

## ÍNDICE GENERAL

|   |          |
|---|----------|
| <b>1. Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>             | <b>1</b> |
| 1.1. Introducción.....  | 1        |
| 1.2. Objetivos.....   | 3        |
| 1.3. Contenido.....   | 4        |
| <b>2. Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE .....</b>                     | <b>7</b> |
| 2.1. Introducción.....  | 7        |
| 2.2. Caracterización geotécnica de suelos volcánicos.....       | 7        |
| 2.2.1. Estudios de suelos volcánicos en la ciudad de Quito..... | 12       |
| 2.2.2. Estudio geotécnico para la Línea 1 de Metro Quito .....  | 15       |
| 2.3. La técnica de “Soil Nailing” .....                         | 22       |
| 2.3.1. Introducción a la técnica .....                          | 22       |
| 2.3.2. Comportamiento de “Soil Nails”.....                      | 23       |
| 2.3.3. Historia de la técnica de “Soil Nailing” .....           | 25       |
| 2.3.4. Componentes de un sistema de “Soil Nailing” .....        | 26       |
| 2.3.4.1. Generalidades.....                                     | 26       |
| 2.3.4.2. “Soil Nails”.....                                      | 27       |
| 2.3.4.3. Pantalla o “Facing”.....                               | 29       |
| 2.3.5. Ventajas de la técnica de “Soil Nailing” .....           | 29       |
| 2.3.5.1. Construcción .....                                     | 29       |
| 2.3.5.2. Rendimiento.....                                       | 30       |
| 2.3.5.3. Costo.....   | 30       |
| 2.3.6. Limitaciones de la técnica de “Soil Nailing”.....        | 30       |
| 2.3.7. Modos de falla.....                                      | 31       |
| 2.3.7.1. Introducción .....                                     | 31       |
| 2.3.7.2. Modos de falla externa.....                            | 31       |
| 2.3.7.3. Modos de falla interna .....                           | 32       |
| 2.3.8. Parámetros equivalentes para “Soil Nails”.....           | 32       |
| 2.3.9. Modelos constitutivos de suelo .....                     | 34       |
| 2.3.9.1. Modelo de Mohr Coulomb.....                            | 34       |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.3.9.2. Modelo de <i>Hardening Soil</i> .....  | 34        |
| 2.3.9.3. Modelo de <i>Hardening Soil with Small-Strain Stiffness</i> .....                                | 37        |
| 2.4. Métodos de análisis de sistemas de “ <i>Soil Nailing</i> ” .....                                     | 38        |
| 2.4.1. Método de los elementos finitos.....   | 38        |
| 2.4.2. Métodos de equilibrio límite .....   | 39        |
| 2.4.2.1. Generalidades .....  | 39        |
| 2.4.2.2. Método de <i>Fellenius</i> .....   | 40        |
| 2.4.2.3. Método de <i>Bishop simplificado</i> .....   | 40        |
| 2.4.2.4. Método de <i>Janbu simplificado</i> .....  | 40        |
| 2.4.2.5. Método de <i>Spencer</i> .....   | 41        |
| 2.4.2.6. Método de <i>Morgenstern-Price</i> .....   | 41        |
| 2.5. Resultados empíricos de excavaciones realizadas mediante la técnica de “ <i>Soil Nailing</i> ” ..... | 41        |
| 2.5.1. Introducción .....   | 41        |
| 2.5.2. “ <i>Soil Nail Wall</i> ” en Manhattan (Estados Unidos) .....                                      | 41        |
| 2.5.3. “ <i>Soil Nailing</i> ” en Dublín (Irlanda) .....  | 43        |
| 2.6. La práctica de “ <i>Soil Nailing</i> ” en la ciudad de Quito .....                                   | 45        |
| 2.7. Conclusiones relativas al estado del arte .....  | 46        |
| <b>3. Capítulo 3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA ZONA DE ESTUDIO .....</b>                              | <b>49</b> |
| 3.1. Introducción .....   | 49        |
| 3.2. Marco geológico .....  | 51        |
| 3.3. Investigaciones geotécnicas “ <i>in situ</i> ” .....   | 54        |
| 3.3.1. Generalidades .....  | 54        |
| 3.3.2. Ensayo de Penetración Estándar ( <i>SPT</i> ).....   | 55        |
| 3.3.3. Toma de muestras.....  | 55        |
| 3.4. Propiedades índice y composición del suelo .....   | 56        |
| 3.4.1. Generalidades .....  | 56        |
| 3.4.2. Contenido natural de agua y Límites de <i>Atterberg</i> .....                                      | 56        |
| 3.4.3. Análisis granulométrico.....   | 59        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.4.4. Densidad de sólidos .....  | 60        |
| 3.4.5. Densidad .....   | 60        |
| 3.4.6. Relación de vacíos .....   | 61        |
| 3.4.7. Porosidad .....  | 61        |
| 3.4.8. Contenido de carbonatos .....  | 62        |
| 3.4.9. Contenido de materia orgánica .....  | 62        |
| 3.5. Mineralogía y Microestructura .....  | 63        |
| 3.5.1. Mineralogía .....  | 63        |
| 3.5.2. Microestructura .....  | 64        |
| 3.6. Consolidación .....  | 65        |
| 3.7. Resistencia al Corte .....   | 69        |
| 3.7.1. Introducción .....   | 69        |
| 3.7.2. Resistencia al Corte No Drenada .....  | 69        |
| 3.7.3. Resistencia al Corte Drenada .....   | 76        |
| 3.8. Parámetros de deformación .....  | 79        |
| 3.9. Conclusiones relativas a la caracterización geotécnica de la zona de estudio ..... | 80        |
| <b>4. Capítulo 4. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL .....</b>                      | <b>83</b> |
| 4.1. Introducción .....   | 83        |
| 4.2. Descripción de las estructuras .....   | 84        |
| 4.3. Proceso constructivo de muros de sótanos en la ciudad de Quito ....                | 87        |
| 4.3.1. Introducción .....   | 87        |
| 4.3.2. Secuencia constructiva de muros anclados de <i>Torre Centre</i> .....            | 88        |
| 4.3.3. Secuencia constructiva de muros anclados de <i>Zaigen</i> .....                  | 93        |
| 4.3.4. Construcción de muros anclados de <i>Torre Centre</i> y <i>Zaigen</i> .....      | 100       |
| 4.4. Instrumentación .....  | 106       |
| 4.4.1. Generalidades .....  | 106       |
| 4.4.2. Galgas extensométricas .....   | 109       |
| 4.4.3. Bases de nivelación .....  | 112       |

|   |            |
|---|------------|
| 4.4.4. Proceso de instrumentación .....   | 113        |
| 4.5. Monitorización .....   | 120        |
| 4.5.1. Introducción .....   | 120        |
| 4.5.2. Instrumentos para monitorización .....   | 120        |
| 4.5.3. Plan de monitorización .....   | 122        |
| 4.6. Conclusiones relativas al planteamiento del estudio experimental.                              | 123        |
| <b>5. Capítulo 5. ANÁLISIS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS Y EQUILIBRIO LÍMITE .....</b>                 | <b>125</b> |
| 5.1. Introducción .....   | 125        |
| 5.2. Parámetros geotécnicos para análisis .....   | 125        |
| 5.2.1. Generalidades .....  | 125        |
| 5.2.2. Módulo de Young $E$ .....  | 126        |
| 5.2.2.1. Introducción .....   | 126        |
| 5.2.2.2. Módulo de Young $E$ para el proyecto Torre Centre .....                                    | 126        |
| 5.2.2.3. Módulo de Young $E$ para el proyecto Zaigen .....  | 127        |
| 5.2.3. Módulo de rigidez secante $E_{50}^{ref}$ .....   | 128        |
| 5.2.3.1. Introducción .....   | 128        |
| 5.2.3.2. Módulo de rigidez secante $E_{50}^{ref}$ para el proyecto Torre Centre .....               | 128        |
| 5.2.3.3. Módulo de rigidez secante $E_{50}^{ref}$ para el proyecto Zaigen .....                     | 130        |
| 5.2.3.4. Estimación de Módulo de rigidez secante $E_{50}^{ref}$ a partir de $E_{50(u)}^{ref}$ ..... | 133        |
| 5.2.4. Módulo de rigidez tangente $E_{oed}^{ref}$ .....   | 134        |
| 5.2.4.1. Introducción .....   | 134        |
| 5.2.4.2. Módulo de rigidez tangente $E_{oed}^{ref}$ para el proyecto Torre Centre .....             | 134        |
| 5.2.4.3. Módulo de rigidez tangente $E_{oed}^{ref}$ para el proyecto Zaigen .....                   | 136        |
| 5.2.5. Módulo de rigidez descarga/recarga $E_{ur}^{ref}$ .....                                      | 138        |
| 5.2.5.1. Introducción .....   | 138        |
| 5.2.5.2. Módulo de rigidez descarga/recarga $E_{ur}^{ref}$ para el proyecto Torre Centre .....      | 138        |
| 5.2.5.3. Módulo de rigidez descarga/recarga $E_{ur}^{ref}$ para el proyecto Zaigen .....            | 139        |

|   |     |
|---|-----|
| 5.2.6. Módulo inicial de corte de referencia en pequeñas deformaciones $G_0^{ref}$  | 140 |
| 5.2.6.1. Introducción .....   | 140 |
| 5.2.6.2. Módulo de corte de referencia $G_0^{ref}$ para el proyecto Torre Centre .....  | 140 |
| 5.2.6.3. Módulo de corte de referencia $G_0^{ref}$ para el proyecto Zaigen.....   | 141 |
| 5.2.7. Nivel de deformación por corte, donde $G = 0.7G_0$ , $\gamma_{0.7}$ .....  | 143 |
| 5.2.8. Ángulo de dilatancia $\psi$ .....  | 143 |
| 5.2.8.1. Introducción .....   | 143 |
| 5.2.8.2. Ángulo de dilatancia $\psi$ para el proyecto Torre Centre.....   | 144 |
| 5.2.8.3. Ángulo de dilatancia $\psi$ para el proyecto Zaigen.....   | 144 |
| 5.2.9. Resumen de parámetros geotécnicos .....  | 145 |
| 5.2.9.1. Resumen de parámetros para el modelo de Mohr Coulomb (MC).....   | 145 |
| 5.2.9.2. Resumen de parámetros para los modelos de Hardening Soil (HS) y Hardening Soil with Small-Strain Stiffness (HSsmall) ..... | 146 |
| 5.3. Características de pantallas y “Soil Nails” para análisis .....  | 148 |
| 5.4. Estudio por el método de los elementos finitos .....   | 150 |
| 5.4.1. Introducción .....   | 150 |
| 5.4.2. Análisis con Plaxis 2D V20 .....   | 151 |
| 5.4.3. Análisis de estructura de proyecto Torre Centre.....   | 151 |
| 5.4.3.1. Generalidades.....   | 151 |
| 5.4.3.2. Diagramas de fuerza axial de tensión en “Soil Nails” de Torre Centre .   | 155 |
| 5.4.3.3. Desplazamientos horizontales y verticales inducidos en Torre Centre...   | 164 |
| 5.4.4. Análisis de estructura de proyecto Zaigen .....  | 169 |
| 5.4.4.1. Generalidades.....   | 169 |
| 5.4.4.2. Diagramas de fuerza axial de tensión en “Soil Nails” de Zaigen .....   | 173 |
| 5.4.4.3. Desplazamientos horizontales y verticales inducidos en Zaigen .....  | 182 |
| 5.5. Análisis de estabilidad global de estructuras de “Soil Nailing” .....  | 187 |
| 5.5.1. Generalidades .....  | 187 |
| 5.5.2. Análisis de estabilidad global de estructura de proyecto Torre Centre .....  | 188 |
| 5.5.3. Análisis de estabilidad global de estructura de proyecto Zaigen.....   | 189 |

|  |            |
|--|------------|
| 5.6. Conclusiones relativas al análisis mediante elementos finitos y equilibrio límite ..... | 190        |
| <b>6. Capítulo 6. RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL</b>                                    | <b>193</b> |
| 6.1. Introducción .....  | 193        |
| 6.2. Resultados experimentales por fases constructivas.....                                  | 194        |
| 6.2.1. Generalidades .....   | 194        |
| 6.2.2. Fuerza axial en barras de acero de “Soil Nails” .....                                 | 194        |
| 6.2.2.1. Introducción.....   | 194        |
| 6.2.2.2. Fuerza axial en barras de acero de “Soil Nails” de Torre Centre.....                | 194        |
| 6.2.2.3. Fuerza axial en barras de acero de “Soil Nails” de Zaigen .....                     | 203        |
| 6.2.2.4. Efectos de la temperatura en las lecturas de “Strain” .....                         | 212        |
| 6.2.3. Desplazamientos horizontales y verticales medidos en excavaciones                     | 212        |
| 6.2.3.1. Introducción.....   | 212        |
| 6.2.3.2. Desplazamientos horizontales y verticales medidos en Torre Centre.....              | 213        |
| 6.2.3.3. Desplazamientos horizontales y verticales medidos en Zaigen .....                   | 218        |
| 6.3. Comparación de resultados experimentales y numéricos.....                               | 224        |
| 6.3.1. Generalidades .....   | 224        |
| 6.3.2. Comparación de fuerza axial en barras de acero de “Soil Nails” .....                  | 224        |
| 6.3.2.1. Introducción.....   | 224        |
| 6.3.2.2. Comparación de fuerza axial en barras de acero de “Soil Nails” de Torre Centre..... | 224        |
| 6.3.2.3. Comparación de fuerza axial en barras de acero de “Soil Nails” de Zaigen .....      | 231        |
| 6.3.3. Comparación de desplazamientos horizontales en pantallas.....                         | 239        |
| 6.3.3.1. Introducción.....   | 239        |
| 6.3.3.2. Comparación de desplazamientos horizontales en pantalla de Torre Centre .....       | 239        |
| 6.3.3.3. Comparación de desplazamientos horizontales en pantalla de Zaigen... ..             | 241        |
| 6.3.4. Comparación de asentamientos en el terreno detrás de pantallas.....                   | 244        |
| 6.3.4.1. Introducción.....   | 244        |
| 6.3.4.2. Comparación de asentamientos en el terreno detrás de pantalla de Torre Centre.....  | 244        |

---

|  |            |
|--|------------|
| 6.3.4.3. Comparación de asentamientos en el terreno detrás de pantalla de Zaigen ..... | 246        |
| 6.4. Conclusiones relativas a los resultados del estudio experimental ..               | 249        |
| <b>7. Capítulo 7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>             | <b>251</b> |
| 7.1. Conclusiones .....  | 251        |
| 7.2. Futuras líneas de investigación .....   | 255        |
| <b>REFERENCIAS .....</b>   | <b>257</b> |
| <b>A. APÉNDICE.....</b>  | <b>265</b> |
| A.1. Ensayos de difracción de rayos X .....  | 265        |
| A.2. Ensayos de consolidación unidimensional .....                                     | 270        |
| A.3. Trayectorias de tensiones efectivas en ensayos triaxiales tipo <i>CU</i>          | 275        |