Ec. 19$$

Donde:

$\gamma_{sat}$  = peso específico saturado de la arcilla ( $KN/m^3$ )

$G_s$  = peso específico relativo de la arcilla

$e$  = índice de vacíos de la arcilla

$\gamma_w$  = peso específico del agua ( $KN/m^3$ )

Como la arcilla se encuentra saturada se reemplaza el índice de vacíos ( $e$ ) por la siguiente expresión:

$$e = w \times G_s \quad Ec. 20$$

Donde:

$w$  = contenido de humedad de la arcilla (%)

El valor de peso específico saturado de la arcilla, puede determinarse reemplazando la Ecuación 20 en la Ecuación 19 dando la expresión siguiente:

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s(1+w)}{1+(w \times G_s)} \times \gamma_w \quad \text{Ec. 21}$$

Ya calculado el peso específico de la arcilla determinamos una expresión para el valor de la tensión total vertical.

$$\sigma = \gamma_{satA} \times (Z_a - PE) \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

$\sigma$  = tensión total vertical ( $KN/m^2$ )

$\gamma_{sat}$  = peso específico saturado de la arcilla ( $KN/m^3$ )

$Z_a$  = espesor de la arcilla (m)

$PE$  = profundidad de excavación (m)

Para calcular la tensión intersticial primero se debe encontrar la altura de presión artesisiana (Figura 3.6) que se determina sumando  $h + Z_a$ , con lo cual la expresión para la tensión intersticial será:

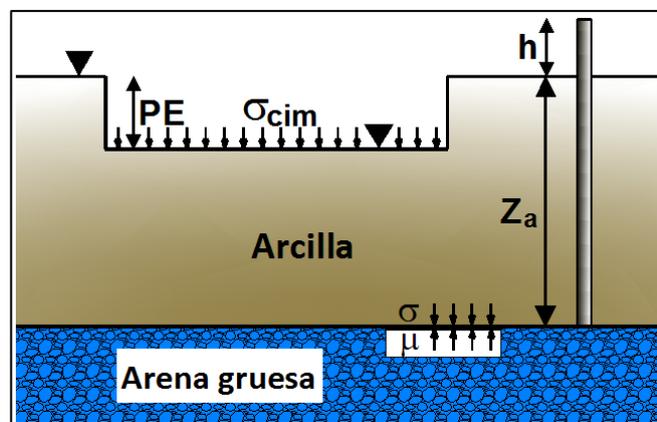


Figura 3.6 ALTURA DE PRESIÓN ARTESIANA.

Fuente: El autor



$$\mu_1 = \gamma_w \times (Z_a + h)$$

Ec. 23

Donde:

$\mu_1$  = tensión intersticial (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_w$  = peso específico del agua (KN/m<sup>3</sup>)

$Z_a$  = espesor de la arcilla (m)

$h$  = nivel de agua artesiana sobre la superficie del terreno (m)

Realizados todos los cálculos de las tensiones se procede a determinar el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos al finalizar la excavación con la *Ecuación 13*.

#### - **Factor de seguridad después de construir la losa de cimentación**

Para calcular el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos después de construir la losa de cimentación, se utiliza la *Ecuación 13*, añadiendo al numerador la *presión uniforme de cimentación* ( $\sigma_{cim}$ ).

$$FS_{lev} = \frac{\sigma + \sigma_{cim}}{\mu}$$

Ec. 24

#### **3.2.1.4. Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos mejorados.**

Los suelos mejorados son de gran importancia nos ayudan a impermeabilizar un estrato, para que no entrara agua a la excavación y a su vez funcione como un tapón hidráulico. Además se analizará los problemas de estabilidad y la supuesta filtración vertical unidimensional que se generara una vez realizada la excavación hasta una cierta profundidad. Para determinar si se produce levantamiento en la zona



excavada, se comprobará si la tensión vertical total dividida a la carga del terreno es mayor o menor a la tensión intersticial, ya que si en mayor no se producirá levantamiento alguno.

- **El suelo de mejoramiento se considera impermeable**

Para calcular el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos de mejoramiento será el cociente entre la tensión total vertical y la tensión intersticial (*Ecuación 13*). En el caso de la tensión mínima que deberá ejercer el estacionamiento subterráneo se tendrá en cuenta que el factor de seguridad sea igual a 2 (valor recomendado para el cálculo tomado de *Ejercicios resueltos de Geotecnia, SÁNCHEZ Matías, 2008*). Para calcular el caudal tendremos en cuenta la expresión de Darcy.

Si la inyección de *grout* (agua y cemento) impermeabiliza el estrato inferior, no entrará agua en la excavación, la inyección funcionará como un tapón hidráulico.

Ahora definiremos las expresiones para la tensión vertical total e intersticial. Para la tensión vertical total se utiliza la (*Ecuación 2*) y para la tensión intersticial será la siguiente expresión.

$$\mu = \gamma_w \times h_w \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

$\mu$  = tensión intersticial (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_w$  = peso específico del agua (KN/m<sup>3</sup>)

$h_w$  = altura de presión (m)

La altura de presión  $h_w$  (*Figura 3.7*), es aquella distancia desde el nivel freático hasta la zona de contacto entre estratos.

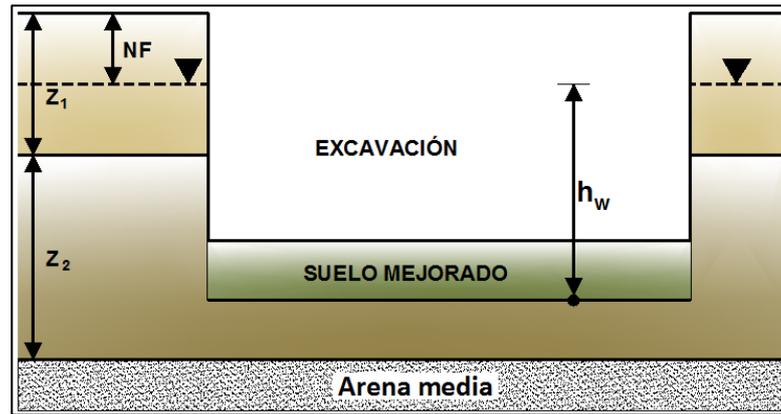


Figura 3.7 ALTURA DE PRESIÓN.

Fuente: El autor

Para el cálculo de la tensión mínima que deberá ejercer el estacionamiento subterráneo se reemplazará ( $FS_{lev} = 2$ ) y añadiendo en el numerador la *tensión mínima* ( $\Delta\sigma$ ) en la *Ecuación 13*.

$$2 = \frac{\sigma + \Delta\sigma}{\mu} \quad \text{Ec. 26}$$

Luego despejamos la tensión mínima ( $\Delta\sigma$ ) y esta servirá para el cálculo.

$$\Delta\sigma = 2\mu - \sigma \quad \text{Ec. 27}$$

- **El suelo de mejoramiento se considera permeable**

Para el cálculo del caudal utilizaremos la ley de Darcy (*Ecuación 14*) y se lo realiza como si se tratase de un terreno estratificado con flujo vertical ascendente.

Con la siguiente expresión se obtendrá el caudal que se filtra hacia la excavación.

$$q = \frac{k_z \times h \times A}{L} \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

$q$  = caudal que se filtra a la excavación [ $m^3/s (m^2)$ ]

$k_z$  = coeficiente de permeabilidad vertical equivalente (m/s)

$h$  = carga de flujo (m)

$A$  = área por metro cuadrado ( $A = 1 m^2$ )

$L$  = longitud de recorrido ascendente del agua (m)

La carga que produce el flujo es la diferencia de nivel freático entre el exterior e interior (zona de excavación), la longitud de recorrido ascendente del agua es la suma del espesor de estrato sobranante después de la excavación y el espesor de suelo mejorado (Figura 3.8).

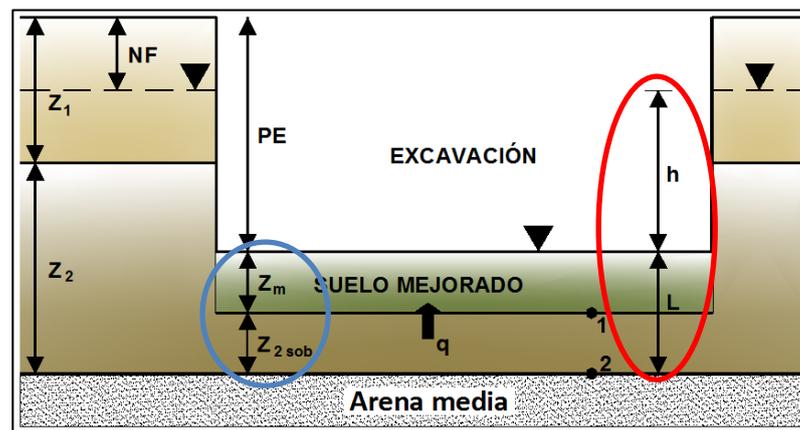


Figura 3.8 CARGA DE FLUJO, RECORRIDO ASCENDENTE DEL AGUA Y ESPESOR SOBRANTE

Fuente: El autor

Ahora se definirá una expresión para el cálculo del coeficiente de permeabilidad vertical equivalente  $k_z$ .

$$k_z = \frac{Z_m + Z_{2sob}}{\frac{Z_m}{k_m} + \frac{Z_{2sob}}{k_2}} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:



$k_z$  = coeficiente de permeabilidad vertical equivalente (m/s)

$Z_m$  = espesor del suelo mejorado (m)

$Z_{2sob}$  = espesor del estrato sobrante después de la excavación (m)

$k_m$  = coeficiente de permeabilidad del suelo mejorado (m/s)

$k_2$  = coeficiente de permeabilidad del estrato 2 (m/s)

El (Cuadro 3.2) proporciona valores representativos de coeficientes de permeabilidad en base a la clasificación de suelos de la SUCS.

| PERMEABILIDAD EN EL SUELO (k) |                                       |   |
|-------------------------------|---------------------------------------|---|
| Tipo de suelo                 | Clasificación<br>SUCS<br>(ASTM D2487) | Coefficiente de<br>permeabilidad<br>(m/s) |
| Gravas mal gradadas           | GP                                    | $K > 10^{-4}$                             |
| Gravas bien gradadas          | GW                                    | $K > 10^{-4}$                             |
| Gravas limosas                | GM                                    | $10^{-5} < K < 10^{-8}$                   |
| Gravas arcillosas             | GC                                    | $10^{-8} < K < 10^{-10}$                  |
| Arenas mal gradadas           | SP                                    | $K > 10^{-5}$                             |
| Arenas bien gradadas          | SW                                    | $K > 10^{-5}$                             |
| Arenas limosas                | SM                                    | $10^{-5} < K < 10^{-8}$                   |
| Arenas arcillosas             | SC                                    | $10^{-8} < K < 10^{-10}$                  |
| Limos baja plasticidad        | ML                                    | $10^{-5} < K < 10^{-8}$                   |
| Limos alta plasticidad        | MH                                    | $10^{-6} < K < 10^{-8}$                   |
| Arcillas baja plasticidad     | CL                                    | $10^{-8} < K < 10^{-10}$                  |
| Arcillas alta plasticidad     | CH                                    | $10^{-8} < K < 10^{-10}$                  |

**Cuadro 3.2 VALORES DE COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD**

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

Como el factor de seguridad va a cambiar solo en el *punto 1* debido a que circula un caudal, pues la tensión intersticial en ese punto será la siguiente expresión:

$$\mu_1 = (\gamma_w \times Z_m) + \gamma_w \times \left( \frac{q \times Z_m}{k_m \times A} \right) \quad \text{Ec. 30}$$

Donde:



$\mu_1$  = tensión intersticial en el punto 1 (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_w$  = peso específico del agua (KN/m<sup>3</sup>)

$Z_m$  = espesor del suelo mejorado (m)

$q$  = caudal que se filtra a la excavación [m<sup>3</sup>/s (m<sup>2</sup>)]

$k_m$  = coeficiente de permeabilidad del suelo mejorado (m/s)

$A$  = área por metro cuadrado ( $A = 1 \text{ m}^2$ )

Hecho esto se procede a calcular el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos de mejoramiento con la Ecuación 13, tomando en cuenta ( $\mu = \mu_1$ ). Para el punto 2 el factor de seguridad no se altera ya que no circula ningún caudal. En el caso de la tensión mínima ( $\Delta\sigma$ ) se utiliza la Ecuación 27.

### 3.2.2. Consolidación primaria en una arcilla

Los suelos arcillosos tienen baja permeabilidad. El suelo está en condiciones no drenadas durante la aplicación de las cargas. La filtración ocurre lentamente y el incremento de presión intersticial se disipa despacio, produciéndose un asentamiento por consolidación.

La cantidad de asentamiento que se produce para un determinado tiempo depende de: la permeabilidad del suelo, la longitud de drenaje y de la compresibilidad del suelo. La ecuación general para el cálculo de asentamiento por consolidación primaria en una arcilla es:

$$S_c = \left( \frac{\Delta e}{1+e_0} \right) \times Z \quad \text{Ec. 31}$$

Donde:

$S_c$  = asentamiento por consolidación primaria (mm)

$\Delta e$  = cambio total del índice de vacíos causada por la aplicación de carga adicional

$e_o$  = Índice de vacíos de la arcilla antes de la aplicación de la carga

$Z$  = espesor de la arcilla

### 3.2.2.1. Asentamiento por consolidación primaria en una arcilla

La cantidad de asentamiento que se produce para un determinado tiempo depende de: la permeabilidad del suelo, de la longitud de drenaje y de la compresibilidad del suelo. El cálculo del asentamiento se centra en la mitad del estrato de la arcilla ya que ahí es donde se produce un incremento en la presión vertical dando como resultado el asentamiento.

Para determinar el asentamiento por consolidación primaria en el centro de la capa de la arcilla se utiliza la *Ecuación 31*.

Para calcular el estado estacional (*Figura 3.1*) en el centro del estrato de la arcilla se necesita definir previamente los pesos específicos de los materiales que se encuentran por encima (*Figura 3.9*).

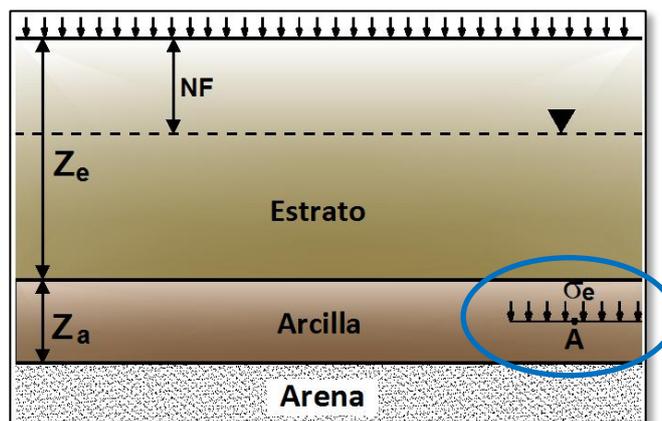


Figura 3.9 ESTADO TENSIONAL EN EL CENTRO DE LA ARCILLA

Fuente: El autor

A continuación se presenta las ecuaciones para el cálculo de los pesos específicos secos y saturados de los estratos del terreno.



$$\gamma = \frac{G_s \times \gamma_w}{1+e} \quad \text{Ec. 32}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \gamma_w \quad \text{Ec. 33}$$

Donde:

$\gamma$  = peso específico seco ( $\text{KN/m}^3$ )

$\gamma_{sat}$  = peso específico saturado ( $\text{KN/m}^3$ )

$G_s$  = peso específico relativo

$e$  = índice de vacíos

$\gamma_w$  = peso específico del agua ( $\text{KN/m}^3$ )

El (Cuadro 3.3) proporciona valores representativos de peso específico relativo para diferentes tipos de suelos.

| TIPO DE SUELO            | Peso específico relativo (Gs) |
|--------------------------|-------------------------------|
| Arena                    | 2.65 - 2.67                   |
| Arena Limosa             | 2.67 - 2.70                   |
| Arcilla Inorgánica       | 2.70 - 2.80                   |
| Suelos con mica o Hierro | 2.75 - 3.00                   |
| Suelos Orgánicos         | Puede ser inferior a 2.00     |

Cuadro 3.3 VALORES DE PESO ESPECÍFICO RELATIVO  
Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

Cuando un estrato se encuentra saturado se reemplaza el índice de vacíos ( $e$ ) por la siguiente expresión:

$$e = w \times G_s \quad \text{Ec. 34}$$

Donde:

$G_s$  = peso específico relativo



$w$  = contenido de humedad (%)

El (Cuadro 3.4) proporciona valores representativos de índice de vacíos para diferentes tipos de suelos.

| TIPO DE SUELO          | Índice de vacíos (e) |
|------------------------|----------------------|
| Arena uniforme suelta  | 0.80                 |
| Arena uniforme densa   | 0.45                 |
| Arena limosa suelta    | 0.65                 |
| Arena limosa densa     | 0.40                 |
| Arcilla dura           | 0.60                 |
| Arcilla suave          | 0.90 - 1.40          |
| Arcilla orgánica suave | 2.50 - 3.20          |

Cuadro 3.4 VALORES DE ÍNDICE DE VACÍOS

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

El valor de peso específico saturado de un estrato, puede determinarse con la expresión siguiente:

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s \times (1+w)}{1+(w \times G_s)} \times \gamma_w \quad \text{Ec. 35}$$

Ya calculado los pesos específicos de los estratos del terreno determinamos la tensión efectiva vertical inicial en el centro de la capa de arcilla (Punto A), la obtenemos a partir de la tensión total vertical e intersticial.

$$\sigma_A = \sum \gamma \times Z \quad \text{Ec. 36}$$

Donde:

$\sigma_A$  = tensión total inicial (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  = peso específico del estrato (KN/m<sup>3</sup>)

$Z$  = espesor del estrato (m)



Para calcular la tensión intersticial se utilizará la siguiente expresión.

$$u_A = \gamma_w \times ((Z_e - NF) + 0.5Z_a) \quad \text{Ec. 37}$$

Donde:

$u_A$  = tensión intersticial (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_w$  = peso específico del agua (KN/m<sup>3</sup>)

$Z_e$  = espesor del estrato (m)

$NF$  = profundidad del nivel freático (m)

$Z_a$  = espesor de la arcilla (m)

Luego de calcular la tensión total vertical e intersticial aplicamos el principio de tensión efectiva (Ecuación 1).

El asentamiento del estrato arcilloso  $S_c$ , lo calcularemos tomando como referencia el centro de la capa de arcilla (Punto A).

Sabemos que,

$$\Delta e = C_c \times \log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_o} \quad \text{Ec. 38}$$

Donde:

$\Delta e$  = cambio total del índice de vacíos causada por la aplicación de carga adicional

$C_c$  = índice de compresión

$\sigma'_f$  = esfuerzo vertical final (KN/m<sup>2</sup>)

$\sigma'_o$  = esfuerzo vertical inicial (KN/m<sup>2</sup>)

El (Cuadro 3.5) proporciona valores representativos de índice de compresión para diferentes tipos de arcilla.



| TIPO DE ARCILLA          | Índice de compresión (Cc) |
|--------------------------|---------------------------|
| Arcilla Azul de Boston   | 0.33                      |
| Arcilla de Chicago       | 0.30                      |
| Arcilla de Nueva Orleans | 0.28                      |
| Arcilla de St. Lawrence  | 0.10                      |

Cuadro 3.5 VALORES DE ÍNDICE DE COMPRESIÓN

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

Dado que tenemos un incremento en la presión vertical  $\sigma_e$ , el esfuerzo vertical es la siguiente expresión:

$$\sigma'_f = \sigma'_o + \sigma_e \quad \text{Ec. 39}$$

El esfuerzo vertical inicial en el (Punto A) es igual a tensión efectiva vertical inicial es decir, ( $\sigma'_o = \sigma'_A$ )

Para el cálculo del incremento en la presión vertical  $\sigma_e$ , empleamos la fórmula de serie infinita en cualquier punto del estrato (Means y Parcher, 1963).

$$\sigma_e = \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{4}{(2N+1)\pi} \times \sin \left[ \frac{(2N+1)\pi}{2} \times \frac{z_{dr}}{H_{dr}} \right] \times e^{-\left[ \frac{(2N+1)^2 \pi^2}{4} \times T_v \right]} \right) \quad \text{Ec. 40}$$

Donde:

$z_{dr}$  = profundidad al punto más cercano del límite de drenaje (m)

$z_{dr}$  = longitud de la trayectoria máxima de drenaje (m)

$e$  = logaritmo de base natural = 2.7183

$T_v$  = factor de tiempo

Realizados todos los cálculos procede a determinar el asentamiento por consolidación primaria en el centro de la capa de arcilla (Punto A) con la Ecuación 31.



El índice de vacíos final se calcula en el centro de la capa de arcilla (*Punto A*), para lo cual se utiliza la siguiente expresión:

$$e_f = e_o + \Delta e \quad \text{Ec. 41}$$

Donde:

$e_f$  = índice de vacíos final en la arcilla

$e_o$  = índice de vacíos de la arcilla antes de la aplicación de la carga (inicial)

$\Delta e$  = cambio total del índice de vacíos causada por la aplicación de carga adicional

### 3.2.2.2. Determinación de la curva de asentamiento por consolidación primaria de una arcilla

El asentamiento por consolidación primaria en la arcilla ocurre a medida que se va perdiendo agua por drenaje, de manera que los poros del suelo se reducen produciéndose deformaciones volumétricas de forma muy lenta después de aplicada la carga, este es el comportamiento típico de las arcillas. Para calcular se aplica la expresión correspondiente al *coeficiente volumétrico de compresibilidad*  $m_v$ , con el cual se obtiene el asentamiento por consolidación primaria final de la arcilla.

$$S_c = m_v \times \Delta \sigma' \times Z \quad \text{Ec. 42}$$

Donde:

$S_c$  = asentamiento por consolidación primaria final (mm)

$m_v$  = coeficiente volumétrico de compresibilidad ( $m^2/KN$ )

$\Delta \sigma'$  = tensión transmitida por la cimentación ( $KN/m^2$ )

$Z$  = espesor de la arcilla (m)



El (Cuadro 3.6) proporciona valores representativos de coeficiente volumétrico de compresibilidad para diferentes tipos de arcilla.

| TIPO DE ARCILLA       | Coeficiente volumétrico de compresibilidad ( $mv = 10^{-3} \text{ m}^2/\text{KN}$ ) |
|-----------------------|---|
| Arcilla plástica      | 2.65 - 2.67   |
| Arcilla consistente   | 2.67 - 2.70   |
| Arcilla semi plástica | 2.70 - 2.80   |
| Arcilla suelta        | 2.75 - 3.00   |
| Arcilla densa         | Puede ser inferior a 2.00   |

**Cuadro 3.6 VALORES DE COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE COMPRESIBILIDAD**  
Fuente: Texto para la asignatura mecánica de suelos, DUQUE Gonzalo y ESCOBAR Carlos, 2002

Luego para diversos tiempos, definiremos su correspondiente factor de tiempo vertical y su grado de consolidación medio (Cuadro 3.7). En base al grado de consolidación y al asentamiento por consolidación primaria final de la arcilla obtendremos el asentamiento instantáneo correspondiente a cada tiempo.

| $U_v$ | $T_v$  | $U_v$ | $T_v$    |
|-------|--------|-------|----------|
| 0     | 0      | 0.55  | 0.239    |
| 0.05  | 0.0019 | 0.6   | 0.286    |
| 0.1   | 0.0079 | 0.65  | 0.34     |
| 0.15  | 0.0177 | 0.7   | 0.403    |
| 0.2   | 0.0314 | 0.75  | 0.477    |
| 0.25  | 0.0491 | 0.8   | 0.567    |
| 0.3   | 0.0707 | 0.85  | 0.684    |
| 0.35  | 0.0962 | 0.9   | 0.848    |
| 0.4   | 0.126  | 0.95  | 1.129    |
| 0.45  | 0.159  | 0.99  | 1.781    |
| 0.5   | 0.197  | 1     | $\infty$ |

**Cuadro 3.7 VALORES DE EL GRADO DE CONSOLIDACIÓN MEDIO  $U_v$  Y FACTOR DE TIEMPO VERTICAL  $T_v$**

Fuente: Ejercicios Resueltos de Geotecnia, SANCHEZ Matías, 2008



La curva corregida la definiremos a partir de la curva instantánea aplicando el método gráfico propuesto por Terzaghi, que consiste en un método empírico compuesto de dos fases, la primera fase durante el periodo de construcción y la segunda después del periodo de construcción.

- **Curva de asentamientos instantáneos por consolidación primaria de la arcilla**

Para determinar el asentamiento por consolidación primaria en el centro del estrato de la arcilla se utiliza la *Ecuación 42*.

Para obtener los asentamientos instantáneos, tomamos diversos tiempos en el intervalo de *tiempo de interés*  $T_e$ , con cada tiempo determinamos el factor de tiempo vertical  $T_v$  y con él el grado de consolidación medio  $U_v$ , que se obtiene interpolando en el *Cuadro 3.7*, con el valor del factor de tiempo vertical (*Ecuación 43*).

$$T_v = \frac{c_v \times t}{Z^2} \quad \text{Ec. 43}$$

Donde:

$T_v$  = factor de tiempo vertical

$c_v$  = coeficiente de consolidación ( $m^2/año$ )

$t$  = tiempo en el que sucede la consolidación (años)

$Z$  = espesor de la arcilla (m)

El coeficiente de consolidación se lo puede obtener de dos métodos, el método de Taylor o de la raíz del tiempo mediante la siguiente expresión:



$$c_{vt} = \frac{0.848 \times Z^2}{t_{90}} \quad \text{Ec. 44}$$

Donde:

$c_{vt}$  = coeficiente de consolidación por el Método de Taylor ( $m^2/año$ )

$t_{90}$  = Tiempo correspondiente al 90% de consolidación (años)

Y el método de Casagrande o del logaritmo del tiempo mediante la siguiente expresión:

$$c_{vc} = \frac{0.197 \times Z^2}{t_{50}} \quad \text{Ec. 45}$$

Donde:

$c_{vc}$  = coeficiente de consolidación por el Método de Casagrande ( $m^2/año$ )

$t_{50}$  = Tiempo correspondiente al 50% de consolidación (años)

Para determinar el asentamiento para un tiempo determinado se utilizará la siguiente expresión:

$$S_{ci} = U_v \times S_c \quad \text{Ec. 46}$$

Donde:

$S_{ci}$  = asentamiento para un tiempo determinado (mm)

$U_v$  = grado de consolidación interpolado en la tabla 1

$S_c$  = asentamiento por consolidación primaria final (mm)

Para construir la gráfica de los asentamientos instantáneos se ubica en el eje de las X los diversos tiempos en el intervalo de tiempo de interés



y en el *eje de las Y* se ubica el asentamiento para un tiempo determinado.

- **Curva de asentamientos corregidos por consolidación primaria de la arcilla**

Para definir los puntos corregidos de asentamiento (**S<sub>cc</sub>**) analíticamente utilizando las siguientes expresiones que nos permiten realizar la corrección gráfica propuesta por Terzaghi, que tiene en cuenta el tiempo de construcción.

Cuando el tiempo del intervalo en función del tiempo de estimación (**t**) es menor al tiempo de construcción (**t<sub>c</sub>**):

$$S_{cc}(t < t_c) = \frac{t}{t_c} S_{ci} \left( \frac{t}{2} \right) \quad \text{Ec. 47}$$

Cuando el tiempo del intervalo en función del tiempo de estimación (**t**) es mayor o igual al tiempo de construcción (**t<sub>c</sub>**):

$$S_{cc}(t \geq t_c) = S_{ci} \left( t - \frac{t_c}{2} \right) \quad \text{Ec. 48}$$

Para construir la gráfica de los asentamientos instantáneos se ubica en el *eje de las X* los diversos tiempos en el intervalo de tiempo de estimación y en el *eje de las Y* se ubica el asentamiento para un tiempo determinado y el asentamiento corregido.

### 3.2.3. Diseño de pilotes hincados y perforados por Estados Límites



El Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) es un método de diseño en el cual las cargas de diseño se mayoran y las resistencias de diseño se minoran multiplicando por factores mayores y menores que la unidad, respectivamente. En este método las fundaciones se dimensionan de modo que las cargas mayoradas sean menores o iguales que las resistencias minoradas.

Para el diseño de pilotes hincados hay dos alternativas de punta cerrada y abierta que a su vez, se diseñará en función de las propiedades del suelo y diseño directo (ensayos in situ). El diseño será por capacidad friccional en el primer estrato y por capacidad de punta en el segundo estrato.

Para el diseño de pilotes perforados se diseñará en base a las propiedades del suelo y diseño directo (ensayos in situ). El diseño será únicamente por capacidad de punta.

La ecuación básica del Diseño para Pilotes Hincados y Perforados en base a Factores de Carga y Resistencia (LRFD) por Estados Límites es:

$$(RF)_s R_s + (RF)_b R_b \geq \sum (FS)_i Q_i \quad \text{Ec. 49}$$

*Donde:*

$(RF)_s$  y  $(RF)_b$  = factores de resistencia para resistencia friccional y de punta, respectivamente

$(R_s$  y  $R_b)$  = resistencia friccional y de punta, respectivamente (KN)

$FS$  = factor de seguridad

$Q$  = carga axial aplicada (KN)



Para calcular la resistencia friccional y de punta se utiliza las siguientes expresiones que a su vez se las utilizará para todos los tipos de diseño de pilotes.

$$R_s = f_s \times a_s \times L \quad \text{Ec. 50}$$

$$R_b = q_{b,10\%} \times A_b \quad \text{Ec. 51}$$

Donde:

$R_s$  = resistencia friccional (KN)

$R_b$  = resistencia de punta (KN)

$f_s$  = resistencia friccional unitaria (KN)

$A_s$  = área del fuste ( $m^2$ )

$L$  = longitud del pilote (m)

$q_{b,10\%}$  = capacidad de carga límite ultima basada en una relación asentamiento-diámetro del pilote igual a 10% [ $s/B = 10\%$ ] ( $KN/m^2$ )

$A_b$  = área de la base del pilote ( $m^2$ )

### 3.2.3.1. Diseño de pilotes hincados en arena

Para la verificación del método de diseño se indican los factores de resistencia ( $RF$ ) a utilizar con los factores de carga de ASCE – 7 y AASHTO. El factor de seguridad ( $FS$ ) indica un valor aproximado del WSD correspondiente al factor de resistencia indicado.

#### Diseño de pilotes de punta cerrada en base a las propiedades del suelo

- Capacidad friccional



$$f_s = \frac{K_s}{K_o} K_o \tan\left(\frac{\delta_c}{\phi_c} \phi_c\right) \sigma'_v \quad \text{Ec. 52}$$

$$\frac{K_s}{K_o} = 7.2(0.0112D_R - 0.0141) \quad \text{Ec. 53}$$

$$K_o = 1 - \text{sen}\phi_c \quad \text{Ec. 54}$$

$$\sigma'_v = Z \times \gamma \quad \text{Ec. 55}$$

Donde:

$K_s / K_o$  = relación entre el coeficiente de empuje del suelo y el coeficiente de presión de tierra en reposo

$K_o$  = coeficiente de presión de tierra en reposo

$\delta_c / \phi_c$  = relación entre el ángulo de fricción superficial y el ángulo de fricción del suelo [que tiene un valor de diseño de:  $\delta_c / \phi_c = 0.85$ ]

$\phi_c$  = ángulo de fricción del suelo ( $^\circ$ ), ver Cuadro 3.9

$\sigma'_v$  = tensión vertical efectiva ( $\text{KN}/\text{m}^2$ )

$D_R$  = densidad relativa del estrato (%), ver Cuadro 3.8

$Z$  = espesor del estrato (m)

$\gamma$  = peso específico del estrato ( $\text{KN}/\text{m}^3$ ), ver Cuadro 3.1

El (Cuadro 3.8) proporciona valores representativos de densidad relativa para diferentes tipos de arena.

| TIPO DE ARENA      | Densidad Relativa (DR) |
|--------------------|------------------------|
| Arena muy suelta   | 0 - 15                 |
| Arena suelta       | 15 - 35                |
| Arena media        | 35 - 65                |
| Arena compacta     | 65 - 85                |
| Arena muy compacta | 85 - 100               |

Cuadro 3.8 VALORES DE DENSIDAD RELATIVA

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001



El (Cuadro 3.9) proporciona valores representativos de ángulo de fricción para diferentes tipos de arena.

| TIPO DE ARENA      | Ángulo de fricción (°) |
|--------------------|------------------------|
| Arena muy suelta   | menor a 30             |
| Arena suelta       | 30 - 32                |
| Arena media        | 32 - 35                |
| Arena compacta     | 35 - 38                |
| Arena muy compacta | mayor a 38             |

Cuadro 3.9 VALORES DE ÁNGULO DE FRICCIÓN

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

Se indican para el diseño los factores de resistencia friccional  $(RF)_s$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_s = 0.37 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_s = 0.40 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 3.9$$

#### - Capacidad de punta

$$q_{b,10\%} = \left( \frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} \right) q_c \quad \text{Ec. 56}$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} = 1.02 - 0.0051D_R \quad \text{Ec. 57}$$

$$q_c = 50N_q^* \tan \phi_c \quad \text{Ec. 58}$$

$$N_q^* = 0.0000009365\phi_c^6 - 0.0000770584\phi_c^5 + 0.0025001813\phi_c^4 - 0.0372952365\phi_c^3 + 0.2710933088\phi_c^2 - 0.6070519863\phi_c + 1 \quad \text{Ec. 59}$$

Donde:

$q_{b,10\%} / q_{bL}$  = relación entre la presión en la base cuando  $s/B = 10\%$  y la resistencia al hundimiento de la base



$q_c =$  resistencia de punta ( $\text{KN}/\text{m}^2$ )

$N_q^* =$  factor de capacidad de carga

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.50 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.52 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 3.0$$

### Diseño directo de pilotes de punta cerrada

#### - Capacidad friccional

$$f_s = 0.002q_c \quad \text{Ec. 60}$$

Donde:

$q_c =$  resistencia de punta ( $\text{KN}/\text{m}^2$ ), se determina con la Ecuación 58

Se indican para el diseño los factores de resistencia friccional  $(RF)_s$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_s = 0.51 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_s = 0.53 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 2.9$$

#### - Capacidad de punta

$$q_{b,10\%} = \left( \frac{q_{b,10\%}}{q_c} \right) q_c \quad \text{Ec. 61}$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_c} = 1.02 - 0.0051D_R \quad \text{Ec. 62}$$



Donde:

$q_{b,10\%} / q_c$  = relación entre la presión en la base cuando  $s/B = 10\%$  y la resistencia de punta

$q_c$  = resistencia de punta ( $\text{KN}/\text{m}^2$ ), se determina con la Ecuación 58

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.56 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.59 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 2.6$$

### Diseño de pilotes de punta abierta en base a las propiedades del suelo

#### - Capacidad friccional

$$f_s = \frac{K_s}{K_o} K_o \tan\left(\frac{\delta_c}{\phi_c} \phi_c\right) \sigma'_v \quad \text{Ec. 63}$$

$$\frac{K_s}{K_o} = \beta(7.2 - 4.8PLR) \quad \text{Ec. 64}$$

$$\beta = 0.0112D_R - 0.0141 \quad \text{Ec. 65}$$

Donde:

$K_s / K_o$  = relación entre el coeficiente de empuje del suelo y el coeficiente de presión de tierra en reposo

$K_o$  = coeficiente de presión de tierra en reposo, se determina con la Ecuación 54

$\delta_c / \phi_c$  = relación entre el ángulo de fricción superficial y el ángulo de fricción del suelo, [que tiene un valor de diseño de:  $\delta_c / \phi_c = 0.85$ ]



$\sigma'_v$  = tensión vertical efectiva (KN/m<sup>2</sup>), se determina con la Ecuación 55

$\beta$  = índice de confiabilidad

**PLR** = relación de longitud de taponamiento, [que tiene un valor de diseño de:  $PLR = 1$ ]

Se indican para el diseño los factores de resistencia friccional  $(RF)_s$  y un valor aproximado del factor de seguridad ( $FS$ ).

$$(RF)_s = 0.37 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_s = 0.40 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 3.9$$

#### - Capacidad de punta

$$q_{b,10\%} = \left( \frac{q_{b,10\%}}{\sigma'_h} \right) \sigma'_h \quad \text{Ec. 66}$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{\sigma'_h} = \alpha \left( 326 - 295 \frac{IFR}{100} \right) \quad \text{Ec. 67}$$

$$\alpha = 0.0112D_R - 0.0141 \quad \text{Ec. 68}$$

$$\sigma'_h = \sigma'_v K_o \quad \text{Ec. 69}$$

$$IFR = \frac{L_p}{L} \quad \text{Ec. 70}$$

Donde:

$q_{b,10\%} / \sigma'_h$  = relación entre la presión en la base cuando  $s/B = 10\%$  y la tensión efectiva horizontal

$\sigma'_h$  = tensión efectiva horizontal (KN/m<sup>2</sup>)

$\alpha$  = coeficiente de separación

**IFR** = relación de llenado incremental (%)

$\sigma'_v$  = tensión vertical efectiva (KN/m<sup>2</sup>), se determina con la Ecuación 55



$K_o$  = coeficiente de presión de tierra en reposo, se determina con la Ecuación 54

$L_p$  = longitud del tapón (m)

$L$  = longitud de penetración del pilote (m)

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.58 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.60 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 2.6$$

### **Diseño directo de pilotes de punta abierta**

#### **- Capacidad friccional**

$$f_s = 0.002q_c \quad \text{Ec. 71}$$

Donde:

$q_c$  = resistencia de punta ( $\text{KN/m}^2$ ), se determina con la Ecuación 58

Se indican para el diseño los factores de resistencia friccional  $(RF)_s$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_s = 0.37 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_s = 0.40 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 3.9$$

#### **- Capacidad de punta**

$$q_{b,10\%} = \left( \frac{q_{b,10\%}}{q_c} \right) q_c \quad \text{Ec. 72}$$



$$\frac{q_{b,10\%}}{q_c} = -0.00443IFR + 0.557 \quad \text{Ec. 73}$$

Donde:

$q_{b,10\%} / q_c$  = relación entre la presión en la base cuando  $s/B = 10\%$  y la resistencia de punta

$q_c$  = resistencia de punta ( $\text{KN/m}^2$ ), se determina con la Ecuación 58

$IFR$  = relación de llenado incremental (%), se determina con la Ecuación 70

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.66 \quad [\text{ASCE-7}]$$

$$(RF)_b = 0.69 \quad [\text{AASHTO}]$$

$$FS = 2.3$$

### 3.2.3.2. Diseño de pilotes hincados en arcilla

Para la verificación del método de diseño se indican los factores de resistencia  $(RF)$  a utilizar con los factores de carga de ASCE – 7 y AASHTO. El factor de seguridad  $(FS)$  indica un valor aproximado del WSD correspondiente al factor de resistencia indicado.

#### Diseño de pilotes en base a las propiedades del suelo

##### - Capacidad friccional

$$f_s = \alpha S_u \quad \text{Ec. 74}$$

$$\alpha = \begin{cases} \left( \frac{c_u}{\sigma'_v} \right)^{0.5} \left( \frac{c_u}{\sigma'_v} \right)^{-0.5}, & \text{para } \frac{c_u}{\sigma'_v} \leq 1 \\ \left( \frac{c_u}{\sigma'_v} \right)^{0.5} \left( \frac{c_u}{\sigma'_v} \right)^{-0.25}, & \text{para } \frac{c_u}{\sigma'_v} > 1 \end{cases} \quad \text{Ec. 75}$$



Donde:

$S_u$  = resistencia al corte no drenada ( $KN/m^2$ ), ver Cuadro 3.10

$\alpha$  = coeficiente de separación

$C_u$  = cohesión del suelo ( $KN/m^2$ ), ver Cuadro 3.11

$\sigma'_v$  = tensión vertical efectiva ( $KN/m^2$ ), se determina con la Ecuación 55

El (Cuadro 3.10) proporciona valores representativos de resistencia al corte no drenado para diferentes tipos de arcilla.

| TIPO DE ARCILLA    | Resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) [KN/m <sup>2</sup> ] |
|--------------------|--|
| Arcilla muy blanda | 0 - 11.8   |
| Arcilla blanda     | 11.8 - 24.5  |
| Arcilla media      | 24.5 - 49.1  |
| Arcilla firme      | 49.1 - 98.1  |
| Arcilla muy firme  | 98.1 - 196.2   |
| Arcilla dura       | mayor a 196.2  |

Cuadro 3.10 VALORES DE RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADO

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

El (Cuadro 3.11) proporciona valores representativos de cohesión para diferentes tipos de arcilla.

| TIPO DE ARCILLA        | Cohesión (KN/m <sup>2</sup> ) |
|------------------------|-------------------------------|
| Arcilla suave          | 0 - 19.2                      |
| Arcilla media dura     | 19.2 - 48                     |
| Arcilla dura           | 48 - 96                       |
| Arcilla muy dura       | 96 - 192                      |
| Arcilla demasiado dura | 192 - 384                     |

Cuadro 3.11 VALORES DE COHESIÓN

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001



Se indican para el diseño los factores de resistencia friccional  $(RF)_s$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_s = 0.44 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_s = 0.46 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 2.9$$

#### - Capacidad de punta

$$q_{b,10\%} = N_c S_u \quad \text{Ec. 76}$$

Donde:

$N_c$  = factor de capacidad de carga, [que tiene un valor de diseño de:

$$N_c = 12]$$

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.66 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.69 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 2.3$$

#### Diseño directo de pilotes

#### - Capacidad friccional

$$f_s = n_{si} N_{SPT} \quad \text{Ec. 77}$$

$$n_{si} = \frac{\alpha_1 K}{F_2} \quad \text{Ec. 78}$$

Donde:



$n_{sb}$ ,  $\alpha_1$ ,  $K$ ,  $F_2$  = factores empíricos que se basan en los resultados de 63 ensayos de carga realizados en pilotes Franki, pilotes Franki encamisados, pilotes prefabricados y pilotes de acero, ver Cuadro 3.12

$N_{SPT}$  = número de golpes del ensayo SPT, ver Cuadro 3.13

El (Cuadro 3.12) proporciona los valores de factores empíricos que se basan en resultados de ensayos de carga en pilotes.

| TIPO DE SUELO             | FACTORES EMPÍRICOS |            |
|---------------------------|--------------------|------------|
|                           | K                  | $\alpha_1$ |
| Grava                     | ---                | ---        |
| Arena                     | 10                 | 1.4        |
| Arena limosa              | 8.0                | 2.0        |
| Arena limosa con arcilla  | 7.0                | 2.4        |
| Arena limosa con limo     | 5.0                | 2.8        |
| Arena arcillosa           | 6.0                | 3.0        |
| Limo arenoso              | 5.5                | 2.2        |
| Limo arenoso con arcilla  | 4.5                | 2.8        |
| Limo                      | 4.0                | 3.0        |
| Limo arcilloso con arena  | 2.5                | 3.0        |
| Limo arcilloso            | 2.3                | 3.4        |
| Arcilla arenosa           | 3.5                | 2.4        |
| Arcilla arenosa con limo  | 3.0                | 2.8        |
| Arcilla arenosa con arena | 3.3                | 3.0        |
| Arcilla limosa            | 2.2                | 4.0        |
| Arcilla                   | 2.0                | 6.0        |
| TIPO DE PILOTE            | FACTORES EMPÍRICOS |            |
|                           | F1                 | F2         |
| Pilotes perforados        | 3.5                | 7.0        |
| Franki                    | 2.5                | 5.0        |
| Acero                     | 1.75               | 3.5        |
| Hormigón prefabricado     | 1.75               | 3.5        |

Cuadro 3.12 FACTORES EMPÍRICOS

Fuente: Diseño de fundaciones profundas por Estados Límites; FOYE Kevin, ABOU Grace, SALGADO Rodrigo; 2004

El (Cuadro 3.13) proporciona los valores recomendados de número de golpes del ensayo SPT para diferentes tipos de arcilla.



| TIPO DE ARCILLA    | Número de golpes del ensayo SPT |
|--------------------|---------------------------------|
| Arcilla muy blanda | menor a 2                       |
| Arcilla blanda     | 2 - 4                           |
| Arcilla media      | 4 - 8                           |
| Arcilla firme      | 8 - 15                          |
| Arcilla muy firme  | 15 - 30                         |
| Arcilla dura       | mayor a 30                      |

Cuadro 3.13 NÚMERO DE GOLPES DEL ENSAYO SPT

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

Se indican para el diseño los factores de resistencia friccional  $(RF)_s$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_s = 0.50 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_s = 0.52 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 3.0$$

#### - Capacidad de punta

$$q_{b,10\%} = n_b N_{SPT} \quad \text{Ec. 79}$$

$$n_b = \frac{K}{F_1} \quad \text{Ec. 80}$$

Donde:

$n_b$ ,  $K$ ,  $F_1$  = factores empíricos que se basan en los resultados de 63 ensayos de carga realizados en pilotes Franki, pilotes Franki encamisados, pilotes prefabricados y pilotes de acero.

$N_{SPT}$  = número de golpes del ensayo SPT

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.50 \text{ [ASCE-7]}$$



$$(RF)_b = 0.52 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 3.0$$

### 3.2.3.3. Diseño de pilotes perforados en arena

Para la verificación del método de diseño se indican los factores de resistencia ( $RF$ ) a utilizar con los factores de carga de ASCE – 7 y AASHTO. El factor de seguridad ( $FS$ ) indica un valor aproximado del WSD correspondiente al factor de resistencia indicado.

#### Diseño de pilotes en base a las propiedades del suelo

##### - Capacidad de punta

$$q_{b,10\%} = \left( \frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} \right) q_c \quad \text{Ec. 81}$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} = 0.225 - 0.0011D_R \quad \text{Ec. 82}$$

Donde:

$q_{b,10\%} / q_{bL}$  = relación entre la presión en la base cuando  $s/B = 10\%$  y la resistencia al hundimiento de la base

$q_c$  = resistencia de punta ( $KN/m^2$ ), se determina con la Ecuación 58

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta ( $RF$ )<sub>b</sub> y un valor aproximado del factor de seguridad ( $FS$ ).

$$(RF)_b = 0.56 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.58 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 2.7$$

#### Diseño directo de pilotes



- **Capacidad de punta**

$$q_{b,10\%} = \left( \frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} \right) q_c \quad \text{Ec. 83}$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} = 0.225 - 0.0011D_R \quad \text{Ec. 84}$$

Donde:

$q_{b,10\%} / q_{bL}$  = relación entre la presión en la base cuando  $s/B = 10\%$  y la resistencia al hundimiento de la base

$q_c$  = resistencia de punta ( $\text{KN/m}^2$ ), se determina con la Ecuación 58

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.64 \quad [\text{ASCE-7}]$$

$$(RF)_b = 0.67 \quad [\text{AASHTO}]$$

$$FS = 2.3$$

**3.2.3.4. Diseño de pilotes perforados en arcilla**

Para la verificación del método de diseño se indican los factores de resistencia  $(RF)$  a utilizar con los factores de carga de ASCE – 7 y AASHTO. El factor de seguridad  $(FS)$  indica un valor aproximado del WSD correspondiente al factor de resistencia indicado.

**Diseño de pilotes en base a las propiedades del suelo**

- **Capacidad de punta**

$$q_{b,10\%} = N_c S_u \quad \text{Ec. 85}$$



Donde:

$N_c$  = factor de capacidad de carga, [que tiene un valor de diseño de:

$$N_c = 12]$$

$S_u$  = resistencia al corte no drenada (KN/m<sup>2</sup>)

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.66 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.69 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 2.3$$

### 3.3 COMPONENTE INFORMÁTICA

El desarrollo de aplicaciones web usando protocolos de internet, se ha convertido en forma más popular a nivel mundial de incrementar la productividad académica, científica y tecnológica. Por esta razón la herramienta *Análisis de Problemas Geotécnicos en Obras Civiles* ha sido desarrollada mediante la plataforma de *Visual Basic.Net 2005*, debido a que es la mejor alternativa para el desarrollo de una aplicación *web asp, aspx y javascript*.

El Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica consta de varias aplicaciones que permite realizar análisis y diseño de diferentes estructuras de cimentación, para la realización de este laboratorio virtual se utilizó los lenguajes de programación *Visual Basic.Net 2005*, *AJAX Extensión 1.0* y *JavaScript*, de servidor Web se escogió el *Internet Information Server 6.0 (IIS)*. Todas estas aplicaciones funcionan únicamente en plataforma Windows.



La presente herramienta ha sido desarrollada utilizando el lenguaje de programación de *Visual Basic.Net 2005*. Con este lenguaje se implementó todos los componentes de la aplicación y sus respectivas capas (capa de presentación, lógica de negocios y capa de acceso a datos). Este lenguaje de programación viene integrado con el programa *Visual Studio 2005*, y el *framework 2.0*. *JavaScript* se implementó para ejecutar en el cliente y presentar mensajes de los eventos producidos por las excepciones que se producen al realizar cálculos con parámetros inadecuados. *AJAX* se utilizó para hacer a la aplicación lo más eficiente en los diferentes eventos que son enviados hacia el servidor y disminuir los tiempos de procesamiento.

El servidor utilizado es *Internet Information Server (IIS)*, desarrollado por *Microsoft*, este servidor permite consumir servicios de *Http*, *Https*, *FTP*, *SMTP* y ejecutar contenido *asp*, *aspx*, *javascript*.

Para desarrollar las aplicaciones se utilizaron diferentes controles incorporados en el programa *Visual Basic.Net 2005*, tales como:

*Tables*, se utilizan para organizar los controles que se emplean durante la creación de la herramienta de aplicación.

*Textbox*, que sirven para ingresar datos, presentar resultados, o mensajes de información.

*Labels*, se utilizan para presentar etiquetas de texto, y también para presentar mensajes de información.

*Images*, permiten presentar gráficos en la interface de la aplicación, con el fin de dar a conocer esquemas y tablas con valores recomendados para el ingreso de datos.

*Buttons*, estos controles son empleados para ejecutar cualquier tipo de evento, es decir se pueden utilizar para cargar un ejemplo, ejecutar un proceso de cálculo, etc.



*Checkbox*, sirven para activar o desactivar opciones que se desee considerar para cualquier proceso.

*DropDownList*, este control se utiliza para escoger el evento se requiera emplear para el proceso de cálculo.

*LinkButtons*, permiten crear un enlace entre distintas aplicaciones.

*WebChartViewer*, este control se utiliza para presentar gráficas en la herramienta de aplicación.

*Panels*, se emplean como una tabla, con el fin de aplicar un evento, que permita habilitar o deshabilitar visualmente los controles que el programador requiera para el desarrollo de la aplicación.

Además se utilizaron controles de *AJAX* con el fin de crear un interface visual agradable al usuario. Se usaron controles como: el *PopupControlExtender*, que se utiliza para hacer visible o no una imagen; el *FilteredTextBoxExtender* se utiliza para ampliar automáticamente el ancho de un *TextBox* según el contenido que se ingrese o que se presente. También se emplearon *UpdatePanels* para actualizar únicamente los *Panels* que se requiera, esto con el fin de no actualizar la aplicación completa.



# **CAPÍTULO IV**

## **EJEMPLOS DE VERIFICACIÓN**

## 4.1 TENSIONES VERTICALES TOTALES, EFECTIVAS E INTERSTICIALES EN UN TERRENO ESTRATIFICADO

### EJEMPLO DE APLICACIÓN:

En un terreno estratificado compuesto de tres estratos, el primero un estrato de arena de 8 m de espesor con un peso específico de  $17 \text{ KN/m}^3$  sobre el nivel freático y  $18.5 \text{ KN/m}^3$  bajo el nivel freático, el segundo un estrato de arcilla de 4 m de espesor con un peso específico de  $18.8 \text{ KN/m}^3$  y el tercer un estrato de arena de 2 m de espesor con un peso específico de  $19.2 \text{ KN/m}^3$  que se apoya sobre un macizo rocoso impermeable.

Se realiza una excavación de 4 m de profundidad para cimentar un edificio. El nivel freático se encuentra a 1 m por debajo de la superficie del terreno. Durante la excavación se realizará el agotamiento del agua que ingrese en la excavación. Obtener las tensiones totales verticales, efectivas e intersticiales en los puntos A, B, C, D, E, en las siguientes condiciones:

- Antes de realizar la excavación
- Después de realizar la excavación

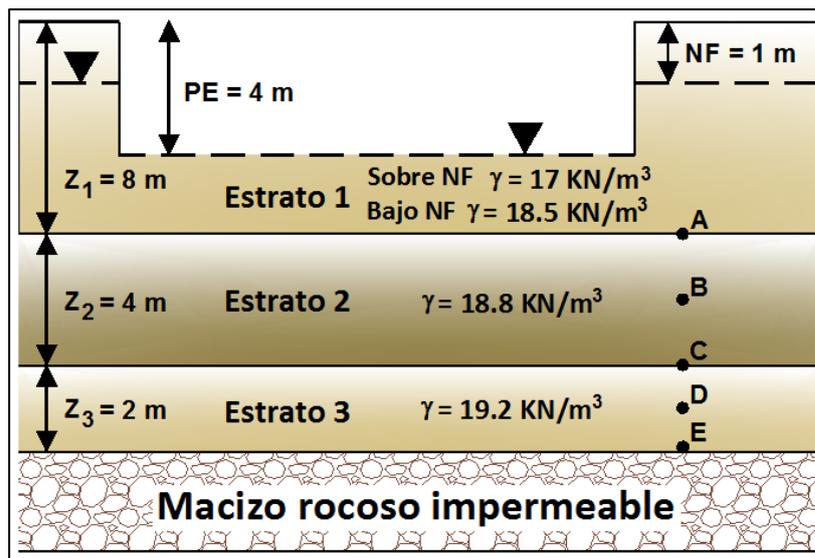


Figura 4.1 DATOS DEL EJEMPLO DE APLICACIÓN (Tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales en un terreno estratificado)

Fuente: El autor



**DATOS DEL EJEMPLO:**

*Profundidad del nivel freático (NF) = 1 m*

*Profundidad de excavación (PE) = 4 m*

**Datos geotécnicos del terreno:**

*Espesor de la arena superior ( $Z_1$ ) = 8 m*

*Peso específico seco de la arena superior ( $\gamma_1$ ) = 17 KN/m<sup>3</sup>*

*Peso específico saturado de la arena superior ( $\gamma_{1sat}$ ) = 18.5 KN/m<sup>3</sup>*

*Espesor de la arcilla ( $Z_2$ ) = 4 m*

*Peso específico de la arcilla ( $\gamma_2$ ) = 18.8 KN/m<sup>3</sup>*

*Espesor de la arena inferior ( $Z_3$ ) = 2 m*

*Peso específico de la arena inferior ( $\gamma_3$ ) = 19.2 KN/m<sup>3</sup>*

Considerar las siguientes condiciones:

- *Peso específico del agua ( $\gamma_w$ ) = 9.81 KN/m<sup>3</sup>*
- *El nivel freático (NF) en el exterior de la excavación se mantiene a la cota previa a la excavación y en el interior de la excavación en la superficie de la misma.*

**PROCEDIMIENTO:**

**a) Tensiones en el suelo antes de realizar la excavación**

Para obtener la tensión total vertical en los cinco puntos, se encuentra aplicando la *Ecuación 2*.

$$\sigma = \sum \gamma \times Z$$

$$\sigma_A = \left( 17 \frac{KN}{m^3} \times 1 m \right) + \left( 18.5 \frac{KN}{m^3} \times 7 m \right)$$

$$\sigma_A = 146.5 \text{ KN/m}^2$$



$$\sigma_B = \left(17 \frac{KN}{m^3} \times 1 m\right) + \left(18.5 \frac{KN}{m^3} \times 7 m\right) + \left(18.8 \frac{KN}{m^3} \times 2 m\right)$$

$$\sigma_B = 184.1 KN/m^2$$

$$\sigma_C = \left(17 \frac{KN}{m^3} \times 1 m\right) + \left(18.5 \frac{KN}{m^3} \times 7 m\right) + \left(18.8 \frac{KN}{m^3} \times 4 m\right)$$

$$\sigma_C = 221.7 KN/m^2$$

$$\sigma_D = \left(17 \frac{KN}{m^3} \times 1 m\right) + \left(18.5 \frac{KN}{m^3} \times 7 m\right) + \left(18.8 \frac{KN}{m^3} \times 4 m\right) + \left(19.2 \frac{KN}{m^3} \times 1 m\right)$$

$$\sigma_D = 240.9 KN/m^2$$

$$\sigma_E = \left(17 \frac{KN}{m^3} \times 1 m\right) + \left(18.5 \frac{KN}{m^3} \times 7 m\right) + \left(18.8 \frac{KN}{m^3} \times 4 m\right) + \left(19.2 \frac{KN}{m^3} \times 2 m\right)$$

$$\sigma_E = 260.1 KN/m^2$$

La tensión intersticial en los cinco puntos se obtiene aplicando la *Ecuación 3*.

$$\mu = \gamma_w \times (Z - NF)$$

$$\mu_A = 9.81 \frac{KN}{m^3} \times (8 m - 1 m)$$

$$\mu_A = 68.67 KN/m^2$$

$$\mu_B = 9.81 \frac{KN}{m^3} \times (10 m - 1 m)$$

$$\mu_B = 88.29 KN/m^2$$

$$\mu_C = 9.81 \frac{KN}{m^3} \times (12 m - 1 m)$$

$$\mu_C = 107.91 KN/m^2$$

$$\mu_D = 9.81 \frac{KN}{m^3} \times (13 m - 1 m)$$

$$\mu_D = 117.72 KN/m^2$$

$$\mu_E = 9.81 \frac{KN}{m^3} \times (14 m - 1 m)$$

$$\mu_E = 127.53 KN/m^2$$

Ya calculas las tensiones totales verticales e intersticiales, se obtiene las tensiones efectivas para los cinco puntos con la *Ecuación 1*.



$$\sigma' = \sigma - \mu$$

$$\sigma'_A = 146.5 \frac{KN}{m^2} - 68.67 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma'_A = 77.83 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma'_B = 184.1 \frac{KN}{m^2} - 88.29 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma'_B = 95.81 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma'_C = 221.7 \frac{KN}{m^2} - 107.91 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma'_C = 113.79 \text{ KN/m}^2$$

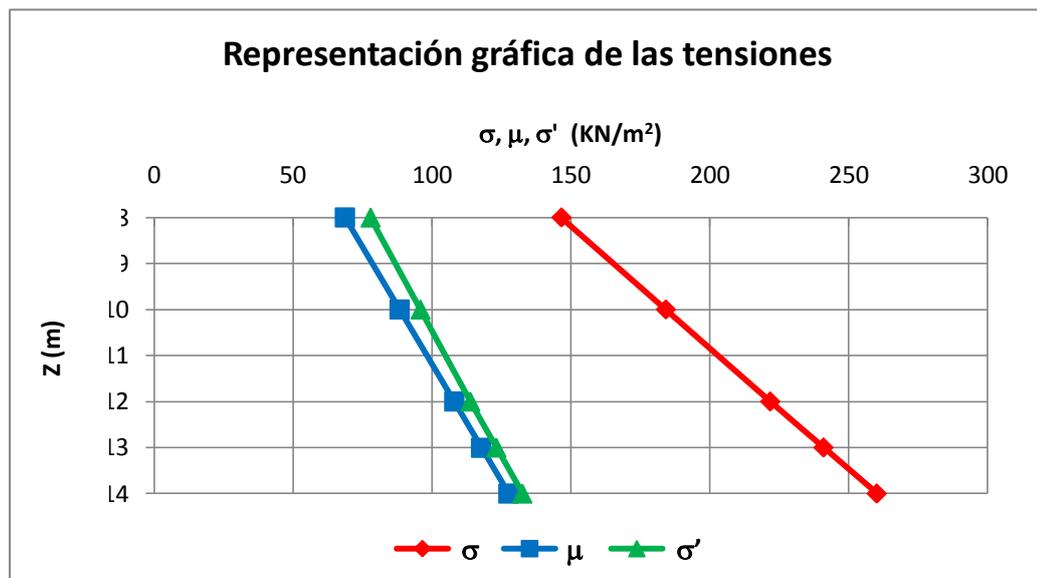
$$\sigma'_D = 240.9 \frac{KN}{m^2} - 117.72 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma'_D = 123.18 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma'_E = 260.1 \frac{KN}{m^2} - 127.53 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma'_E = 132.57 \text{ KN/m}^2$$

En la *Gráfica 4.1*, se representan las parejas de valores  $Z-\sigma$ ,  $Z-\mu$  y  $Z-\sigma'$  que definen la representación gráfica de las tensiones.



Gráfica 4.1 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS TENSIONES ANTES DE LA EXCAVACIÓN

Fuente: El autor



### **b) Tensiones en el suelo después de realizar la excavación**

Primero se debe calcular la descarga de las tensiones con la *Ecuación 4*.

$$\Delta\sigma = \gamma \times NF$$

$$\Delta\sigma = \left(17 \frac{KN}{m^3} \times 1 m\right) + \left(18.5 \frac{KN}{m^3} \times 3 m\right)$$

$$\Delta\sigma = 72.5 \text{ KN/m}^2$$

Para obtener la tensión total vertical en los cinco puntos, se encuentra aplicando la *Ecuación 5*.

$$\sigma = \left[\sum \gamma \times Z\right] - \Delta\sigma$$

$$\sigma_A = 146.5 \frac{KN}{m^2} - 72.5 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_A = 74 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_B = 184.1 \frac{KN}{m^2} - 72.5 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_B = 111.6 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_C = 221.7 \frac{KN}{m^2} - 72.5 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_C = 149.2 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_D = 240.9 \frac{KN}{m^2} - 72.5 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_D = 168.4 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_E = 260.1 \frac{KN}{m^2} - 72.5 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_E = 187.6 \text{ KN/m}^2$$

La tensión intersticial en los cinco puntos se obtiene aplicando la *Ecuación 6*.

$$\mu = (\gamma_w \times Z) - \Delta\sigma$$



$$\mu_A = 68.67 \frac{KN}{m^2} - 72.5 \frac{KN}{m^2}$$

$$\mu_A = -3.83 \text{ KN/m}^2$$

$$\mu_B = 88.29 \frac{KN}{m^2} - 72.5 \frac{KN}{m^2}$$

$$\mu_B = 15.79 \text{ KN/m}^2$$

$$\mu_C = 107.91 \frac{KN}{m^2} - 72.5 \frac{KN}{m^2}$$

$$\mu_C = 35.41 \text{ KN/m}^2$$

$$\mu_D = 117.72 \frac{KN}{m^2} - 72.5 \frac{KN}{m^2}$$

$$\mu_D = 45.22 \text{ KN/m}^2$$

$$\mu_E = 127.53 \frac{KN}{m^2} - 72.5 \frac{KN}{m^2}$$

$$\mu_E = 55.03 \text{ KN/m}^2$$

Ya calculas las tensiones totales verticales e intersticiales, se obtiene las tensiones efectivas para los cinco puntos con la Ecuación 1.

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

$$\sigma'_A = 74 \frac{KN}{m^2} - \left( -3.83 \frac{KN}{m^2} \right)$$

$$\sigma'_A = 77.83 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma'_B = 111.6 \frac{KN}{m^2} - 15.79 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma'_B = 95.81 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma'_C = 149.2 \frac{KN}{m^2} - 35.41 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma'_C = 113.79 \text{ KN/m}^2$$

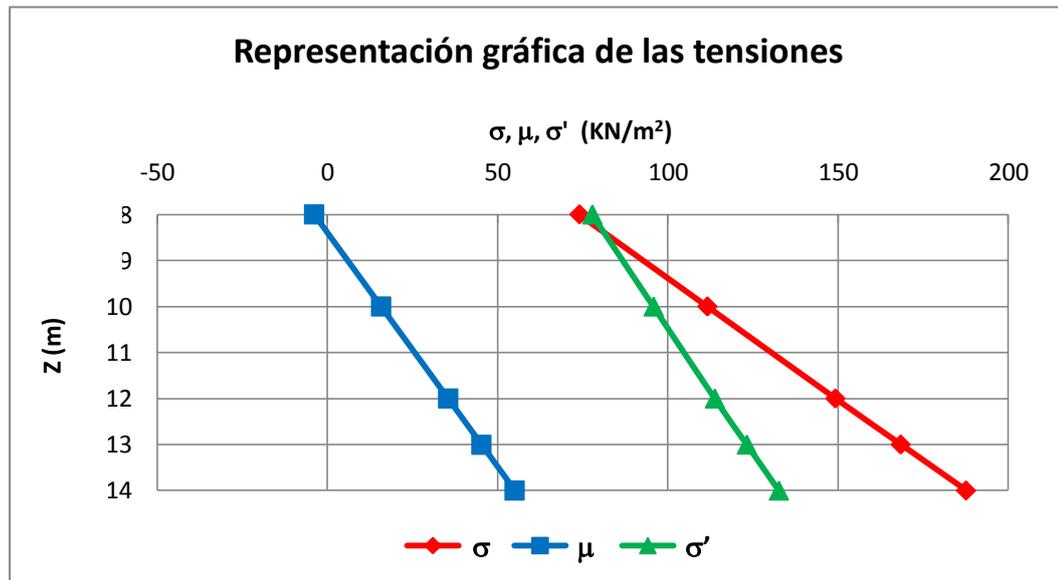
$$\sigma'_D = 168.4 \frac{KN}{m^2} - 45.22 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma'_D = 123.18 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma'_E = 187.6 \frac{KN}{m^2} - 55.03 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma'_E = 132.57 \text{ KN/m}^2$$

En la *Gráfica 4.2*, se representan las parejas de valores  $Z-\sigma$ ,  $Z-\mu$  y  $Z-\sigma'$  que definen la representación gráfica de las tensiones.



Gráfica 4.2 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS TENSIONES DESPUÉS DE LA EXCAVACIÓN

Fuente: El autor

## 4.2 TENSIONES VERTICALES TOTALES, EFECTIVAS E INTERSTICIALES BAJO LA CIMENTACIÓN DEL PILÓN DE UN PUEBTE

### **EJEMPLO DE APLICACIÓN:**

Un pílón de un puente de hormigón armado tiene una altura de 8 m, un área de apoyo de 10 m<sup>2</sup> y soporta la carga del tablero de 1500 KN. El pílón se cimenta en el cauce de un río, apoyándose sobre la superficie de un estrato de arena de 5 m de espesor, y peso específico de 20 KN/m<sup>2</sup>.

El nivel de agua en el río puede variar de 0 m a 3 m de altura sobre la superficie de arena, obtener las tensiones totales verticales, efectivas e intersticiales en los puntos A, B y C bajo el centro de la cimentación del pílón, en las siguientes condiciones:

- El nivel de agua en el río coincide con la superficie de la arena
- El nivel de agua en el río alcanza 3 m sobre la superficie de la arena

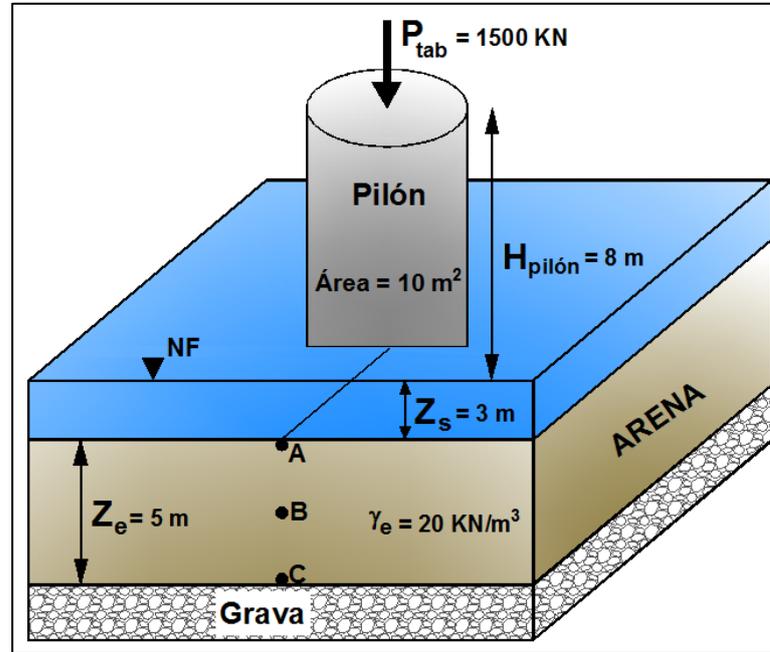


Figura 4.2 DATOS DEL EJEMPLO DE APLICACIÓN (Tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales bajo la cimentación del pylon de un puente)

Fuente: El autor

#### DATOS DEL EJEMPLO:

##### *Datos geométricos del pylon:*

Altura del pylon ( $H_{\text{pylon}}$ ) = 8 m

Área de apoyo del pylon ( $A$ ) = 10 m<sup>2</sup>

Carga transmitida ( $P_{\text{tab}}$ ) = 1500 kN

##### *Datos geotécnicos de la arena:*

Espesor ( $Z_e$ ) = 5 m

Peso específico ( $G_s$ ) = 20 kN/m<sup>3</sup>

Altura de nivel de agua del río ( $Z_s$ ) = 3 m

Considerar los siguientes parámetros:



- Peso específico del agua ( $\gamma_w$ ) = 9.81 KN/m<sup>3</sup>
- Peso específico del hormigón ( $\gamma_h$ ) = 25 KN/m<sup>3</sup>

**PROCEDIMIENTO:**

**a) El nivel de agua en el río coincide con la superficie de la arena**

Para calcular la tensión total vertical se adicionará la tensión de la cimentación aportada por el pilón y el tablero.

Con la *Ecuación 7*, se obtiene el valor de la tensión transmitida por el tablero a la cimentación.

$$\sigma_{tab} = \frac{P_{tab}}{A}$$
$$\sigma_{tab} = \frac{1500 \text{ KN}}{10 \text{ m}^2}$$
$$\sigma_{tab} = \mathbf{150 \text{ KN/m}^2}$$

Con la *Ecuación 8*, se obtiene el valor de la tensión transmitida por el peso del pilón a la cimentación, tomando en cuenta que anteriormente se debe calcular la carga del pilón.

$$\sigma_{pilón} = \frac{W_{pilón}}{A}$$
$$\sigma_{pilón} = \frac{2000 \text{ KN}}{10 \text{ m}^2}$$
$$\sigma_{pilón} = \mathbf{200 \text{ KN/m}^2}$$

Para obtener la tensión de la cimentación se emplea la *Ecuación 9*.

$$\sigma_{cim} = \sigma_{tab} + \sigma_{pilón}$$
$$\sigma_{cim} = 150 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} + 200 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$



$$\sigma_{cim} = 350 \text{ KN/m}^2$$

Ya obtenidas las tensiones aplicadas a la cimentación se obtiene con la *Ecuación 10* la tensión total vertical en los tres puntos.

$$\sigma = \sigma_{cim} + (\gamma_e \times Z)$$

$$\sigma_A = 350 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} + \left( 20 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 0 \text{ m} \right)$$

$$\sigma_A = 350 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_B = 350 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} + \left( 20 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 2.5 \text{ m} \right)$$

$$\sigma_B = 400 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_C = 350 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} + \left( 20 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 5 \text{ m} \right)$$

$$\sigma_C = 450 \text{ KN/m}^2$$

La tensión intersticial en los tres puntos se encuentra con la *Ecuación 11*.

$$\mu = \gamma_w \times Z$$

$$\mu_A = 9.81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 0 \text{ m}$$

$$\mu_A = 0$$

$$\mu_B = 9.81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 2.5 \text{ m}$$

$$\mu_B = 24.53 \text{ KN/m}^2$$

$$\mu_C = 9.81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 5 \text{ m}$$

$$\mu_C = 49.05 \text{ KN/m}^2$$

Ya calculas las tensiones totales verticales e intersticiales, con la *Ecuación 1* se obtiene las tensiones efectivas para los tres puntos.

$$\sigma' = \sigma - \mu$$



$$\sigma'_A = 350 \frac{KN}{m^2} - 0$$

$$\sigma'_A = 350 \text{ KN/m}^2$$

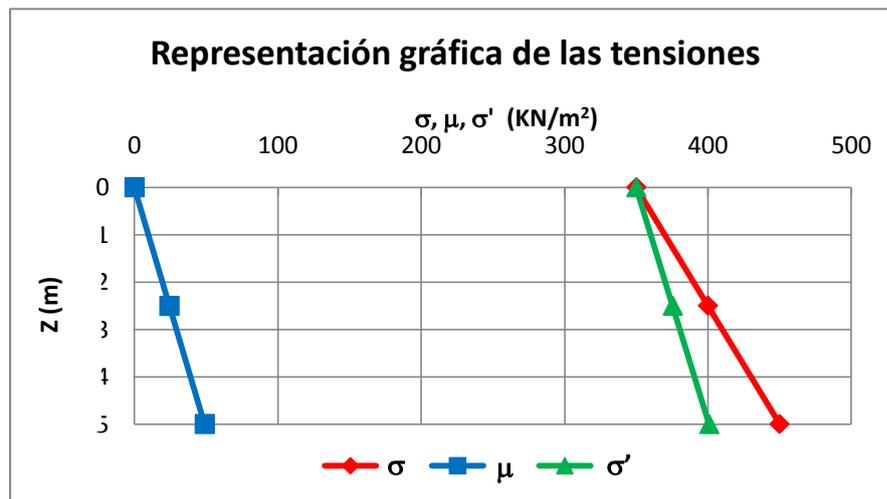
$$\sigma'_B = 400 \frac{KN}{m^2} - 24.53 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma'_B = 375.47 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma'_C = 450 \frac{KN}{m^2} - 49.05 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma'_C = 400.95 \text{ KN/m}^2$$

En la *Gráfica 4.3*, se representan las parejas de valores  $Z-\sigma$ ,  $Z-\mu$  y  $Z-\sigma'$  que definen la representación gráfica de las tensiones.



Gráfica 4.3 REPRESENTACIÓN GRAFICA DE LAS TENSIONES CUANDO EL NIVEL DE AGUA EN EL RÍO COINCIDE CON LA SUPERFICIE DE LA ARENA.

Fuente: El autor

**b) El nivel de agua en el río alcanza 3 m sobre la superficie de la arena**

Las tensiones totales verticales en los tres puntos no cambian con respecto al literal anterior, ya que gravitan los mismos pesos.

$$\sigma_A = 350 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_B = 400 \text{ KN/m}^2$$



$$\sigma_C = 450 \text{ KN/m}^2$$

La tensión intersticial en los tres puntos se encuentra con la *Ecuación 12*.

$$\mu = \gamma_w \times (Z + Z_s)$$

$$\mu_A = 9.81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times (0 \text{ m} + 3 \text{ m})$$

$$\mu_A = 29.43 \text{ KN/m}^2$$

$$\mu_B = 9.81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times (2.5 \text{ m} + 3 \text{ m})$$

$$\mu_B = 53.96 \text{ KN/m}^2$$

$$\mu_C = 9.81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times (5 \text{ m} + 3 \text{ m})$$

$$\mu_C = 78.48 \text{ KN/m}^2$$

Ya calculas las tensiones intersticiales con la *Ecuación 1*, se obtiene las tensiones efectivas para los tres puntos.

$$\sigma'_A = 350 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} - 29.43 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma'_A = 320.57 \text{ KN/m}^2$$

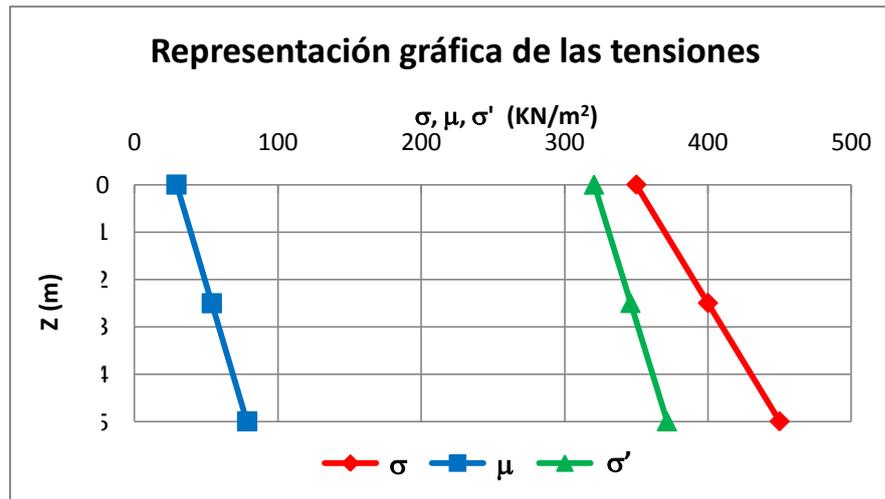
$$\sigma'_B = 400 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} - 53.96 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma'_B = 346.04 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma'_C = 450 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} - 78.48 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma'_C = 371.52 \text{ KN/m}^2$$

En la *Gráfica 4.4*, se representan las parejas de valores  $Z-\sigma$ ,  $Z-\mu$  y  $Z-\sigma'$  que definen la representación gráfica de las tensiones.



Gráfica 4.4 REPRESENTACIÓN GRAFICA DE LAS TENSIONES CUANDO EL NIVEL DE AGUA EN EL RÍO ALCANZA 3 m SOBRE LA SUPERFICIE DE LA ARENA.

Fuente: El autor

### 4.3 FACTOR DE SEGURIDAD EMPLEADO EN EL LEVANTAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS

#### EJEMPLO DE APLICACIÓN:

Una capa de 10 m de espesor de arcilla se apoya sobre un estrato de arena gruesa que contiene agua subterránea. Un piezómetro insertado en el contacto arcilla - arena gruesa registra un nivel de agua artesisiana de 2.5 m por encima de la superficie de la arcilla.

La arcilla tiene un peso específico relativo de 2.65 y un contenido de humedad del 25%, siendo su coeficiente de permeabilidad de  $2E-7$  m/s.

Se pretende excavar 3 m del suelo para construir una edificación apoyada sobre una losa de cimentación, que transmitirá una presión uniforme de  $150 \text{ KN/m}^2$  sobre el suelo que la soporta, determinar:

- Flujo de agua a través de la arcilla en  $\text{m}^3/\text{año}$  antes de comenzar los trabajos de excavación

- b) Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos al finalizar la excavación
- c) Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos después de construir la cimentación

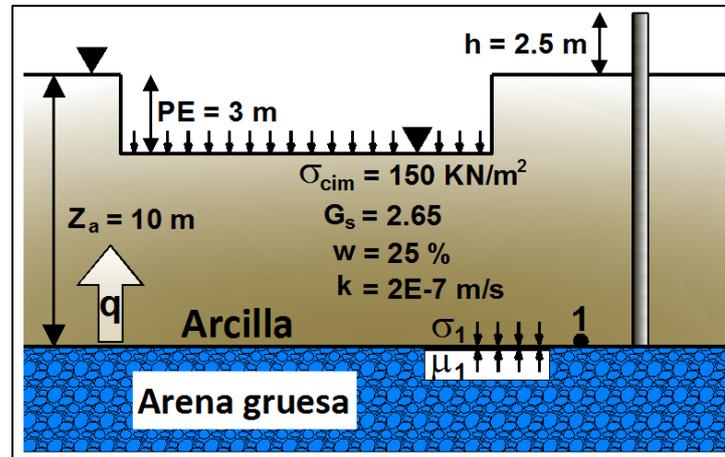


Figura 4.3. DATOS DEL EJEMPLO DE APLICACIÓN (Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos)

Fuente: El autor

**DATOS DEL EJEMPLO:**

Nivel de agua artesiana sobre la superficie del terreno ( $h$ ) = 2.5 m

Profundidad de excavación ( $PE$ ) = 3 m

Presión uniforme de cimentación ( $\sigma_{cim}$ ) = 150 KN/m<sup>2</sup>

**Datos geotécnicos de la arcilla:**

Espesor ( $Z_a$ ) = 10 m

Peso específico relativo ( $G_s$ ) = 2.65

Contenido de humedad ( $W$ ) = 25 %

Coefficiente de permeabilidad ( $K$ ) =  $2 \cdot 10^{-7}$  m/s

Considerar los siguientes parámetros:

- Peso específico del agua ( $\gamma_w$ ) = 9.81 KN/m<sup>3</sup>
- El nivel freático se encuentra en la superficie del terreno
- Se admite que el flujo es unidimensional



**PROCEDIMIENTO:**

**a) Flujo de agua a través de la arcilla en  $m^3/año$  antes de comenzar los trabajos de excavación.**

Para obtener la velocidad del agua se emplea la *Ecuación 16*, tomando en cuenta que  $\Delta h = h$  y  $L = Z_a$

$$v = k \times \frac{h}{Z_a}$$

$$v = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s} \times \frac{2.5 \text{ m}}{10 \text{ m}}$$

$$v = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$

El valor del caudal se encuentra aplicando la *Ecuación 17*, se considera que  $A = 1 \text{ m}^2$ .

$$Q = v \times A$$

$$Q = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s} \times 1 \text{ m}^2$$

$$Q = 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{ m}^2$$

Finalmente con la *Ecuación 18* se obtiene el caudal en las unidades de  $m^3/año$ , considerando la conversión  $1 \text{ año} = 31536000 \text{ s}$  dando como resultado el caudal que se filtra hacia la superficie del terreno:

$$q = Q \times 31536000 \text{ s}$$

$$q = 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{ m}^2 \times 31536000 \text{ s}$$

$$q = 1.58 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \text{ m}^2$$

**b) Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos al finalizar la excavación**



Primero se debe calcular el valor del peso específico saturado de la arcilla, se emplea la *Ecuación 21*:

$$\gamma_{satA} = \frac{G_s(1 + w)}{1 + (w \times G_s)} \times \gamma_w$$
$$\gamma_{satA} = \frac{(2.65)(1 + 0.25)}{1 + (0.25 \times 2.65)} \times 9.81 \text{ KN/m}^3$$
$$\gamma_{satA} = \mathbf{19.55 \text{ KN/m}^3}$$

A partir de la *Ecuación 22* se determina la tensión total vertical.

$$\sigma_1 = \gamma_{satA} \times (Z_a - PE)$$
$$\sigma_1 = 19.55 \text{ KN/m}^3 \times (10 \text{ m} - 3 \text{ m})$$
$$\sigma_1 = \mathbf{136.85 \text{ KN/m}^2}$$

La tensión intersticial se encuentra aplicando la *Ecuación 23*.

$$\mu_1 = \gamma_w \times (Z_a + h)$$
$$\mu_1 = 9.81 \text{ KN/m}^3 \times (10 \text{ m} + 2.5 \text{ m})$$
$$\mu_1 = \mathbf{122.63 \text{ KN/m}^2}$$

A partir de los valores calculados anteriormente y de la *Ecuación 13*, se procede a determinar el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos al finalizar la excavación.

$$FS_{lev} = \frac{\sigma_1}{\mu_1}$$
$$FS_{lev} = \frac{136.85 \text{ KN/m}^2}{122.63 \text{ KN/m}^2}$$
$$FS_{lev} = \mathbf{1.12}$$

**c) Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos después de construir la cimentación**



Finalmente se calculará el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos después de construir la cimentación mediante la *Ecuación 24*, teniendo en cuenta la presión uniforme de cimentación.

$$FS_{lev} = \frac{\sigma_1 + \sigma_{cim}}{\mu_1}$$
$$FS_{lev} = \frac{136.85 \frac{KN}{m^2} + 150 \frac{KN}{m^2}}{122.63 \frac{KN}{m^2}}$$

$$FS_{lev} = 2.34$$

#### 4.4 FACTOR DE SEGURIDAD EMPLEADO EN EL LEVANTAMIENTO DE SUELOS MEJORADOS

##### ***EJEMPLO DE APLICACIÓN:***

Se construirá un estacionamiento subterráneo, en un terreno estratificado compuesto desde la superficie hacia el interior por un estrato de arena de 6 m de espesor, con un coeficiente de permeabilidad de  $10E-5$  m/s y un peso específico de  $19 \text{ KN/m}^3$ . Debajo, hay un estrato de limo de 12 m de espesor, con un coeficiente de permeabilidad de  $5E-7$  m/s y un peso específico de  $19.5 \text{ KN/m}^3$ , que a su vez se apoya sobre un estrato de arena media.

El nivel freático se sitúa a 3 m de profundidad, la excavación se la realiza a una profundidad de 11 m. Después, se mejora el terreno con una inyección grout (agua y cemento) con un espesor de 3.5 m, un coeficiente de permeabilidad de  $5E-8$  m/s y un peso específico de  $20 \text{ KN/m}^3$ . Determinar:

**a) Si el suelo de mejoramiento se considera impermeable, calcular:**

a1. Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos mejorados.



a2. Tensión mínima que deberá ejercer el estacionamiento subterráneo para que  $FS_{lev} = 2$ .

b) Si el suelo de mejoramiento se considera permeable, calcular:

b1. Caudal que se filtra hacia la excavación.

b2. Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos mejorados.

b3. Tensión mínima que deberá ejercer el estacionamiento subterráneo para que  $FS_{lev} = 2$ .

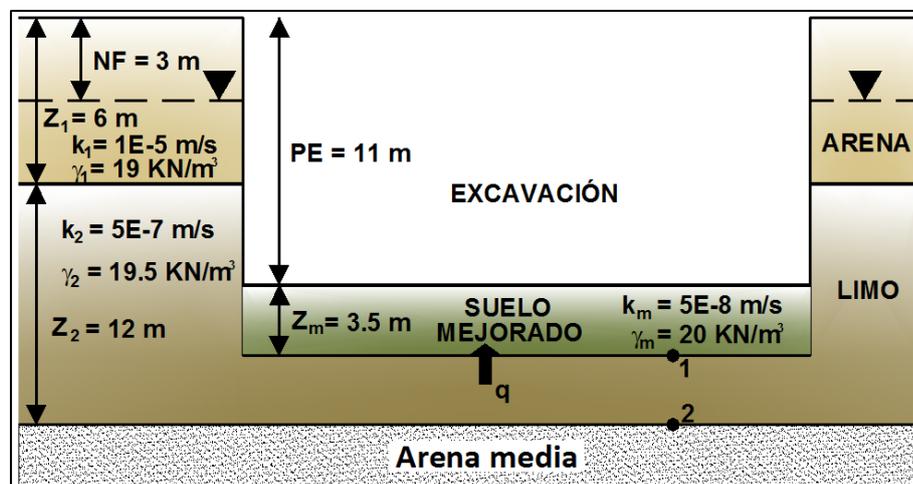


Figura 4.4 DATOS DEL EJEMPLO DE APLICACIÓN (Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelo mejorados)

Fuente: El autor

#### DATOS DEL EJEMPLO:

Profundidad del nivel freático (NF) = 3 m

Profundidad de excavación (PE) = 11 m

#### Datos geotécnicos de la arena:

Espesor ( $Z_1$ ) = 6 m

Peso específico ( $\gamma_1$ ) = 19 KN/m<sup>3</sup>

Coeficiente de permeabilidad (K) =  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s



**Datos geotécnicos del limo:**

$$\text{Espesor } (Z_2) = 12 \text{ m}$$

$$\text{Peso específico } (\gamma_2) = 19.5 \text{ KN/m}^3$$

$$\text{Coeficiente de permeabilidad } (K) = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$$

**Datos geotécnicos del suelo mejorado:**

$$\text{Espesor } (Z_m) = 3.5 \text{ m}$$

$$\text{Peso específico } (\gamma_m) = 20 \text{ KN/m}^3$$

$$\text{Coeficiente de permeabilidad } (K) = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$

Considerar los siguientes parámetros:

- *Peso específico del agua*  $(\gamma_w) = 9.81 \text{ KN/m}^3$
- *Durante la excavación se realiza el drenaje del agua, que fluye hacia el interior de la excavación.*
- *Se admite que el flujo es unidimensional*

**PROCEDIMIENTO:**

Si el suelo de mejoramiento se considera impermeable, calcular:

**a) Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos de mejoramiento.**

Primero calculamos las tensiones total vertical e intersticial en los puntos 1 y 2 con las Ecuaciones 2 y 25 respectivamente.

$$\sigma = \sum \gamma \times Z$$

$$\sigma_1 = 20 \text{ KN/m}^3 \times 3.5 \text{ m}$$

$$\sigma_1 = 70 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_2 = (20 \text{ KN/m}^3 \times 3.5 \text{ m}) + (19.5 \text{ KN/m}^3 \times 3.5 \text{ m})$$

$$\sigma_2 = 138.25 \text{ KN/m}^2$$



$$\mu = \gamma_w \times h_w$$

$$\mu_1 = 9.81 \text{ KN/m}^3 \times 11.5 \text{ m}$$

$$\mu_1 = \mathbf{112.82 \text{ KN/m}^2}$$

$$\mu_2 = 9.81 \text{ KN/m}^3 \times 15 \text{ m}$$

$$\mu_2 = \mathbf{147.15 \text{ KN/m}^2}$$

Obtenidas las tensiones procedemos al cálculo del factor de seguridad en los puntos 1 y 2 con la *Ecuación 13*.

$$FS_{lev} = \frac{\sigma}{\mu}$$

$$FS_{lev\ 1} = \frac{70 \text{ KN/m}^2}{112.82 \text{ KN/m}^2}$$

$$FS_{lev\ 1} = \mathbf{0.62}$$

$$FS_{lev\ 2} = \frac{138.25 \text{ KN/m}^2}{147.15 \text{ KN/m}^2}$$

$$FS_{lev\ 2} = \mathbf{0.94}$$

**b) Tensión mínima que deberá ejercer el estacionamiento subterráneo para que  $FS_{lev} = 2$ .**

El valor de la tensión mínima que debe aportar la cimentación se la obtiene con la *Ecuación 27* para ambos puntos.

$$\Delta\sigma = 2\mu - \sigma$$

$$\Delta\sigma_1 = (2 \times 112.82 \text{ KN/m}^2) - 70 \text{ KN/m}^2$$

$$\Delta\sigma_1 = \mathbf{155.64 \text{ KN/m}^2}$$

$$\Delta\sigma_2 = (2 \times 147.15 \text{ KN/m}^2) - 138.25 \text{ KN/m}^2$$

$$\Delta\sigma_2 = \mathbf{156.05 \text{ KN/m}^2}$$

Si el suelo de mejoramiento se considera permeable, calcular:



**a) Caudal que se filtra hacia la excavación.**

Primero calculamos el coeficiente de permeabilidad vertical equivalente con la *Ecuación 29*.

$$k_z = \frac{Z_m + Z_{2sob}}{\frac{Z_m}{k_m} + \frac{Z_{2sob}}{k_2}}$$
$$k_z = \frac{3.5 \text{ m} + 3.5 \text{ m}}{\frac{3.5 \text{ m}}{5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}} + \frac{3.5 \text{ m}}{5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}}}$$
$$k_z = 9.09 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$

El caudal que se filtra hacia la excavación se lo calcula con la *Ecuación 28*.

$$q = \frac{k_z \times h \times A}{L}$$
$$q = \frac{9.09 \cdot 10^{-8} \text{ m/s} \times 8 \text{ m} \times 1 \text{ m}^2}{7 \text{ m}}$$
$$q = 1.04 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{ m}^2$$

**b) Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos de mejoramiento.**

Como la tensión total vertical no varía en los puntos 1 y 2 se adopta los valores de cuando el suelo de mejoramiento se considera impermeable.

Para calcular la tensión intersticial en el punto 1 se la realiza con la *Ecuación 30* debido a que circula un caudal y para el punto 2 se adopta el valor de cuando el suelo de mejoramiento se considera impermeable.

$$\mu_1 = (\gamma_w \times Z_m) + \left[ \gamma_w \times \left( \frac{q \times Z_m}{k_m \times A} \right) \right]$$
$$\mu_1 = (9.81 \text{ KN/m}^3 \times 3.5 \text{ m}) + \left[ 9.81 \text{ KN/m}^3 \times \left( \frac{1.04 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{ m}^2 \times 3.5 \text{ m}}{5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s} \times 1 \text{ m}^2} \right) \right]$$



$$\mu_1 = 105.75 \text{ KN/m}^2$$

Obtenidas las tensiones procedemos al cálculo del factor de seguridad en los puntos 1 y 2 con la *Ecuación 13*.

$$FS_{lev} = \frac{\sigma}{\mu}$$

$$FS_{lev\ 1} = \frac{70 \text{ KN/m}^2}{105.75 \text{ KN/m}^2}$$

$$FS_{lev\ 1} = 0.66$$

$$FS_{lev\ 2} = \frac{138.25 \text{ KN/m}^2}{147.15 \text{ KN/m}^2}$$

$$FS_{lev\ 2} = 0.94$$

**c) Tensión mínima que deberá ejercer el estacionamiento subterráneo para que  $FS_{lev} = 2$ .**

El valor de la tensión mínima que debe aportar la cimentación se la obtiene con la *Ecuación 27* para ambos puntos.

$$\Delta\sigma = 2\mu - \sigma$$

$$\Delta\sigma_1 = (2 \times 105.75 \text{ KN/m}^2) - 70 \text{ KN/m}^2$$

$$\Delta\sigma_1 = 141.50 \text{ KN/m}^2$$

$$\Delta\sigma_2 = (2 \times 147.15 \text{ KN/m}^2) - 138.25 \text{ KN/m}^2$$

$$\Delta\sigma_2 = 156.05 \text{ KN/m}^2$$

#### 4.5 DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA EN UNA ARCILLA

**EJEMPLO DE APLICACIÓN:**



Sobre la superficie de un terreno estratificado compuesto por dos estratos (Figura 4.5) se va a construir un amplio edificio y esto impondrá un incremento en la presión vertical de  $140 \text{ KN/m}^2$  en la mitad de la capa de arcilla. El espesor de la arena es  $10 \text{ m}$  y de la arcilla es  $2 \text{ m}$ , el índice de vacíos en la arena es  $0.76$ .

El nivel freático alcanza los  $3 \text{ m}$  bajo la superficie del terreno, el contenido de humedad de la arcilla es  $43 \%$ , el índice de compresión de la arcilla es  $0.3$  y para ambos suelos el peso específico relativo es  $2.7$ , determinar:

- El asentamiento por consolidación primaria de la arcilla
- El índice de vacíos final en la arcilla

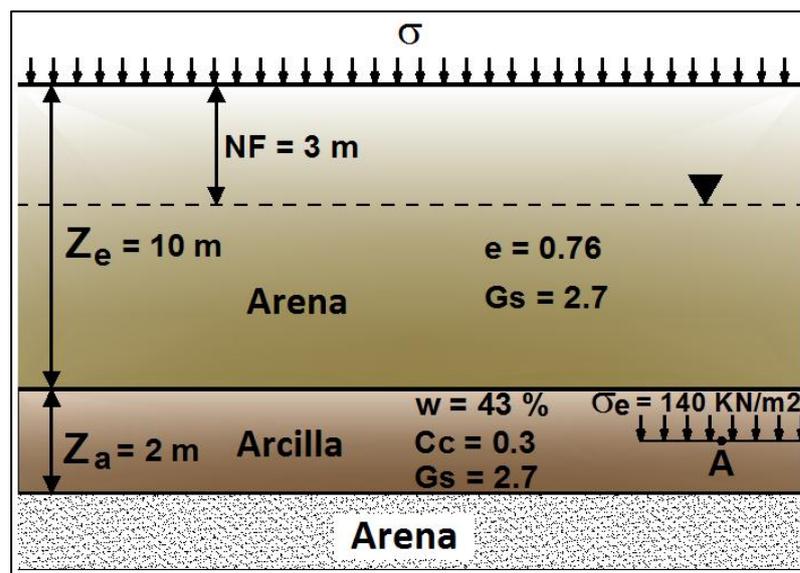


Figura 4.5 DATOS DEL EJEMPLO DE APLICACIÓN (Determinación del asentamiento por consolidación primaria en una arcilla)

Fuente: El autor

#### DATOS DEL EJEMPLO:

Profundidad del nivel freático (NF) =  $3 \text{ m}$

#### Datos geotécnicos de la arena:

Espesor ( $Z_e$ ) =  $10 \text{ m}$

Índice de vacíos ( $e$ ) =  $0.76$



Peso específico relativo ( $G_s$ ) = 2.7

**Datos geotécnicos de la arcilla:**

Espesor ( $Z_a$ ) = 2 m

Incremento de presión vertical ( $\sigma_e$ ) = 140 KN/m<sup>2</sup>

Peso específico relativo ( $G_s$ ) = 2.7

Contenido de humedad ( $W$ ) = 43 %

Índice de compresión ( $C_c$ ) = 0.3

Considerar los siguientes parámetros:

- Peso específico del agua ( $\gamma_w$ ) = 9.81 KN/m<sup>3</sup>

**PROCEDIMIENTO:**

**a) El asentamiento por consolidación primaria de la arcilla**

Para calcular el peso específico seco de la arena se emplea la *Ecuación 32*.

$$\gamma_e = \frac{G_s \times \gamma_w}{1 + e}$$
$$\gamma_e = \frac{2.7 \times 9.81 \text{ KN/m}^3}{1 + 0.76}$$
$$\gamma_e = 15.05 \text{ KN/m}^3$$

El peso específico saturado de la arena se lo calcula con la *Ecuación 33*.

$$\gamma_{e_{sat}} = \frac{G_s + e}{1 + e} \times \gamma_w$$
$$\gamma_{e_{sat}} = \frac{2.7 + 0.76}{1 + 0.76} \times 9.81 \text{ KN/m}^3$$
$$\gamma_{e_{sat}} = 19.29 \text{ KN/m}^3$$



Como el índice de vacíos ( $e$ ) al estar la arcilla saturada se la obtiene con la *Ecuación 34*. Tomando en cuenta que el contenido de humedad de la arcilla esta en porcentaje.

$$e = w \times G_s$$

$$e = 43 \% \times 2.7$$

$$e = 1.16$$

A partir de la *Ecuación 35* se determina el peso específico saturado de la arcilla.

$$\gamma_{a_{sat}} = \frac{G_s \times (1 + w)}{1 + (w \times G_s)} \times \gamma_w$$

$$\gamma_{a_{sat}} = \frac{2.7 \times (1 + 43\%)}{1 + (43\% \times 2.7)} \times 9.81 \text{ KN/m}^3$$

$$\gamma_{a_{sat}} = 17.53 \text{ KN/m}^3$$

Para obtener la tensión total vertical utilizamos la *Ecuación 36*.

$$\sigma_A = \sum \gamma \times Z$$

$$\sigma_A = \left(15.05 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 3\text{m}\right) + \left(19.29 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 7\text{m}\right) + \left(17.53 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 1\text{m}\right)$$

$$\sigma_A = 198.01 \text{ KN/m}^2$$

Para obtener la tensión intersticial utilizamos la *Ecuación 37*.

$$u_A = \gamma_w \times ((Z_e - NF) + 0.5Z_a)$$

$$u_A = 9.81 \text{ KN/m}^3 \times ((10 \text{ m} - 3 \text{ m}) + (0.5 \times 2 \text{ m}))$$

$$u_A = 78.48 \text{ KN/m}^2$$

Ya calculados los valores de las tensiones total vertical e intersticial se procede a utilizar la *Ecuación 1*, para el cálculo de la tensión efectiva vertical inicial.



$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A$$

$$\sigma'_A = 198.01 \text{ KN/m}^2 - 78.48 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma'_A = \mathbf{119.53 \text{ KN/m}^2}$$

Con la *Ecuación 38*, calculamos el valor de cambio total del índice de vacíos causada por la aplicación de carga adicional, tomando en cuenta las siguientes condiciones:

$$\sigma'_o = \sigma'_A$$

$$\sigma'_o = \mathbf{119.53 \text{ KN/m}^2}$$

$$\sigma'_f = \sigma'_o + \sigma_e$$

$$\sigma'_f = 119.53 \text{ KN/m}^2 + 140 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma'_f = \mathbf{259.53 \text{ KN/m}^2}$$

$$\Delta e = C_c \times \log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_o}$$

$$\Delta e = 0.3 \times \log \frac{259.53 \text{ KN/m}^2}{119.53 \text{ KN/m}^2}$$

$$\Delta e = \mathbf{0.10}$$

Finalmente con la *Ecuación 31*, se obtiene el asentamiento por consolidación primaria de la arcilla tomando en cuenta  $e_o = e$ .

$$S_c = \left( \frac{\Delta e}{1 + e_o} \right) \times Z_a$$

$$S_c = \left( \frac{0.10}{1 + 1.16} \right) \times 2 \text{ m}$$

$$S_c = \mathbf{0.093 \text{ m} = 93 \text{ mm}}$$

#### **b) El índice de vacíos final en la arcilla**

Para determinar el índice de vacíos final se utiliza la *Ecuación 41*.

$$e_f = e_o + \Delta e$$

$$e_f = 1.16 + 0.10$$

$$e_f = 1.06$$

#### 4.6 DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA EN UNA ARCILLA

##### EJEMPLO DE APLICACIÓN:

Sobre la superficie de un estrato de arcilla de 6 m de espesor, que se apoya sobre un macizo granítico impermeable, se va a construir un gran centro comercial que transmitirá una presión de 100 KN/m<sup>2</sup>.

Dos de los parámetros obtenidos en ensayos en el centro de la arcilla son el coeficiente volumétrico de compresibilidad de 0.00025 m<sup>2</sup>/KN y el coeficiente de consolidación de 1.7 m<sup>2</sup>/año.

Se estima una duración de las obras de 3 años. Determinar:

- La curva de asentamientos instantáneos para los 6 primeros años
- La curva de asentamientos corregida.

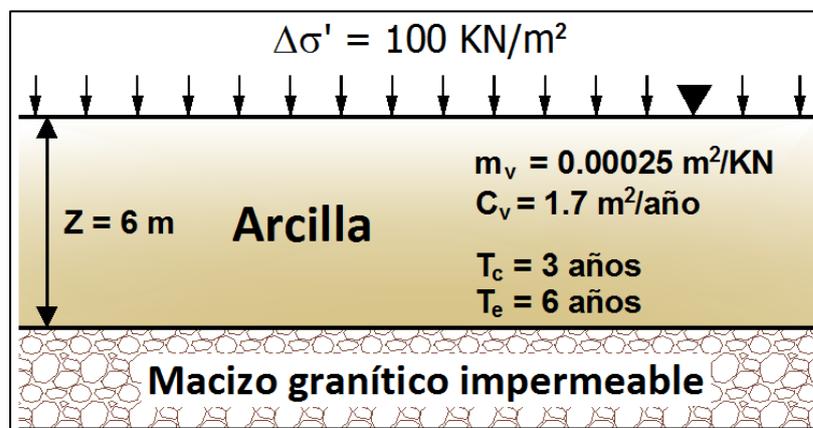


Figura 4.6 DATOS DEL EJEMPLO DE APLICACIÓN (Determinación de la curva de asentamiento por consolidación primaria en una arcilla)

Fuente: El autor



**DATOS DEL EJEMPLO:**

*Presión transmitida ( $\Delta\sigma'$ ) = 100 KN/m<sup>2</sup>*

*Tiempo de construcción ( $T_c$ ) = 3 años*

*Tiempo de interés ( $T_e$ ) = 6 años*

**Datos geotécnicos de la arcilla:**

*Espesor ( $Z$ ) = 6 m*

*Coefficiente volumétrico de compresibilidad ( $m_v$ ) = 0.00025 m<sup>2</sup>/KN*

*Coefficiente de consolidación ( $c_v$ ) = 1.7 m<sup>2</sup>/año*

Considerar los siguientes parámetros:

- *Consultar la Cuadro 3.7*

**PROCEDIMIENTO:**

**a) La curva de asentamientos instantáneos para los 6 primeros años**

Para calcular el asentamiento por consolidación primaria se emplea la *Ecuación 42*.

$$S_c = m_v \times \Delta\sigma' \times Z$$

$$S_c = 0.00025 \frac{m^2}{KN} \times \frac{100KN}{m^2} \times 6m$$

$$S_c = 0.15 m = 150 mm$$

Para obtener los asentamientos instantáneos, tomamos diversos tiempos en el intervalo de 0 a 6 años, con cada tiempo determinamos el factor de tiempo vertical  $T_v$  y con él el grado de consolidación medio  $U_v$ . Por ejemplo, para  $t = 1$  año, se utiliza la *Ecuación 43*.

$$T_v = \frac{c_v \times t}{Z^2}$$



$$T_v = \frac{1.7 \frac{m^2}{año} \times 1 \text{ año}}{(6m)^2}$$

$$T_v = 0.0472$$

Interpolando en el Cuadro 3.7, entre los valores de  $T_v = 0.0314$  ( $U_v = 0.20$ ) y  $T_v = 0.0491$  ( $U_v = 0.25$ ) obtenemos  $U_v = 0.245$ .

Con la Ecuación 46 se calcula el valor del asentamiento instantáneo para  $t = 1$  año.

$$S_{ci} = U_v \times S_c$$

$$S_{ci} = 0.245 \times 150 \text{ mm}$$

$$S_{ci} = 36.75 \text{ mm}$$

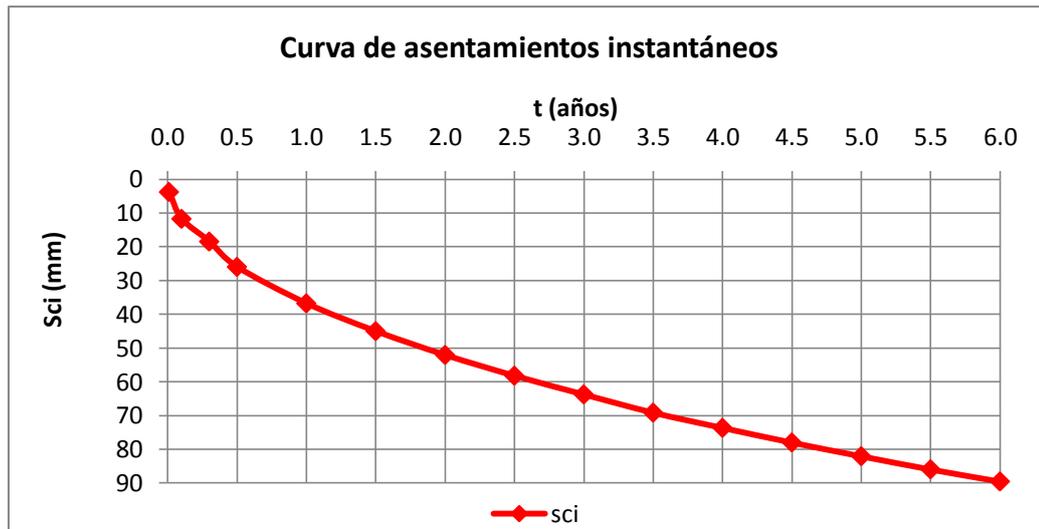
Ya hecho un cálculo para un tiempo determinado, ahora en la Cuadro 4.1 se muestran todos los resultados para asentamientos instantáneos.

| t (años) | $T_v$ (m <sup>2</sup> /año) | $U_v$ | $S_{ci}$ (mm) |
|----------|-----------------------------|-------|---------------|
| 0.01     | 0.0005                      | 0.025 | 3.8           |
| 0.1      | 0.0047                      | 0.078 | 11.7          |
| 0.3      | 0.0142                      | 0.123 | 18.5          |
| 0.5      | 0.0236                      | 0.173 | 26.0          |
| 1.0      | 0.0472                      | 0.245 | 36.8          |
| 1.5      | 0.0708                      | 0.300 | 45.0          |
| 2.0      | 0.0944                      | 0.347 | 52.1          |
| 2.5      | 0.1181                      | 0.388 | 58.2          |
| 3.0      | 0.1417                      | 0.425 | 63.8          |
| 3.5      | 0.1653                      | 0.461 | 69.2          |
| 4.0      | 0.1889                      | 0.491 | 73.7          |
| 4.5      | 0.2125                      | 0.520 | 78.0          |
| 5.0      | 0.2361                      | 0.547 | 82.1          |
| 5.5      | 0.2597                      | 0.573 | 86.0          |
| 6.0      | 0.2833                      | 0.597 | 89.6          |

Cuadro 4.1 VALORES PARA LA CURVA DE ASENTAMIENTOS INSTANTÁNEOS

Fuente: El autor

En la Gráfica 4.5, se representan las parejas de valores  $t-S_{ci}$  que definen la curva de asentamientos instantáneos.



Gráfica 4.5 CURVA DE ASENTAMIENTOS INSTANTÁNEOS

Fuente: El autor

**b) La curva de asentamientos corregida.**

Para corregir los puntos analíticamente se utiliza las Ecuaciones 47 y 48.

Siendo el tiempo de construcción  $T_c = 3$  años,  $S_{ci}$  el asentamiento instantáneo y  $S_{cc}$  el asentamiento corregido, tenemos por ejemplo:

Para  $t = 2$  años utilizamos la Ecuación 47, tenemos:

$$S_{cc}(2 < 3) = \frac{t}{t_c} S_{ci} \left( \frac{t}{2} \right) = \frac{t}{t_c} S_{ci}(1) = \frac{2}{3} \times 36.8 \text{ mm} = 24.5 \text{ mm}$$

Pues del Cuadro 4.1 para  $t = \text{año } S_{ci}(1) = 36.8 \text{ mm}$

Y para  $t = 5.5$  años utilizamos la Ecuación 48, tenemos:

$$S_{cc}(5.5 \geq 3) = S_{ci} \left( 5.5 - \frac{3}{2} \right) = S_{ci}(4) = 73.7 \text{ mm}$$

Pues del Cuadro 4.1 para  $t = \text{año } S_{ci}(4) = 73.7 \text{ mm}$



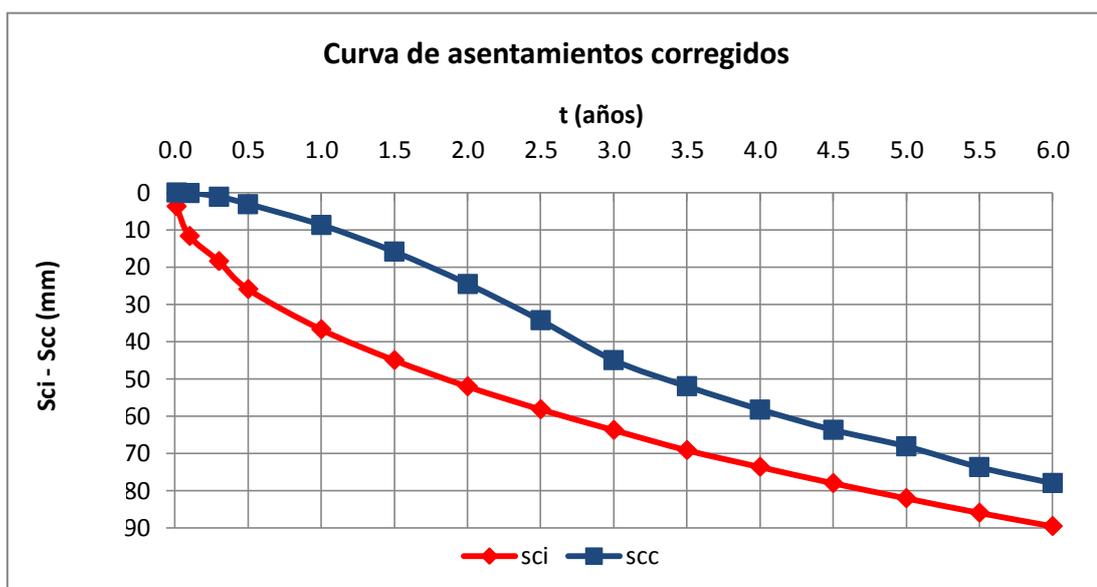
Ya hecho un cálculo para un tiempo determinado, ahora en el *Cuadro 4.2* se muestran todos los resultados para asentamientos corregidos.

| t (años) | Sci (mm) | Scs (mm) |
|----------|----------|----------|
| 0.01     | 3.8      | 0.0      |
| 0.10     | 11.7     | 0.1      |
| 0.30     | 18.5     | 1.1      |
| 0.50     | 26.0     | 3.1      |
| 1.00     | 36.8     | 8.7      |
| 1.50     | 45.0     | 15.9     |
| 2.00     | 52.1     | 24.5     |
| 2.50     | 58.2     | 34.3     |
| 3.00     | 63.8     | 45.0     |
| 3.50     | 69.2     | 52.0     |
| 4.00     | 73.7     | 58.2     |
| 4.50     | 78.0     | 63.7     |
| 5.00     | 82.1     | 68.1     |
| 5.50     | 86.0     | 73.7     |
| 6.00     | 89.6     | 78.0     |

Cuadro 4.2 VALORES PARA LA CURVA DE ASENTAMIENTOS CORREGIDOS

Fuente: El autor

En la *Gráfica 4.6*, se representan las parejas de valores  $t-S_{ci}$  y  $t-S_{cc}$  que definen la curva de asentamientos instantáneos y corregidos respetivamente.



Gráfica 4.6 CURVA DE ASENTAMIENTOS CORREGIDOS

Fuente: El autor

## 4.7 DISEÑO DE PILOTES HINCADOS Y PERFORADOS POR ESTADOS LÍMITES

### EJEMPLO DE APLICACIÓN:

En la *Figura 4.7*, se indica el perfil del subterráneo en un sitio donde se va a construir una edificación. Para lo cual se va a usar un grupo de pilotes hincados de punta cerrada de diámetro de 1.2 m, de la cual se va a realizar una comprobación de diseño en uno de los pilotes en donde es requerida una carga axial aplicada de 1000 KN.

El terreno está compuesto de dos estratos, el primero un estrato de arena de 7 m de espesor, con un peso específico de  $19 \text{ KN/m}^3$ , su densidad relativa es de 50% y un ángulo de fricción de  $28^\circ$ . El segundo un estrato de arcilla de 4 m de espesor, con un peso específico de  $16 \text{ KN/m}^3$ , su cohesión de  $25 \text{ KN/m}^2$ .

La comprobación se la va a realizar en base a las propiedades del suelo y diseño directo (ensayos in situ) de la siguiente manera:

En el estrato de arena se comprobará por capacidad friccional que el pilote hincado traspase todo su espesor, en el estrato de arcilla se hará por capacidad de punta que el pilote hincado traspase tres veces el diámetro. Determinar la resistencia friccional y de punta.

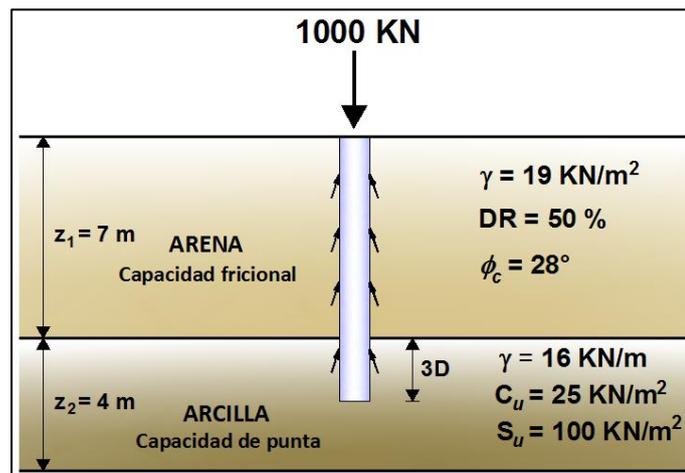


Figura 4.7 DATOS DEL EJEMPLO DE APLICACIÓN (Diseño de pilotes hincados y perforados por Estados Límites)

Fuente: El autor



**DATOS DEL EJEMPLO:**

Carga axial aplicada ( $Q$ ) = 1000 KN

Diámetro ( $D$ ) = 1.2 m

**Datos geotécnicos de la arena:**

Espesor ( $Z_1$ ) = 7 m

Peso específico ( $\gamma_1$ ) = 19 KN/m<sup>3</sup>

Densidad relativa ( $DR$ ) = 50%

Ángulo de fricción ( $\phi_c$ ) = 28°

**Datos geotécnicos de la arcilla:**

Espesor ( $Z_2$ ) = 4 m

Peso específico ( $\gamma_2$ ) = 16 KN/m<sup>3</sup>

Cohesión ( $C_u$ ) = 25 KN/m<sup>2</sup>

Resistencia al corte no drenada ( $S_u$ ) = 100 KN/m<sup>2</sup>

**Considerar las siguientes metodologías de diseño:**

- En base a las propiedades del suelo

$$(RF)_s = 0.37 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.66 \text{ [ASCE-7]}$$

$$FS = 2.8$$

- Diseño directo

$$(RF)_s = 0.51 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.50 \text{ [ASCE-7]}$$

$$FS = 2.5$$

**Además se considera los parámetros siguientes:**

Numero de golpes del ensayo SPT para la arcilla  $N_{SPT} = 20$

Los factores empíricos:

$$\alpha_1 = 2.8$$



$$K = 3.5$$

$$F_1 = 1.75$$

$$F_2 = 3.5$$

#### PROCEDIMIENTO:

##### a) En base a las propiedades del suelo

##### Capacidad friccional

Para el cálculo de la tensión vertical efectiva se utiliza la *Ecuación 55*.

$$\sigma'_v = Z \times \gamma$$

$$\sigma'_v = 7 \text{ m} \times 19 \text{ KN/m}^3$$

$$\sigma'_v = 133 \text{ KN/m}^2$$

Luego calculamos el valor del coeficiente de presión de tierra en reposo aplicando la *Ecuación 54*.

$$K_o = 1 - \text{sen}\phi_c$$

$$K_o = 1 - \text{sen}(28^\circ)$$

$$K_o = 0.53$$

La relación  $K_s/K_o$  se la calcula con la *Ecuación 53*, teniendo en cuenta la densidad relativa.

$$\frac{K_s}{K_o} = 7.2(0.0112D_R - 0.0141)$$

$$\frac{K_s}{K_o} = 7.2((0.0112 \times 50\%) - 0.0141)$$

$$\frac{K_s}{K_o} = 3.93$$



A partir de la *Ecuación 52* se determina la resistencia friccional unitaria, tomando en cuenta que  $\delta_c/\phi_c = 0.85$ .

$$f_s = \frac{K_s}{K_o} K_o \tan\left(\frac{\delta_c}{\phi_c} \phi_c\right) \sigma'_v$$

$$f_s = 3.93 \times 0.53 \times \tan(0.85 \times 28^\circ) \times 133 \frac{KN}{m^2}$$

$$f_s = 122.32 \text{ KN}$$

Ahora se calcula el área del fuste con la siguiente expresión:

$$A_s = \pi \times D \times Z$$

$$A_s = \pi \times 1.2 \text{ m} \times 7 \text{ m}$$

$$A_s = 26.39 \text{ m}^2$$

Finalmente se calcula el valor de la resistencia friccional con la *Ecuación 50*.

$$R_s = f_s \times a_s \times L$$

$$R_s = 122.32 \times 26.39 \text{ m}^2 \times 7 \text{ m}$$

$$R_s = 22596.17 \text{ KN}$$

### Capacidad de punta

Primero se calcula el área de la base del pilote con la siguiente expresión:

$$A_b = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$A_b = \frac{\pi \times (1.2 \text{ m})^2}{4}$$

$$A_b = 1.13 \text{ m}^2$$

A partir de la *Ecuación 76*, se determina la capacidad de carga última, tomando en cuenta que el factor de capacidad de carga tiene un valor para el



diseño de  $N_c = 12$  y la resistencia al corte no drenada (*Cuadro 3.10*) se ha escogido un valor de  $S_u = 100 \text{ KN/m}^2$ .

$$q_{b,10\%} = N_c S_u$$

$$q_{b,10\%} = 12 \times 100 \text{ KN/m}^2$$

$$q_{b,10\%} = \mathbf{1200 \text{ KN/m}^2}$$

Finalmente se calcula el valor de la resistencia de punta con la *Ecuación 51*.

$$R_b = q_{b,10\%} \times A_b$$

$$R_b = 1200 \text{ KN/m}^2 \times 1.13 \text{ m}^2$$

$$R_b = \mathbf{1356 \text{ KN}}$$

Ahora se realiza la comprobación del diseño con la *Ecuación 49*, teniendo en cuenta los factores de resistencia para resistencia friccional y de punta en metodologías del diseño, el factor de seguridad será de 2.8.

$$\begin{aligned} (RF)_s R_s + (RF)_b R_b &\geq \sum (FS)_i Q_i \\ (0.37 \times 22596.17 \text{ KN}) + (0.66 \times 1356 \text{ KN}) &\geq (2.8 \times 1000 \text{ KN}) \\ \mathbf{9255.54 \text{ KN}} &\geq \mathbf{2800 \text{ KN}} \end{aligned}$$

Por lo tanto, el Diseño por Estados límites es satisfactorio.

### ***b) Diseño directo***

#### **Capacidad friccional**

Primero debemos determinar el factor de capacidad de carga, para lo cual se utiliza la *Ecuación 59*.

$$N_q^* = 0.0000009365 \phi_c^6 - 0.0000770584 \phi_c^5 + 0.0025001813 \phi_c^4 - 0.0372952365 \phi_c^3 + 0.2710933088 \phi_c^2 - 0.6070519863 \phi_c + 1$$

$$N_q^* = 0.0000009365 \times 28^6 - 0.0000770584 \times 28^5 + 0.0025001813 \times 28^4 - 0.0372952365 \times 28^3 + 0.2710933088 \times 28^2 - 0.6070519863 \times 28 + 1$$



$$N_q^* = 39.67$$

A partir de la *Ecuación 58* se determina la resistencia de punta.

$$q_c = 50N_q^* \tan \phi_c$$

$$q_c = 50 \times 39.67 \times \tan(28^\circ)$$

$$q_c = 1054.72 \text{ KN/m}^2$$

Luego calculamos el valor de la resistencia friccional unitaria aplicando la *Ecuación 60*.

$$f_s = 0.02q_c$$

$$f_s = 0.02 \times 1054.72 \text{ KN/m}^2$$

$$f_s = 63.28 \text{ KN/m}^2$$

Finalmente se calcula el valor de la resistencia friccional con la *Ecuación 50*.

$$R_s = f_s \times a_s \times L$$

$$R_s = 63.28 \text{ KN/m}^2 \times 26.39 \text{ m}^2 \times 7 \text{ m}$$

$$R_s = 11689.71 \text{ KN}$$

### Capacidad de punta

Para calcular la capacidad de carga última se debe tomar en cuenta los factores empíricos (*Cuadro 3.12*) y el número de golpes del ensayo del SPT (*Cuadro 3.13*), con la *Ecuación 80* se determina  $n_b$ .

$$n_b = \frac{K}{F_1}$$

$$n_b = \frac{3.5}{1.75}$$

$$n_b = 2$$

Aplicando la *Ecuación 79*, se obtiene el valor de la capacidad de carga última.



$$q_{b,10\%} = n_b N_{SPT}$$

$$q_{b,10\%} = 2 \times 20$$

$$q_{b,10\%} = 40 \text{ KN/m}^2$$

Finalmente se calcula el valor de la resistencia de punta con la *Ecuación 51*.

$$R_b = q_{b,10\%} \times A_b$$

$$R_b = 40 \text{ KN/m}^2 \times 1.13 \text{ m}^2$$

$$R_b = 45.20 \text{ KN}$$

Ahora se realiza la comprobación del diseño con la *Ecuación 49*, teniendo en cuenta los factores de resistencia para resistencia friccional y de punta en metodologías del diseño, el factor de seguridad será de 2.5.

$$(RF)_s R_s + (RF)_b R_b \geq \sum (FS)_i Q_i$$

$$(0.51 \times 11689.71 \text{ KN}) + (0.50 \times 45.20 \text{ KN}) \geq (2.5 \times 1000 \text{ KN})$$

$$5984.35 \text{ KN} \geq 2500 \text{ KN}$$

Por lo tanto, el Diseño por Estados límites es satisfactorio.



# **CAPÍTULO V**

## **MANUALES DE USUARIO**



## 5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan los manuales de usuario de cada una de las herramientas, en los que se explica su funcionamiento, y además se describen las diferentes metodologías que se han utilizado para desarrollar dichas aplicaciones. Cada manual es independiente, por lo tanto la numeración de figuras, gráficas, cuadros y ecuaciones, lo es también.

### Disclaimer

El autor no se responsabiliza por la aplicación que se le dé al presente software y/o por perjuicios directos o indirectos que se deriven de resultados erróneos. El mismo ha sido desarrollado con fines investigativos, y su confiabilidad está aún en proceso de evaluación. El uso y aplicación del mismo queda bajo absoluta responsabilidad del usuario.

Si durante la aplicación de la herramienta “Análisis de Problemas Geotécnicos en Obras Civiles” hay algo que no parece funcionar correctamente, por favor informe sobre el problema a [jchurtado@utpl.edu.ec](mailto:jchurtado@utpl.edu.ec).

## 5.2 CÁLCULO DE: TENSIONES VERTICALES TOTALES, EFECTIVAS E INTERSTICIALES EN UN TERRENO ESTRATIFICADO

Esta herramienta se ha elaborado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúan las tensiones en el suelo en un terreno estratificado compuesto de tres estratos, que a su vez se apoya sobre un macizo rocoso impermeable, con el propósito de construir una losa de cimentación para lo cual se realizará una excavación. La presente herramienta permite determinar y graficar las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales antes y después de la excavación.

La metodología para el proceso de cálculo ha sido extraída del libro *Ejercicios resueltos de Geotecnia*, SÁNCHEZ Matías, 2008.



Para poder hacer uso de esta herramienta se deberá ingresar gratuitamente como usuario registrado del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line a través de la dirección [www.utpl.edu.ec/vleg](http://www.utpl.edu.ec/vleg), en la parte de ANÁLISIS.

Todo el entorno trabaja en forma dinámica, en donde el usuario ingresa a cualquiera de las herramientas disponibles en el portal y procede a digitar los datos necesarios para el cálculo correspondiente, para luego obtener los resultados.

A continuación se explica el correcto manejo de la herramienta así como también las metodologías empleadas en el proceso de cálculo, las cuales se aplican mediante un ejemplo guía.

### **Funcionamiento de la herramienta**

A continuación se realiza una breve descripción del funcionamiento de la herramienta:

- a) En la interfaz de la herramienta el usuario ingresa los datos, como son: *la profundidad del nivel freático NF y la profundidad de excavación PE*, luego ingresamos los datos geotécnicos del terreno como son: *el espesor  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  y el peso específico  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$  de cada uno de los estratos.*
- b) La herramienta permite cargar un ejemplo, con fines de ofrecer una guía para el correcto ingreso de datos, mediante el botón **EJEMPLO**.
- c) Mediante el botón **CALCULAR** se procesan todos los datos y finalmente se presentan los resultados.
- d) Si el usuario desea realizar otro análisis, la herramienta dispone de un botón con la descripción **LIMPIAR**, que permite recargar la página para poder ingresar los nuevos datos.

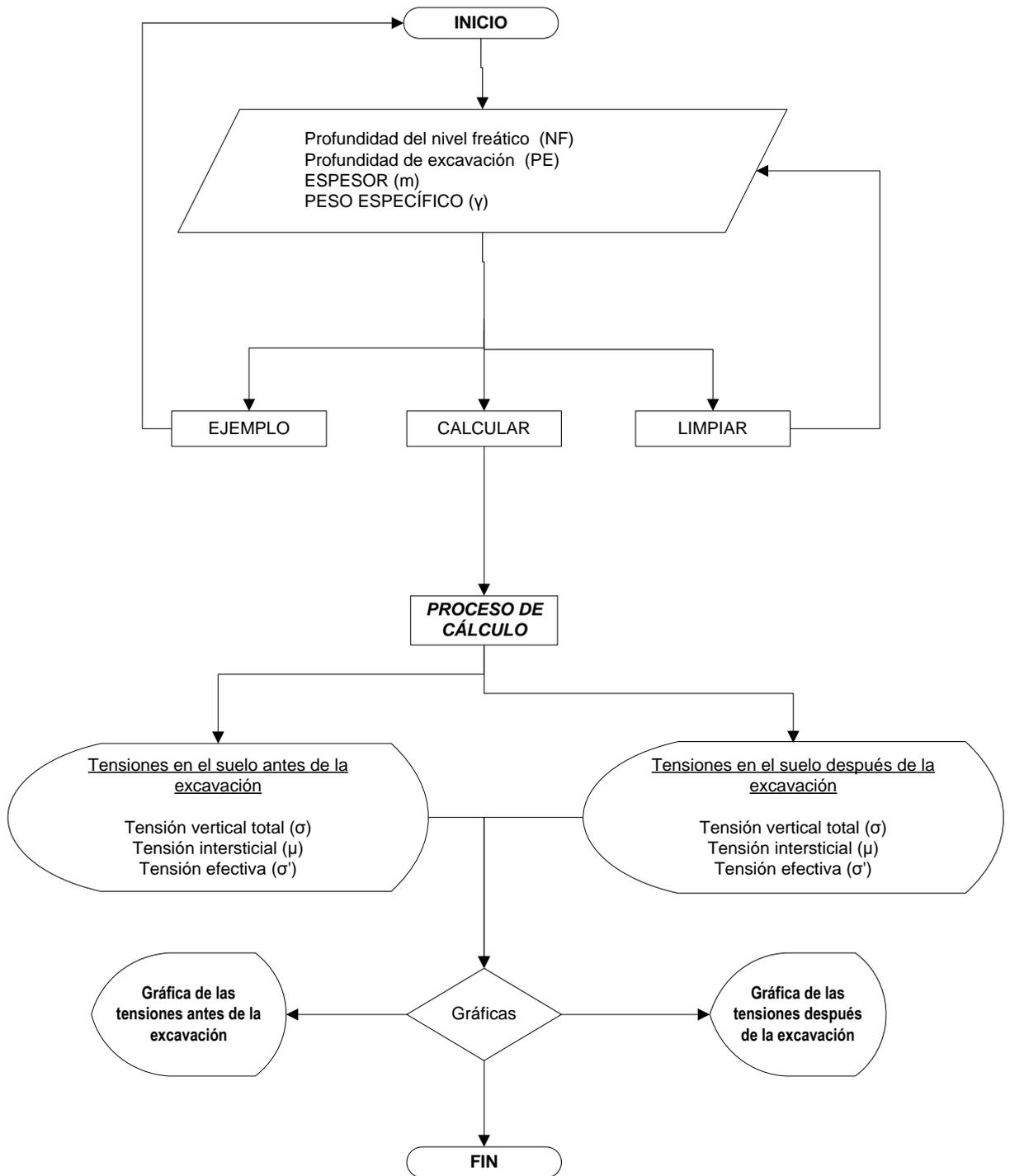


Figura 1. FLUJOGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

Fuente: El autor

## Limitaciones de la herramienta

La presente herramienta permite determinar exclusivamente las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales que actúan en un terreno estratificado compuesto de tres estratos y las gráficas de las tensiones en el suelo que se producen. Además permite almacenar y presentar las gráficas de las tensiones antes y después de la excavación simultáneamente hasta tres veces el ingreso de datos para realizar una comparación.

## Manejo de la herramienta

### - Paso 1: Ingreso de datos

Se procede a ingresar la profundidad del nivel freático y la profundidad de excavación. Luego se ingresan los datos geotécnicos de los estratos como son el espesor y el peso específico. Para ingresar los datos se recomienda observar las imágenes donde se muestra detalladamente el desarrollo de la herramienta, en la cual, se encuentra el perfil del terreno estratificado y la excavación a realizar, que se presenta en la parte derecha de la interfaz de ingreso de datos (Figura 2).

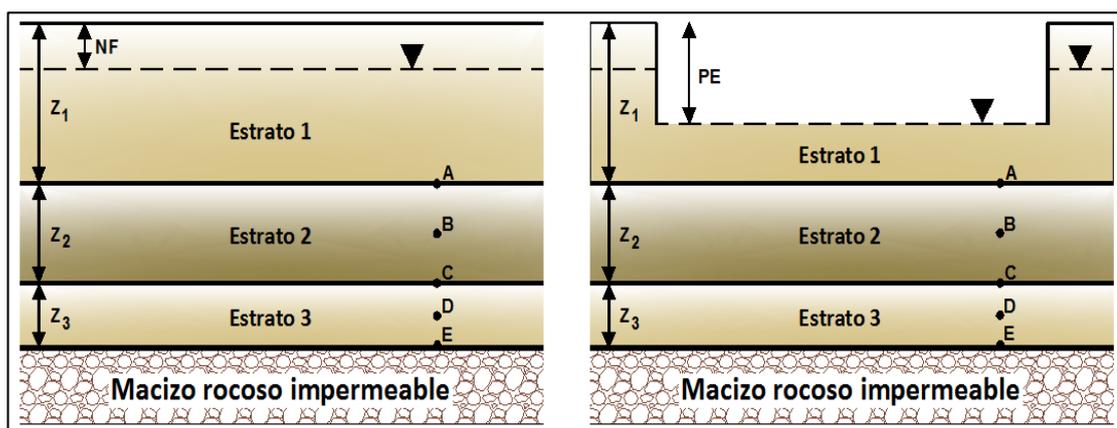


Figura 2. PERFIL DEL TERRENO ESTRATIFICADO Y EXCAVACIÓN A REALIZAR

Fuente: El autor

A continuación se describe el manejo de la herramienta, para lo cual se ha utilizado el ingreso de datos de un ejemplo guía (Figura 3).

**INGRESO DE DATOS**

Profundidad del nivel freatico (NF)  m

Profundidad de excavación (PE)  m

Figura 3. INGRESO DE DATOS

Fuente: El autor

Luego se ingresa los datos geotécnicos del terreno (Figura 4):

**DATOS GEOTÉCNICOS DEL TERRENO**

|           | ESPESOR<br>Z (m)               | PESO ESPECÍFICO<br>$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> ) |                                   |
|-----------|--------------------------------|--|-----------------------------------|
|           |                                | SECO   | SATURADO                          |
| Estrato 1 | <input type="text" value="8"/> | <input type="text" value="17"/>                  | <input type="text" value="18.5"/> |
| Estrato 2 | <input type="text" value="4"/> | <input type="text" value="18.8"/>                |                                   |
| Estrato 3 | <input type="text" value="2"/> | <input type="text" value="19.2"/>                |                                   |

Figura 4. DATOS GEOTÉCNICOS DEL TERRENO

Fuente: El autor

En el caso de que el usuario desconozca el valor del *Peso específico de algún estrato  $\gamma$* , la herramienta presenta un botón (Figura 4), que permite mostrar una tabla con valores recomendados para dicho parámetro de acuerdo a diferentes tipos de suelo (Cuadro1).



| PESOS UNITARIOS TÍPICOS ( $\gamma$ ) |                                       |  |   |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| Tipo de suelo                        | Clasificación<br>SUCS<br>(ASTM D2487) | Sobre el nivel<br>freático<br>(KN/m <sup>3</sup> ) | Bajo el nivel<br>freático<br>(KN/m <sup>3</sup> ) |
| Gravas mal gradadas                  | GP                                    | 17.5 - 20.5  | 19.5 - 22.0                                       |
| Gravas bien gradadas                 | GW                                    | 17.5 - 22.0  | 19.5 - 23.5                                       |
| Gravas limosas                       | GM                                    | 16.0 - 20.5  | 19.5 - 22.0                                       |
| Gravas arcillosas                    | GC                                    | 16.0 - 20.5  | 19.5 - 22.0                                       |
| Arenas mal gradadas                  | SP                                    | 15.0 - 19.5  | 19.0 - 21.0                                       |
| Arenas bien gradadas                 | SW                                    | 15.0 - 21.0  | 19.0 - 23.0                                       |
| Arenas limosas                       | SM                                    | 12.5 - 21.0  | 17.5 - 22.0                                       |
| Arenas arcillosas                    | SC                                    | 13.5 - 20.5  | 17.5 - 21.0                                       |
| Limos baja plasticidad               | ML                                    | 11.5 - 17.5  | 12.5 - 20.5                                       |
| Limos alta plasticidad               | MH                                    | 11.5 - 17.5  | 11.5 - 20.5                                       |
| Arcillas baja plasticidad            | CL                                    | 12.5 - 17.5  | 11.5 - 20.5                                       |
| Arcillas alta plasticidad            | CH                                    | 12.5 - 17.5  | 11.0 - 19.5                                       |

Cuadro 1. VALORES RECOMENDADOS DE PESOS ESPECÍFICOS TÍPICOS

Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

### - Paso 2: Ejecución de la herramienta

Esta herramienta dispone de un botón con la descripción **EJEMPLO**, que permite el ingreso de datos de un ejemplo guía, en caso que se desee hacerlo. El botón **CALCULAR** el cual permite ejecutar el proceso de cálculo para determinar *las tensiones en el suelo de un terreno estratificado*. Finalmente el botón con la descripción **LIMPIAR** que permite limpiar todos los datos para poder realizar un nuevo ejemplo (Figura 5).

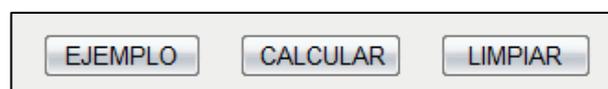


Figura 5. BOTONES EJEMPLO, CALCULAR Y LIMPIAR.

Fuente: El autor

### - Paso 3: Presentación de resultados

Una vez hecho el proceso de cálculo, se presentan los resultados de las tensiones en el suelo antes de la excavación (Figura 6).

**RESULTADOS**

*Tensiones en el suelo antes de la excavación*

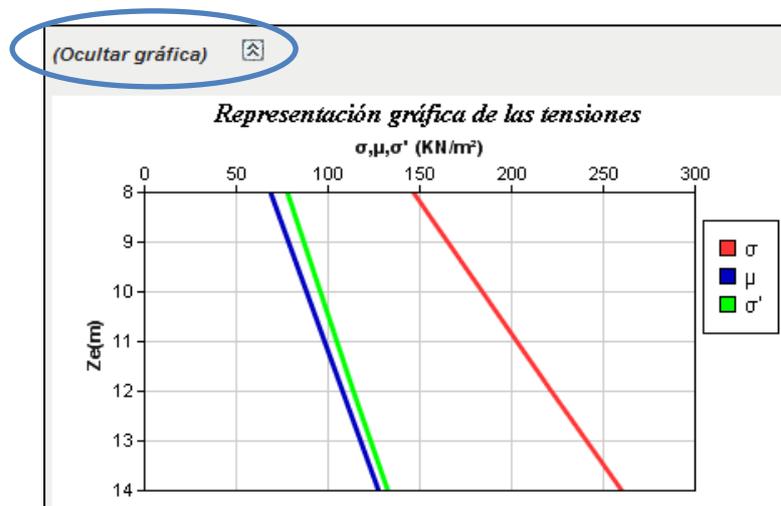
|                                     | Punto A | Punto B | Punto C | Punto D | Punto E |                   |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------|
| Tensión vertical total ( $\sigma$ ) | 146.5   | 184.1   | 221.7   | 240.9   | 260.1   | KN/m <sup>2</sup> |
| Tensión intersticial ( $\mu$ )      | 68.67   | 88.29   | 107.91  | 117.72  | 127.53  | KN/m <sup>2</sup> |
| Tensión efectiva ( $\sigma'$ )      | 77.83   | 95.81   | 113.79  | 123.18  | 132.57  | KN/m <sup>2</sup> |

(Ver gráfica)

Figura 6. RESULTADOS DE LAS TENSIONES EN EL SUELO ANTES DE LA EXCAVACIÓN

Fuente: El autor

En el caso de que el usuario desee conocer el valor de las tensiones en el suelo a cualquier profundidad, la herramienta presenta un link **ver gráfica** (Figura 6), que permite mostrar una gráfica en donde se muestra cómo actúan las tensiones en el suelo en el terreno estratificado, si el usuario desea ocultarla presiona el link **ocultar gráfica** (Gráfica 1).



Gráfica 1. GRÁFICA DE LAS TENSIONES EN EL SUELO ANTES DE LA EXCAVACIÓN

Fuente: El autor

Finalmente se presentan los resultados de las tensiones en el suelo después de la excavación (Figura 7).

**Tensiones en el suelo después de la excavación**

Descarga de las tensiones ( $\Delta\sigma$ )

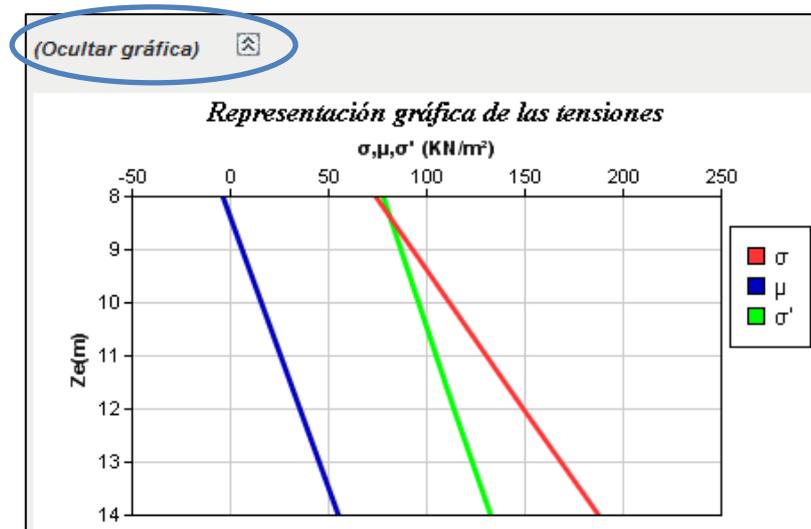
|                                     | Punto A                            | Punto B                            | Punto C                             | Punto D                             | Punto E                             |                         |
|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Tensión vertical total ( $\sigma$ ) | <input type="text" value="74"/>    | <input type="text" value="111.6"/> | <input type="text" value="149.2"/>  | <input type="text" value="168.4"/>  | <input type="text" value="187.6"/>  | <i>KN/m<sup>2</sup></i> |
| Tensión intersticial ( $\mu$ )      | <input type="text" value="-3.83"/> | <input type="text" value="15.79"/> | <input type="text" value="35.41"/>  | <input type="text" value="45.22"/>  | <input type="text" value="55.03"/>  | <i>KN/m<sup>2</sup></i> |
| Tensión efectiva ( $\sigma'$ )      | <input type="text" value="77.83"/> | <input type="text" value="95.81"/> | <input type="text" value="113.79"/> | <input type="text" value="123.18"/> | <input type="text" value="132.57"/> | <i>KN/m<sup>2</sup></i> |

(Ver gráfica)

Figura 7. RESULTADOS DE LAS TENSIONES EN EL SUELO DESPUÉS DE LA EXCAVACIÓN

Fuente: El autor

Al igual que el caso anterior si el usuario desee conocer el valor de las tensiones en el suelo a cualquier profundidad, la herramienta presenta un link **ver gráfica** (Figura 7), que permite mostrar una gráfica en donde se muestra cómo actúan las tensiones en el suelo en el terreno estratificado, si el usuario desea ocultarla presiona el link **ocultar gráfica** (Gráfica 2).



Gráfica 2. GRÁFICA DE LAS TENSIONES EN EL SUELO DESPUÉS DE LA EXCAVACIÓN

Fuente: El autor

### Descripción de la metodología empleada

El proceso de cálculo es el propuesto por el libro *Ejercicios resueltos de Geotecnia*, Matías Sánchez, 2008, la metodología consiste en realizar un análisis de las tensiones en el suelo producidas en el terreno estratificado

antes y después de realizar la excavación, con la finalidad de conocer el estado en el que se encuentra el suelo para la construcción de una losa de cimentación.

Para calcular las tensiones en el terreno estratificado aplicaremos el principio de tensión efectiva. Al realizar la excavación se produce una descarga de las tensiones en el suelo.

Este proceso se describe en las siguientes condiciones:

### - Tensiones en el suelo antes de la excavación

Las tensiones en el suelo como son la tensión total vertical, efectiva e intersticial se las calcula en cinco puntos significativos (Figura 8) con el principio de tensión efectiva propuesto por Terzagui.

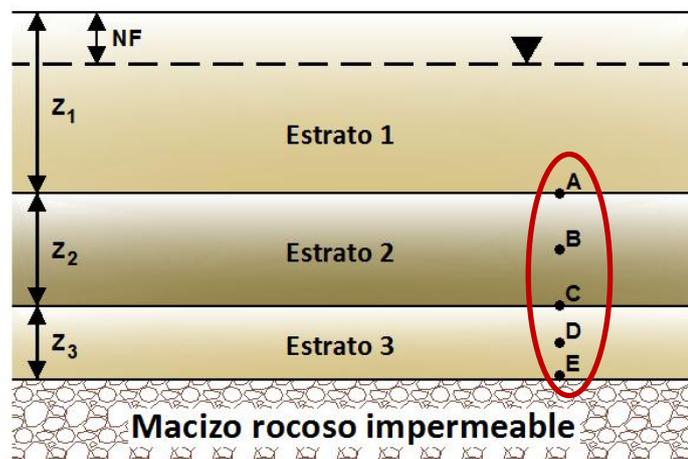


Figura 8. PUNTOS DE ANÁLISIS PARA EL CÁLCULO DE LAS TENSIONES.

Fuente: El autor

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

Ec. 1

Donde:

$\sigma'$  = tensión efectiva (KN/m<sup>2</sup>)



$\sigma =$  tensión vertical total ( $\text{KN}/\text{m}^2$ )

$\mu =$  tensión intersticial ( $\text{KN}/\text{m}^2$ )

Para los cinco puntos se utiliza la *Ecuación 1*. Ahora definiremos la expresión para la tensión total vertical.

$$\sigma = \sum \gamma \times Z$$

Ec. 2

Donde:

$\sigma =$  tensión total vertical ( $\text{KN}/\text{m}^2$ )

$\gamma =$  peso específico del estrato ( $\text{KN}/\text{m}^3$ )

$Z =$  profundidad de análisis (m)

La profundidad de análisis  $Z$  (Figura 9), es aquella distancia desde la superficie del terreno hasta cada uno de los puntos de análisis. Como resultado los puntos se ubicarán ya sea al final del estrato o en el centro del mismo.

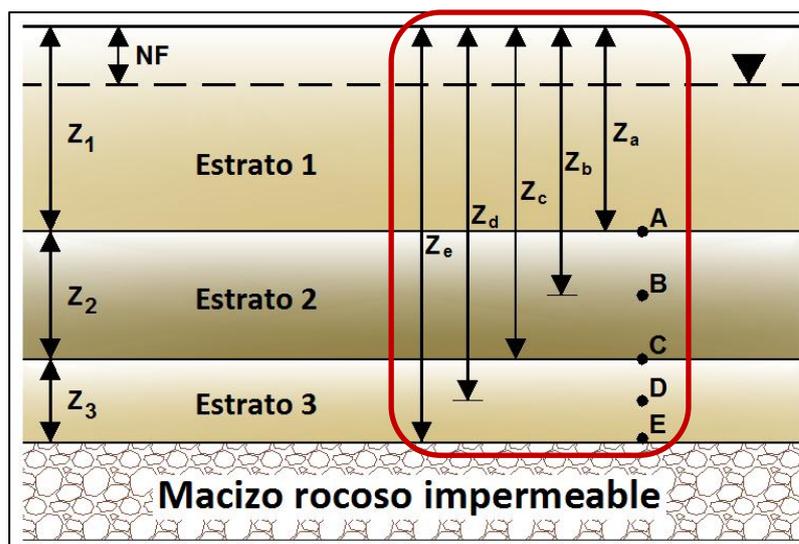


Figura 9. PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS.

Fuente: El autor

Ahora definiremos la expresión para la tensión intersticial.

$$\mu = \gamma_w \times (Z - NF) \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$\mu$  = tensión intersticial ( $\text{KN/m}^2$ )

$\gamma_w$  = peso específico del agua ( $\text{KN/m}^3$ )

$Z$  = profundidad de análisis (m)

$NF$  = profundidad del nivel freático (m)

Para construir la gráfica de las tensiones antes de la excavación se ubica en el eje de las X las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales y en el eje de las Y se ubica la profundidad de análisis.

#### - Tensiones en el suelo después de la excavación

Las tensiones en el suelo para este caso será el mismo que el anterior aplicando el principio de tensión efectiva propuesto por Terzagui. Se calculará en cinco puntos significativos (Figura 10) con la única diferencia que se restará la *descarga de las tensiones* ( $\Delta\sigma$ ) o zona de excavación en cada una de las tensiones totales verticales, efectivas e intersticiales (Figura 10).

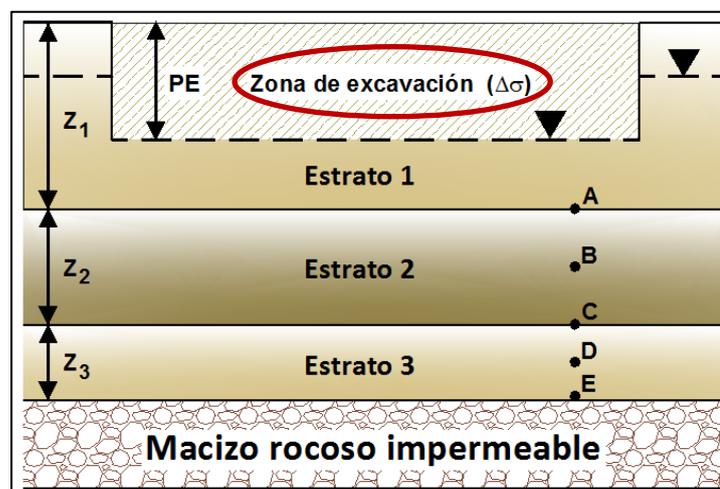


Figura 10. DESCARGA DE LAS TENSIONES.

Fuente: El autor



Al realizar la excavación, se produce una descarga de las tensiones que se la obtiene con la siguiente expresión:

$$\Delta\sigma = \gamma \times PE \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$\Delta\sigma$  = descarga de las tensiones (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  = peso específico del estrato (KN/m<sup>3</sup>)

$PE$  = profundidad de excavación (m)

Ya realizada la excavación se obtendrá la siguiente expresión para calcular la tensión vertical total para los cinco puntos de análisis.

$$\sigma = [\sum \gamma \times Z] - \Delta\sigma \quad \text{Ec. 5}$$

Ahora definiremos la expresión para la tensión intersticial.

$$\mu = (\gamma_w \times Z) - \Delta\sigma \quad \text{Ec. 6}$$

Con la Ecuación 1 se obtiene las tensiones efectivas.

Para construir la gráfica de las tensiones después de la excavación se ubica en el eje de las X las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales y en el eje de las Y se ubica la profundidad de análisis.

### 5.3 CÁLCULO DE: TENSIONES VERTICALES TOTALES, EFECTIVAS E INTERSTICIALES BAJO LA CIMENTACIÓN DEL PILÓN DE UN PUENTE

Esta herramienta se ha diseñado con la finalidad de conocer si la estructura del pílón va a sufrir un asentamiento cuando el nivel del agua del río varía con la superficie del estrato, para lo cual se realiza un análisis de cómo actúan las



tensiones en el suelo bajo la cimentación de un pilón de un puente de hormigón armado que a su vez se cimenta en el cauce de un río apoyándose sobre la superficie de un estrato. El nivel de agua en el río puede variar sobre la superficie del estrato. La presente herramienta permite determinar las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales a cualquier profundidad bajo el centro de la cimentación del pilón, en las siguientes condiciones: cuando el nivel de agua en el río coincide con la superficie del estrato y cuando el nivel de agua en el río está sobre la superficie del estrato.

La metodología para el proceso de cálculo ha sido extraída del libro “Ejercicios resueltos de Geotecnia”, SÁNCHEZ Matías, 2008.

Para poder hacer uso de esta herramienta se deberá ingresar gratuitamente como usuario registrado del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line a través de la dirección [www.utpl.edu.ec/vleg](http://www.utpl.edu.ec/vleg), en la parte de ANÁLISIS.

Todo el entorno trabaja en forma dinámica, en donde el usuario ingresa a cualquiera de las herramientas disponibles en el portal y procede a digitar los datos necesarios para el cálculo correspondiente, para luego obtener los resultados.

A continuación se explica el correcto manejo de la herramienta así como también las metodologías empleadas en el proceso de cálculo, las cuales se aplican mediante un ejemplo guía.

### **Funcionamiento de la herramienta**

A continuación se realiza una breve descripción del funcionamiento de la herramienta:

e) En la interfaz de la herramienta el usuario ingresa los datos, como son: la altura del pilón  $H_{pilón}$ , el área de apoyo del pilón  $A$ , la carga transmitida  $P_{Tab}$ ,



el peso específico del estrato  $\gamma_e$ , el espesor del estrato  $Z_e$  y finalmente la altura de nivel de agua del río sobre la superficie del estrato  $Z_s$ .

- f) La herramienta permite cargar un ejemplo, con fines de ofrecer una guía para el correcto ingreso de datos, mediante el botón **EJEMPLO**.
- g) Mediante el botón **CALCULAR** se procesan todos los datos y finalmente se presentan los resultados.
- h) Si el usuario desea realizar otro análisis, la herramienta dispone de un botón con la descripción **LIMPIAR**, que permite recargar la página para poder ingresar los nuevos datos.

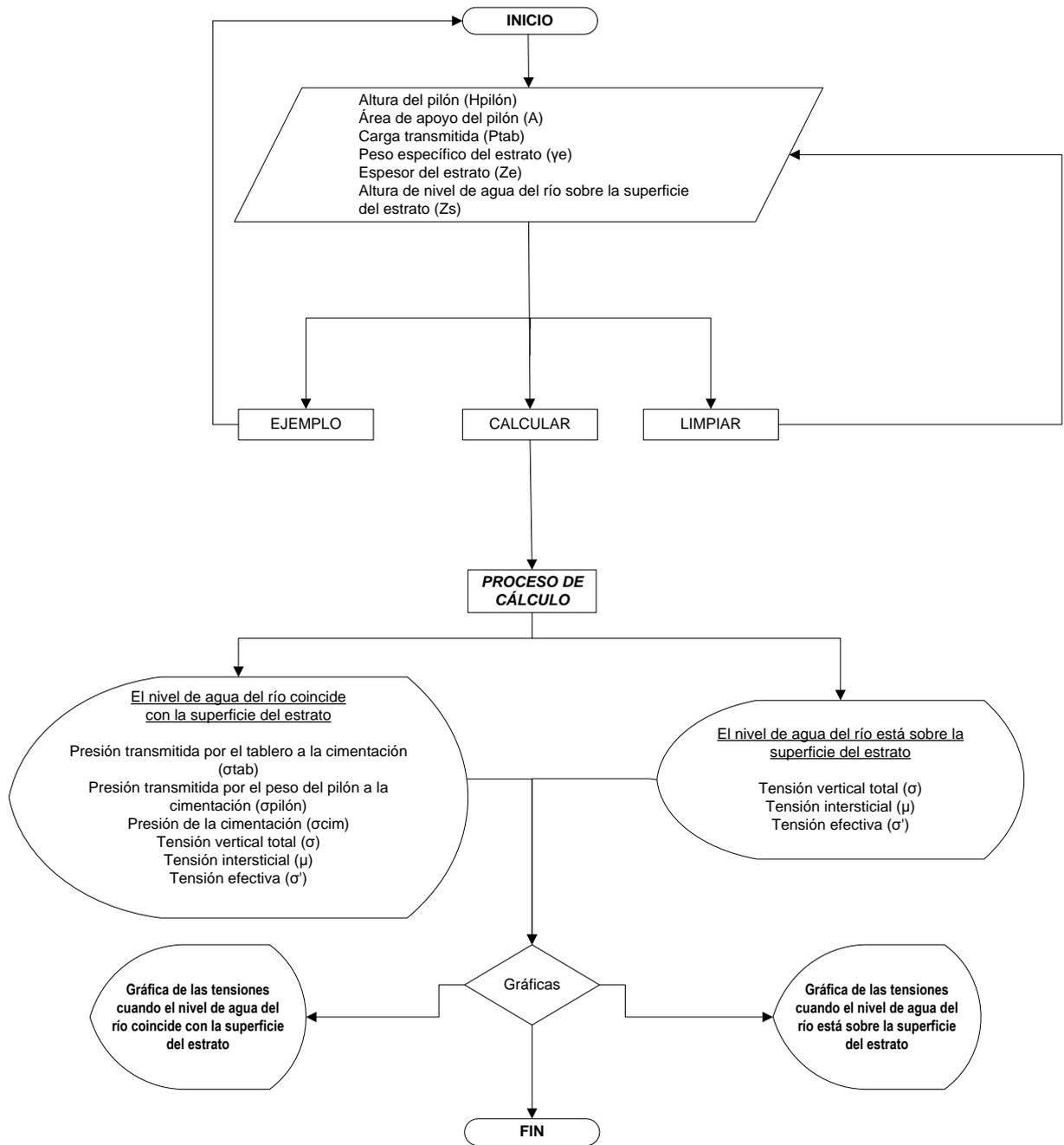


Figura 1. FLUJOGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

Fuente: El autor

### Limitaciones de la herramienta

La presente herramienta permite determinar exclusivamente las tensiones en el suelo que actúan bajo el centro de la cimentación a cualquier profundidad del estrato que se apoya el pilón y las gráficas de las tensiones en el suelo que se producen.

## Manejo de la herramienta

### - Paso 1: Ingreso de datos

Se procede a ingresar los datos geométricos del pilón y los datos geotécnicos del estrato. Para ingresar los datos, se recomienda observar las dos imágenes donde se muestra detalladamente el desarrollo de la herramienta, en la cual, se encuentra el nivel de agua en el río coincide con la superficie del estrato y el nivel de agua en el río está sobre la superficie del estrato (Figura 2).

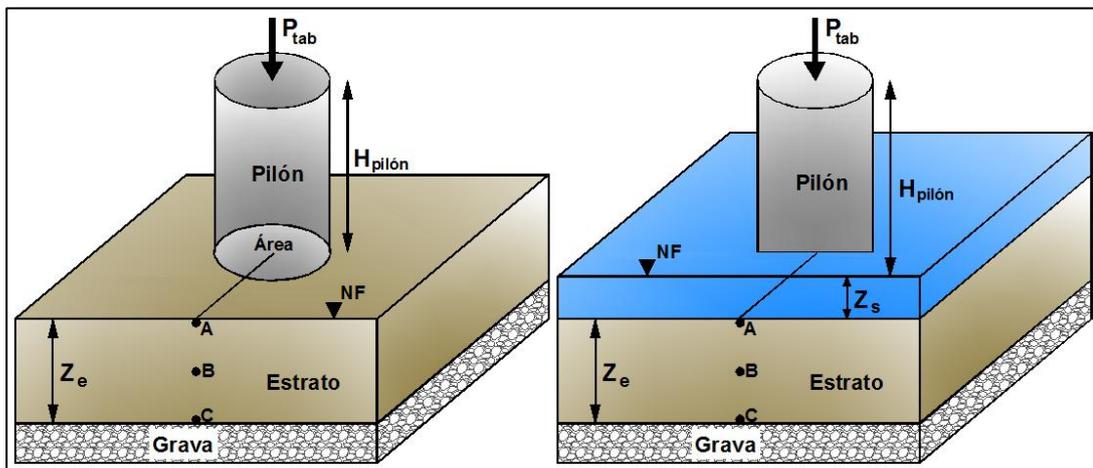


Figura 2. PERFIL DEL TERRENO, ESQUEMA DEL PILAR Y NIVEL DE AGUA

Fuente: El autor

A continuación se describe la interfaz de la herramienta, para lo cual se ha utilizado el ingreso de datos de un ejemplo guía.

| INGRESO DE DATOS  |  |
|---|--|
| Altura del pilón ( $H_{pilón}$ )  | <input type="text" value="8"/> m         |
| Area de apoyo del pilón (A)   | <input type="text" value="10"/> $m^2$    |
| Carga transmitida ( $P_{tab}$ )   | <input type="text" value="1500"/> KN     |
| Peso específico del estrato ( $\gamma_e$ )                                | <input type="text" value="20"/> $KN/m^3$ |
| Espesor del estrato ( $Z_e$ )   | <input type="text" value="5"/> m         |
| Altura de nivel de agua del río sobre la superficie del estrato ( $Z_s$ ) | <input type="text" value="3"/> m         |

Figura 3. INGRESO DE DATOS

Fuente: El autor

En el caso de que el usuario desconozca el valor del *Peso específico del estrato*  $\gamma_e$ , la herramienta presenta un botón (Figura 3), que permite mostrar una tabla con valores recomendados para dicho parámetro de acuerdo a diferentes tipos de suelo (Cuadro 1).



| PESOS UNITARIOS TÍPICOS ( $\gamma$ ) |                                       |  |   |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| Tipo de suelo                        | Clasificación<br>SUCS<br>(ASTM D2487) | Sobre el nivel<br>freático<br>(KN/m <sup>3</sup> ) | Bajo el nivel<br>freático<br>(KN/m <sup>3</sup> ) |
| Gravas mal gradadas                  | GP                                    | 17.5 - 20.5  | 19.5 - 22.0                                       |
| Gravas bien gradadas                 | GW                                    | 17.5 - 22.0  | 19.5 - 23.5                                       |
| Gravas limosas                       | GM                                    | 16.0 - 20.5  | 19.5 - 22.0                                       |
| Gravas arcillosas                    | GC                                    | 16.0 - 20.5  | 19.5 - 22.0                                       |
| Arenas mal gradadas                  | SP                                    | 15.0 - 19.5  | 19.0 - 21.0                                       |
| Arenas bien gradadas                 | SW                                    | 15.0 - 21.0  | 19.0 - 23.0                                       |
| Arenas limosas                       | SM                                    | 12.5 - 21.0  | 17.5 - 22.0                                       |
| Arenas arcillosas                    | SC                                    | 13.5 - 20.5  | 17.5 - 21.0                                       |
| Limos baja plasticidad               | ML                                    | 11.5 - 17.5  | 12.5 - 20.5                                       |
| Limos alta plasticidad               | MH                                    | 11.5 - 17.5  | 11.5 - 20.5                                       |
| Arcillas baja plasticidad            | CL                                    | 12.5 - 17.5  | 11.5 - 20.5                                       |
| Arcillas alta plasticidad            | CH                                    | 12.5 - 17.5  | 11.0 - 19.5                                       |

Cuadro 1. VALORES RECOMENDADOS DE PESOS ESPECÍFICOS TÍPICOS

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

### - Paso 2: Ejecución de la herramienta

Esta herramienta dispone de un botón con la descripción **EJEMPLO**, que permite cargar los datos de un ejemplo guía, en caso que se desee hacerlo. El botón **CALCULAR** el cual permite ejecutar el proceso de cálculo para determinar las *tensiones en el suelo bajo la cimentación del pilón de un puente*. Finalmente el botón con la descripción **LIMPIAR** que permite limpiar todos los datos para poder realizar un nuevo ejemplo (Figura 4).

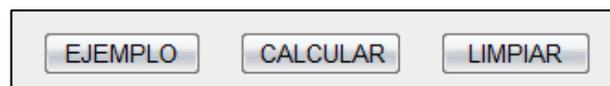


Figura 4. BOTONES EJEMPLO, CALCULAR Y LIMPIAR.

Fuente: El autor

### - Paso 3: Presentación de resultados

Una vez hecho el proceso de cálculo, se presentan los resultados para las dos condiciones. En la primera se encuentran los resultados como: presión transmitida por el tablero a la cimentación, presión transmitida por el peso del pilón a la cimentación, presión de la cimentación y las tensiones (Figura 5).

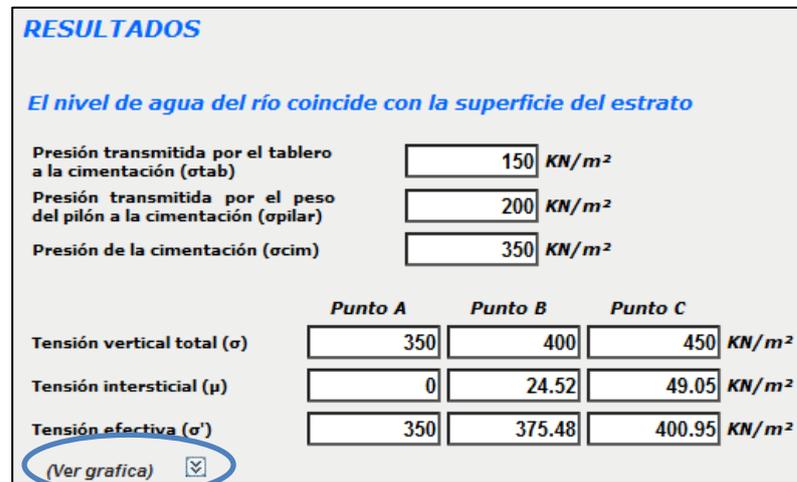
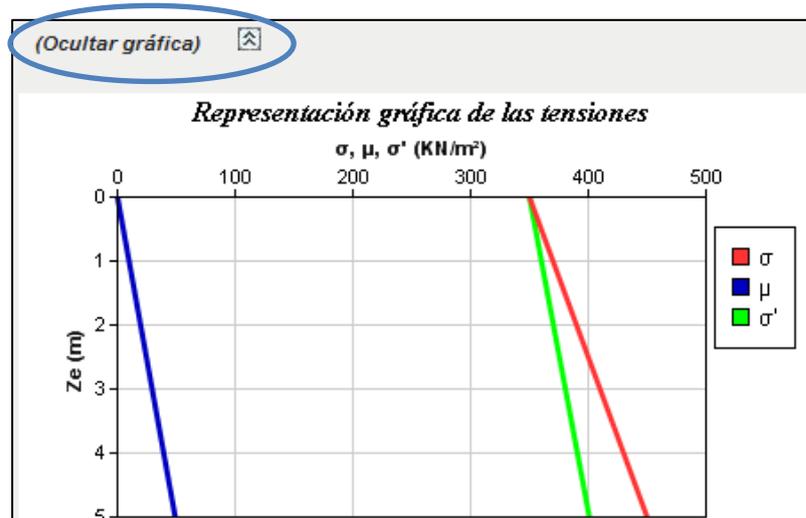


Figura 5. RESULTADOS CUANDO EL NIVEL DE AGUA COINCIDE CON LA SUPERFICIE DEL ESTRATO

Fuente: El autor

En el caso de que el usuario desee conocer el valor de las tensiones en el suelo a cualquier profundidad, la herramienta presenta un link **ver gráfica** (Figura 5), que permite mostrar una gráfica en donde se muestra cómo actúan las tensiones en el suelo en todo el espesor del estrato, si el usuario desea ocultarla presiona el link **ocultar gráfica** (Gráfica 1).



Gráfica 1. GRÁFICA DE LAS TENSIONES CUANDO EL NIVEL DE AGUA COINCIDE CON LA SUPERFICIE DEL ESTRATO

Fuente: El autor

En la segunda condición se encuentran los resultados de las tensiones en el suelo (Figura 6).

*El nivel de agua del río está sobre la superficie del estrato*

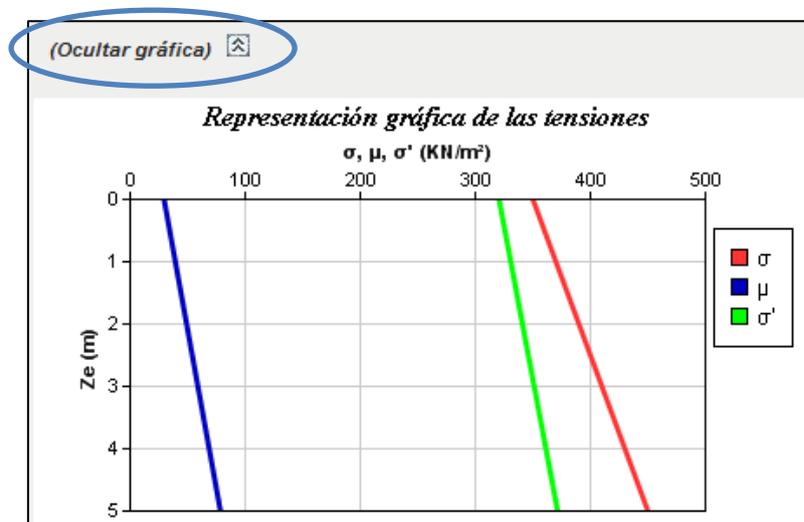
|                                     | Punto A | Punto B | Punto C |          |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|----------|
| Tensión vertical total ( $\sigma$ ) | 350     | 400     | 450     | $KN/m^2$ |
| Tensión intersticial ( $\mu$ )      | 29.43   | 53.96   | 78.48   | $KN/m^2$ |
| Tensión efectiva ( $\sigma'$ )      | 320.57  | 346.04  | 371.52  | $KN/m^2$ |

(Ver gráfica)

Figura 6. RESULTADOS CUANDO EL NIVEL DE AGUA ESTÁ SOBRE LA SUPERFICIE DEL ESTRATO

Fuente: El autor

Al igual que el caso anterior si el usuario desee conocer el valor de las tensiones en el suelo a cualquier profundidad, la herramienta presenta un link **ver gráfica** (Figura 6), que permite mostrar una gráfica en donde se muestra cómo actúan las tensiones en el suelo en todo el espesor del estrato, si el usuario desea ocultarla presiona el link **ocultar gráfica** (Gráfica 2).



Gráfica 2. GRÁFICA DE LAS TENSIONES CUANDO EL NIVEL DE AGUA ESTÁ SOBRE LA SUPERFICIE DEL ESTRATO

Fuente: El autor

## Descripción de la metodología empleada

El proceso de cálculo es el propuesto por el libro *Ejercicios resueltos de Geotecnia*, SÁNCHEZ Matías, 2008, la metodología consiste en realizar un análisis de las tensiones producidas en el estrato cuando el nivel de agua varía con respecto a la superficie.

Para calcular las tensiones en el estrato aplicaremos el principio de tensión efectiva propuesto por Terzaghi. En la tensión total vertical se adicionará la presión aportada por el pilón y el tablero.

Este proceso se describe en las siguientes condiciones:

### - Cuando el nivel de agua del río coincide con la superficie del estrato

Las tensiones en el suelo como son la tensión total vertical, efectiva e intersticial se las calcula en tres puntos significativos (*Figura 7*) con el principio de tensión efectiva propuesto por Terzagui.

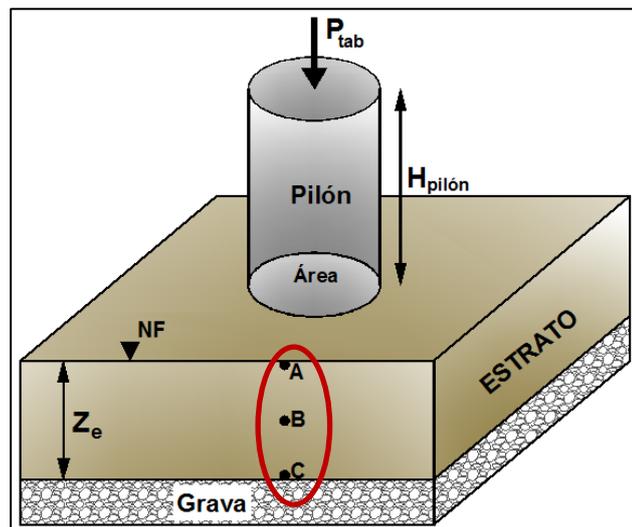


Figura 7. PUNTOS DE ANÁLISIS PARA EL CÁLCULO DE LAS TENSIONES.

Fuente: El autor

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

Ec. 1

Donde:



$\sigma'$  = tensión efectiva (KN/m<sup>2</sup>)

$\sigma$  = tensión vertical total (KN/m<sup>2</sup>)

$\mu$  = tensión intersticial (KN/m<sup>2</sup>)

Para los tres puntos se utiliza la *Ecuación 1*. Ahora definiremos la expresión para la tensión total vertical.

$$\sigma = \gamma_e \times Z$$

Ec. 2

Donde:

$\sigma$  = tensión total vertical (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_e$  = peso específico del estrato (KN/m<sup>3</sup>)

$Z$  = profundidad de análisis (m)

La profundidad de análisis  $Z$  (Figura 8), es aquella distancia desde la superficie del estrato hasta cada uno de los puntos de análisis. Como resultado el *punto A* será siempre cero al coincidir con la superficie del estrato, el *punto B* será la mitad del espesor del estrato y el *punto C* será la distancia del espesor del estrato.

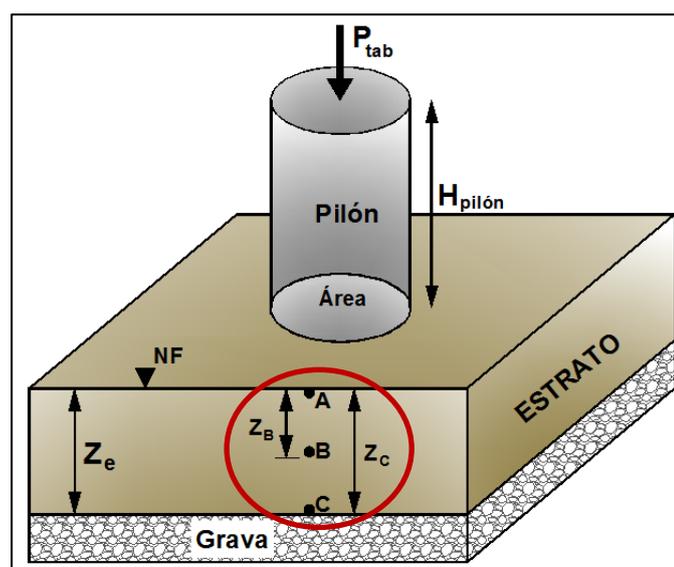


Figura 8. PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS.

Fuente: El autor



Como ya se indicó anteriormente para calcular la tensión total vertical se adicionará la tensión de la cimentación aportada por el pilón y el tablero cuyas expresiones son las siguientes:

$$\sigma_{tab} = \frac{P_{tab}}{A} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$\sigma_{tab}$  = presión transmitida por el tablero a la cimentación (KN/m<sup>2</sup>)

$P_{tab}$  = carga transmitida (KN)

$A$  = área de apoyo del pilón (m<sup>2</sup>)

$$\sigma_{pilón} = \frac{W_{pilón}}{A} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$\sigma_{pilón}$  = presión transmitida por el peso del pilón a la cimentación (KN/m<sup>2</sup>)

$W_{pilón}$  = carga del pilón (KN)

$A$  = área de apoyo del pilón (m<sup>2</sup>)

$$\sigma_{cim} = \sigma_{tab} + \sigma_{pilón} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$\sigma_{cim}$  = presión transmitida a la cimentación (KN/m<sup>2</sup>)

Ya obtenidas las presiones aplicadas a la cimentación se indicará la expresión para el cálculo de la tensión total vertical.

$$\sigma = \sigma_{cim} + (\gamma_e \times Z) \quad \text{Ec. 6}$$

Ahora definiremos la expresión para la tensión intersticial.

$$\mu = \gamma_w \times Z$$

Ec. 7

Donde:

$\mu$  = tensión intersticial ( $\text{KN/m}^2$ )

$\gamma_w$  = peso específico del agua ( $\text{KN/m}^3$ )

$Z$  = profundidad de análisis (m)

Para construir la gráfica de las tensiones cuando el nivel de agua del río coincide con la superficie del estrato se ubica en el *eje de las X* las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales y en el *eje de las Y* se ubica la profundidad de análisis.

#### - Cuando el nivel de agua del río está sobre la superficie del estrato

Las tensiones en el suelo para este caso será el mismo que el anterior aplicando el principio de tensión efectiva propuesto por Terzagui. Se calculará en tres puntos significativos (*Figura 7*) con la única diferencia que en la tensión intersticial se aumentará la altura de nivel de agua del río sobre la superficie del estrato  $Z_s$  (*Figura 9*).

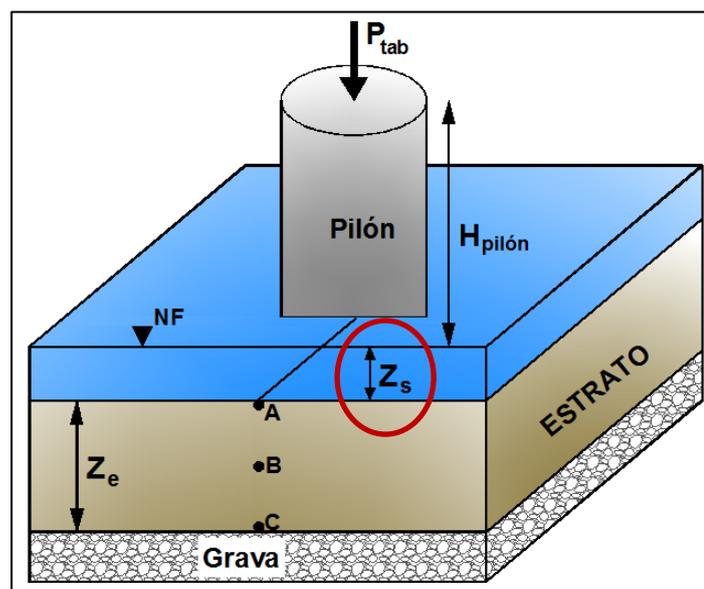


Figura 9. ALTURA DE NIVEL DE AGUA DEL RÍO.

Fuente: El autor



$$\mu = \gamma_w \times (Z + Z_s)$$

Ec. 8

Donde:

$Z_s$  = altura de nivel de agua del río (m)

Para construir la gráfica de las tensiones cuando el nivel de agua del río está sobre la superficie del estrato se ubica en el *eje de las X* las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales y en el *eje de las Y* se ubica la profundidad de análisis.

#### **5.4 CÁLCULO DE: FACTOR DE SEGURIDAD EMPLEADO EN EL LEVANTAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS**

Esta herramienta se ha diseñado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúan las tensiones en el suelo cuando se desea construir una edificación sobre una losa de cimentación que transmite presión uniforme sobre el terreno, para esto se necesita realizar una excavación en el estrato arcilloso apoyado sobre un estrato de arena gruesa que contiene agua subterránea, para esto se han tomado datos de campo. Un piezómetro insertado en el contacto arcilla - arena gruesa el mismo que registra el nivel de agua artesisiana sobre la superficie del terreno. La presente herramienta permite determinar el caudal que se filtra hacia la superficie del terreno y el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos al finalizar la excavación y después de construir la losa de cimentación.

La metodología para el proceso de cálculo ha sido extraída del libro *Ejercicios resueltos de Geotecnia*, SÁNCHEZ Matías, 2008.

Para poder hacer uso de esta herramienta se deberá ingresar gratuitamente como usuario registrado del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía



on-line a través de la dirección [www.utpl.edu.ec/vleg](http://www.utpl.edu.ec/vleg), en la parte de ANÁLISIS/Ejercicios de geotecnia.

Todo el entorno trabaja en forma dinámica, en donde el usuario ingresa a cualquiera de las herramientas disponibles en el portal y procede a digitar los datos necesarios para el cálculo correspondiente, para luego obtener los resultados.

A continuación se explica el correcto manejo de la herramienta así como también las metodologías empleadas en el proceso de cálculo, las cuales se aplican mediante un ejemplo guía.

### **Funcionamiento de la herramienta**

A continuación se realiza una breve descripción del funcionamiento de la herramienta:

- a) En la interfaz de la herramienta el usuario ingresa los datos, como son: *el espesor de la arcilla  $Z_a$ , el peso específico relativo  $G_s$ , el contenido de humedad  $W$ , el coeficiente de permeabilidad  $K$ , el nivel de agua artesiana sobre la superficie del terreno  $h$ , la profundidad de excavación  $PE$ , y finalmente la presión uniforme de cimentación  $\sigma_{cim}$ .*
- b) La herramienta permite cargar un ejemplo, con fines de ofrecer una guía para el correcto ingreso de datos, mediante el botón **EJEMPLO**.
- c) Mediante el botón **CALCULAR** se procesan todos los datos y finalmente se presentan los resultados.
- d) Si el usuario desea realizar otro análisis, la herramienta dispone de un botón con la descripción **LIMPIAR**, que permite recargar la página para poder ingresar los nuevos datos.

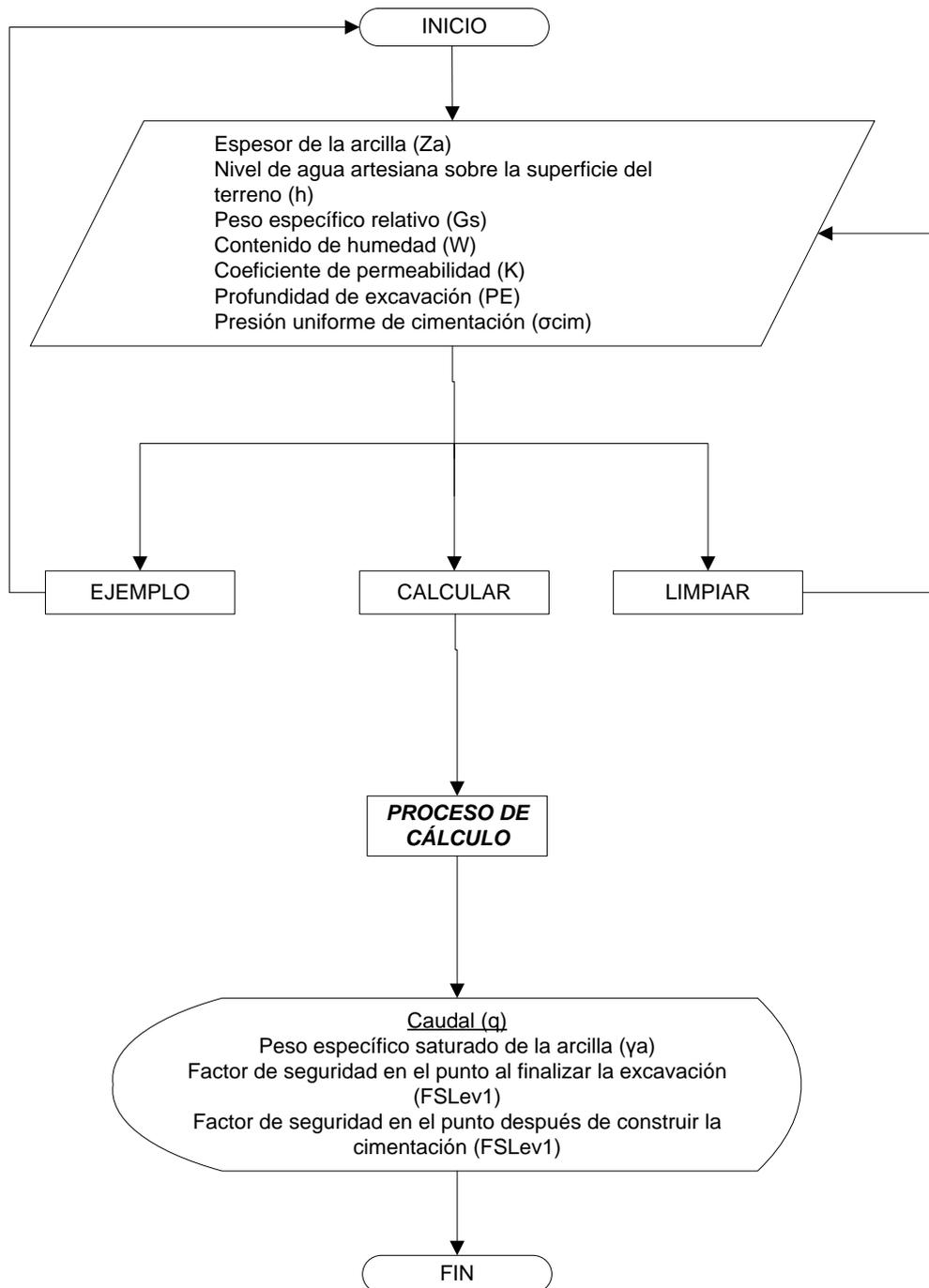


Figura 1. FLUJOGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

Fuente: El autor

### Limitaciones de la herramienta

La presente herramienta permite determinar exclusivamente el caudal que se filtra hacia la superficie del terreno y el factor de seguridad empleado en el



levantamiento de suelos arcillosos al finalizar la excavación y después de construir la cimentación.

### Manejo de la herramienta

#### - Paso 1: Ingreso de datos

Se procede a ingresar los datos geotécnicos de la arcilla. Para ingresar los datos geotécnicos de la arcilla, se recomienda observar las dos imágenes donde se muestra detalladamente el desarrollo de la herramienta, en la cual, se encuentra el perfil del terreno con el análisis piezométrico, la excavación y la cimentación, que se presenta en la parte derecha de la interfaz de ingreso de datos (Figura 2).

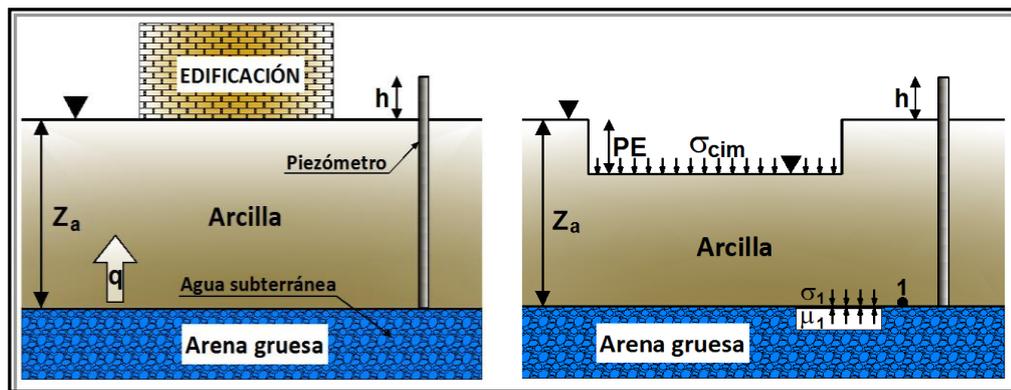


Figura 2. PERFIL DEL TERRENO, ANÁLISIS PIEZOMÉTRICO, EXCAVACIÓN Y CIMENTACIÓN

Fuente: El autor

A continuación se describe el manejo de la herramienta, para lo cual se ha utilizado el ingreso de datos de un ejemplo guía.

| INGRESO DE DATOS  |                       |
|---|-----------------------|
| Espesor de la arcilla ( $Z_a$ )                                 | 10 m                  |
| Nivel de agua artésiana sobre la superficie del terreno ( $h$ ) | 2.5 m                 |
| Peso específico relativo ( $G_s$ ) [2.70 - 2.80]                | 2.65                  |
| Contenido de humedad ( $W$ )                                    | 25 %                  |
| Coefficiente de permeabilidad ( $K$ )                           | 0.0000002 m/s         |
| Profundidad de excavación (PE)                                  | 3 m                   |
| Presión uniforme de cimentación ( $\sigma_{cim}$ )              | 150 KN/m <sup>2</sup> |

Figura 3. INGRESO DE DATOS

Fuente: El autor

En el caso de que el usuario desconozca el valor del *Coefficiente de permeabilidad K*, la herramienta presenta un botón (Figura 3), que permite mostrar una tabla con valores recomendados para dichos parámetros de acuerdo a diferentes tipos de arcilla (Cuadro 1).



| PERMEABILIDAD EN LAS ARCILLAS (k) |                                       |   |
|-----------------------------------|---------------------------------------|---|
| Tipo de suelo                     | Clasificación<br>SUCS<br>(ASTM D2487) | Coefficiente de<br>permeabilidad<br>(m/s) |
| Limos baja plasticidad            | ML                                    | $10^{-5} < K < 10^{-8}$                   |
| Limos alta plasticidad            | MH                                    | $10^{-6} < K < 10^{-8}$                   |
| Arcillas baja plasticidad         | CL                                    | $10^{-8} < K < 10^{-10}$                  |
| Arcillas alta plasticidad         | CH                                    | $10^{-8} < K < 10^{-10}$                  |

Cuadro 1. VALORES RECOMENDADOS DE PERMEABILIDAD EN LAS ARCILLAS

Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

### - Paso 2: Ejecución de la herramienta

Esta herramienta dispone de un botón con la descripción **EJEMPLO**, que permite el ingreso de datos de un ejemplo guía, en caso que se desee hacerlo. El botón **CALCULAR** el cual permite ejecutar el proceso de cálculo para determinar el *factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos*. Finalmente el botón con la descripción **LIMPIAR** que permite limpiar todos los datos para poder realizar un nuevo ejemplo (Figura 4).

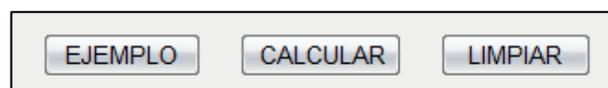


Figura 4. BOTONES EJEMPLO, CALCULAR Y LIMPIAR.

Fuente: El autor

### - Paso 3: Presentación de resultados

Una vez hecho el proceso de cálculo, se presentan los resultados para el factor de seguridad empleado en levantamiento de suelos arcillosos, entre los



cuales se encuentran resultados como: el flujo de agua a través de la arcilla, el peso específico saturado de la arcilla, el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos al finalizar la excavación y después de construir la cimentación (Figura 5).

| <b>RESULTADOS</b>  |  |
|--|--|
| <b>Flujo de agua a través de la arcilla en m<sup>3</sup>/año antes de comenzar los trabajos de excavación</b>    |  |
| Caudal (q)   | <input type="text" value="1.58"/> m <sup>3</sup> /año/m <sup>2</sup> |
| <b>Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos al finalizar la excavación</b>          |  |
| Peso específico saturado de la arcilla ( $\gamma_a$ )  | <input type="text" value="19.55"/> KN/m <sup>3</sup>                 |
| Factor de seguridad en el punto 1 (FSLev)  | <input type="text" value="1.12"/>                                    |
| <b>Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos después de construir la cimentación</b> |  |
| Factor de seguridad en el punto 1 (FSLev)  | <input type="text" value="2.34"/>                                    |

Figura 5. RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD EMPLEADO EN EL LEVANTAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS.

Fuente: El autor

### Descripción de la metodología empleada

El proceso de cálculo es el propuesto por el libro *Ejercicios resueltos de Geotecnia*, SÁNCHEZ Matías, 2008, la metodología consiste en comprobar si existen condiciones hidrostáticas en el límite de arcilla - arena gruesa (Punto 1). Como las condiciones son hidrodinámicas, existirá un flujo de agua hacia donde hay menos potencial o altura piezométrica.

Para calcular el caudal tendremos en cuenta la expresión de Darcy. El factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos será el cociente entre la tensión total vertical - aplicada hacia abajo- y la tensión intersticial en el contacto arcilla - arena gruesa (Punto 1) -ejercida hacia arriba-. Este proceso se describe a continuación:

## - Ley de darcy

Darcy (1956) propuso la siguiente ecuación para calcular la velocidad de flujo de agua a través de un suelo (Figura 6).

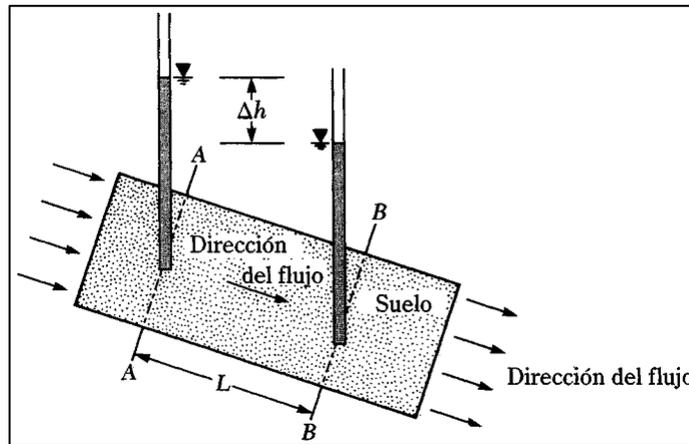


Figura 6. DEFINICIÓN DE LA LEY DE DARCY.

Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

$$v = k \times i$$

Ec. 1

Donde:

$v$  = velocidad de Darcy (m/s)

$k$  = permeabilidad hidráulica del suelo (m/s)

$i$  = gradiente hidráulico

El gradiente hidráulico  $i$  se define como:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Ec. 2

Donde:

$\Delta h$  = diferencia de carga piezométrica (m)

$L$  = longitud (m)



Reemplazando la *Ecuación 2* en la *Ecuación 1* se obtiene la ecuación que se utilizará para el cálculo de la velocidad de flujo.

$$v = k \times \frac{\Delta h}{L} \quad \text{Ec. 3}$$

Para calcular el caudal que se filtra hacia la superficie del terreno se utiliza la ecuación de continuidad.

$$Q = v \times A \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$Q = \text{caudal [m}^3/\text{s(m}^2\text{)]}$

$v = \text{velocidad de Darcy (m/s)}$

$A = \text{área por metro cuadrado (A = 1 m}^2\text{)}$

Como el caudal se lo calculará en las unidades de m<sup>3</sup>/año, se añadirá la conversión  $1 \text{ año} = 31536000 \text{ s}$  dando como resultado lo siguiente:

$$q = Q \times 31536000 \quad \text{Ec. 5}$$

#### - Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos

La presente herramienta dispone de dos apartados utilizados para determinar el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos. A continuación se describe cada uno de ellos.

$$FS_{lev} = \frac{\sigma_1}{\mu_1} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$FS_{lev} = \text{factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos}$

$\sigma_1$  = tensión vertical total (KN/m<sup>2</sup>)

$\mu_1$  = tensión intersticial (KN/m<sup>2</sup>)

Para los dos apartados se utiliza la Ecuación 6 ya que se hará el cálculo en el mismo punto (Figura 7).

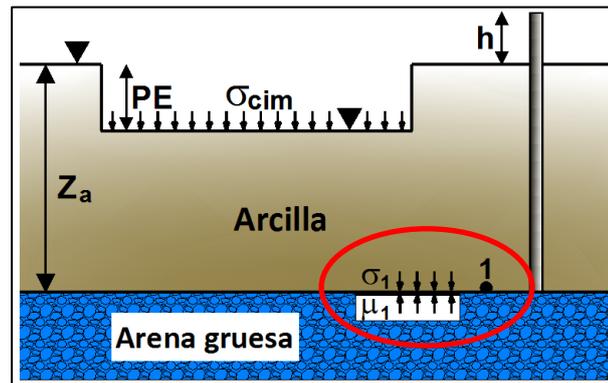


Figura 7. DEFINICIÓN DE FSlev.

Fuente: El autor

**- Cuando se finaliza la excavación**

Luego de finalizada la excavación se procede a calcular las tensiones totales verticales e intersticiales en el punto 1.

**Tensión total vertical ( $\sigma_1$ )**

Para calcular la tensión total vertical necesitamos conocer el peso específico saturado de la arcilla.

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \times \gamma_w \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$\gamma_{sat}$  = peso específico saturado de la arcilla (KN/m<sup>3</sup>)

$G_s$  = peso específico relativo de la arcilla



$e$  = índice de vacíos de la arcilla

$\gamma_w$  = peso específico del agua ( $\text{KN/m}^3$ )

Como la arcilla se encuentra saturada se reemplaza el índice de vacíos ( $e$ ) por la siguiente expresión:

$$e = w \times G_s \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$w$  = contenido de humedad de la arcilla (%)

El valor de peso específico saturado de la arcilla, puede determinarse con la expresión siguiente:

$$\gamma_{satA} = \frac{G_s(1+w)}{1+(w \times G_s)} \times \gamma_w \quad \text{Ec. 9}$$

Ya calculado el peso específico de la arcilla determinamos una expresión para el valor de la tensión total vertical.

$$\sigma_1 = \gamma_{satA} \times (Z_a - PE) \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

$\sigma_1$  = tensión total vertical ( $\text{KN/m}^2$ )

$\gamma_{satA}$  = peso específico saturado de la arcilla ( $\text{KN/m}^3$ )

$Z_a$  = espesor de la arcilla (m)

$PE$  = profundidad de excavación (m)

### **Tensión intersticial ( $\mu_1$ )**

La altura de presión artesisiana en el *punto 1* se determina sumando  $h + Z_a$ , con lo cual la expresión para la tensión intersticial será:



$$\mu_1 = \gamma_w \times (Z_a + h)$$

Ec. 11

Donde:

$\mu_1$  = tensión intersticial (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_w$  = peso específico del agua (KN/m<sup>3</sup>)

$Z_a$  = espesor de la arcilla (m)

$h$  = nivel de agua artesiana sobre la superficie del terreno (m)

Realizados todos los cálculos de las tensiones se procede a determinar el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos al finalizar la excavación con la *Ecuación 6*.

#### - **Después de construir la cimentación**

Las tensiones del apartado anterior servirán para calcular el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos después de construir la cimentación, añadiendo al numerador la *presión uniforme de cimentación* ( $\sigma_{cim}$ ).

$$FS_{lev} = \frac{\sigma_1 + \sigma_{cim}}{\mu_1}$$

Ec. 12

### **5.5 CÁLCULO DE: FACTOR DE SEGURIDAD EMPLEADO EN EL LEVANTAMIENTO DE SUELOS MEJORADOS**

Esta herramienta se ha diseñado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúan las tensiones en el suelo cuando se va a proceder a la construcción de una losa de cimentación en un terreno estratificado compuesto principalmente de dos estratos que a su vez se apoyan sobre un estrato de arena media. Para lo cual se va a realizar una excavación, después se mejorará el terreno interior con una inyección de *grout* (agua y cemento).



La presente herramienta permite determinar el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos mejorados, en las siguientes condiciones: cuando el suelo mejorado se considera impermeable y permeable. Además se determinará el caudal que se filtrará hacia la zona excavada.

La metodología para el proceso de cálculo ha sido extraída del libro *Ejercicios resueltos de Geotecnia*, SÁNCHEZ Matías, 2008.

Para poder hacer uso de esta herramienta se deberá ingresar gratuitamente como usuario registrado del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line a través de la dirección [www.utpl.edu.ec/vleg](http://www.utpl.edu.ec/vleg), en la parte de ANÁLISIS/Ejercicios de geotecnia.

Todo el entorno trabaja en forma dinámica, en donde el usuario ingresa a cualquiera de las herramientas disponibles en el portal y procede a digitar los datos necesarios para el cálculo correspondiente, para luego obtener los resultados.

A continuación se explica el correcto manejo de la herramienta así como también las metodologías empleadas en el proceso de cálculo, las cuales se aplican mediante un ejemplo guía.

### **Funcionamiento de la herramienta**

A continuación se realiza una breve descripción del funcionamiento de la herramienta:

- a) En la interfaz de la herramienta el usuario ingresa los datos, como son: *la profundidad del nivel freático NF y la profundidad de excavación PE*, luego ingresamos los datos geotécnicos del terreno como son: *el espesor  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_m$ ; el peso específico relativo  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_m$ ; y los coeficientes de permeabilidad  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_m$ , de cada uno de los estratos.*



- b) La herramienta permite cargar un ejemplo, con fines de ofrecer una guía para el correcto ingreso de datos, mediante el botón **EJEMPLO**.
- c) Mediante el botón **CALCULAR** se procesan todos los datos y finalmente se presentan los resultados.
- d) Si el usuario desea realizar otro análisis, la herramienta dispone de un botón con la descripción **LIMPIAR**, que permite recargar la página para poder ingresar los nuevos datos.

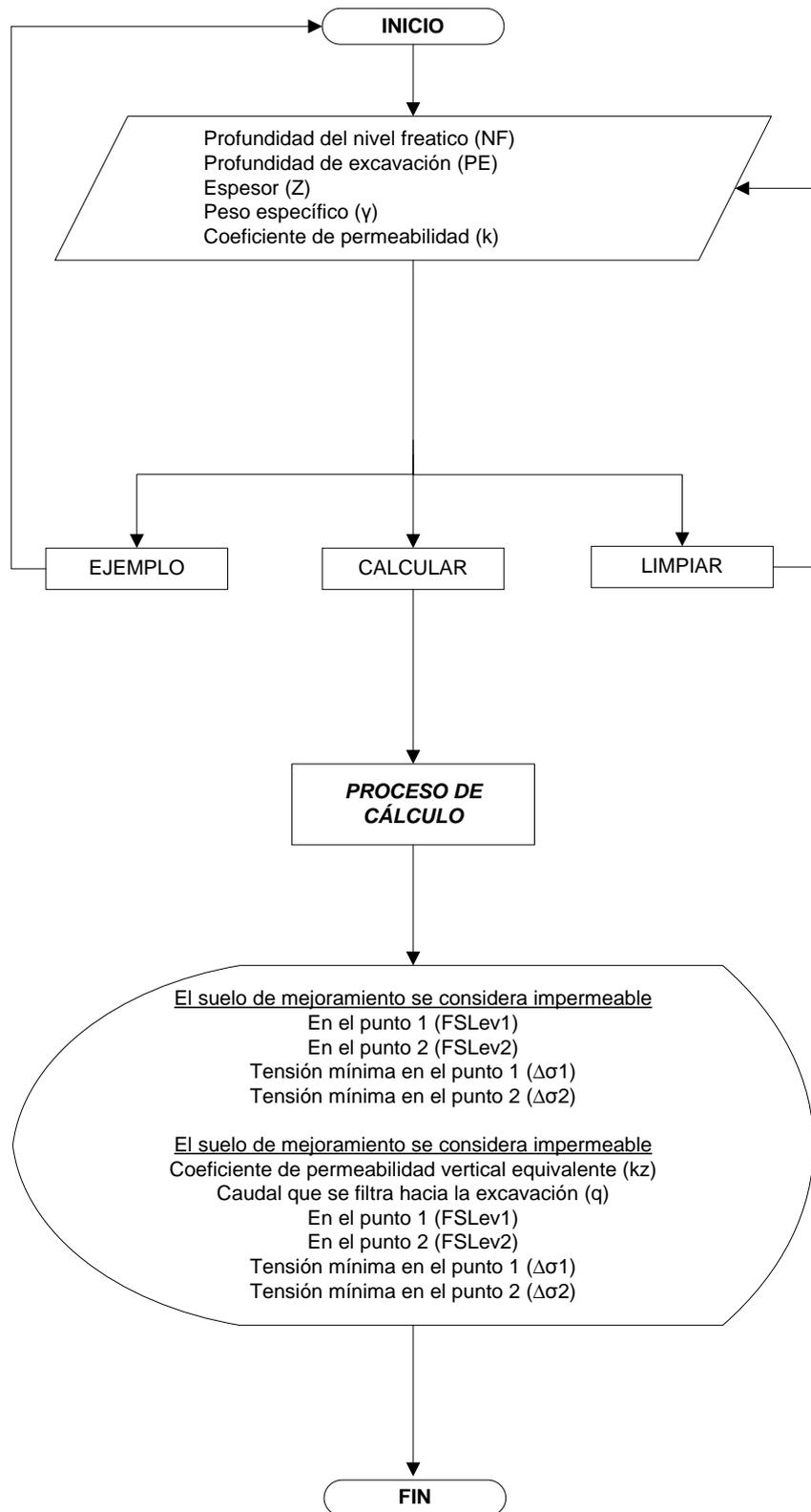


Figura 1. FLUJOGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

Fuente: El autor

## Limitaciones de la herramienta

La presente herramienta permite determinar exclusivamente el caudal que se filtra hacia la zona excavada y el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos mejorados cuando el suelo de mejoramiento se considera permeable e impermeable.

## Manejo de la herramienta

### - Paso 1: Ingreso de datos

Se procede a ingresar la profundidad del nivel freático y la profundidad de excavación. Luego se ingresan los datos geotécnicos de los estratos como son el espesor, el peso específico y el coeficiente de permeabilidad. Para ingresar los datos se recomienda observar las imágenes donde se muestra detalladamente el desarrollo de la herramienta, en la cual, se encuentra el perfil del terreno estratificado, el suelo de mejoramiento cuando se considera permeable e impermeable, que se presenta en la parte derecha de la interfaz de ingreso de datos (*Figura 2*).

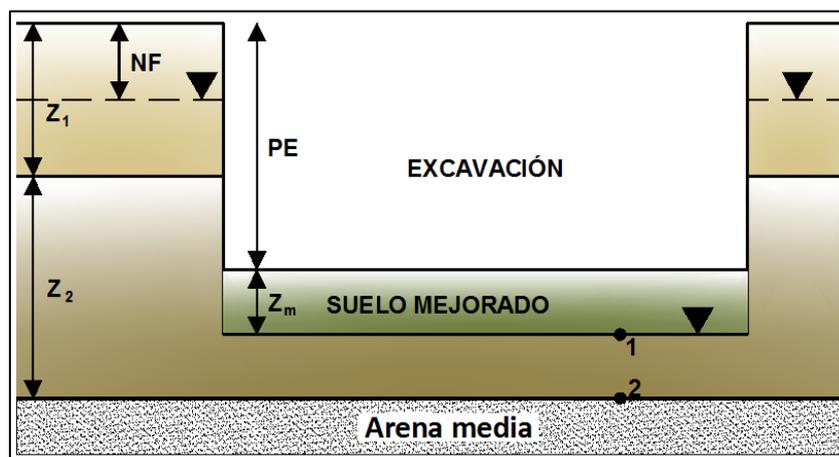


Figura 2. PERFIL DEL TERRENO CON LA EXCAVACIÓN

Fuente: El autor

A continuación se describe el manejo de la herramienta, para lo cual se ha utilizado el ingreso de datos de un ejemplo guía (*Figura 3*).

**INGRESO DE DATOS**

Profundidad del nivel freático (NF)  m

Profundidad de excavación (PE)  m

Figura 3. INGRESO DE DATOS

Fuente: El autor

Luego se ingresa los datos geotécnicos del terreno (Figura 4):

**DATOS GEOTÉCNICOS DEL TERRENO**

|                | ESPESOR<br>Z (m)                 | PESO<br>ESPECÍFICO<br>$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> ) | COEFICIENTE DE<br>PERMEABILIDAD<br>k (m/s) |
|----------------|----------------------------------|---|--|
| Estrato 1      | <input type="text" value="6"/>   | <input type="text" value="19"/>                     | <input type="text" value="1E-05"/>         |
| Estrato 2      | <input type="text" value="12"/>  | <input type="text" value="19.5"/>                   | <input type="text" value="5E-07"/>         |
| Suelo mejorado | <input type="text" value="3.5"/> | <input type="text" value="20"/>                     | <input type="text" value="5E-08"/>         |

Figura 4. DATOS GEOTÉCNICOS DEL TERRENO

Fuente: El autor

En el caso de que el usuario desconozca el valor del *Peso específico  $\gamma$*  y el *Coefficiente de permeabilidad  $k$* , la herramienta presenta un botón para cada caso (Figura 4), que permite mostrar una tabla con valores recomendados para dichos parámetros respectivamente (Cuadro 1 y 2).

| PESOS UNITARIOS TÍPICOS ( $\gamma$ ) |                                       |  |   |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| Tipo de suelo                        | Clasificación<br>SUCS<br>(ASTM D2487) | Sobre el nivel<br>freático<br>(KN/m <sup>3</sup> ) | Bajo el nivel<br>freático<br>(KN/m <sup>3</sup> ) |
| Gravas mal gradadas                  | GP                                    | 17.5 - 20.5  | 19.5 - 22.0                                       |
| Gravas bien gradadas                 | GW                                    | 17.5 - 22.0  | 19.5 - 23.5                                       |
| Gravas limosas                       | GM                                    | 16.0 - 20.5  | 19.5 - 22.0                                       |
| Gravas arcillosas                    | GC                                    | 16.0 - 20.5  | 19.5 - 22.0                                       |
| Arenas mal gradadas                  | SP                                    | 15.0 - 19.5  | 19.0 - 21.0                                       |
| Arenas bien gradadas                 | SW                                    | 15.0 - 21.0  | 19.0 - 23.0                                       |
| Arenas limosas                       | SM                                    | 12.5 - 21.0  | 17.5 - 22.0                                       |
| Arenas arcillosas                    | SC                                    | 13.5 - 20.5  | 17.5 - 21.0                                       |
| Limos baja plasticidad               | ML                                    | 11.5 - 17.5  | 12.5 - 20.5                                       |
| Limos alta plasticidad               | MH                                    | 11.5 - 17.5  | 11.5 - 20.5                                       |
| Arcillas baja plasticidad            | CL                                    | 12.5 - 17.5  | 11.5 - 20.5                                       |
| Arcillas alta plasticidad            | CH                                    | 12.5 - 17.5  | 11.0 - 19.5                                       |

Cuadro 1. VALORES RECOMENDADOS DE PESOS ESPECÍFICOS

Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001



| PERMEABILIDAD EN EL SUELO (k) |                                       |   |
|-------------------------------|---------------------------------------|---|
| Tipo de suelo                 | Clasificación<br>SUCS<br>(ASTM D2487) | Coefficiente de<br>permeabilidad<br>(m/s) |
| Gravas mal gradadas           | GP                                    | $K > 10^{-4}$                             |
| Gravas bien gradadas          | GW                                    | $K > 10^{-4}$                             |
| Gravas limosas                | GM                                    | $10^{-5} < K < 10^{-8}$                   |
| Gravas arcillosas             | GC                                    | $10^{-8} < K < 10^{-10}$                  |
| Arenas mal gradadas           | SP                                    | $K > 10^{-5}$                             |
| Arenas bien gradadas          | SW                                    | $K > 10^{-5}$                             |
| Arenas limosas                | SM                                    | $10^{-5} < K < 10^{-8}$                   |
| Arenas arcillosas             | SC                                    | $10^{-8} < K < 10^{-10}$                  |
| Limos baja plasticidad        | ML                                    | $10^{-5} < K < 10^{-8}$                   |
| Limos alta plasticidad        | MH                                    | $10^{-6} < K < 10^{-8}$                   |
| Arcillas baja plasticidad     | CL                                    | $10^{-8} < K < 10^{-10}$                  |
| Arcillas alta plasticidad     | CH                                    | $10^{-8} < K < 10^{-10}$                  |

Cuadro 2. VALORES RECOMENDADOS DE COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD

Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

### - Paso 2: Ejecución de la herramienta

Esta herramienta dispone de un botón con la descripción **EJEMPLO**, que permite el ingreso de datos de un ejemplo guía, en caso que se desee hacerlo. El botón **CALCULAR** el cual permite ejecutar el proceso de cálculo para determinar el *factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos mejorados*. Finalmente el botón con la descripción **LIMPIAR** que permite limpiar todos los datos para poder realizar un nuevo ejemplo (Figura 5).

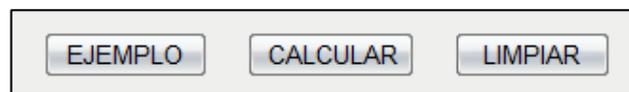


Figura 5. BOTONES EJEMPLO, CALCULAR Y LIMPIAR.

Fuente: El autor

### - Paso 3: Presentación de resultados

Una vez hecho el proceso de cálculo, se presentan los resultados para el factor de seguridad empleado en levantamiento de suelos de mejoramiento, entre los cuales se encuentran resultados como: factor de seguridad (puntos 1



y 2) y la tensión mínima que deberá ejercer el estacionamiento subterráneo para que el factor de seguridad sea 2 (valor recomendado para el cálculo tomado de la metodología), esto es cuando el suelo de mejoramiento se considera impermeable (Figura 6).

| <b>RESULTADOS</b>  |                          |
|--|--------------------------|
| <b>El suelo de mejoramiento se considera impermeable</b>                                   |                          |
| <b>Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos de mejoramiento</b>          |                          |
| En el punto 1 (FSLev1)   | 0.62                     |
| En el punto 2 (FSLev2)   | 0.94                     |
| <b>Tensión mínima que deberá ejercer el estacionamiento subterráneo para que FSlev = 2</b> |                          |
| Tensión mínima en el punto 1 ( $\Delta\sigma_1$ )  | 155.63 KN/m <sup>2</sup> |
| Tensión mínima en el punto 2 ( $\Delta\sigma_2$ )  | 156.05 KN/m <sup>2</sup> |

Figura 6. RESULTADOS CUANDO EL SUELO DE MEJORAMIENTO SE CONSIDERA IMPERMEABLE

Fuente: El autor

Además presenta el coeficiente de permeabilidad vertical equivalente, caudal que se filtra hacia la excavación, factor de seguridad (puntos 1 y 2) y la tensión mínima que deberá ejercer el estacionamiento subterráneo para que el factor de seguridad sea 2 (valor recomendado para el cálculo tomado de la metodología), esto es cuando el suelo de mejoramiento se considera permeable (Figura 7).

|  |   |
|--|---|
| <b>El suelo de mejoramiento se considera permeable</b>                                     |   |
| Coefficiente de permeabilidad vertical equivalente (kz)                                    | 9.09E-08 m/s                              |
| Caudal que se filtra hacia la excavación (q)   | 1.04E-07 m <sup>3</sup> /s/m <sup>2</sup> |
| <b>Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos de mejoramiento</b>          |   |
| En el punto 1 (FSLev1)   | 0.66                                      |
| En el punto 2 (FSLev2)   | 0.94                                      |
| <b>Tensión mínima que deberá ejercer el estacionamiento subterráneo para que FSlev = 2</b> |   |
| Tensión mínima en el punto 1 ( $\Delta\sigma_1$ )  | 141.5 KN/m <sup>2</sup>                   |
| Tensión mínima en el punto 2 ( $\Delta\sigma_2$ )  | 156.05 KN/m <sup>2</sup>                  |

Figura 7. RESULTADOS CUANDO EL SUELO DE MEJORAMIENTO SE CONSIDERA PERMEABLE

Fuente: El autor



## Descripción de la metodología empleada

El proceso de cálculo es el propuesto por el libro *Ejercicios resueltos de Geotecnia*, SÁNCHEZ Matías, 2008, la metodología consiste en determinar si se produce levantamiento en la zona excavada, comprobaremos si la tensión vertical debida a la carga del terreno es mayor o menor que la subpresión del agua.

Además se desean analizar los problemas de estabilidad y la supuesta filtración vertical unidimensional que se generara una vez realizada la excavación hasta una cierta profundidad.

Para calcular el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos de mejoramiento será el cociente entre la tensión total vertical - aplicada hacia abajo- y la tensión intersticial -ejercida hacia arriba- (*Puntos 1 y 2*). En el caso de la tensión mínima que deberá ejercer el estacionamiento subterráneo se tendrá en cuenta que el factor de seguridad sea igual a 2. Para calcular el caudal tendremos en cuenta la expresión de Darcy.

Este proceso se describe en las siguientes condiciones:

### **- El suelo de mejoramiento se considera impermeable**

Si la inyección de *grout* (agua y cemento) impermeabiliza el estrato inferior, no entrará agua en la excavación, la inyección funcionará como un tapón hidráulico. El factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos mejorados se lo calculará en los puntos 1 y 2 (*Figura 8*).

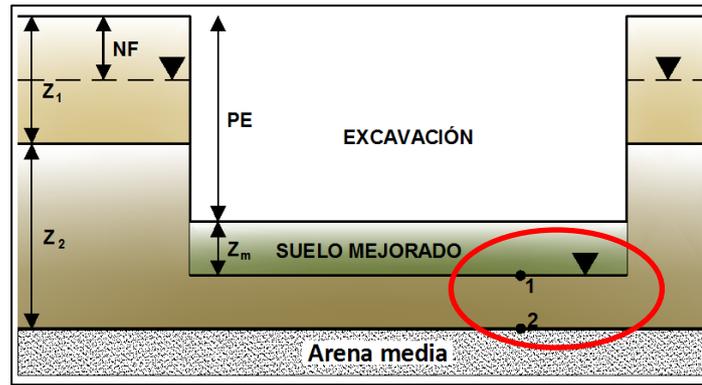


Figura 8. EL SUELO DE MEJORAMIENTO SE CONSIDERA PERMEABLE

Fuente: El autor

$$FS_{lev} = \frac{\sigma}{\mu} \quad Ec. 1$$

Donde:

$FS_{lev}$  = factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos de mejoramiento

$\sigma$  = tensión total vertical ( $KN/m^2$ )

$\mu$  = tensión intersticial ( $KN/m^2$ )

Para los dos puntos se utiliza la Ecuación 1. Ahora definiremos las expresiones para la tensión total vertical e intersticial.

$$\sigma = \sum \gamma \times Z \quad Ec. 2$$

Donde:

$\sigma$  = tensión total vertical ( $KN/m^2$ )

$\gamma$  = peso específico del estrato ( $KN/m^3$ )

$Z$  = espesor del estrato (m)

$$\mu = \gamma_w \times h_w \quad Ec. 3$$

Donde:

$\mu$  = tensión intersticial ( $\text{KN}/\text{m}^2$ )

$\gamma_w$  = peso específico del agua ( $\text{KN}/\text{m}^3$ )

$h_w$  = altura de presión (m)

La altura de presión  $h_w$  (Figura 9), es aquella distancia desde el nivel freático hasta la zona de contacto (punto 1 y 2).

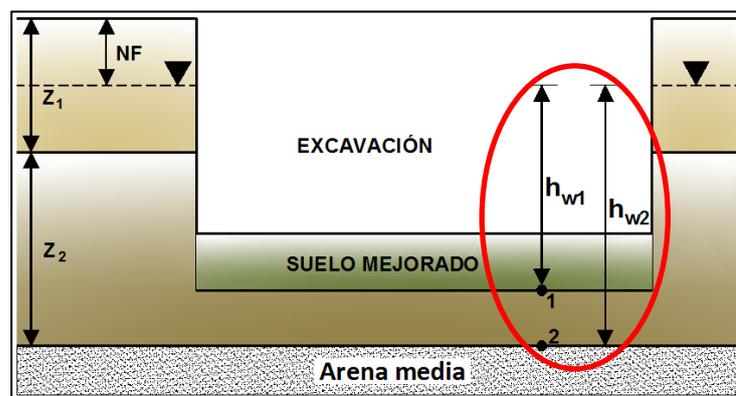


Figura 9. ALTURA DE PRESIÓN

Fuente: El autor

Para el cálculo de la tensión mínima que deberá ejercer el estacionamiento subterráneo se reemplazará ( $FS_{lev} = 2$ ) y añadiendo en el numerador la tensión mínima ( $\Delta\sigma$ ) en la Ecuación 1.

$$2 = \frac{\sigma + \Delta\sigma}{\mu} \quad \text{Ec. 4}$$

Luego despejamos la tensión mínima ( $\Delta\sigma$ ) y esta servirá para el cálculo en los dos puntos.

$$\Delta\sigma = 2\mu - \sigma \quad \text{Ec. 5}$$

- El suelo de mejoramiento se considera permeable

Para el cálculo del caudal utilizaremos la ley de Darcy y se lo realiza como si se tratase de un terreno estratificado con flujo vertical ascendente (*Figura 10*).

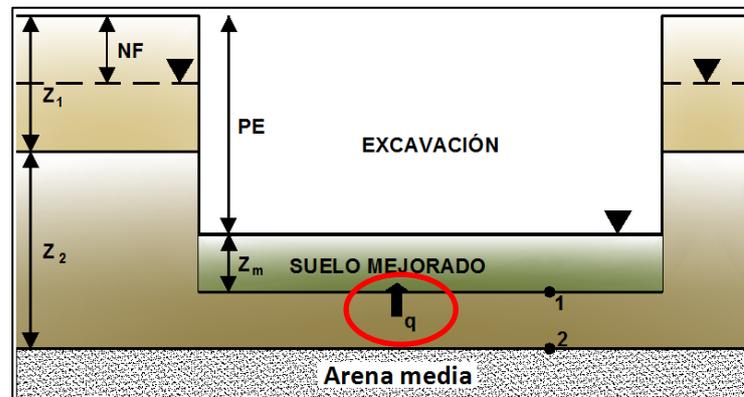


Figura 10. CAUDAL CON FLUJO VERTICAL ASCENDENTE

Fuente: El autor

Con la siguiente expresión se obtendrá el caudal que se filtra hacia la excavación.

$$q = \frac{k_z \times h \times A}{L} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$q$  = caudal que se filtra a la excavación [ $m^3/s$  ( $m^2$ )]

$k_z$  = coeficiente de permeabilidad vertical equivalente (m/s)

$h$  = carga de flujo (m)

$A$  = área por metro cuadrado ( $A = 1 m^2$ )

$L$  = longitud de recorrido ascendente del agua (m)

La carga que produce el flujo es la diferencia de nivel freático entre el exterior e interior (zona de excavación), la longitud de recorrido ascendente del agua es la suma del espesor de estrato sobrante después de la excavación y el espesor de suelo mejorado (*Figura 11*).

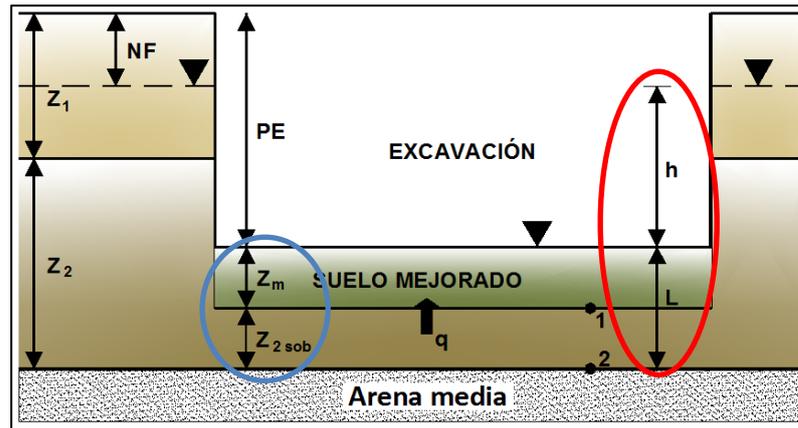


Figura 11. CARGA DE FLUJO, RECORRIDO ASCENDENTE DEL AGUA Y ESPESOR SOBRANTE

Fuente: El autor

Definimos una expresión para el cálculo del coeficiente de permeabilidad vertical equivalente  $k_z$ .

$$k_z = \frac{Z_m + Z_{2sob}}{\frac{Z_m}{k_m} + \frac{Z_{2sob}}{k_2}} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$k_z$  = coeficiente de permeabilidad vertical equivalente (m/s)

$Z_m$  = espesor del suelo mejorado (m)

$Z_{2sob}$  = espesor del estrato sobrante después de la excavación (m)

$k_m$  = coeficiente de permeabilidad del suelo mejorado (m/s)

$k_2$  = coeficiente de permeabilidad del estrato 2 (m/s)

Como el factor de seguridad va a cambiar solo en el punto 1 debido a que circula un caudal, pues la tensión intersticial en ese punto será la siguiente expresión:

$$\mu_1 = (\gamma_w \times Z_m) + \gamma_w \times \left( \frac{q \times Z_m}{k_m \times A} \right) \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:



$\mu_1$  = tensión intersticial en el punto 1 (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_w$  = peso específico del agua (KN/m<sup>3</sup>)

$Z_m$  = espesor del suelo mejorado (m)

$q$  = caudal que se filtra a la excavación [m<sup>3</sup>/s (m<sup>2</sup>)]

$k_m$  = coeficiente de permeabilidad del suelo mejorado (m/s)

$A$  = área por metro cuadrado ( $A = 1 \text{ m}^2$ )

Hecho esto se procede a calcular el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos de mejoramiento con la *Ecuación 1*, tomando en cuenta ( $\mu = \mu_1$ ). Para el *punto 2* el factor de seguridad no se altera ya que no circula ningún caudal. En el caso de la tensión mínima ( $\Delta\sigma$ ) se utiliza la *Ecuación 5*, para los dos puntos.

## 5.6 DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA EN UNA ARCILLA

Esta herramienta se ha diseñado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúa la superficie de un terreno estratificado compuesto principalmente de tres estratos siendo el del medio una arcilla donde se va a construir una edificación y este proceso impondrá un incremento en la presión vertical en los suelos generando un asentamiento el mismo que es medible en la mitad de la capa de arcilla. La presente herramienta permite determinar el asentamiento por consolidación primaria en la mitad de la capa de arcilla y el índice de vacíos final en la arcilla.

La metodología para el proceso de cálculo ha sido extraída del libro *Ejercicios resueltos de Geotecnia*, SÁNCHEZ Matías, 2008.

Para poder hacer uso de esta herramienta se deberá ingresar gratuitamente como usuario registrado del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line a través de la dirección [www.utpl.edu.ec/vleg](http://www.utpl.edu.ec/vleg), en la parte de ANÁLISIS/Ejercicios de geotecnia.



Todo el entorno trabaja en forma dinámica, en donde el usuario ingresa a cualquiera de las herramientas disponibles en el portal y procede a digitar los datos necesarios para el cálculo correspondiente, para luego obtener los resultados.

A continuación se explica el correcto manejo de la herramienta así como también las metodologías empleadas en el proceso de cálculo, las cuales se aplican mediante un ejemplo guía.

### **Funcionamiento de la herramienta**

A continuación se realiza una breve descripción del funcionamiento de la herramienta:

- a) En la interfaz de la herramienta el usuario ingresa los datos, como son: *la profundidad del nivel freático  $NF$* , luego ingresamos los datos geotécnicos del estrato como son: *el espesor  $Z_e$ , el índice de vacíos  $e$ , el peso específico relativo  $G_s$*  y finalmente ingresamos los datos geotécnicos de la arcilla como son: *el espesor  $Z_a$ , el incremento de presión vertical  $\sigma_e$ , el contenido de humedad  $w$ , el índice de compresión  $C_c$ , el peso específico relativo  $G_s$ .*
- b) La herramienta permite cargar un ejemplo, con fines de ofrecer una guía para el correcto ingreso de datos, mediante el botón **EJEMPLO**.
- c) Mediante el botón **CALCULAR** se procesan todos los datos y finalmente se presentan los resultados.
- d) Si el usuario desea realizar otro análisis, la herramienta dispone de un botón con la descripción **LIMPIAR**, que permite recargar la página para poder ingresar los nuevos datos.

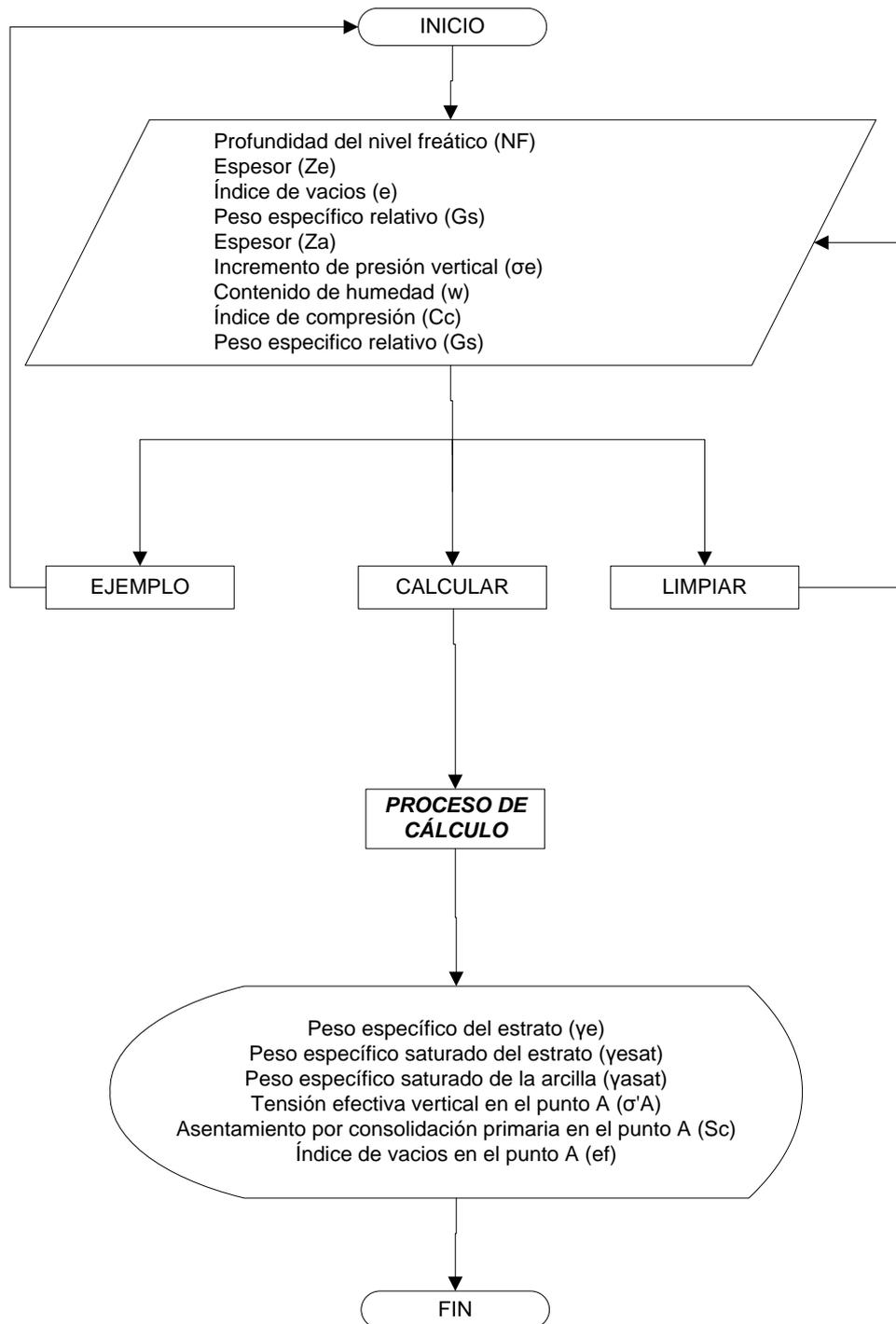


Figura 1. FLUJOGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

Fuente: El autor

### **Limitaciones de la herramienta**

La presente herramienta permite determinar únicamente el asentamiento por consolidación primaria provocado por la cimentación de una edificación y el índice de vacíos final en suelos arcillosos.

## Manejo de la herramienta

### - Paso 1: Ingreso de datos

Se procede a ingresar la profundidad del nivel freático, luego se ingresan los datos geotécnicos del estrato y de la arcilla. Para ingresar los datos geotécnicos de los estratos se recomienda observar la imagen donde se muestra detalladamente el desarrollo de la herramienta, en la cual, se encuentra el perfil del terreno, que se presenta en la parte derecha de la interfaz de ingreso de datos (*Figura 2*).

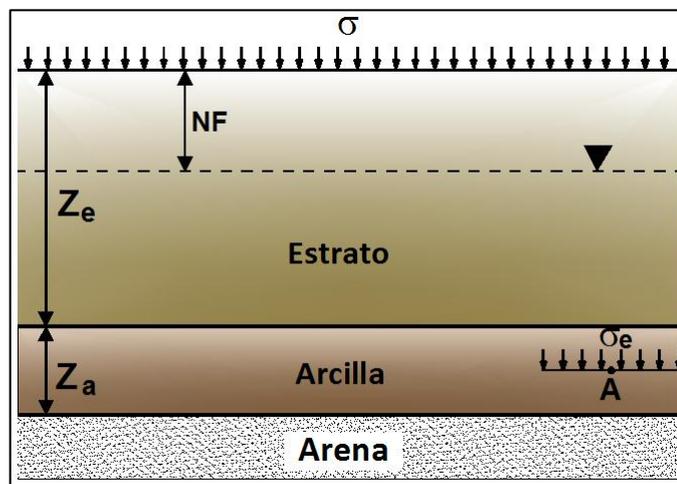


Figura 2. PERFIL DEL TERRENO

Fuente: El autor

A continuación se describe la interfaz de la herramienta, para lo cual se ha utilizado el ingreso de datos de un ejemplo guía.

Figura 3. INGRESO DEL NIVEL FREÁTICO

Fuente: El autor

Luego se ingresan los datos geotécnicos del estrato:

**Datos geotécnicos del estrato**

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Espesor (Ze)                  | <input type="text" value="10 m"/>                                  |
| Índice de vacíos (e)          | <input type="text" value="0.76"/> <input type="button" value="⏏"/> |
| Peso específico relativo (Gs) | <input type="text" value="2.7"/> <input type="button" value="⏏"/>  |

Figura 4. INGRESO DE DATOS GEOTÉCNICOS DEL ESTRATO

Fuente: El autor

En el caso de que el usuario desconozca el valor del *Índice de vacíos e* y el *Peso específico relativo Gs*, la herramienta presenta un botón para cada caso (Figura 4), que permite mostrar una tabla con valores recomendados para dichos parámetros respectivamente (Cuadro 1 y 2).



| TIPO DE SUELO          | Índice de vacíos (e) |
|------------------------|----------------------|
| Arena uniforme suelta  | 0.80                 |
| Arena uniforme densa   | 0.45                 |
| Arena limosa suelta    | 0.65                 |
| Arena limosa densa     | 0.40                 |
| Arcilla dura           | 0.60                 |
| Arcilla suave          | 0.90 - 1.40          |
| Arcilla orgánica suave | 2.50 - 3.20          |

Cuadro 1. VALORES RECOMENDADOS DE ÍNDICE DE VACÍOS

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001



| TIPO DE SUELO            | Peso específico relativo (Gs) |
|--------------------------|-------------------------------|
| Arena                    | 2.65 - 2.67                   |
| Arena Limosa             | 2.67 - 2.70                   |
| Arcilla Inorgánica       | 2.70 - 2.80                   |
| Suelos con mica o Hierro | 2.75 - 3.00                   |
| Suelos Orgánicos         | Puede ser inferior a 2.00     |

Cuadro 2. VALORES RECOMENDADOS DE PESO ESPECÍFICO RELATIVO

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

Luego se ingresa los datos geotécnicos de la arcilla:

**Datos geotécnicos de la arcilla**

|   |  |
|---|--|
| Espesor (Za)                                  | <input type="text" value="2"/> m   |
| Incremento de presión vertical ( $\sigma_e$ ) | <input type="text" value="140"/> KN/m <sup>2</sup>   |
| Contenido de humedad (w)                      | <input type="text" value="43"/> %  |
| Índice de compresión (Cc)                     | <input type="text" value="0.3"/>  |
| Peso específico relativo (Gs) [2.7 - 2.8]     | <input type="text" value="2.7"/>   |

Figura 5. INGRESO DE DATOS GEOTÉCNICOS DE LA ARCILLA

Fuente: El autor

En el caso de que el usuario desconozca el valor del *Índice de compresión* Cc, la herramienta presenta un botón (Figura 5), que permite mostrar una tabla con valores recomendados para dichos parámetros de acuerdo a los diferentes tipos de arcilla (Cuadro 3).

| TIPO DE SUELO            | Índice de compresión (Cc) |
|--------------------------|---------------------------|
| Arcilla Azul de Boston   | 0.33                      |
| Arcilla de Chicago       | 0.30                      |
| Arcilla de Nueva Orleans | 0.28                      |
| Arcilla de St. Lawrence  | 0.10                      |

Cuadro 3. VALORES RECOMENDADOS DE ÍNDICE DE COMPRESIÓN

Fuente: El autor

### - Paso 2: Ejecución de la herramienta

Esta herramienta dispone de un botón con la descripción **EJEMPLO**, que permite el ingreso de datos de un ejemplo guía, en caso que se desee hacerlo. El botón **CALCULAR** el cual permite ejecutar el proceso de cálculo para determinar el *asentamiento por consolidación primaria en la arcilla*. Finalmente el botón con la descripción **LIMPIAR** que permite limpiar todos los datos para poder realizar un nuevo ejemplo (Figura 6).

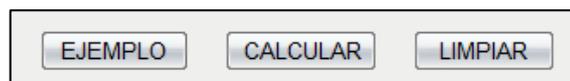


Figura 6. BOTONES EJEMPLO, CALCULAR Y LIMPIAR.

Fuente: El autor



### - Paso 3: Presentación de resultados

Una vez hecho el proceso de cálculo, se presentan los resultados para el asentamiento por consolidación primaria en la arcilla, entre los cuales se encuentran resultados como: los pesos específicos de los estratos, la tensión efectiva vertical en el punto A, el asentamiento por consolidación primaria en el punto A y el índice de vacíos en el punto A (Figura 7).

| <b>RESULTADOS</b>   |                          |
|---|--------------------------|
| <b>Asentamiento por consolidación primaria en la arcilla</b>    |                          |
| Peso específico del estrato ( $\gamma_e$ )                      | 15.05 KN/m <sup>3</sup>  |
| Peso específico saturado del estrato ( $\gamma_{sat}$ )         | 19.29 KN/m <sup>3</sup>  |
| Peso específico saturado de la arcilla ( $\gamma_a$ )           | 17.53 KN/m <sup>3</sup>  |
| Tensión efectiva vertical en el punto A ( $\sigma'_A$ )         | 119.23 KN/m <sup>2</sup> |
| Asentamiento por consolidación primaria en el punto A ( $S_c$ ) | 94 mm                    |
| <b>Índice final de vacíos en la arcilla</b>                     |                          |
| Índice de vacíos en el punto A ( $e_f$ )                        | 1.06                     |

Figura 7. RESULTADOS DEL ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA EN LA  
ARCILLA

Fuente: El autor

### Descripción de la metodología empleada

El proceso de cálculo es el propuesto por el libro *Ejercicios resueltos de Geotecnia*, SÁNCHEZ Matías, 2008, la metodología consiste en realizar un análisis de las tensiones producidas en el centro del estrato de la arcilla (Punto A). Como el estrato arcilloso está normalmente consolidado se produce un incremento en la presión vertical.

Para calcular el asentamiento por consolidación primaria en la arcilla se aplica la expresión correspondiente en función del índice de compresión y de las tensiones efectivas inicial y final en el centro del estrato de la arcilla (Punto A).

Este proceso se describe a continuación:

### - Asentamiento por consolidación primaria de la arcilla

La presente herramienta permite determinar el asentamiento por consolidación primaria y el índice de vacíos final de la arcilla (*Punto A*). A continuación se describe cada uno de ellos.

$$S_c = \left( \frac{\Delta e}{1+e_o} \right) \times Z_a \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$S_c$  = asentamiento (mm)

$\Delta e$  = cambio total del índice de vacíos causada por la aplicación de carga adicional

$e_o$  = índice de vacíos de la arcilla antes de la aplicación de la carga

$Z_a$  = espesor de la arcilla

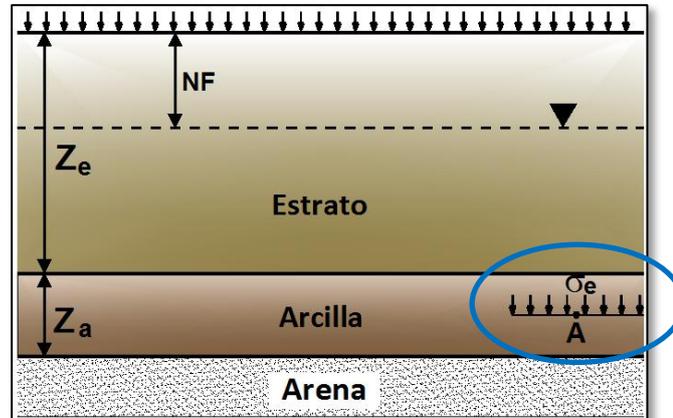


Figura 8. ESTADO TENSIONAL EN EL PUNTO A

Fuente: El autor

Para calcular el estado estacional en el centro del estrato de la arcilla (*Punto A*) se necesita definir previamente los pesos específicos de los materiales que se encuentran por encima (*Figura 8*).

A continuación se presenta las ecuaciones para el cálculo de los pesos específicos secos y saturados de los estratos del terreno.



$$\gamma = \frac{G_s \times \gamma_w}{1+e} \quad \text{Ec. 2}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \gamma_w \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$\gamma$  = peso específico seco (KN/m<sup>3</sup>)

$\gamma_{sat}$  = peso específico saturado (KN/m<sup>3</sup>)

$G_s$  = peso específico relativo

$e$  = índice de vacíos

$\gamma_w$  = peso específico del agua (KN/m<sup>3</sup>)

Cuando un estrato se encuentra saturado se reemplaza el índice de vacíos ( $e$ ) por la siguiente expresión:

$$e = w \times G_s \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$G_s$  = peso específico relativo

$w$  = contenido de humedad (%)

El valor de peso específico saturado de un estrato, puede determinarse con la expresión siguiente:

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s \times (1+w)}{1+(w \times G_s)} \times \gamma_w \quad \text{Ec. 5}$$

Ya calculado los pesos específicos de los estratos del terreno determinamos la tensión efectiva vertical inicial en el centro de la capa de arcilla (*Punto A*), la obtenemos a partir de la tensión total vertical e intersticial.



$$\sigma_A = \sum \gamma \times Z$$

Ec. 6

Donde:

$\sigma_A$  = tensión total inicial (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  = peso específico del estrato (KN/m<sup>3</sup>)

$Z$  = espesor del estrato (m)

Para calcular la tensión intersticial se utilizará la siguiente expresión.

$$u_A = \gamma_w \times ((Z_e - NF) + 0.5Z_a)$$

Ec. 7

Donde:

$u_A$  = tensión intersticial (KN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_w$  = peso específico del agua (KN/m<sup>3</sup>)

$Z_e$  = espesor del estrato (m)

$NF$  = profundidad del nivel freático (m)

$Z_a$  = espesor de la arcilla (m)

Luego de calcular la tensión total vertical e intersticial nos ayudamos con el principio de tensión efectiva que es:

$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A$$

Ec. 8

Donde:

$\sigma'_A$  = tensión efectiva vertical inicial (KN/m<sup>2</sup>)

$\sigma_A$  = tensión total inicial (KN/m<sup>2</sup>)

$u_A$  = tensión intersticial (KN/m<sup>2</sup>)

El asentamiento del estrato arcilloso  $S_c$ , lo calcularemos tomando como referencia el centro de la capa de arcilla (Punto A).



Sabemos que,

$$\Delta e = C_c \times \log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_o} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

$\Delta e$  = cambio total del índice de vacíos causada por la aplicación de carga adicional

$C_c$  = índice de compresión

$\sigma'_f$  = esfuerzo vertical final (KN/m<sup>2</sup>)

$\sigma'_o$  = esfuerzo vertical inicial (KN/m<sup>2</sup>)

Dado que tenemos un incremento en la presión vertical  $\sigma_e$ , el esfuerzo vertical es la siguiente expresión:

$$\sigma'_f = \sigma'_o + \sigma_e \quad \text{Ec. 10}$$

El esfuerzo vertical inicial en el (Punto A) es igual a tensión efectiva vertical inicial es decir, ( $\sigma'_o = \sigma'_A$ )

Para el cálculo del incremento en la presión vertical  $\sigma_e$ , empleamos la fórmula de serie infinita en cualquier punto del estrato (Means y Parcher, 1963).

$$\sigma_e = \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{4}{(2N+1)\pi} \times \sin \left[ \frac{(2N+1)\pi}{2} \times \frac{z_{dr}}{H_{dr}} \right] \times e^{-\left[ \frac{(2N+1)^2 \times \pi^2}{4} \times T_v \right]} \right) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$z_{dr}$  = profundidad al punto más cercano del límite de drenaje (m)

$H_{dr}$  = longitud de la trayectoria máxima de drenaje (m)

$e$  = logaritmo de base natural = 2.7183

$T_v$  = factor de tiempo



Realizados todos los cálculos procede a determinar el asentamiento por consolidación primaria en el centro de la capa de arcilla (*Punto A*) con la *Ecuación 1*.

#### - Índice de vacíos final en la arcilla

El índice de vacíos se calcula en el centro de la capa de arcilla (*Punto A*), para lo cual se utiliza la siguiente expresión:

$$e_f = e_o + \Delta e \quad \text{Ec. 12}$$

*Donde:*

$e_f$  = *Índice de vacíos final en la arcilla*

$e_o$  = *Índice de vacíos de la arcilla antes de la aplicación de la carga (inicial)*

$\Delta e$  = *cambio total del índice de vacíos causada por la aplicación de carga adicional*

### 5.7 DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA EN UNA ARCILLA

Esta herramienta se ha diseñado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúa la superficie de un estrato de arcilla, que se apoya sobre un macizo granítico impermeable, donde se va a construir una edificación que a su vez transmitirá una presión uniforme generando un asentamiento que es medible en la mitad de la capa de arcilla. La presente herramienta permite determinar la curva de asentamientos instantáneos y corregidos por consolidación primaria de la arcilla, con el propósito de tener en cuenta el asentamiento de la cimentación provocado por la consolidación primaria de la arcilla, generado en diversos tiempos a lo largo de la vida útil de la obra.



La metodología para el proceso de cálculo ha sido extraída del libro “Ejercicios resueltos de Geotecnia”, Matías Sánchez, 2008.

Para poder hacer uso de esta herramienta se deberá ingresar gratuitamente como usuario registrado del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line a través de la dirección [www.utpl.edu.ec/vleg](http://www.utpl.edu.ec/vleg), en la parte de *ANÁLISIS*.

Todo el entorno trabaja en forma dinámica, en donde el usuario ingresa a cualquiera de las herramientas disponibles en el portal y procede a digitar los datos necesarios para el cálculo correspondiente, para luego obtener los resultados.

A continuación se explica el correcto manejo de la herramienta así como también las metodologías empleadas en el proceso de cálculo, las cuales se aplican mediante un ejemplo guía.

### **Funcionamiento de la herramienta**

A continuación se realiza una breve descripción del funcionamiento de la herramienta:

- a) En la interfaz de la herramienta el usuario ingresa los datos, como son: *la presión transmitida ( $\Delta\sigma'$ )* de la cimentación al estrato de arcilla, *el tiempo de construcción ( $T_c$ )* estimado de la duración de la obra, *el tiempo de interés ( $T_e$ )* en el cual se desea conocer los asentamientos por consolidación primaria que ha sufrido la cimentación en un tiempo determinado, luego ingresamos los datos geotécnicos de la arcilla como son: *el espesor  $Z$* , *el coeficiente volumétrico de compresibilidad ( $m_v$ )* es el inverso del módulo edométrico y se lo obtiene del ensayo de consolidación o edómetro y *el coeficiente de consolidación ( $c_v$ )* se obtiene del ensayo de consolidación o edómetro.



- b) La herramienta permite cargar un ejemplo, con fines de ofrecer una guía para el correcto ingreso de datos, mediante el botón **EJEMPLO**.
- c) Mediante el botón **CALCULAR** se procesan todos los datos y finalmente se presentan los resultados.
- d) Si el usuario desea realizar otro análisis, la herramienta dispone de un botón con la descripción **LIMPIAR**, que permite recargar la página para poder ingresar los nuevos datos.

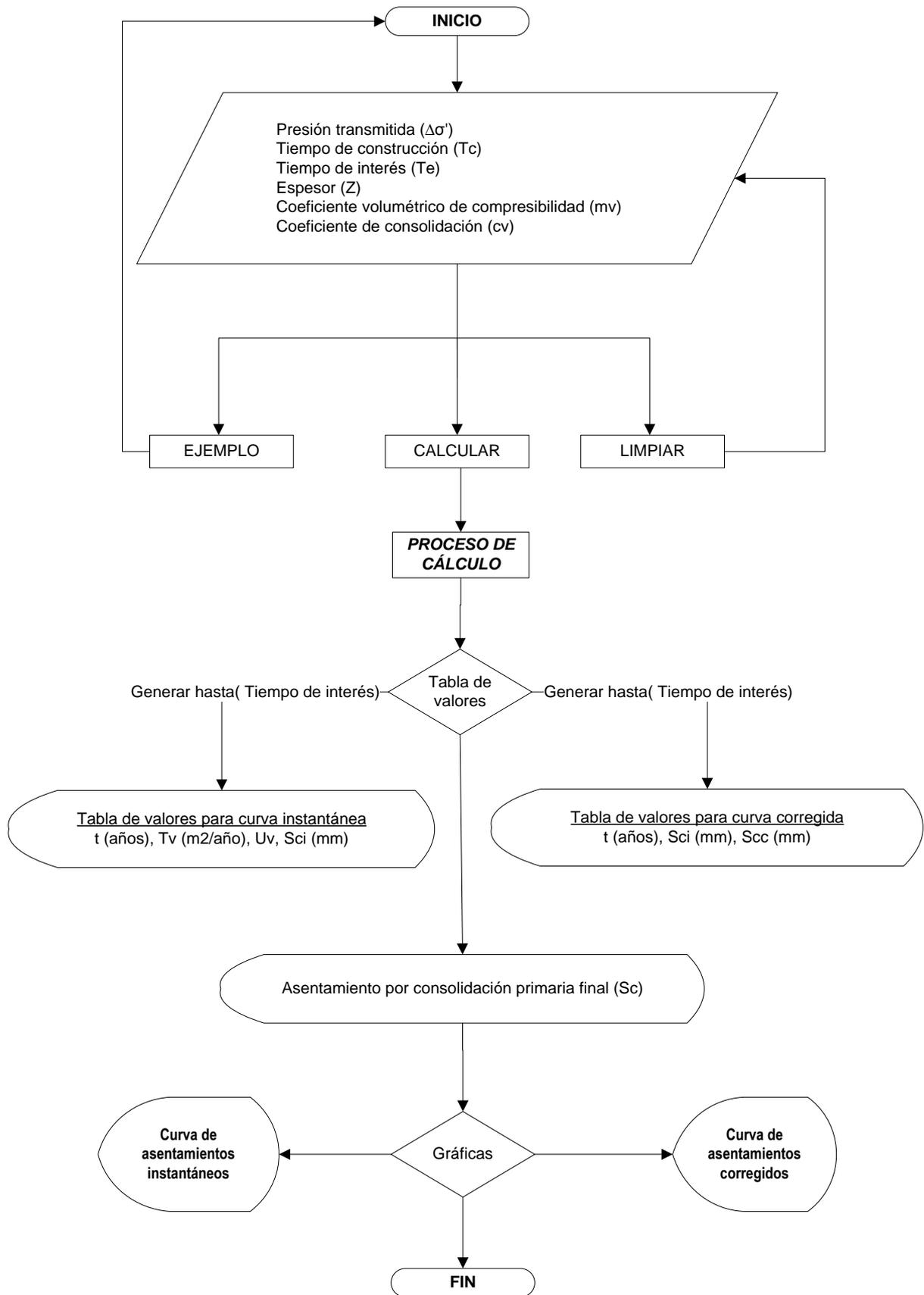


Figura 1. FLUJOGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

Fuente: El autor



## Limitaciones de la herramienta

La presente herramienta permite determinar únicamente las curvas de asentamientos instantáneos y corregidos por consolidación primaria provocado por la cimentación de una edificación en un estrato de arcilla. Además permite almacenar y presentar las curvas de asentamientos instantáneos y corregidos simultáneamente hasta tres veces el ingreso de datos para realizar una comparación.

## Manejo de la herramienta

### - Paso 1: Ingreso de datos

Se procede a ingresar la *presión transmitida*, el *tiempo de construcción* y el *tiempo de interés*, luego se ingresa los datos geotécnicos de la arcilla. Para ingresar los datos se recomienda observar la imagen donde se muestra detalladamente el desarrollo de la herramienta, en la cual, se encuentra el perfil del terreno, que se presenta en la parte derecha de la interfaz de ingreso de datos (*Figura 2*).

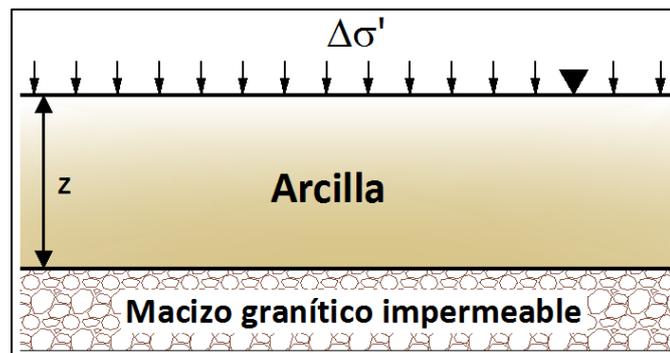


Figura 2. PERFIL DEL TERRENO

Fuente: El autor

A continuación se describe el manejo de la herramienta, para lo cual se ha utilizado el ingreso de datos de un ejemplo guía.

**INGRESO DE DATOS**

Tensión transmitida ( $\Delta\sigma'$ )   $KN/m^2$

Tiempo de construcción ( $T_c$ )  Años

Tiempo de estimación ( $T_e$ )  Años

Figura 3. INGRESO DE DATOS

Fuente: El autor

Si el usuario desconoce los valores del grado de consolidación medio  $U_v$ , y del factor de tiempo vertical  $T_v$ , la herramienta presenta un botón (Figura 3), que permite mostrar una tabla con estos valores (Cuadro 1).

| $U_v$ | $T_v$  | $U_v$ | $T_v$    |
|-------|--------|-------|----------|
| 0     | 0      | 0.55  | 0.239    |
| 0.05  | 0.0019 | 0.6   | 0.286    |
| 0.1   | 0.0079 | 0.65  | 0.34     |
| 0.15  | 0.0177 | 0.7   | 0.403    |
| 0.2   | 0.0314 | 0.75  | 0.477    |
| 0.25  | 0.0491 | 0.8   | 0.567    |
| 0.3   | 0.0707 | 0.85  | 0.684    |
| 0.35  | 0.0962 | 0.9   | 0.848    |
| 0.4   | 0.126  | 0.95  | 1.129    |
| 0.45  | 0.159  | 0.99  | 1.781    |
| 0.5   | 0.197  | 1     | $\infty$ |

Cuadro 1. TABLA DE VALORES DE  $U_v$  Y  $T_v$

Fuente: Ejercicios Resueltos de Geotecnia, SANCHÉZ Matías, 2008

Luego se ingresa los datos geotécnicos de la arcilla:

**Datos geotécnicos de la arcilla**

Espesor ( $Z$ )   $m$

Coefficiente volumétrico de compresibilidad ( $m_v$ )   $m^2/KN$

Coefficiente de consolidación ( $c_v$ )   $m^2/año$  [1 - 10]

Figura 4. INGRESO DE DATOS GEOTÉCNICOS DE LA ARCILLA

Fuente: El autor

En el caso de que el usuario desconozca el valor del *Coficiente volumétrico de compresibilidad*  $m_v$ , la herramienta presenta un botón (Figura 4), que permite mostrar una tabla con valores recomendados para dichos parámetros de acuerdo a los diferentes tipos de arcilla (Cuadro 2).



| TIPO DE ARCILLA       | Coficiente volumétrico de compresibilidad ( $m_v = 10^{-3} \text{ m}^2/\text{KN}$ ) |
|-----------------------|---|
| Arcilla plástica      | 2.039 - 0.255   |
| Arcilla consistente   | 0.255 – 0.127   |
| Arcilla semi plástica | 0.127 – 0.068   |
| Arcilla suelta        | 0.102 – 0.051   |
| Arcilla densa         | 0.020 – 0.013   |

Cuadro 2. VALORES RECOMENDADOS DE COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE COMPRESIBILIDAD  
Fuente: Texto para la asignatura mecánica de suelos, DUQUE Gonzalo y ESCOBAR Carlos, 2002

### - Paso 2: Ejecución de la herramienta

Esta herramienta dispone de un botón con la descripción **EJEMPLO**, que permite cargar los de datos de un ejemplo guía, en caso que se desee hacerlo. El botón **CALCULAR** el cual permite ejecutar el proceso de cálculo para determinar *la curva de asentamiento instantáneo y corregida por consolidación primaria en la arcilla*. Finalmente el botón con la descripción **LIMPIAR** que permite limpiar todos los datos para poder realizar un nuevo ejemplo (Figura 5).

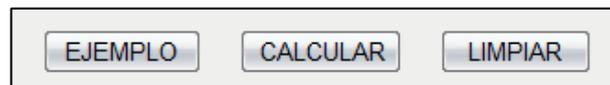


Figura 5. BOTONES EJEMPLO, CALCULAR Y LIMPIAR.

Fuente: El autor

### - Paso 3: Presentación de resultados

Una vez hecho el proceso de cálculo, se presentan los resultados para la curva de asentamientos instantáneos por consolidación primaria en la arcilla

que consiste en graficar los asentamientos producidos en tiempos determinados durante la vida útil de la obra, entre los cuales se encuentran resultados como: el asentamiento por consolidación primaria en la mitad de la capa de arcilla, la tabla de valores para la curva instantánea y la gráfica de asentamientos instantáneos (Figura 6).

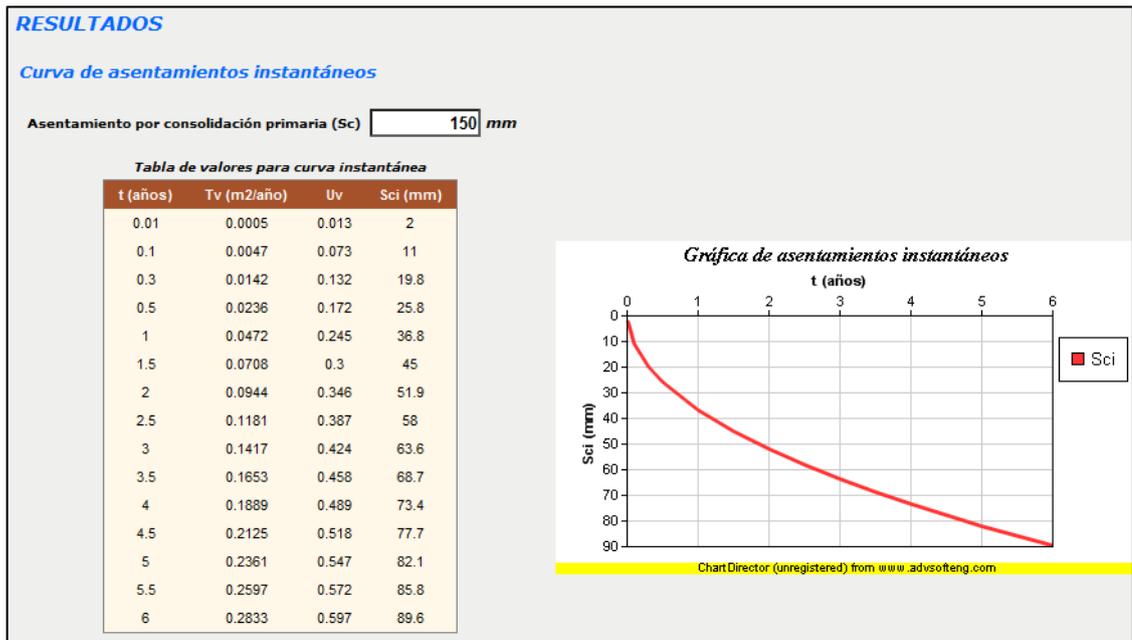


Figura 6. RESULTADOS DE LA CURVA DE ASENTAMIENTOS INSTANTÁNEOS

Fuente: El autor

Finalmente se presentan los resultados para la curva de asentamientos corregidos por consolidación primaria en la arcilla que se la realiza debido a que en la práctica las cargas estructurales aplicadas al suelo no son instantáneas. Inicialmente puede haber una reducción de carga por excavación, posteriormente un incremento a medida que se realiza la construcción, entre los cuales se encuentran resultados como: la tabla de valores para la curva corregida y la gráfica de asentamientos corregidos (Figura 7).

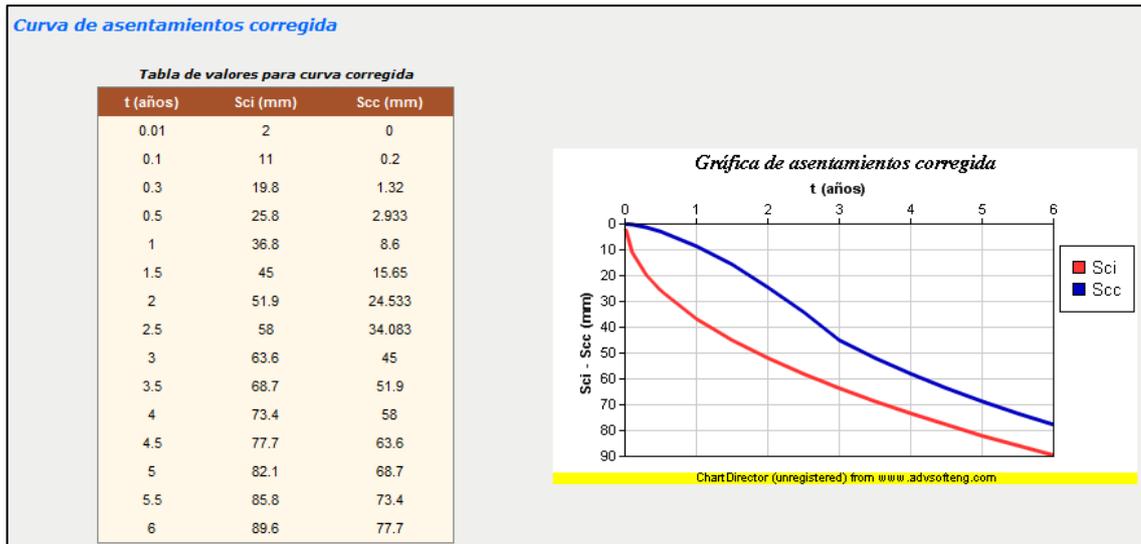


Figura 7. RESULTADOS DE LA CURVA DE ASENTAMIENTOS CORREGIDOS

Fuente: El autor

### Descripción de la metodología empleada

El proceso de cálculo es el propuesto por el libro *Ejercicios resueltos de Geotecnia*, Matías Sánchez, 2008, la metodología consiste en realizar un análisis de los asentamientos producidos en el centro del estrato de la arcilla. Además se graficará los asentamientos para diversos tiempos que se producen con el incremento de presión de la cimentación.

El asentamiento por consolidación primaria en la arcilla ocurre a medida que se va perdiendo agua por drenaje, de manera que los poros del suelo se reducen produciéndose deformaciones volumétricas de forma muy lenta después de aplicada la carga, este es el comportamiento típico de las arcillas. Para calcular se aplica la expresión correspondiente al *coeficiente volumétrico de compresibilidad*  $m_v$ , con el cual se obtiene el asentamiento por consolidación primaria final de la arcilla.

Luego para diversos tiempos, definiremos su correspondiente factor de tiempo vertical y su grado de consolidación medio (*Cuadro 2*). En base al grado de consolidación y al asentamiento por consolidación primaria final de la arcilla obtendremos el asentamiento instantáneo correspondiente a cada tiempo.



La curva corregida la definiremos a partir de la curva instantánea aplicando el método gráfico propuesto por Terzaghi, que consiste en un método empírico compuesto de dos fases, la primera fase durante el periodo de construcción y la segunda después del periodo de construcción.

Este proceso se describe a continuación:

**- Curva de asentamientos instantáneos por consolidación primaria de la arcilla**

La presente herramienta permite determinar el asentamiento por consolidación primaria final en el centro del estrato de la arcilla con la siguiente expresión:

$$S_c = m_v \times \Delta\sigma' \times Z \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$S_c$  = asentamiento por consolidación primaria final (mm)

$m_v$  = coeficiente volumétrico de compresibilidad ( $m^2/KN$ )

$\Delta\sigma'$  = tensión transmitida por la cimentación ( $KN/m^2$ )

$Z$  = espesor de la arcilla (m)

| $U_v$ | $T_v$  | $U_v$ | $T_v$ |
|-------|--------|-------|-------|
| 0     | 0      | 0.55  | 0.239 |
| 0.05  | 0.0019 | 0.6   | 0.286 |
| 0.1   | 0.0079 | 0.65  | 0.34  |
| 0.15  | 0.0177 | 0.7   | 0.403 |
| 0.2   | 0.0314 | 0.75  | 0.477 |
| 0.25  | 0.0491 | 0.8   | 0.567 |
| 0.3   | 0.0707 | 0.85  | 0.684 |
| 0.35  | 0.0962 | 0.9   | 0.848 |
| 0.4   | 0.126  | 0.95  | 1.129 |



|      |       |      |          |
|------|-------|------|----------|
| 0.45 | 0.159 | 0.99 | 1.781    |
| 0.5  | 0.197 | 1    | $\infty$ |

**Cuadro 3. VALORES DE EL GRADO DE CONSOLIDACIÓN MEDIO  $U_v$  Y FACTOR DE TIEMPO VERTICAL  $T_v$**

Fuente: Ejercicios Resueltos de Geotecnia, SANCHÉZ Matías, 2008

Para obtener los asentamientos instantáneos, tomamos diversos tiempos en el intervalo de *tiempo de interés*  $T_e$ , con cada tiempo determinamos el factor de tiempo vertical  $T_v$  y con él el grado de consolidación medio  $U_v$ , que se obtiene interpolando en el Cuadro 3, con el valor del factor de tiempo vertical (Ecuación 2).

$$T_v = \frac{c_v \times t}{Z^2} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$T_v$  = factor de tiempo vertical

$c_v$  = coeficiente de consolidación ( $m^2/año$ )

$t$  = tiempo en el que sucede la consolidación (años)

$Z$  = espesor de la arcilla (m)

El coeficiente de consolidación se lo puede obtener de dos métodos, el método de Taylor o de la raíz del tiempo mediante la siguiente expresión:

$$c_{vt} = \frac{0.848 \times Z^2}{t_{90}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$c_{vt}$  = coeficiente de consolidación por el Método de Taylor ( $m^2/año$ )

$t_{90}$  = Tiempo correspondiente al 90% de consolidación (años)



Y el método de Casagrande o del logaritmo del tiempo mediante la siguiente expresión:

$$c_{vc} = \frac{0.197 \times Z^2}{t_{50}} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$c_{vc}$  = coeficiente de consolidación por el Método de Casagrande ( $m^2/año$ )

$t_{50}$  = Tiempo correspondiente al 50% de consolidación (años)

Para determinar el asentamiento para un tiempo determinado se utilizará la siguiente expresión:

$$S_{ci} = U_v \times S_c \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$S_{ci}$  = asentamiento para un tiempo determinado (mm)

$U_v$  = grado de consolidación interpolado en la tabla 1

$S_c$  = asentamiento por consolidación primaria final (mm)

Para construir la gráfica de los asentamientos instantáneos se ubica en el eje de las X los diversos tiempos en el intervalo de tiempo de interés y en el eje de las Y se ubica el asentamiento para un tiempo determinado.

#### - Curva de asentamientos corregidos por consolidación primaria de la arcilla

Podemos definir los puntos corregidos de asentamiento (**Scc**) analíticamente utilizando las siguientes expresiones que nos permiten realizar la corrección



gráfica propuesta por Terzaghi, que tiene en cuenta el tiempo de construcción.

Cuando el tiempo del intervalo en función del tiempo de estimación ( $t$ ) es menor al tiempo de construcción ( $t_c$ ):

$$S_{cc}(t < t_c) = \frac{t}{t_c} S_{ci} \left( \frac{t}{2} \right) \quad \text{Ec. 6}$$

Cuando el tiempo del intervalo en función del tiempo de estimación ( $t$ ) es mayor o igual al tiempo de construcción ( $t_c$ ):

$$S_{cc}(t \geq t_c) = S_{ci} \left( t - \frac{t_c}{2} \right) \quad \text{Ec. 7}$$

Para construir la gráfica de los asentamientos instantáneos se ubica en el *eje de las X* los diversos tiempos en el intervalo de tiempo de estimación y en el *eje de las Y* se ubica el asentamiento para un tiempo determinado y el asentamiento corregido.

## 5.8 DISEÑO DE PILOTES HINCADOS Y PERFORADOS POR ESTADOS LÍMITES

Esta herramienta se ha diseñado con la finalidad de proponer un método de diseño por Estados Límites para Pilotes Hincados y Perforados que está basado en un estudio racional de los métodos de diseño en base a la probabilidad. En particular, se utiliza el Diseño por Factores de Carga y Resistencia para facilitar la metodología de Diseño por Estados Límites.

Aunque existen numerosos métodos de diseño, se ha seleccionado algunas ecuaciones de diseño a partir de una base de datos de ensayos de carga en pilotes. En todos los casos la ecuación considerada cuantifica una verificación en estado límite último, y dicha ecuación se expresa en términos de la carga



aplicada y las variables de diseño correspondientes. Cada ecuación para estado límite contiene la expresión para la resistencia de diseño, y por lo que refleja directamente la ecuación de diseño a utilizar.

Los pilotes hincados se caracterizan por fuerte fricción al suelo, mejora la comprensión del terreno y para reducir el costo de la hinca el pilote tiene que ser liso. Para los pilotes perforados previamente se debe excavar el terreno donde se va a instalar el pilote, se caracteriza por una débil fricción al suelo y se debe considerar que el pilote sea rugoso para mejorar la contribución del fuste.

La metodología para el proceso de cálculo ha sido extraída del libro *“Diseño de Fundaciones Profundas por Estados Límites”*; Kevin Foye, Grace Abou Jaoude, Rodrigo Salgado; Universidad de Purdue Indiana; 2004.

Para poder hacer uso de esta herramienta se deberá ingresar gratuitamente como usuario registrado del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line a través de la dirección [www.utpl.edu.ec/vleg](http://www.utpl.edu.ec/vleg), en la parte de **ANÁLISIS**.

Todo el entorno trabaja en forma dinámica, en donde el usuario ingresa a cualquiera de las herramientas disponibles en el portal y procede a digitar los datos necesarios para el cálculo correspondiente, para luego obtener los resultados.

A continuación se explica el correcto manejo de la herramienta así como también las metodologías empleadas en el proceso de cálculo, las cuales se aplican mediante un ejemplo guía.

### **Funcionamiento de la herramienta**

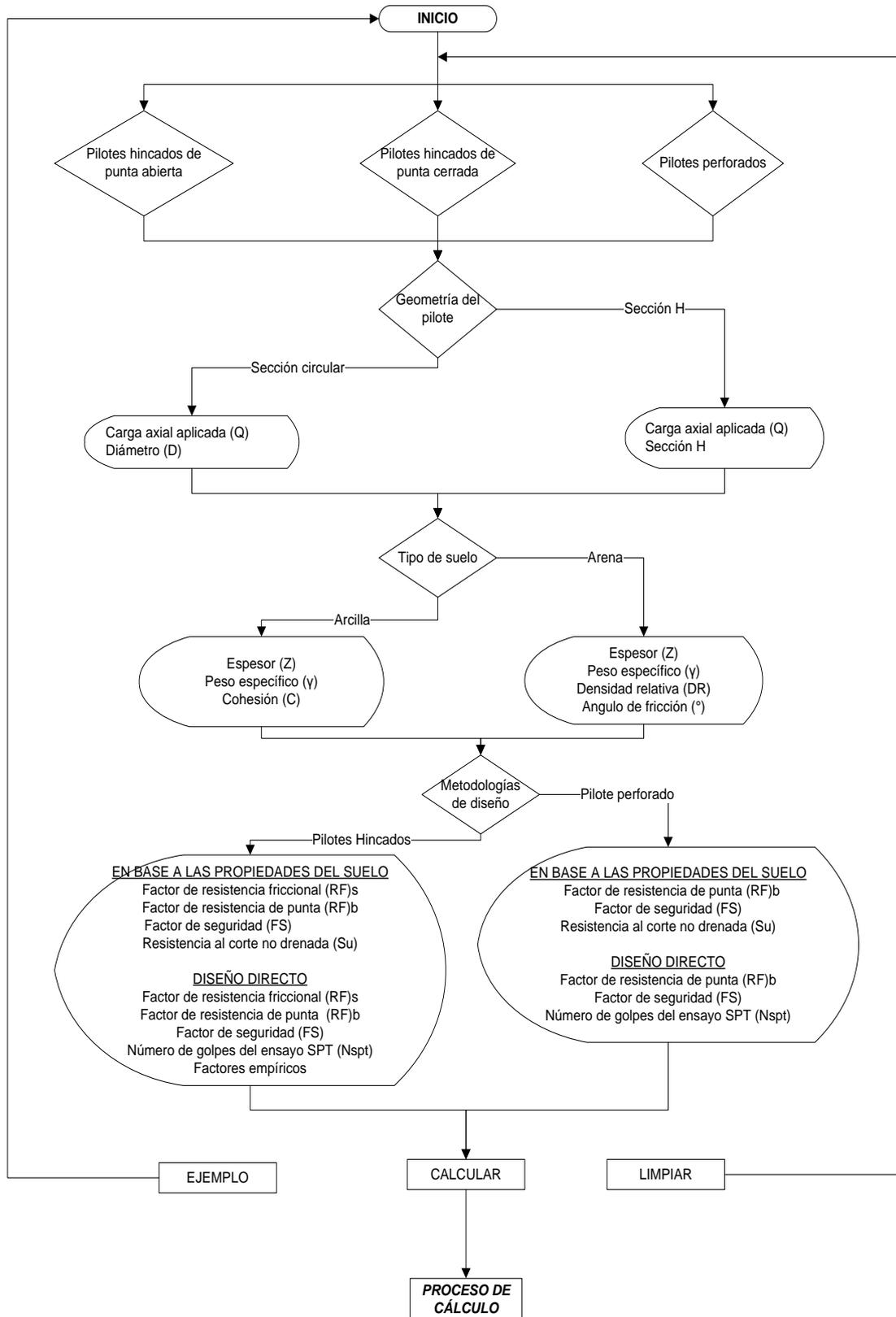
A continuación se realiza una breve descripción del funcionamiento de la herramienta:



- a) En la interfaz de la herramienta el usuario puede escoger tres opciones para el diseño, como son: *pilotes hincados de punta cerrada*, *pilotes hincados de punta abierta* y *pilotes perforados*. Seguidamente se selecciona la geometría del pilote que puede ser de *sección circular* o *sección H*.
- b) Luego se procede al ingreso de datos, como son: *la carga axial aplicada (Q)*, el *diámetro del pilote (D)*, y si el usuario ha seleccionado la opción *sección H*, la herramienta permite seleccionar trece diferentes secciones tomadas de la Norma ASTM A 6/A 6M – 07.
- c) A continuación se ingresa los datos geotécnicos del terreno, como son: el *tipo de suelo* que puede ser arena o arcilla, el *espesor (Z)*, el *peso específico ( $\gamma$ )*, la *densidad relativa (DR)*, el *ángulo de fricción ( $\phi_c$ )* o la *cohesión (C)* dependiendo del tipo de suelo. Además, se muestran valores sugeridos en la interface de la herramienta al presionar el botón que se encuentra junto a la variable a ingresar.
- d) Ya ingresados todos los datos se procede a seccionar las metodologías de diseño, como son: seleccionar los *factores de resistencia friccional ( $RF_s$ )* y los *factores de resistencia de punta ( $RF_b$ )*, tomadas de AASTHO y ASCE-7, el *factor de seguridad (FS)* comprendido entre [2.3 – 3.9] esto se debe a que se ha colocado los valores que recomienda el texto especializado utilizado para la metodología, la *resistencia al corte no drenada ( $S_u$ )*, el *número de golpes* tomados del ensayo del SPT ( $N_{SPT}$ ) y los *factores empíricos* propuestos para el diseño ( $\alpha_b, K, F_1, F_2$ ).
- e) La herramienta permite cargar un ejemplo, con fines de ofrecer una guía para el correcto ingreso de datos, mediante el botón **EJEMPLO**.
- f) Mediante el botón **CALCULAR** se procesan todos los datos y finalmente se presentan los resultados junto con un mensaje de información que indica si el diseño es satisfactorio o no.



- g) Los resultados del diseño se presentan *en base a las propiedades del suelo y diseño directo*, en los dos casos el diseño se lo hará por capacidad friccional para el primer estrato y por capacidad de punta el segundo estrato.
- h) Si el usuario desea realizar otro análisis, la herramienta dispone de un botón con la descripción **LIMPIAR**, que permite recargar la página para poder ingresar los nuevos datos.



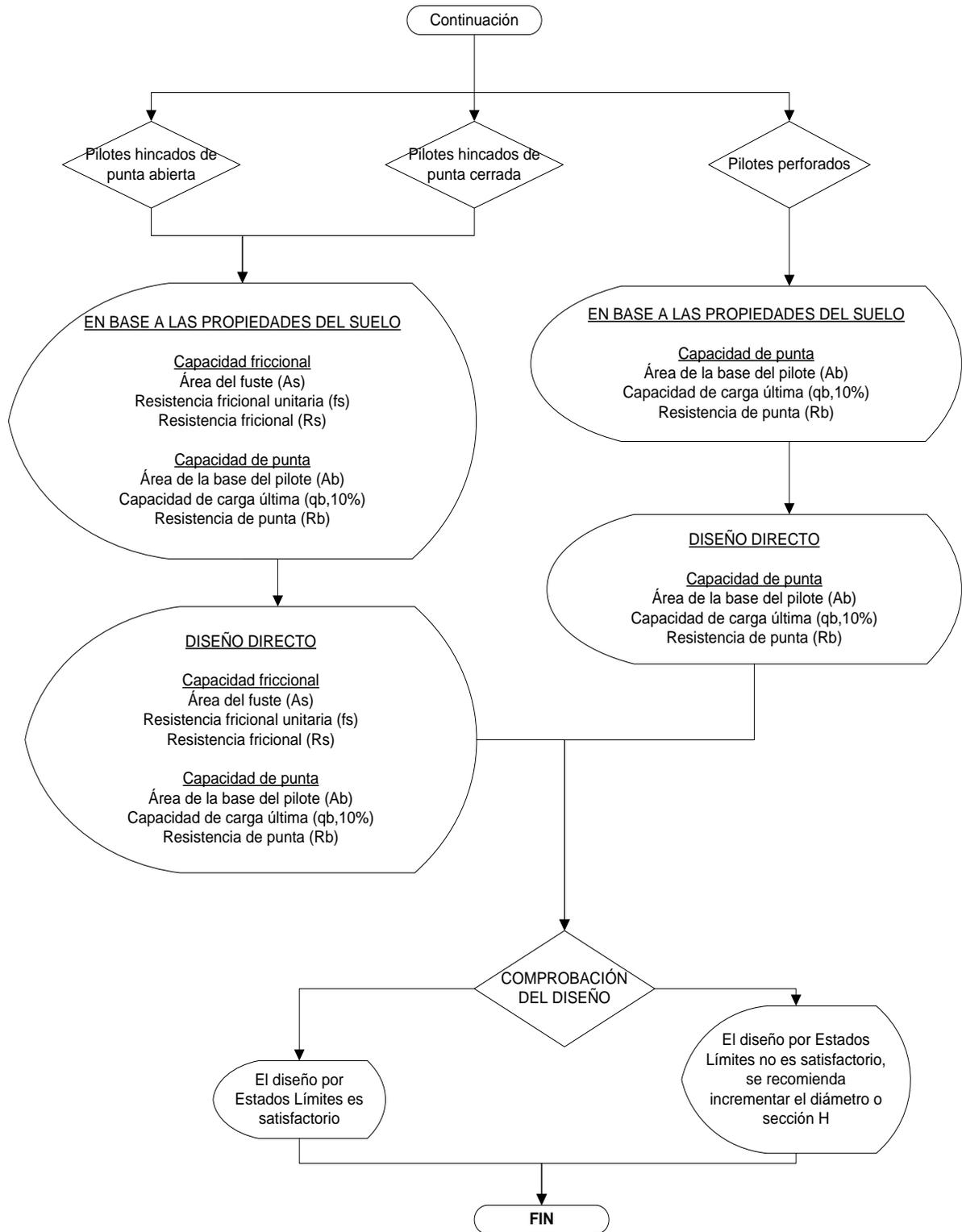


Figura 1. FLUJOGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

Fuente: El autor



## Limitaciones de la herramienta

La presente herramienta permite el diseño de pilotes hincados y perforados en base a factores de carga y resistencia, para pilotes de sección circular y de sección H. El número máximo de estratos a considerarse es de dos, no se considera nivel freático. El diseño de la capacidad friccional se comprobará en el primer estrato y la capacidad de punta se lo hará en el segundo estrato, para los dos casos el diseño se comprobará en base a las propiedades del suelo y diseño directo (ensayos in situ).

## Manejo de la herramienta

### - Paso 1: Ingreso de datos

Se procede a seleccionar el tipo de pilote de una de las tres opciones para el diseño (Figura 2), seguidamente se selecciona la geometría del pilote que usando las dos alternativas (Figura 3).



Figura 2. SELECCIÓN DEL TIPO DE PILOTE

Fuente: El autor



Figura 3. SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PILOTE

Fuente: El autor

A continuación se describe el manejo de la herramienta, para lo cual se ha utilizado el ingreso de datos de un ejemplo guía. Cuando se selecciona en la geometría del pilote (Figura 3) sección circular se ingresa la carga axial



aplicada y el diámetro (Figura 4), pero al seleccionar sección H se elige una de las opciones que se presenta (Figura 5).

**INGRESO DE DATOS**

Carga axial aplicada (Q)  **KN**

Diámetro (D)  **m**

Figura 4. INGRESO DE DATOS CUANDO SE ESCOGE SECCIÓN CIRCULAR

Fuente: El autor

**INGRESO DE DATOS**

Carga axial aplicada (Q)  **KN**

Sección H  ▼

- HP 200 x 43
- HP 200 x 53
- HP 250 x 62
- HP 250 x 85
- HP 310 x 79
- HP 310 x 93
- HP 310 x 110
- HP 310 x 125
- HP 310 x 132
- HP 360 x 108
- HP 360 x 132
- HP 360 x 152**
- HP 360 x 174

Figura 5. INGRESO DE DATOS CUANDO SE ESCOGE SECCIÓN H

Fuente: El autor

Una vez definido el tipo y la geometría del pilote se procede a ingresar los datos geotécnicos del terreno (Figura 6), entre los cuales están el espesor, el peso específico, la densidad relativa, el ángulo de fricción o la cohesión dependiendo el tipo de suelo escogido. Para cada uno de estos parámetros de ingreso la herramienta presenta un botón que permite mostrar una tabla con valores recomendados para dichos parámetros (Cuadro 1).

**DATOS GEOTECNICOS DEL TERRENO**

| TIPO DE SUELO | Espesor Z (m) | Peso específico $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> ) | Densidad relativa (DR) | Angulo de fricción (°) / Cohesión KN/m <sup>2</sup> |
|---------------|---------------|---|------------------------|---|
| Arena ▼       | 7             | 19  | 50                     | 28  |
| Arcilla ▼     | 4             | 16  | 60                     | 25  |

Figura 6. DATOS GEOTÉCNICOS DEL TERRENO

Fuente: El autor

| TIPO DE ARENA          | Densidad Relativa (DR)        | PESOS UNITARIOS TÍPICOS ( $\gamma$ ) |   |
|------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---|
| TIPO DE ARENA          | Ángulo de fricción (°)        | Tipo de suelo                        | Bajo el nivel freático (KN/m <sup>3</sup> ) |
| Arena muy suelta       | 0 - 15                        | Arenas mal gradadas                  | 19.0 - 21.0                                 |
| Arena suelta           | 15 - 35                       | Arenas bien gradadas                 | 19.0 - 23.0                                 |
| Arena media            | 35 - 65                       | Arenas limosas                       | 17.5 - 22.0                                 |
| Arena compacta         | 65 - 85                       | Arenas arcillosas                    | 17.5 - 21.0                                 |
| Arena muy compacta     | 85 - 100                      | Limos baja plasticidad               | 12.5 - 20.5                                 |
|                        |                               | Limos alta plasticidad               | 11.5 - 20.5                                 |
|                        |                               | Arcillas baja plasticidad            | 11.5 - 20.5                                 |
|                        |                               | Arcillas alta plasticidad            | 11.0 - 19.5                                 |
| TIPO DE ARCILLA        | Cohesión (KN/m <sup>2</sup> ) |                                      |   |
| Arcilla suave          | 0 - 19.2                      |                                      |   |
| Arcilla media dura     | 19.2 - 48                     |                                      |   |
| Arcilla dura           | 48 - 96                       |                                      |   |
| Arcilla muy dura       | 96 - 192                      |                                      |   |
| Arcilla demasiado dura | 192 - 384                     |                                      |   |

Cuadro 1. VALORES RECOMENDADOS PARA DATOS GEOTÉCNICOS DEL TERRENO

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

Para proceder al diseño se utilizan las metodologías de diseño que están en dos parámetros, el primero se trata en base a las propiedades del suelo, y la segunda por diseño directo. Se indican los factores de resistencia friccional y de punta, el factor de seguridad establecido por la metodología de diseño, y los demás parámetros mencionados anteriormente (Figura 7).

**METODOLOGÍAS DE DISEÑO**

*En base a propiedades del suelo*

Factor de resistencia friccional (RF)<sub>s</sub> 0.37 ASCE-7 ▾

Factor de resistencia de punta (RF)<sub>b</sub> 0.66 ASCE-7 ▾

Factor de seguridad (FS) [2.3 - 3.9] 2.9

Resistencia al corte no drenada ( $S_u$ ) 100 KN/m<sup>2</sup>

*Diseño directo*

Factor de resistencia friccional (RF)<sub>s</sub> 0.51 ASCE-7 ▾

Factor de resistencia de punta (RF)<sub>b</sub> 0.50 ASCE-7 ▾

Factor de seguridad (FS) [2.3 - 3.9] 2.3

Número de golpes del ensayo SPT ( $N_{spt}$ ) 20

*Factores empíricos*

|            |      |
|------------|------|
| $\alpha_1$ | 2.8  |
| K          | 3.5  |
| F1         | 1.75 |
| F2         | 3.5  |

Figura 7. METODOLOGÍAS DE DISEÑO

Fuente: El autor

Para escoger los factores de resistencia existen dos alternativas los valores de ASCE-7 y AASTHO, que se pueden alternar como el usuario crea más conveniente.

En el caso de que el usuario desconozca los valores de la *Resistencia al corte no drenada*  $S_u$ , *Número de golpes del ensayo del SPT*  $N_{SPT}$  y de los *factores empíricos*, la herramienta presenta unos botones (Figura 7), que permite mostrar unas tablas con valores recomendados para dichos parámetros de ingreso (Cuadro 2).



| TIPO DE SUELO             | FACTORES EMPÍRICOS |            |
|---------------------------|--------------------|------------|
|                           | K                  | $\alpha_1$ |
| Grava                     | ---                | ---        |
| Arena                     | 10                 | 1.4        |
| Arena limosa              | 8.0                | 2.0        |
| Arena limosa con arcilla  | 7.0                | 2.4        |
| Arena limosa con limo     | 5.0                | 2.8        |
| Arena arcillosa           | 6.0                | 3.0        |
| Limo arenoso              | 5.5                | 2.2        |
| Limo arenoso con arcilla  | 4.5                | 2.8        |
| Limo                      | 4.0                | 3.0        |
| Limo arcilloso con arena  | 2.5                | 3.0        |
| Limo arcilloso            | 2.3                | 3.4        |
| Arcilla arenosa           | 3.5                | 2.4        |
| Arcilla arenosa con limo  | 3.0                | 2.8        |
| Arcilla arenosa con arena | 3.3                | 3.0        |
| Arcilla limosa            | 2.2                | 4.0        |
| Arcilla                   | 2.0                | 6.0        |

| TIPO DE PILOTE        | FACTORES EMPÍRICOS |     |
|-----------------------|--------------------|-----|
|                       | F1                 | F2  |
| Pilotes perforados    | 3.5                | 7.0 |
| Franki                | 2.5                | 5.0 |
| Acero                 | 1.75               | 3.5 |
| Hormigón prefabricado | 1.75               | 3.5 |

| TIPO DE ARCILLA    | Resistencia al corte no drenado (Su) [KN/m <sup>2</sup> ] |
|--------------------|---|
| Arcilla muy blanda | 0 - 11.8  |
| Arcilla blanda     | 11.8 - 24.5   |
| Arcilla media      | 24.5 - 49.1   |
| Arcilla firme      | 49.1 - 98.1   |
| Arcilla muy firme  | 98.1 - 196.2  |
| Arcilla dura       | mayor a 196.2   |

| TIPO DE ARCILLA    | Número de golpes del ensayo SPT |
|--------------------|---------------------------------|
| Arcilla muy blanda | menor a 2                       |
| Arcilla blanda     | 2 - 4                           |
| Arcilla media      | 4 - 8                           |
| Arcilla firme      | 8 - 15                          |
| Arcilla muy firme  | 15 - 30                         |
| Arcilla dura       | mayor a 30                      |

Cuadro 2. VALORES RECOMENDADOS PARA METODOLOGÍAS DE DISEÑO

Fuente: Diseño de fundaciones profundas por Estados Límites; FOYE Kevin, ABOU Grace, SALGADO Rodrigo; 2004

- Paso 2: Ejecución de la herramienta

Esta herramienta dispone de un botón con la descripción **EJEMPLO**, que permite cargar los de datos de un ejemplo guía, en caso que se desee hacerlo. El botón **CALCULAR** el cual permite ejecutar el proceso de cálculo para el *Diseño de Pilotes Hincados y Perforados por Estados Límites*. Finalmente el botón con la descripción **LIMPIAR** que permite limpiar todos los datos para poder realizar un nuevo ejemplo (Figura 8).

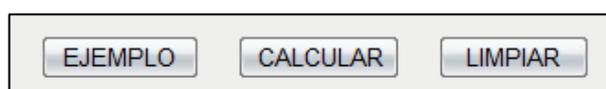


Figura 8. BOTONES EJEMPLO, CALCULAR Y LIMPIAR.

Fuente: El autor

### - Paso 3: Presentación de resultados

Una vez hecho el proceso de cálculo, se presentan los resultados para diseño en base a las propiedades del suelo y diseño directo, entre los cuales se encuentran resultados como: el área del fuste, el área de la base del pilote, resistencia friccional unitaria, capacidad de carga última, resistencia friccional y resistencia de punta (Figura 9).

| <b>RESULTADOS</b>                         |               |
|---|---------------|
| <b>En base a propiedades del suelo</b>    |               |
| <b>Capacidad friccional</b>               |               |
| Área del fuste ( $A_s$ )                  | 26.39 $m^2$   |
| Resistencia friccional unitaria ( $f_s$ ) | 122.32 $KN$   |
| Resistencia friccional ( $R_s$ )          | 22596.17 $KN$ |
| <b>Capacidad de punta</b>                 |               |
| Área de la base del pilote ( $A_b$ )      | 1.13 $m^2$    |
| Capacidad de carga última ( $q_b, 10\%$ ) | 1200 $KN/m^2$ |
| Resistencia de punta ( $R_b$ )            | 1356 $KN$     |
| <b>Diseño directo</b>                     |               |
| <b>Capacidad friccional</b>               |               |
| Área del fuste ( $A_s$ )                  | 26.39 $m^2$   |
| Resistencia friccional unitaria ( $f_s$ ) | 63.28 $KN$    |
| Resistencia friccional ( $R_s$ )          | 11689.71 $KN$ |
| <b>Capacidad de punta</b>                 |               |
| Área de la base del pilote ( $A_b$ )      | 1.13 $m^2$    |
| Capacidad de carga última ( $q_b, 10\%$ ) | 40 $KN/m^2$   |
| Resistencia de punta ( $R_b$ )            | 45.2 $KN$     |

Figura 9. RESULTADOS DEL DISEÑO POR ESTADOS LÍMITES

Fuente: El autor

Al final de los resultados, aparecerá en la parte inferior se comprobará el diseño aplicando la fórmula establecida en la metodología y se hará tanto para el diseño en base a las propiedades del suelo como para el diseño directo (Figura 10), además un mensaje donde se indica si el diseño del pilote ha sido satisfactorio (Figura 11a), o se indica que el diseño no es satisfactorio, para lo cual se recomienda incrementar el valor del diámetro o la sección H del pilote (Figura 11b).



Figura 10. COMPROBACIÓN DEL DISEÑO

Fuente: El autor

El Diseño por Estados Límites es satisfactorio.

(a)

El Diseño por Estados Límites no es satisfactorio, se recomienda incrementar el diámetro o sección H del pilote.

(b)

Figura 11. MENSAJE DE INFORMACIÓN DEL DISEÑO POR ESTADOS LÍMITES

Fuente: El autor

### Descripción de la metodología empleada

El proceso de cálculo es el propuesto por el libro *“Diseño de Fundaciones Profundas por Estados Límites”*; Kevin Foye, Grace Abou Jaoude, Rodrigo Salgado; Universidad de Purdue Indiana; 2004, la metodología permite el Diseño de Pilotes Hincados y Perforados en base a Factores de Carga y Resistencia por Estados Límites.

El Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) es un método de diseño en el cual las cargas de diseño se mayoran y las resistencias de diseño se minoran multiplicando por factores mayores y menores que la unidad, respectivamente. En este método las fundaciones se dimensionan de modo que las cargas mayoradas sean menores o iguales que las resistencias minoradas.



Para el diseño de pilotes hincados hay dos alternativas de punta cerrada y abierta que a su vez, se diseñará en función de las propiedades del suelo y diseño directo (ensayos in situ). El diseño será por capacidad friccional en el primer estrato y por capacidad de punta en el segundo estrato.

Para el diseño de pilotes perforados se diseñará en base a las propiedades del suelo y diseño directo (ensayos in situ). El diseño será únicamente por capacidad de punta.

La ecuación básica del Diseño para Pilotes Hincados y Perforados en base a Factores de Carga y Resistencia (LRFD) por Estados Límites es:

$$(RF)_s R_s + (RF)_b R_b \geq \sum (FS)_i Q_i \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$(RF)_s$  y  $(RF)_b$ ) = factores de resistencia para resistencia friccional y de punta, respectivamente

$(R_s$  y  $R_b)$  = resistencia friccional y de punta, respectivamente (KN)

$FS$  = factor de seguridad

$Q$  = carga axial aplicada (KN)

Para calcular la resistencia friccional y de punta se utiliza las siguientes expresiones que a su vez se las utilizará para todos los tipos de diseño de pilotes.

$$R_s = f_s \times a_s \times L \quad \text{Ec. 2}$$

$$R_b = q_{b,10\%} \times A_b \quad \text{Ec. 3}$$



Donde:

$R_s$  = resistencia friccional (KN)

$R_b$  = resistencia de punta (KN)

$f_s$  = resistencia friccional unitaria (KN)

$A_s$  = área del fuste ( $m^2$ )

$L$  = longitud del pilote (m)

$q_{b,10\%}$  = capacidad de carga límite última basada en una relación asentamiento-diámetro del pilote igual a 10% [ $s/B = 10\%$ ] ( $KN/m^2$ )

$A_b$  = área de la base del pilote ( $m^2$ )

Este proceso se describe a continuación:

## DISEÑO DE PILOTES HINCADOS EN ARENA

Para la verificación del método de diseño se indican los factores de resistencia ( $RF$ ) a utilizar con los factores de carga de ASCE – 7 y AASHTO. El factor de seguridad ( $FS$ ) indica un valor aproximado del WSD correspondiente al factor de resistencia indicado.

### Diseño de pilotes de punta cerrada en base a las propiedades del suelo

#### - Capacidad friccional

$$f_s = \frac{K_s}{K_o} K_o \tan\left(\frac{\delta_c}{\phi_c} \phi_c\right) \sigma'_v \quad Ec. 4$$

$$\frac{K_s}{K_o} = 7.2(0.0112D_R - 0.0141) \quad Ec. 5$$

$$K_o = 1 - \text{sen}\phi_c \quad Ec. 6$$

$$\sigma'_v = Z \times \gamma \quad Ec. 7$$



Donde:

$K_s / K_o$  = relación entre el coeficiente de empuje del suelo y el coeficiente de presión de tierra en reposo

$K_o$  = coeficiente de presión de tierra en reposo

$\delta_c / \phi_c$  = relación entre el ángulo de fricción superficial y el ángulo de fricción del suelo [que tiene un valor de diseño de:  $\delta_c / \phi_c = 0.85$ ]

$\phi_c$  = ángulo de fricción del suelo

$\sigma'_v$  = tensión vertical efectiva (KN/m<sup>2</sup>)

$D_R$  = densidad relativa del estrato (%)

$Z$  = espesor del estrato (m)

$\gamma$  = peso específico del estrato (KN/m<sup>3</sup>)

Se indican para el diseño los factores de resistencia friccional  $(RF)_s$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_s = 0.37 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_s = 0.40 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 3.9$$

#### - Capacidad de punta

$$q_{b,10\%} = \left( \frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} \right) q_c \quad \text{Ec. 8}$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} = 1.02 - 0.0051D_R \quad \text{Ec. 9}$$

$$q_c = 50N_q^* \tan \phi_c \quad \text{Ec. 10}$$

$$N_q^* = 0.0000009365\phi_c^6 - 0.0000770584\phi_c^5 + 0.0025001813\phi_c^4 - 0.0372952365\phi_c^3 + 0.2710933088\phi_c^2 - 0.6070519863\phi_c + 1 \quad \text{Ec. 11}$$



Donde:

$q_{b,10\%} / q_{bL}$  = relación entre la presión en la base cuando  $s/B = 10\%$  y la resistencia al hundimiento de la base

$q_c$  = resistencia de punta (KN/m<sup>2</sup>)

$N_q^*$  = factor de capacidad de carga

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.50 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.52 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 3.0$$

### **Diseño directo de pilotes de punta cerrada**

#### **- Capacidad friccional**

$$f_s = 0.002q_c$$

Ec. 12

Donde:

$q_c$  = resistencia de punta, se determina con la Ec. 10 (KN/m<sup>2</sup>)

Se indican para el diseño los factores de resistencia friccional  $(RF)_s$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_s = 0.51 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_s = 0.53 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 2.9$$



### - Capacidad de punta

$$q_{b,10\%} = \left( \frac{q_{b,10\%}}{q_c} \right) q_c \quad \text{Ec. 13}$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_c} = 1.02 - 0.0051D_R \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

$q_{b,10\%} / q_c$  = relación entre la presión en la base cuando  $s/B = 10\%$  y la resistencia de punta

$q_c$  = resistencia de punta ( $\text{KN/m}^2$ ), se determina con la Ec. 10

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.56 \quad [\text{ASCE-7}]$$

$$(RF)_b = 0.59 \quad [\text{AASHTO}]$$

$$FS = 2.6$$

### Diseño de pilotes de punta abierta en base a las propiedades del suelo

### - Capacidad friccional

$$f_s = \frac{K_s}{K_o} K_o \tan \left( \frac{\delta_c}{\phi_c} \phi_c \right) \sigma'_v \quad \text{Ec. 15}$$

$$\frac{K_s}{K_o} = \beta(7.2 - 4.8PLR) \quad \text{Ec. 16}$$

$$\beta = 0.0112D_R - 0.0141 \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:



$K_s / K_o$  = relación entre el coeficiente de empuje del suelo y el coeficiente de presión de tierra en reposo

$K_o$  = coeficiente de presión de tierra en reposo, se determina con la Ec. 6

$\delta_c / \phi_c$  = relación entre el ángulo de fricción superficial y el ángulo de fricción del suelo, [que tiene un valor de diseño de:  $\delta_c / \phi_c = 0.85$ ]

$\sigma'_v$  = tensión vertical efectiva (KN/m<sup>2</sup>), se determina con la Ec. 7

$\beta$  = índice de confiabilidad

$PLR$  = relación de longitud de taponamiento, [que tiene un valor de diseño de:  $PLR = 1$ ]

Se indican para el diseño los factores de resistencia friccional  $(RF)_s$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_s = 0.37 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_s = 0.40 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 3.9$$

#### - Capacidad de punta

$$q_{b,10\%} = \left( \frac{q_{b,10\%}}{\sigma'_h} \right) \sigma'_h \quad \text{Ec. 18}$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{\sigma'_h} = \alpha \left( 326 - 295 \frac{IFR}{100} \right) \quad \text{Ec. 19}$$

$$\alpha = 0.0112D_R - 0.0141 \quad \text{Ec. 20}$$

$$\sigma'_h = \sigma'_v K_o \quad \text{Ec. 21}$$

$$IFR = \frac{L_p}{L} \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

$q_{b,10\%} / \sigma'_h$  = relación entre la presión en la base cuando  $s/B = 10\%$  y la tensión efectiva horizontal



$\sigma'_h$  = tensión efectiva horizontal (KN/m<sup>2</sup>)

$\alpha$  = coeficiente de separación

*IFR* = relación de llenado incremental (%)

$\sigma'_v$  = tensión vertical efectiva (KN/m<sup>2</sup>), se determina con la Ec. 7

$K_o$  = coeficiente de presión de tierra en reposo, se determina con la Ec. 6

$L_p$  = longitud del tapón (m)

$L$  = longitud de penetración del pilote (m)

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad (*FS*).

$$(RF)_b = 0.58 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.60 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 2.6$$

### **Diseño directo de pilotes de punta abierta**

#### **- Capacidad friccional**

$$f_s = 0.002q_c \quad \text{Ec. 23}$$

Donde:

$q_c$  = resistencia de punta, se determina con la Ec. 10 (KN/m<sup>2</sup>)

Se indican para el diseño los factores de resistencia friccional  $(RF)_s$  y un valor aproximado del factor de seguridad (*FS*).

$$(RF)_s = 0.37 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_s = 0.40 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 3.9$$



### - Capacidad de punta

$$q_{b,10\%} = \left( \frac{q_{b,10\%}}{q_c} \right) q_c \quad \text{Ec. 24}$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_c} = -0.00443IFR + 0.557 \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

$q_{b,10\%} / q_c$  = relación entre la presión en la base cuando  $s/B = 10\%$  y la resistencia de punta

$q_c$  = resistencia de punta ( $\text{KN/m}^2$ ), se determina con la Ec. 10

$IFR$  = relación de llenado incremental (%), se determina con la Ec. 22

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.66 \quad [\text{ASCE-7}]$$

$$(RF)_b = 0.69 \quad [\text{AASHTO}]$$

$$FS = 2.3$$

## DISEÑO DE PILOTES HINCADOS EN ARCILLA

Para la verificación del método de diseño se indican los factores de resistencia  $(RF)$  a utilizar con los factores de carga de ASCE – 7 y AASHTO. El factor de seguridad  $(FS)$  indica un valor aproximado del WSD correspondiente al factor de resistencia indicado.

### Diseño de pilotes en base a las propiedades del suelo

### - Capacidad friccional

$$f_s = \alpha S_u \quad \text{Ec. 26}$$



$$\alpha = \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{C_u}{\sigma'_{v'}} \right)^{0.5} \left( \frac{C_u}{\sigma'_{v'}} \right)^{-0.5}, \text{ para } \frac{C_u}{\sigma'_{v'}} \leq 1 \\ \left( \frac{C_u}{\sigma'_{v'}} \right)^{0.5} \left( \frac{C_u}{\sigma'_{v'}} \right)^{-0.25}, \text{ para } \frac{C_u}{\sigma'_{v'}} > 1 \end{array} \right\} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

$S_u$  = resistencia al corte no drenada (KN/m<sup>2</sup>)

$\alpha$  = coeficiente de separación

$C_u$  = cohesión del suelo (KN/m<sup>2</sup>)

$\sigma'_{v'}$  = tensión vertical efectiva (KN/m<sup>2</sup>), se determina con la Ec. 7

Se indican para el diseño los factores de resistencia friccional  $(RF)_s$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_s = 0.44 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_s = 0.46 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 2.9$$

#### - Capacidad de punta

$$q_{b,10\%} = N_c S_u \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

$N_c$  = factor de capacidad de carga, [que tiene un valor de diseño de:  $N_c = 12$ ]

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.66 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.69 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 2.3$$



## Diseño directo de pilotes

### - Capacidad friccional

$$f_s = n_{si} N_{SPT} \quad \text{Ec. 29}$$

$$n_{si} = \frac{\alpha_1 K}{F_2} \quad \text{Ec. 30}$$

Donde:

$n_{si}$ ,  $\alpha_1$ ,  $K$ ,  $F_2$  = factores empíricos que se basan en los resultados de 63 ensayos de carga realizados en pilotes Franki, pilotes Franki encamisados, pilotes prefabricados y pilotes de acero.

$N_{SPT}$  = número de golpes del ensayo SPT

Se indican para el diseño los factores de resistencia friccional  $(RF)_s$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_s = 0.50 \quad [\text{ASCE-7}]$$

$$(RF)_s = 0.52 \quad [\text{AASHTO}]$$

$$FS = 3.0$$

### - Capacidad de punta

$$q_{b,10\%} = n_b N_{SPT} \quad \text{Ec. 31}$$

$$n_b = \frac{K}{F_1} \quad \text{Ec. 32}$$

Donde:

$n_b$ ,  $K$ ,  $F_1$  = factores empíricos que se basan en los resultados de 63 ensayos de carga realizados en pilotes Franki, pilotes Franki encamisados, pilotes prefabricados y pilotes de acero.



$N_{SPT}$  = número de golpes del ensayo SPT

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.50 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.52 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 3.0$$

## DISEÑO DE PILOTES PERFORADOS EN ARENA

Para la verificación del método de diseño se indican los factores de resistencia  $(RF)$  a utilizar con los factores de carga de ASCE – 7 y AASHTO. El factor de seguridad  $(FS)$  indica un valor aproximado del WSD correspondiente al factor de resistencia indicado.

### Diseño de pilotes en base a las propiedades del suelo

#### - Capacidad de punta

$$q_{b,10\%} = \left( \frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} \right) q_c \quad \text{Ec. 33}$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} = 0.225 - 0.0011D_R \quad \text{Ec. 34}$$

Donde:

$q_{b,10\%} / q_{bL}$  = relación entre la presión en la base cuando  $s/B = 10\%$  y la resistencia al hundimiento de la base

$q_c$  = resistencia de punta ( $KN/m^2$ ), se determina con la Ec. 10



Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.56 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.58 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 2.7$$

### **Diseño directo de pilotes**

#### **- Capacidad de punta**

$$q_{b,10\%} = \left( \frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} \right) q_c \quad \text{Ec. 35}$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} = 0.225 - 0.0011D_R \quad \text{Ec. 36}$$

Donde:

$q_{b,10\%} / q_{bL}$  = relación entre la presión en la base cuando  $s/B = 10\%$  y la resistencia al hundimiento de la base

$q_c$  = resistencia de punta ( $\text{KN/m}^2$ ), se determina con la Ec. 10

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad  $(FS)$ .

$$(RF)_b = 0.64 \text{ [ASCE-7]}$$

$$(RF)_b = 0.67 \text{ [AASHTO]}$$

$$FS = 2.3$$

### **DISEÑO DE PILOTES PERFORADOS EN ARCILLA**

Para la verificación del método de diseño se indican los factores de resistencia  $(RF)$  a utilizar con los factores de carga de ASCE – 7 y AASHTO.



El factor de seguridad (FS) indica un valor aproximado del WSD correspondiente al factor de resistencia indicado.

### **Diseño de pilotes en base a las propiedades del suelo**

#### **- Capacidad de punta**

$$q_{b,10\%} = N_c S_u \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

$N_c$  = factor de capacidad de carga, [que tiene un valor de diseño de:  $N_c = 12$ ]

$S_u$  = resistencia al corte no drenada ( $\text{KN/m}^2$ )

Se indican para el diseño los factores de resistencia de punta  $(RF)_b$  y un valor aproximado del factor de seguridad (FS).

$$(RF)_b = 0.66 \quad [\text{ASCE-7}]$$

$$(RF)_b = 0.69 \quad [\text{AASHTO}]$$

$$FS = 2.3$$



# **CAPÍTULO VI**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**



## 6.1 CONCLUSIONES

- Se ha conseguido desarrollar con éxito una herramienta que permite el análisis de problemas geotécnicos en Obras Civiles y el Diseño de pilotes hincados y perforados por Estados Límites, y su respectiva implementación en el *LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA (LVIG)*.
- Esta aplicación web está sujeta a continuas actualizaciones, es decir, que se puede mejorar tanto su interface visual, como las metodologías incorporadas a esta.
- La presente herramienta permite reducir el tiempo de cálculo al momento de realizar un análisis de problemas geotécnicos ya sea en cimentaciones superficiales o profundas.
- La herramienta de análisis de problemas geotécnicos en Obras Civiles ayudará a mejorar los métodos de enseñanza - aprendizaje en lo referente a la ingeniería de cimentaciones.
- Con el desarrollo de esta herramienta se incentivará a futuras investigaciones sobre análisis de problemas geotécnicos en Obras Civiles.



## 6.2 RECOMENDACIONES

- Investigar acerca de otras metodologías para el análisis de problemas geotécnicos en Obras Civiles y realizar una comparación entre ellas para decidir cuál proporciona resultados más confiables.
- Modificar el código de todas las aplicaciones, de tal manera que se puedan considerar más alternativas de cálculo como aumentar el número de estratos, considerar el nivel freático en el diseño de pilotes y además se pueda actualizar de manera continua las metodologías empleadas para el proceso de diseño.
- Leer detenidamente los manuales de usuario, antes de usar cualquiera de las aplicaciones, con el fin de evitar el mal funcionamiento de la herramienta.



# **CAPÍTULO VII**

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



- SÁNCHEZ, Matías. 2008. *Ejercicios Resueltos de Geotecnia*. Bellisco Ediciones Técnicas y Científicas. Primera Edición. Madrid.
- FOYE Kevin, ABOU Grace, SALGADO Rodrigo. 2004. *Diseño de Fundaciones Profundas por Estados Límites*. Universidad de Purdue, West Lafayette, Indiana.
- DAS, Braja M. 2001. *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*. California State University, Sacramento. International Thomson Editores. Cuarta Edición. México.
- CODUTO, Donald P. 2008. *Geotechnical Engineering principles and practices*. PHI Learning Private Limited. New Delhi.
- GUNARATNE, Manjriker. 2006. *The Foundation Engineering Handbook*. Taylor & Francis Group. CRC Press. New York. United States.
- DUQUE Gonzalo, ESCOBAR Carlos. 2002. *Texto para la asignatura mecánica de suelos*. Universidad Nacional de Colombia. Manizales.
- NORMA, ASTM A 6/A 6M – 07. Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling. 2007



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
*La Universidad Católica de Loja*

## **ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

### **“IMPLEMENTACIÓN DE OCHO HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EN OBRAS CIVILES EN EL LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA (LVIG)”**

**TRABAJO DE FIN DE CARRERA  
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

#### **DATOS GENERALES**

**AUTOR:**

Diego Fernando Urgilés González

**DIRECTOR:**

Ing. José Hurtado Hurtado

**LOJA - ECUADOR**

**2010**



## RESUMEN

La elección del tipo de cimentación depende especialmente de las propiedades del suelo, posición del nivel freático y también de la magnitud de las cargas existentes. A partir de todos esos datos se calcula la capacidad portante, que junto con la homogeneidad del terreno aconsejan usar un tipo u otro diferente de cimentación. Siempre que es posible se emplean cimentaciones superficiales, ya que son el tipo de cimentación menos costoso y más simple de ejecutar. En el caso cuando el suelo superficial posee características inadecuadas para cimentar se busca otras alternativas entre ellas está cimentaciones profundas.

La presente investigación ha permitido desarrollar ocho aplicaciones web de análisis de problemas geotécnicos en obras civiles de las cuales, cuatro se centra en la aplicación de tensión efectiva, obtención de tensiones en terrenos estratificados en condiciones hidrostáticas e hidrodinámicas. Las siguientes dos aplicaciones web analizan y ofrecen una visión general de los asentamientos por consolidación primaria y cálculo del coeficiente de consolidación y las dos últimas se encuentran en la misma aplicación web que trata sobre el diseño de pilotes hincados y perforados por factores de carga y resistencia (LRFD) por estados límites, que es un método de diseño en el cual las cargas de diseño se mayoran y las resistencias de diseño se minoran multiplicando por factores mayores y menores que la unidad respectivamente, empleando: el lenguaje de programación de *Visual Basic.Net 2005*, distintos controles de *Ajax*, y lenguaje de *Java script*.

Estas aplicaciones permiten reducir considerablemente el tiempo de diseño de cimentaciones superficiales y profundas. Además, dentro de la escuela de Ingeniería Civil, constituyen un aporte para el entorno enseñanza – aprendizaje, ya que las herramientas pueden ayudar a los estudiantes, a corroborar las metodologías de cálculo para el análisis de problemas geotécnicos en Obras Civiles.

Entre las herramientas desarrolladas tenemos:



- ✓ Herramienta “*Tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales en un terreno estratificado*”, se ha elaborado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúan las tensiones en el suelo en un terreno estratificado compuesto de tres estratos, que a su vez se apoya sobre un macizo rocoso impermeable, con el propósito de construir una losa de cimentación para lo cual se realizará una excavación. La presente herramienta permite determinar y graficar las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales antes y después de la excavación.
  
- ✓ Herramienta “*Tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales bajo la cimentación del pilón de un puente*”, se ha diseñado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúan las tensiones en el suelo bajo la cimentación de un pilón de un puente de hormigón armado que a su vez se cimenta en el cauce de un río apoyándose sobre la superficie de un estrato. El nivel de agua en el río puede variar sobre la superficie del estrato. La presente herramienta permite determinar las tensiones verticales totales, efectivas e intersticiales a cualquier profundidad bajo el centro de la cimentación del pilón, en las siguientes condiciones: cuando el nivel de agua en el río coincide con la superficie del estrato y cuando el nivel de agua en el río está sobre la superficie del estrato.
  
- ✓ Herramienta “*Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos*”, se ha diseñado con la finalidad de conocer si la estructura del pilón va a sufrir un asentamiento cuando el nivel del agua del río varíe con la superficie del estrato, para lo cual se realiza un análisis de cómo actúan las tensiones en el suelo cuando se desea construir una edificación sobre una losa de cimentación que transmite presión uniforme sobre el terreno, para esto se necesita realizar una excavación en el estrato arcilloso apoyado sobre un estrato de arena gruesa que contiene agua subterránea, para esto se han tomado datos de campo. Un piezómetro insertado en el contacto entre dos estratos el mismo que registra el nivel de agua artesiana sobre la superficie del terreno. La presente herramienta permite determinar el caudal que se filtra hacia la superficie del terreno y el factor



de seguridad empleado en el levantamiento de suelos arcillosos al finalizar la excavación y después de construir la losa de cimentación.

- ✓ Herramienta “*Factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos mejorados*”, se ha diseñado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúan las tensiones en el suelo cuando se va a proceder a la construcción de una losa de cimentación en un terreno estratificado compuesto principalmente de dos estratos que a su vez se apoyan sobre un estrato de arena media. Para lo cual se va a realizar una excavación, después se mejorará el terreno interior con una inyección de *grout* (agua y cemento). La presente herramienta permite determinar el factor de seguridad empleado en el levantamiento de suelos de mejoramiento, en las siguientes condiciones: cuando el suelo mejorado se considera impermeable y permeable. Además se determinará el caudal que se filtrará hacia la zona excavada.
  
- ✓ Herramienta “*Determinación del asentamiento por consolidación primaria en una arcilla*”, se ha diseñado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúa la superficie de un terreno estratificado compuesto principalmente de tres estratos siendo el del medio una arcilla donde se va a construir una edificación y este proceso impondrá un incremento en la presión vertical en los suelos generando un asentamiento el mismo que es medible en la mitad de la capa de arcilla. La presente herramienta permite determinar el asentamiento por consolidación primaria en la mitad de la capa de arcilla y el índice de vacíos final en la arcilla.
  
- ✓ Herramienta “*Determinación de la curva de asentamiento por consolidación primaria en una arcilla*”, se ha diseñado con la finalidad de realizar un análisis de cómo actúa la superficie de un estrato de arcilla, que se apoya sobre un macizo granítico impermeable, donde se va a construir una edificación que a su vez transmitirá una presión uniforme generando un asentamiento que es medible en la mitad de la capa de arcilla. La presente herramienta permite determinar la curva de asentamientos instantáneos y



corregidos por consolidación primaria de la arcilla, con el propósito de tener en cuenta el asentamiento de la cimentación provocado por la consolidación primaria de la arcilla, generado en diversos tiempos a lo largo de la vida útil de la obra.

- ✓ Herramienta “*Diseño de pilotes hincados y perforados por Estados Límites*”, se ha diseñado con la finalidad de proponer un método de diseño por Estados Límites para Pilotes Hincados y Perforados que está basado en un estudio racional de los métodos de diseño en base a la probabilidad. En particular, se utiliza el Diseño por Factores de Carga y Resistencia para facilitar la metodología de Diseño por Estados Límites. La presente herramienta permite determinar factores de resistencia para resistencia friccional y de punta, en base a las propiedades de los suelos y a diseño directo (ensayos in situ).

Además se elaboraron manuales de usuario para cada una de las herramientas, para lo cual se ha tomado como referencia diferentes metodologías cuyo proceso de cálculo es de carácter analítico.

Con el fin de hacer más agradable la interfaz visual de las herramientas, y de proporcionar cierta ayuda al usuario durante el ingreso de datos, se han incorporado: esquemas de cimentación para cada una de las aplicaciones, valores recomendados para distintos parámetros, y en varios casos, gráficas que ayudan a la interpretación de resultados obtenidos.

Todas estas aplicaciones han sido satisfactoriamente implementadas en el *Laboratorio virtual de ingeniería geotécnica (LVIG)*. Para poder hacer uso de estas herramientas se debe ingresar gratuitamente, como usuario registrado del LVIG, vía online a través de la dirección [www.utpl.edu.ec/vleg](http://www.utpl.edu.ec/vleg), en la sección de ANÁLISIS.