

CONTENCIÓN, TRATAMIENTO Y MEJORAMIENTO DE SUELOS

Contenido

	Prólogo	<i>i</i>
1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Parte I: Contención de excavaciones	1
	1.1.1 Empuje de tierra sobre muros	
	1.1.2 Muros pantalla	
	1.1.3 Tablaestacas	
	1.1.4 Lumbreras en suelos blandos	
	1.1.5 Concreto lanzado	
1.2	Parte II: Refuerzo de suelos	21
	1.2.1 Anclas	
	1.2.2 Refuerzo con geotextiles	
	1.2.3 Inclusiones rígidas	
	1.2.4 Terraplenes piloteados	
	1.2.5 Vibrosustitución	
	1.2.6 Pilas de agregado compactado	
1.3	Parte III: Mejoramiento de suelos	34
	1.3.1 Compactación dinámica	
	1.3.2 Sistemas de precarga	
	1.3.3 Estabilización con cal	
1.4	Parte IV: Control de agua	41
	1.4.1 Sistemas de pozos de bombeo	
	Referencias	45

Parte I: Contención de excavaciones

2	DISEÑO DE EXCAVACIONES EN SUELOS BLANDOS	53
2.1	Introducción	53
2.2	Equilibrio plástico en suelos	53
	2.2.1 Hipótesis fundamentales de Terzaghi y Peck (1967)	
	2.2.2 Equilibrio plástico de la teoría de Rankine	
	2.2.3 Sobrecarga en la superficie del terreno (Terzaghi y Peck, 1967)	
	2.2.4 Condición activa desarrollada por el giro de la parte inferior de la estructura de retención (Terzaghi y Peck, 1967)	
	2.2.5 Condición pasiva desarrollada por el giro de la parte inferior de la estructura de retención (Terzaghi y Peck, 1967)	
	2.2.6 Influencia de la rugosidad de la estructura de retención (Terzaghi y Peck, 1967)	
	2.2.7 Influencia de la rugosidad del sistema de contención en la forma de la superficie de deslizamiento (Terzaghi y Peck, 1967)	
2.3	Sistemas de contención para excavaciones a cielo abierto (Terzaghi y Peck, 1967)	62
	2.3.1 Excavaciones en arena seca (Terzaghi y Peck, 1967)	

2.3.2	Excavaciones en arcilla saturada (Terzaghi y Peck, 1967)	
2.3.3	Sistemas de contención (Terzaghi y Peck, 1967; Cuevas, 2012)	
2.3.4	Aspectos relevantes para la selección del sistema (Terzaghi y Peck, 1967)	
2.4	Presiones horizontales generadas por la masa de suelo en los sistemas de contención	73
2.4.1	Presiones horizontales por cimentaciones y sobrecargas (Olivari, 1983)	
2.4.2	Presiones horizontales por la masa de suelo	
2.5	Falla de fondo	88
2.5.1	Falla de fondo por esfuerzos cortantes	
2.5.2	Falla por subpresión	
2.6	Empotramiento de la estructura de contención	103
2.6.1	Zeevaert (1983)	
2.6.2	Tamez (1987 y 2001)	
2.7	Deformaciones en la superficie	106
2.7.1	Introducción	
2.7.2	Peck (1969)	
2.7.3	Clough y O'Rourke (1990)	
2.7.4	Bowles (1996)	
2.7.5	Criterio de Ou y Hsieh (2011)	
2.8	Recomendaciones para aumentar la seguridad de las excavaciones (Jiménez, 2018)	111
2.8.1	Separación horizontal de puntales	
2.8.2	Precarga	
2.8.3	Empotramiento de la pata	
2.9	Modelado numérico para excavaciones (Jiménez, 2018)	115
2.9.1	Principios básicos	
2.9.2	Modelos constitutivos	
2.9.3	Selección del modelo constitutivo	
2.9.4	Selección de parámetros	
2.9.5	Conclusiones	
2.10	Casos prácticos	117
2.10.1	Excavación a 10.0 m de profundidad en las calles de Sevilla y Tokio, Ciudad de México (Cuevas, 2012)	
2.10.2	Falla de excavación de Tokio y Sevilla (Cuevas, 2012)	
	Referencias	156
3	MUROS PANTALLA	159
3.1	Introducción	159
3.1.1	Generalidades	
3.1.2	Historia en el contexto internacional	
3.1.3	Historia en el contexto mexicano	
3.2	Clasificación de los muros pantalla	164
3.2.1	Clasificación por función del diseño	
3.2.2	Clasificación por configuración en planta	
3.2.3	Clasificación por secuencia constructiva	
3.2.4	Clasificación por tipo de refuerzo	
3.3	Dimensiones típicas	169
3.3.1	Dimensiones en planta de tableros	
3.3.2	Profundidades de desplante	171

3.4	Equipos de excavación	
	3.4.1 Criterio de selección	
	3.4.2 Excavadora/retroexcavadora	
	3.4.3 Almejas mecánicas de caída libre	
	3.4.4 Almejas hidráulicas de caída libre	
	3.4.5 Almejas hidráulicas con Kelly	
	3.4.6 Excavadoras de circulación inversa	
	3.4.7 Equipos de percusión	
	3.4.8 Equipos de perforación	
	3.4.9 Hidrofresas	
3.5	Lodos de estabilización o excavación	188
	3.5.1 Generalidades	
	3.5.2 Criterio para la selección del tipo de lodo	
	3.5.3 Tipos de fluidos de estabilización	
	3.5.4 Consideraciones de diseño	
	3.5.5 Materiales principales	
	3.5.6 Características de los lodos	
	3.5.7 Ejecución	
	3.5.8 Control de calidad	
	3.5.9 Mecanismo de falla en zanjas	
3.6	Etapas de construcción	216
	3.6.1 Muros convencionales, postensados, viga montante y revestimiento de concreto.	
	3.6.2 Muros precolados	
3.7	Materiales, inspección, registros y observaciones de las condiciones finales	258
	3.7.1 Materiales	
	3.7.2 Inspección y tolerancias	
	3.7.3 Registros	
	3.7.4 Observaciones de las condiciones finales	
	3.7.5 Diferencias en las condiciones del sitio	
	3.7.6 Terminación del trabajo	
3.8	Consideraciones estructurales	281
	3.8.1 Juntas de colado	
	3.8.2 Trabe de coronamiento	
3.9	Reparación de defectos y filtraciones en muros pantalla	295
	3.9.1 Tipos de defectos y filtraciones	
	3.9.2 Clasificación por severidad	
	3.9.3 Técnicas de reparación	
3.10	Casos prácticos	312
	3.10.1 Muro pantalla precolado	
	3.10.2 Muro pantalla convencional	
	Referencias	325
4	TABLAESTACAS	329
4.1	Introducción	329
4.2	Tablaestacas de madera	331
4.3	Tablestacas de concreto	333
4.4	Tablestacas de acero	338
	4.4.1 Generalidades	
	4.4.2 Secciones típicas	
4.5	Tablestacas vinílicas	340

4.5.1	Generalidades	
4.5.2	Aplicaciones recomendadas	
4.5.3	Maquinaria recomendada	
4.6	Equipo de hincado	343
4.6.1	Hincado por impacto	
4.6.2	Hincado por vibración	
4.6.3	Hincado por presión	
4.6.4	Secuencia de hincado	
4.6.5	Guías de hincado	
4.6.6	Perfiles planos	
4.6.7	Corrosión	
4.7	Muro Berlín	353
4.8	Muro de pilas	358
4.8.1	Perforación	
4.8.2	Acero de refuerzo y concreto	
4.8.3	Factores que influyen en la selección de la técnica	
4.9	Casos prácticos	363
4.9.1	Torre Latinoamericana, ciudad de México	
4.9.2	Trinchera Tlaquepaque, Línea 3 de Tren Ligero, Guadalajara.	
4.9.3	Andador de protección marginal Yavaros, Sonora.	
4.9.4	Muro de pilas contiguas en la zona geotécnica III de la Ciudad de México	
	Referencias	386
5	LUMBRERAS EN SUELOS BLANDOS	389
5.1	Introducción	389
5.1.1	¿Qué es una lumbrera?	
5.1.2	Aplicaciones	
5.1.3	Estructura de una lumbrera	
5.2	Diseño geotécnico de lumbreras	395
5.2.1	Generalidades	
5.2.2	Exploración geotécnica	
5.2.3	Información básica para diseño	
5.2.4	Análisis geotécnico	
5.2.5	Comportamiento mecánico de una sección circular	
5.2.6	Desplazamientos	
5.3	Procedimientos de construcción	412
5.3.1	Consideraciones generales de los procesos constructivos	
5.3.2	Pozo indio	
5.3.3	Técnica de flotación	
5.3.4	Anillos prefabricados	
5.3.5	Muro diafragma	
5.3.6	Pilas secantes	
5.4	Instrumentación	466
5.5	Manejo de riesgos	467
	Referencias	469
6	CONCRETO LANZADO	475
6.1	Introducción	475
6.2	Métodos de lanzado	
6.2.1	Vía seca	

6.2.2	Vía húmeda	
6.3	Ventajas de la vía húmeda respecto a la vía seca	479
6.4	Materiales	480
6.4.1	Cemento	
6.4.2	Agua	
6.4.3	Agregados	
6.4.4	Aditivos	
6.4.5	Fibras	
6.4.6	Dosificación de mezclas	
6.5	Equipos	492
6.5.1	Equipos para dosificación y mezclado	
6.5.2	Equipos para transporte del concreto	
6.5.3	Equipos para generación eléctrica	
6.5.4	Equipos para generación de aire a alta presión	
6.5.5	Bombas de agua	
6.5.6	Bombas dosificadoras de aditivo	
6.5.7	Equipos de lanzado	
6.6	Cuadrilla típica	501
6.7	Proceso del concreto lanzado	503
6.7.1	Planeación del proceso	
6.7.2	Ejecución de los trabajos	
6.8	Concreto lanzado en taludes existentes y nuevos cortes	509
6.9	Concreto lanzado en túneles por método convencional	514
6.10	Lumbreras	516
6.11	Otros casos para el empleo del concreto lanzado	516
6.11.1	Cajones de cimentación y lumbreras	
6.11.2	Taludes y pilas	
6.11.3	Pilas y concreto lanzado	
6.11.4	Muro armado y anclas de tensión para confinar un bloque de material	
6.11.5	Lanzado entre marcos de acero de galería en condiciones de suelos erosionables	
	Referencias	522

Parte II: Refuerzo de suelos

7	DISEÑO DE ANCLAS	525
7.1	Introducción	525
7.2	Las anclas en los sistemas de contención	525
7.2.1	Partes constitutivas de las anclas	
7.2.2	Clasificación de las anclas	
7.3	Diseño de las anclas	539
7.3.1	Especificaciones para los componentes del ancla	
7.3.2	Capacidad del ancla	
7.3.3	Tensado de anclas	
7.3.4	Monitoreo del comportamiento	
7.3.5	Ejemplos de diseño	
7.4	Construcción	588
	Referencias	599

8	REFUERZO DE TERRAPLENES CON GEOTEXTILES	601
8.1	Introducción	601
8.2	Geotextiles	602
	8.2.1 Funciones y aplicaciones	
	8.2.2 Aplicaciones de los geotextiles a terraplenes reforzados	
8.3	Diseño de terraplenes reforzados sobre suelos suaves	605
	8.3.1 Consideraciones de diseño	
	8.3.2 Etapas de diseño	
8.4	Propiedades de los geotextiles y del relleno	618
	8.4.1 Requisitos de resistencia del geotextil	
	8.4.2 Necesidades de drenaje	
	8.4.3 Consideraciones ambientales	
	8.4.4 Requisitos de capacidad de construcción (capacidad de supervivencia)	
	8.4.5 Trabajabilidad	
	8.4.6 Consideraciones del relleno (material para terraplén)	
8.5	Especificaciones	624
8.6	Procedimientos de construcción	632
	8.6.1 Preparar la subrasante	
	8.6.2 Procedimientos para colocar el geotextil	
	8.6.3 Procedimientos de colocación, distribución y compactación del relleno.	
	8.6.4 Monitoreo e instrumentación	
8.7	Refuerzo de terraplenes que cubren áreas grandes	638
8.8	Casos prácticos	639
	8.8.1 Refuerzo de terraplenes sobre suelos orgánicos y granulares mal graduados con potencial de licuación: Caso Túnel Coatzacoalcos, Veracruz, México.	
	8.8.2 Muros de contención para el fraccionamiento Balcones del Mar, Ensenada, Baja California, México, a base de geotextil tejido de alta resistencia y concreto lanzado.	
	8.8.3 Muros de contención a base de geosintéticos y concreto lanzado.	
	Referencias	647
	Anexo 1 Normatividad de geotextiles	649
	Anexo 2 Costura y traslape de geotextiles	656
9	INCLUSIONES RÍGIDAS	659
9.1	Introducción	659
	9.1.1 Conceptos generales	
	9.1.2 Mecanismos de transferencia de carga	
	9.1.3 Parámetros que afectan el desempeño del mejoramiento del subsuelo con inclusiones	
9.2	Procesos constructivos	668
	9.2.1 Efectos del proceso constructivo	
9.3	Métodos de análisis	671
	9.3.1 Métodos analíticos	
	9.3.2 Métodos numéricos	
	9.3.3 Comparación de metodologías	
9.4	Comportamiento de suelos reforzados con inclusiones sísmicas	681
9.5	Comportamiento de suelos reforzados con inclusiones ante cargas superficiales cíclicas	682

	9.5.1	Comportamiento de turbinas de viento	
	9.5.2	Comportamiento del terraplén con cargas de tráfico	
9.6		Casos prácticos	683
	9.6.1	Estudio con modelos a escala	
	9.6.2	Unidad habitacional, caso 1	
	9.6.3	Tanques resueltos con pilotes de fricción e inclusiones	
	9.6.4	Unidad habitacional, caso 2	
	9.6.5	Modelo experimental a escala real	
	9.6.6	Terraplén de prueba con inclusiones en el ex lago de Texcoco	
	9.6.7	Aspectos sobresalientes de los casos historia	
9.7		Control de calidad	702
	9.7.1	Alteración inducida en el subsuelo	
	9.7.2	Integridad de la inclusión	
9.8		Normativa	707
		Referencias	707
10		TERRAPLENES PILOTEADOS	711
10.1		Introducción	711
	10.1.1	Presentación	
	10.1.2	Terraplén piloteado con refuerzo basal	
	10.1.3	Alcances y objetivos	
	10.1.4	Antecedentes y experiencias mundiales	
10.2		Componentes de terraplenes piloteados y el fenómeno de arqueo	714
	10.2.1	Componentes del sistema y estado de esfuerzos en la zona de arqueo	
	10.2.2	Resistencia y deformabilidad del suelo que constituye el terraplén	
	10.2.3	Refuerzos geosintéticos artificiales	
	10.2.4	Pilotes y capiteles	
10.3		Enfoques analíticos para el diseño de terraplenes estructurales piloteados con refuerzo geosintético basal	721
	10.3.1	Cargas sobre el terraplén	
	10.3.2	Enfoques principales de diseño de terraplenes piloteados	
	10.3.3	Mecanismo de transferencia de carga del terraplén a los capiteles	
	10.3.4	Esfuerzos en el refuerzo geosintético artificial	
	10.3.5	Verificación de la no indentación de pilotes en el terraplén	
10.4		Análisis numéricos del arqueo en suelos	738
	10.4.1	Efecto de la variación del ángulo de fricción en el material que conforma el terraplén	
	10.4.2	Influencia de la altura del terraplén	
10.5		Caso historia: Terraplén piloteado construido en el ex Lago de Texcoco	741
	10.5.1	Descripción general del terraplén de prueba	
	10.5.2	Instrumentación geotécnica	
	10.5.3	Resultados de las mediciones	
	10.5.4	Arqueo del suelo ante pruebas de placa con carga estática	
10.6		Metodología para el diseño de terraplenes piloteados	759
	10.6.1	Esquema general del procedimiento	
	10.6.2	Consideraciones para una geometría y diseño preliminares	
	10.6.3	Diseño de pilotes, incluyendo capiteles, y su espaciamiento	
	10.6.4	Diseño del refuerzo geosintético basal	
	10.6.5	Estimación de asentamientos a largo plazo	

10.6.6	Consideraciones constructivas y monitoreo de su comportamiento	
10.7	Ventajas y desventajas de los terraplenes piloteados	767
10.8	Ejemplo de aplicación del cálculo de esfuerzos	769
	Referencias	771
11	VIBROSUSTITUCIÓN	775
11.1	Fundamento teórico	775
11.2	Modelos de cálculo	776
11.2.1	Método de Priebe	
11.2.2	Método de Van Impe et al., (1983)	
11.2.3	Método de Greenwood y Kirsh	
11.3	Rango de suelos	782
11.4	Diseño	782
11.5	Predicción de la densificación	784
11.6	Descripción de la técnica	784
11.6.1	Vibrosustitución por vía húmeda	
11.6.2	Vibrosustitución por vía seca o vibrodesplazamiento	
11.7	Material de relleno	788
11.8	Verificación del mejoramiento	788
11.9	Comparación entre vibrocompactación y vibrosustitución	788
11.10	Casos prácticos	790
11.10.1	Manzanillo, Colima (1998)	
11.10.2	Berkeley, California, Estados Unidos (2019 y 2021)	
	Referencias	796
12	PILAS DE AGREGADO COMPACTADO	797
12.1	Introducción	797
12.2	Conceptos generales	798
12.3	Procedimiento constructivo	799
12.3.1	Sistema de perforación y remplazo	
12.3.2	Sistema de desplazamiento	
12.4	Resultados de construcción	805
12.4.1	Incremento de resistencia al corte	
12.4.2	Parámetros compuestos de resistencia al corte	
12.4.3	Incremento en capacidad de carga	
12.4.4	Modos de falla por capacidad de carga en equilibrio límite	
12.5	Protección ante el fenómeno de licuación	813
12.6	Apoyo de cimentaciones y cálculo de asentamientos	814
12.6.1	Zona superior - analogía de resortes	
12.6.2	Zona superior – módulo elástico compuesto	
12.6.3	Zona inferior – asentamiento	
12.6.4	Asentamiento total	
12.6.5	Asentamiento respecto al tiempo	
12.7	Pilas de Agregado Compactado sujetas a tensión	819
12.8	Pruebas de Módulo	819
12.9	Uso del sistema PAC	821
12.10	Diseño de terraplenes y estructuras de transporte	823
12.11	Casos prácticos	824
12.11.1	Aplicación del sistema de perforación y remplazo	
12.11.2	Aplicación del sistema de desplazamiento	
	Referencias	833

Parte III: Mejoramiento de suelos

13	COMPACTACIÓN DINÁMICA	835
13.1	Introducción	835
13.2	Principios de la técnica de compactación dinámica	836
13.3	Restricciones para aplicar la técnica de compactación dinámica	836
13.4	Consideraciones de diseño	837
13.5	Proceso de ejecución	843
13.6	Control de calidad	848
13.7	Caso práctico	849
	Referencias	849
14	SISTEMAS DE PRECARGA	851
14.1	Introducción	851
14.2	Antecedentes históricos	851
14.3	Tipos de precarga	853
	14.3.1 Precarga simple	
	14.3.2 Precarga con drenes verticales	
	14.3.3 Precarga con aplicación de vacío	
14.4	Análisis y diseño de sistemas de precarga	879
	14.4.1 Métodos analíticos	
	14.4.2 Códigos para la evaluación de sistemas de precarga	
	14.4.3 Métodos numéricos	
14.5	Evaluación de la efectividad de sistemas de precarga	894
	14.5.1 Estudio de las propiedades del suelo antes y después del mejoramiento	
	14.5.2 Instrumentación para observar la evolución de la precarga	
	14.5.3 Estimación del grado de consolidación con mediciones de campo	
14.6	Casos prácticos	903
	14.6.1 Precarga y drenes de arena	
	14.6.2 Proyecto Petroquímico Etileno XXI	
	14.6.3 Tramos de prueba en el ex Lago de Texcoco	
	Referencias	914
15	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL	925
15.1	Mecanismos de estabilización	925
15.2	Mecanismos de estabilización	926
15.3	Cal para estabilizaciones	927
15.4	Diseño de mezclas suelo-cal	932
15.5	Procedimiento constructivo	938
	Referencias	950

Parte IV: Control de agua

16	SISTEMAS DE POZOS DE BOMBEO	953
16.1	Introducción	953

16.2	Ecuaciones generales para el análisis de flujo de agua en pozos de bombeo	953
16.2.1	Ley de Darcy	
16.2.2	Ecuación de continuidad	
16.2.3	Ecuación de Laplace	
16.2.4	Ecuación de Poisson	
16.2.5	Ecuación general en régimen transitorio	
16.3	Permeabilidad en suelos	956
16.3.1	Permeabilidad equivalente	
16.3.2	Métodos para determinar la permeabilidad en suelos	
16.3.3	Factores que influyen en la permeabilidad de un suelo	
16.4	Redes de flujo	960
16.5	Pruebas de bombeo	964
16.5.1	Pruebas de bombeo en régimen establecido	
16.5.2	Pruebas de bombeo en régimen transitorio	
16.5.3	Información preliminar	
16.5.4	Diseño de pruebas de bombeo	
16.6	Interpretación de pruebas de bombeo	968
16.6.1	Ecuación de Thiem para un acuífero confinado en régimen establecido	
16.6.2	Ecuación de Thiem-Dupuit para un acuífero confinado en régimen establecido	
16.6.3	Ecuación de Glee para un acuífero semiconfinado en régimen establecido	
16.6.4	Ecuación de Theis para un acuífero confinado en régimen transitorio	
16.6.5	Ecuación de Jacob-Cooper para un acuífero confinado (modificación a la ecuación de Theis)	
16.6.6	Ecuación de Theis-Dupuit para un acuífero no confinado en régimen transitorio	
16.6.7	Ecuación de Hantush-Jacob para un acuífero semiconfinado en régimen transitorio	
16.6.8	Particularidades en la interpretación de pruebas de bombeo	
16.6.9	Programa para el análisis de pruebas de bombeo: AnPo v1.0	
16.7	Sistemas de pozos de bombeo para el control del nivel freático	989
16.7.1	Cárcamos de bombeo	
16.7.2	Sistema de bombeo con pozos-punta	
16.7.3	Sistema de pozos de bombeo profundos	
16.7.4	Sistema de pozos de bombeo con eyectores	
16.8	Casos prácticos	1015
16.8.1	Caso I. Control del nivel freático en una excavación	
16.8.2	Caso II. Sistema de bombeo superficial	
	Referencias	1033
	Apéndice A. Tipos de bombas en sistemas de pozos de bombeo	1036
	Apéndice B. Cálculo de la capacidad de la bomba	1037
	Apéndice C. Dispositivos de observación en pruebas o sistemas de bombeo	1039
	Apéndice D. Procedimiento para utilizar el programa AnPo v1.0	1042