

MECÁNICA DE SUELOS

SEGUNDA EDICIÓN

Felipe Villalobos



Obras y Proyectos
Revista de Ingeniería Civil

EDITORIAL
UNIVERSIDAD CATOLICA
DE LA SANTISIMA CONCEPCION

Copyright © 2016, Editorial UCSC y OyP
Todos los derechos reservados • All rights reserved

Inscripción 247.505
Departamento de Derechos Intelectuales DIBAM

Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema o método, electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito de la editorial y el autor.

No se asume ninguna responsabilidad por parte de la editorial ni del autor ante cualquier daño a la propiedad o a las personas que resulte de la operación o uso de esta publicación o de la información contenida en este libro.

Universidad Católica de la Santísima Concepción
Obras y Proyectos - Editorial UCSC
Alonso de Ribera 2850
Casilla 297 Concepción, Chile
T: +56 41 2345852 / 5047 / 5566
oyp@ucsc.cl • editorial@ucsc.cl
oyp.ucsc.cl • ucsc.cl/vinculacion/editorial

ISBN 978-956-7943-71-5 Tapa dura cosida
ISBN 978-956-7943-70-8 Tapa rústica pegada

Composición y diseño: Mauro Poblete Freire, OyP

Impreso en Chile • Printed in Chile

Índice de contenidos

Índice de contenidos	v
Prólogo	x
Prefacio	xI
1. Origen	1
1.1. Reseña histórica	1
1.1.1. Sinopsis de la Mecánica de Suelos en Chile	5
1.2. Geología y Mecánica de Suelos	7
1.2.1. Suelos residuales	9
1.2.2. Suelos transportados y depositados	10
1.3. Suelos y rocas chilenas	13
2. Composición y clasificación	17
2.1. Química de los suelos	17
2.1.1. Minerales constitutivos de las arcillas	20
2.1.2. Físico-química de las arcillas	24
2.2. Relaciones de fase en los suelos	26
2.2.1. Relaciones volumétricas	27
2.2.2. Contenido de agua	28
2.2.3. Pesos unitarios	28
2.3. Granulometría	30
2.3.1. Curva granulométrica	36
2.3.2. Diámetros efectivos	37
2.3.3. Coeficientes de uniformidad y curvatura	38
2.4. Plasticidad	41
2.4.1. Límites de consistencia	41
2.4.2. Límites de Atterberg	42
2.4.3. Actividad	43
2.4.4. Carta de plasticidad	45
2.4.5. Determinación del límite líquido	46
2.4.6. Ensayo de caída de cono	48
2.4.7. Determinación del límite plástico	50
2.4.8. Determinación del límite de contracción	50
2.5. Clasificación de suelos	51
2.6. ¿Una nueva carta de plasticidad?	55

3. Compactación	57
3.1. Mejoramiento de suelos	57
3.2. Ensayos Proctor	58
3.2.1. Curvas de compactación	60
3.2.2. Curva de saturación	60
3.2.3. Influencia de la energía de compactación	62
3.3. Cambios de estructura y permeabilidad debido a la compactación	63
3.4. Control de densidad en suelos granulares	70
3.4.1. Método del cono de arena	72
3.4.2. Mediciones con sondas nucleares	72
3.4.3. Métodos no nucleares	74
3.4.4. Ensayo CBR	76
3.5. Equipos de compactación de suelos	77
3.5.1. Compactación estática	77
3.5.2. Compactación por impacto	78
3.5.3. Compactación por vibración	78
3.5.4. Compactación por amasado	79
3.6. Determinación del equipo	79
4. Mecánica del continuo y elasticidad	81
4.1. Mecánica del continuo	81
4.1.1. Desplazamientos y deformaciones en un medio continuo	82
4.1.2. Compatibilidad de deformaciones	87
4.1.3. Deformaciones planas	88
4.1.4. Tensor de tensiones	88
4.1.5. Tensiones principales e invariantes	90
4.1.6. Rotación de ejes y círculo de Mohr	92
4.2. Elasticidad	97
4.2.1. Constantes elásticas	97
4.2.2. Desviador de tensiones y deformaciones	100
4.2.3. Relaciones constitutivas elásticas triaxiales	101
4.3. Soluciones elásticas en geomecánica	106
4.3.1. Carga puntual sobre un espacio seminfinito	106
4.3.2. Carga lineal uniforme e infinita	111
4.3.3. Carga uniforme de ancho finito y longitud infinita	112
4.3.4. Carga circular uniforme	114
4.3.5. Carga uniforme sobre superficie triangular	117
4.3.6. Método de Newmark	120
4.3.7. El medio de Westergaard	122
5. Tensiones efectivas y capilaridad	124
5.1. Tensiones geostáticas	124
5.1.1. El principio de las tensiones efectivas	125
5.1.2. Tensiones efectivas en un suelo con infiltración	129

5.2.	Capilaridad	132
5.2.1.	Tensión superficial	133
5.2.2.	Ascensión de agua en tubos capilares	134
5.2.3.	Capilaridad en los suelos	136
5.2.4.	Altura de ascensión capilar	141
5.2.5.	Medición de la succión en los suelos	143
5.2.6.	Tensión efectiva en suelos parcialmente saturados	145
6.	Escurrimiento en medios permeables	147
6.1.	Condiciones artesianas	148
6.2.	Ley de Darcy y permeabilidad	149
6.2.1.	El coeficiente de permeabilidad	151
6.2.2.	Observaciones a la ley de Darcy	154
6.2.3.	Ensayo de permeabilidad de carga constante	156
6.2.4.	Ensayo de permeabilidad de carga variable	159
6.2.5.	Celda de Rowe	161
6.3.	Mediciones de permeabilidad en terreno	164
6.3.1.	Pozo de bombeo en un acuífero no confinado	164
6.3.2.	Pozo de bombeo en un acuífero confinado	165
6.3.3.	Flujo no estacionario en pozos	167
6.3.4.	Método de Theis para un acuífero confinado	168
6.3.5.	Método de la línea recta de Cooper y Jacob	170
6.4.	Teoría de flujo bidimensional	172
6.5.	Condiciones de borde	177
6.5.1.	Borde impermeable	177
6.5.2.	Bordes de embalse	177
6.5.3.	Superficie de escurrimiento	178
6.5.4.	Superficie libre	179
6.6.	Redes de flujo	179
6.6.1.	Gradiente hidráulico crítico	183
6.6.2.	Método de estabilidad de Terzaghi	186
6.6.3.	Presiones hidrodinámicas	187
6.7.	Escurrimiento en presas de tierra	189
6.7.1.	Mapeo conforme usando funciones elementales	190
6.7.2.	Correcciones de Casagrande	194
6.7.3.	Control de escurrimiento en presas de tierra	197
7.	Consolidación unidimensional	201
7.1.	Teoría de la consolidación	202
7.2.	Ensayo edométrico	203
7.2.1.	Velocidad de construcción	211
7.3.	Solución del problema de consolidación unidimensional usando isocronas parabólicas	212
7.3.1.	Tiempo de consolidación	222

7.3.2.	Presentación e interpretación de resultados	223
7.3.3.	Asentamiento y tiempo de consolidación	229
7.4.	Solución exacta de la ecuación que gobierna la consolidación unidimensional	231
7.5.	Consolidación usando drenes verticales	236
7.5.1.	Consolidación radial considerando variación lineal de la permeabilidad en el suelo perturbado	238
8.	Resistencia al corte	245
8.1.	El modelo de fricción de Coulomb	246
8.1.1.	El criterio de falla de Coulomb	248
8.2.	Ensayo de corte directo	252
8.2.1.	Presentación de resultados	255
8.2.2.	Cambio de volumen durante el corte del suelo	258
8.2.3.	Estado crítico	261
8.2.4.	Resistencia al corte máxima y dilatancia	264
8.2.5.	Efecto del tamaño de la caja de corte	267
8.3.	Ensayo triaxial	269
8.3.1.	Marco de carga	272
8.3.2.	Cambio volumétrico	273
8.3.3.	Controlador de presión y panel de distribución	274
8.3.4.	Preparación de muestras	274
8.3.5.	Saturación	275
8.3.6.	Consolidación	278
8.3.7.	Velocidad de carga	279
8.3.8.	Tensiones y resistencia al corte triaxial	279
8.3.9.	Resistencia al corte triaxial en suelos cohesivos	283
8.3.10.	Trayectoria de tensiones	286
8.3.11.	Resistencia al corte triaxial de suelos granulares	289
8.3.12.	Interpretación de resultados	293
8.4.	Modelo Cam clay	297
8.4.1.	Triaxial drenado en compresión	303
8.4.2.	Triaxial no drenado en compresión	305
9.	Estructuras de contención	312
9.1.	Empujes de suelos	312
9.2.	Tipos de estructuras de contención	315
9.2.1.	Muro gravitacional y en voladizo	315
9.2.2.	Muro entramado y de gaviones	316
9.2.3.	Tablestacas, muros pantalla y Berlínés	317
9.2.4.	Muros de suelo reforzado	319
9.3.	Estados de empuje	321
9.3.1.	Empuje en reposo	323
9.3.2.	Mediciones de K_0 en suelos granulares	325

9.3.3.	Estado de empuje activo de Rankine	325
9.3.4.	Desplazamientos para condición activa	332
9.3.5.	Teoría de empuje activo de Coulomb	338
9.3.6.	Ángulo de la cuña de falla de empuje activo	344
9.3.7.	Empuje activo de Coulomb en suelos con cohesión	346
9.3.8.	Empujes debido a cargas externas	347
9.3.9.	Efecto del nivel freático	349
9.3.10.	Empuje pasivo de Rankine	354
9.3.11.	Empuje pasivo de Coulomb	356
9.3.12.	Desplazamientos para condición pasiva	359
9.3.13.	Nivel freático	360
9.4.	Muros empotrados	361
9.4.1.	Estabilidad de perforaciones y zanjas usando lodos	365
9.5.	Muros de suelo reforzado	367
9.6.	Efecto de arco	369
10.	Estabilidad de taludes	380
10.1.	Causas y tipos de deslizamientos	383
10.2.	Deslizamiento en talud infinito	385
10.2.1.	Condición no drenada	385
10.2.2.	Condición drenada	386
10.3.	Fallas circulares	388
10.3.1.	Método de las dovelas	389
10.3.2.	Solución de Fellenius	392
10.3.3.	Solución simple de Greenwood	392
10.3.4.	Solución simplificada de Bishop	394
10.3.5.	Efecto de la fuerza horizontal E	395
10.4.	Fallas no circulares	395
10.4.1.	Método simplificado de Janbu	396
10.4.2.	Métodos rigurosos	397
Anexo		400
Referencias		407
Índice		424

Prólogo

Hace mucho tiempo que no se edita un libro de estas características en Chile, con el potencial de convertirse en una referencia obligada para el estudio de un área de la ingeniería civil. Mecánica de Suelos es un libro didáctico que sintetiza contenidos de libros clásicos de ingeniería geotécnica, incorporando actualizaciones basadas en investigaciones más recientes. El libro está orientado a la formación de ingenieros estructurales, geotécnicos y constructores que están participando en los primeros cursos de ingeniería geotécnica.

El apropiado desempeño de la práctica profesional de la geotecnia requiere, entre otras cosas, un cabal entendimiento de los fenómenos físicos que controlan el comportamiento de los suelos. Este libro revisa los fundamentos teóricos que explican estos fenómenos y desarrolla metodologías de cálculo para el diseño de las estructuras más típicas, como muros de contención, taludes y presas de tierra, entre otros.

Los contenidos del libro siguen un orden similar a los cursos fundamentales impartidos en Chile, y en particular los del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, por lo que es muy posible que se convierta en lectura obligada de estudiantes de pregrado. También, aborda temas avanzados, como por ejemplo una introducción a la mecánica de suelos de estado crítico, que ayudan a estudiantes de postgrado en la transición a aspectos más específicos de la geotecnia.

Muchos pasajes del libro incorporan casos nacionales como la identificación de las principales características de los suelos singulares de Chile, cuyas propiedades no se encuentran suficientemente bien abordados en los libros clásicos de ingeniería geotécnica. También, hace una revisión y reconocimiento a los ingenieros geotécnicos más destacados del país a lo largo de la historia. Estos contenidos generan sentidos de pertenencia que acercan la disciplina a las nuevas generaciones de ingenieros en formación.

Esta obra tiene el potencial de convertirse en una referencia obligada a nivel nacional y latinoamericano basado en la calidad y organización de sus contenidos. Llevar a cabo una obra de estas características requiere el compromiso y la dedicación de alguien como el Profesor Villalobos, quien demuestra un cabal conocimiento de variadas áreas de la ingeniería geotécnica. Un ejercicio que ayuda a la labor de muchos académicos que tenemos que sintetizar material de muchas fuentes para preparar nuestros cursos.

Dr. César Pastén

Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

Santiago, 23 de mayo 2016

Prefacio

Este libro surge de los apuntes de clases de Mecánica de Suelos complementado con los años. Cubre una parte importante de la Mecánica de Suelos básica o estándar que recogen los libros clásicos de Juárez Badillo y Rico Rodríguez (1996), Lambe y Whitman (1969) y la principal fuente de estos clásicos como lo son Terzaghi (1943) y Terzaghi *et al.* (1996) que es una revisión del libro publicado en 1948 por Terzaghi y Peck. Se pueden nombrar varios autores de libros de Mecánica de Suelos como Taylor, Tschebotarioff, Sowers, Jumikis, Scott, Smith, Das y por otro lado Atkinson, Bolton, Craig, Powrie, Whitlow, Muir Wood por nombrar los más conocidos en inglés. Para elaborar este libro es indudable que estos textos han sido de gran apoyo.

Este libro está pensado principalmente para estudiantes de los cursos de Mecánica de Suelos dictados en pregrado. Aunque también podría ser de apoyo y punto de partida a quienes cursen Mecánica de Suelos Experimental, Estabilidad de Taludes, Aguas Subterráneas y Fundaciones. También puede ser de utilidad para quienes deban interactuar con ingenieros geotécnicos para entender el porqué de ciertos ensayos y estudios.

Los contenidos de la Mecánica de Suelos pueden ser presentados con distintos matices y énfasis, es por ello necesario brindar este apoyo a alumnos que generalmente ya tienen al menos cinco cursos previos del área estructural e incluso piensan que con una norma o código se puede resolver un problema de ingeniería. Sin embargo, la formación geológica del suelo hace que este material sea generalmente heterogéneo, anisotrópico, no lineal-elástico, es decir, no tiende a ajustarse a la ley elástica-lineal de Hooke de tensión-deformación como sí puede ocurrir en acero, hormigón, incluso madera o plástico. Pero tal vez lo más propio y distintivo del suelo sea la presencia de agua, puesto que el agua puede cambiar las tensiones y por lo mismo las deformaciones y rigidez del suelo. Aún más, en Mecánica de Suelos se estudia y miden directamente desplazamientos y deformaciones a partir de los cuales es posible estimar fuerzas y tensiones si se asocian valores de rigidez al material. Los asentamientos son desplazamientos verticales de gran interés y que reflejan la interacción suelo estructura, estudiado en más detalle en cursos de fundaciones.

Otra motivación para escribir este libro fue incorporar aspectos recientes de Mecánica de Suelos, los cuales simplemente no aparecen en los textos de la actual bibliografía. Con más de 20 *journals* en Geotecnia, algunos de ellos con más de 50 años de vida, existe una cada vez más prolífera fuente de conocimientos. Varios de estos *journals* han tenido que incrementar la cantidad de números editados al año para poder incorporar la creciente demanda por espacio para publicar resultados de investigaciones teóricas, experimentales y de ingeniería práctica. Es por ello importante dar a conocer al lector que la Mecánica de Suelos es muy activa y que la comunidad que la compone trabaja arduamente en dilucidar y resolver los enigmas aún pendientes de comportamiento del suelo y explicar proyectos relevantes de ingeniería geotécnica.

La idea es crear el interés por ir más allá del libro y consultar la activa producción científica y técnica ya sea en publicaciones periódicas y congresos.

La secuencia de los capítulos tal vez no sigue el orden normalmente utilizado. El capítulo 1 parte con una breve reseña histórica mundial y de Chile para contextualizar e insertar la Mecánica de Suelos en el tiempo y el espacio. Se continúa también con breves descripciones de Geología aplicada, depósitos de suelos y tipos de suelos y rocas chilenas. Luego, en el capítulo 2 se definen la composición química y clasificación de suelos. Compactación, elasticidad y tensiones efectivas se estudian en los capítulos 3, 4 y 5, respectivamente. Se presentan escurrimiento y consolidación (capítulos 6 y 7) antes de resistencia al corte (capítulo 8) con el fin de poder incorporar conceptos de estado crítico y modelo Cam clay. Finalmente, en los capítulos 9 y 10 se estudian empujes y taludes. Por lo general, se acostumbra a dividir el curso en Mecánica de Suelos I y Mecánica de Suelos II para así poder realizar 9 laboratorios y estudiar los 10 capítulos. De esta forma, en Mecánica de Suelos II se estudia escurrimiento, consolidación, empujes y taludes y el resto se estudia en Mecánica de Suelos I. A pesar de la amplitud e importancia de los contenidos, la Mecánica de Suelos ha sido reducida solo a un curso en los nuevos programas curriculares, los cuales tienen incluso más cursos en áreas que ni siquiera son parte de la Ingeniería Civil, como economía y administración e idiomas. Esto ha sido otra motivación para escribir este libro como una forma de que los alumnos suplan la ilógica reducción en horas de clases y laboratorios de Mecánica de Suelos. Esto es obviamente una contradicción que se da justo en momentos en que la sociedad es más demandante, ya que se solicitan estudios profesionales de Mecánica de Suelos más acabados y completos, ya sea por parte de los colegios profesionales de ingenieros, constructores y arquitectos y de la propia comunidad que entiende la importancia de la Mecánica de Suelos para evitar pérdidas de tiempo, dinero y vidas humanas.

Es más, se esperaría que programas actualizados de Ingeniería Civil no solo mantuvieran al menos los tres cursos tradicionales de Geotecnia, sino que se incorporaran nuevos cursos o áreas de la Geotecnia que son muy necesarias hoy en día en la práctica profesional como lo son: Geosintéticos, Mecánica de Suelos Parcialmente Saturados, Métodos Numéricos en Geotecnia, Mecánica de Rocas, Dinámica de Suelos, Mejoramiento de Suelos, Exploración Geotécnica, Mecánica de Suelos Residuales y Fundaciones Especiales. Otra motivación de este libro es que a través del estudio de la Mecánica de Suelos surja en quienes lo lean el interés por estudiar áreas de la Geotecnia como las arriba señaladas. La idea del libro es mostrar un desarrollo lógico y secuencial de razonamiento para resolver problemas, los cuales no se basan en poner primero una fórmula o ecuación y luego buscar los valores para resolverla. Dado que la Mecánica de Suelos es netamente profesional, se busca formar una base de conceptos y principios básicos y simples sobre los cuales se puedan ir resolviendo de manera analítica problemas más complejos que se encuentran en la práctica profesional. Es importante recalcar esto, ya que en ingeniería a veces se cree que mientras más complejo y difícil mejor, lo cual es justamente lo contrario de la buena

ingeniería, especialmente en Mecánica de Suelos, donde no siempre se cuenta con datos de entrada obtenidos de manera rigurosa, menos se podría usar un modelo o método de cálculo difícil de entender o resolver de tipo caja negra.

A pesar de la resolución de ejemplos y presentación de cálculos y resultados, esto es insuficiente y por ello se deben resolver otros problemas apoyados por ayudantías y clases. Lo mismo los laboratorios de clasificación, compactación, permeabilidad, consolidación y resistencia al corte, en donde los alumnos realizan los experimentos y ensayos ellos mismos bajo la supervisión de técnicos, laboratoristas y ayudantes. En este libro no se abordan los temas de fundaciones, tales como exploración geotécnica, capacidad de soporte y asentamientos de fundaciones superficiales y profundas, dado que comprenden un curso y temáticas extensas. Cualquier comentario sobre este libro es bienvenido, especialmente si es para complementarlo y corregir posibles errores.

Finalmente, debo agradecer el aporte de muchos alumnos y colegas que con sus preguntas ayudaron a corregir y complementar este libro. El Laboratorio de Geo-Materiales (LGM) ha sido fundamental al crear un ambiente propicio para adentrarse en la Mecánica de Suelos, por ello agradezco enormemente a Erwin Jara (quien trabajó hasta el 2012 en LGM), Mauricio Poblete y Mauro Poblete (quienes trabajan en LGM desde enero 2013). Mauro ha leído gran parte de los borradores de este libro y ha entregado sugerencias y comentarios muy útiles, además de comentar aspectos importantes de ensayos. Es importante recordar que Terzaghi mencionó que un matemático o un teórico son un peligro en Mecánica de Suelos, es por ello que el trabajo de laboratorio y terreno para la asesoría de proyectos es una condición *sine qua non* para trabajar en Mecánica de Suelos. Y un último aspecto no menor es agradecer a la universidad por haber brindado la libertad para escribir este libro que demandó varios años, dado que dentro de la vorágine académica de hoy en día escribir un libro no es recomendable porque carece de valor respecto a publicaciones de artículos y proyectos de investigación.

Felipe Villalobos
Concepción, 4 de junio 2014

Capítulo 1

Origen

1.1. Reseña histórica

Es indudable que desde las civilizaciones más remotas las construcciones realizadas por el hombre han tenido que apoyarse sobre un terreno propicio, ya sea en suelo o roca. No obstante, Kerisel (1985) señala que hasta el siglo XVIII no existe ningún indicio o evidencia de Mecánica de Suelos ni cálculos matemáticos relacionados a ella, sino solo procedimientos empíricos de prueba y error. Es por ello que la existencia hasta el día de hoy de las pirámides y esfinges realizadas por los egipcios y los muros, canales, caminos y edificios construidos en periodos a.c. en China, Japón, Mesopotamia, Grecia y Roma, indican el uso de nociones intuitivas de fundaciones y resistencia del suelo para soportar carga, cuyo éxito se basa esencialmente en el sobredimensionamiento. Durante la era d.c. ya se prefería fundar en roca o suelo denso con zapatas de bloques de piedra y en caso contrario ya se usaban pilotes de madera, también se compactaban suelos sueltos, se reforzaban suelos blandos y se extraía agua de pozos. Sería muy extenso presentar ejemplos de construcciones de presas, torres, templos y edificios construidos en Europa, México, Perú, Japón, India y China (ver Kerisel, 1985). Cabe destacar en el siglo XV los dibujos de Leonardo Da Vinci de un martinete para hincar pilotes y de un sistema de ataguía para construir bajo el agua.

No es sino hasta el siglo XVIII que aparecen los primeros procedimientos que se asocian a lo que hoy se entiende por Mecánica de Suelos. Skempton (1985) plantea cuatro periodos: i) pre-clásico, ii) Mecánica de Suelos Clásica, primera etapa, iii) segunda etapa y iv) Mecánica de Suelos Moderna. En el periodo pre-clásico, Gautier en 1717 define diferentes pesos unitarios para arcillas y arenas y determina la pendiente natural de los suelos sobre la base del ángulo que adquiere un montículo cónico invertido, desde 31° en arena seca limpia a 45° en suelo recién excavado, además de definir como permeable a la arena e impermeable a la arcilla. Belidor en 1729, Gadroy en 1746 y Perronet en 1769 eran ingenieros de la escuela militar, quienes documentaron estudios de empujes de suelo contra estructuras de contención, iden-

tificando planos de falla en modelos a escala.

La primera etapa de la Mecánica de Suelos Clásica se atribuye al trabajo de Coulomb (1776), donde se plantea el criterio de falla extensamente usado hasta hoy en día, se define un plano de falla, la fuerza de empuje, momento volcante, altura límite del muro y fricción entre el muro y el suelo, aunque siempre en tensiones totales en suelo granular. El trabajo de Coulomb no fue entendido en su época debido al álgebra sofisticada que envuelve. Fue el libro de Prony de 1802 que descifró y diseminó entre los estudiantes de la *École Polytechnique Ponts et Chaussées* de París la teoría de la cuña de Coulomb. Français en 1820 extiende la teoría de empuje de Coulomb al caso de talud (corte no soportado), determina la altura límite en suelo con cohesión, ya definida por Prony y por ello se le atribuye como uno de los primeros análisis de estabilidad de taludes en suelo cohesivo. Se asocia a Poncelet el primer análisis de capacidad de soporte en 1840, quien introdujo el uso del símbolo ϕ para el ángulo de fricción interna, además de señalar que la cohesión es cero en falla y promover la ayuda del empuje pasivo para evitar fallas por empuje activo. Hope en 1845 realiza mediciones de la fricción entre el suelo y el muro con un equipo diseñado por él y encuentra valores de 8° y 22° en una pared lisa y rugosa, respectivamente, valores no muy lejanos de los determinados usando la teoría de Coulomb. Collin en 1846 presenta resultados de ensayos de corte directo para estudiar el deslizamiento de un talud de arcilla. Este periodo lo cierra el profesor de ingeniería de la Universidad de Glasgow, William Rankine, quien en 1857 publica las conocidas fórmulas de los coeficientes de empuje activo y pasivo, K_a y K_p , deducidas de la teoría de campo de tensiones, las cuales son ampliamente adoptadas hasta el día de hoy en el cálculo de empujes.

La segunda etapa de la Mecánica de Suelos clásica se asocia al trabajo de Darcy (1856) sobre el estudio de filtros de arena con un equipo (permeámetro), cuyo principio se sigue utilizando hasta el día de hoy para determinar permeabilidades tanto en carga constante como variable. Posteriormente, en 1878, el profesor de matemáticas en Lille y luego en la Sorbonne en París, Joseph Boussinesq planteó las soluciones del problema de tensiones y deformaciones debido a una carga puntual sobre un espacio elástico y seminfinito, también vigente hasta nuestros días y que servirá como punto de partida para soluciones con otras condiciones de borde y carga. En 1885, el profesor de ingeniería en Manchester, Osborne Reynolds presentó los experimentos que demuestran el fenómeno de dilatancia en arenas en función del cambio de volumen, carga hidráulica (presión de poros) y densidad del suelo. Clibborn en 1896 y Beresford en 1902 utilizan el concepto de gradiente hidráulico en experimentos a escala de diques, verificando la ley de Darcy y estableciendo gradientes hidráulicos para los cuales se desarrolla arrastre de partículas (*piping*).

La Mecánica de Suelos moderna comienza con la aparición del principio de tensiones efectivas de Terzaghi, sin embargo, previamente Atterberg (1911) planteó la clasificación de suelos granulares y cohesivos en 1911. Atterberg definió el límite líquido

(*Fliessgrenze*) como el contenido de agua sobre el cual el suelo es prácticamente un fluido y el límite de plasticidad (*Ausrollgrenze*) como el contenido de agua bajo el cual el suelo se desmigaja cuando es enrollado en tiras delgadas. La diferencia entre estos dos límites la definió como índice de plasticidad (*Plastizitätszahl*). Atterberg era químico y estudioso de la Ciencia de los Suelos en el Instituto de Investigaciones Agrícolas de Kalmar, Suecia. Estos resultados tan familiares en Mecánica de Suelos no fueron considerados fuera de Suecia hasta que Terzaghi los incluyó en sus investigaciones y publicaciones. Frontard realizó en 1910 ensayos de corte directo en arcillas y ensayos de consolidación en 1911, donde presentó los resultados en función de la carga aplicada y el contenido de humedad. Bell en 1915 presenta y utiliza las soluciones de empuje de Rankine en arcilla, altura crítica (grieta de retracción), aunque destaca la primera expresión para el cálculo de la capacidad de soporte última en arcilla para la fundación de un muro en un muelle. La falla del muelle Stiberg en Gotemburgo fue retrocalculada por Petterson y Hultin en 1916, para lo cual dividieron la masa deslizante en dovelas, encontrando así valores de ϕ entre 9.7° y 13.8° , lo cual constituye el primer análisis de deslizamiento circular, dando origen al método sueco de las dovelas. Fellenius en 1918 realiza el mismo análisis de estabilidad, pero asumiendo $\phi = 0$, convirtiéndose así en el primer análisis no drenado (Fellenius, 1927). En 1913, Olsson formó junto a Fellenius y el geólogo von Post una comisión geotécnica para Ferrocarriles del Estado de Suecia para estudiar los graves problemas de deslizamientos. De este estudio se concluye la importancia del remoldeo en arcillas, de donde surge el concepto de sensibilidad y pérdida de resistencia. Conclusiones que fueron obtenidas a partir de ensayos con el equipo de caída de cono y ensayos edométricos.

La aparición de *Erdbaumechanik* en 1925 es considerada como el nacimiento de la Mecánica de Suelos. Este libro contiene resultados ya presentados por Terzaghi en *journals* austriacos sobre su trabajo en Estambul, Turquía. Los ensayos principales descritos por Terzaghi (1925) son los de densidad de las partículas sólidas, los límites de plasticidad, el porcentaje de arcilla, consolidación, permeabilidad, corte directo, capilaridad y compresión no confinada. En el ensayo de consolidación en un equipo edométrico se interpretan los resultados utilizando el coeficiente de consolidación c_v , el índice de vacíos e , el coeficiente de permeabilidad k , el coeficiente de empuje en reposo K_0 , el coeficiente de compresibilidad, incrementos de carga, donde por primera vez se grafica la carga en función del índice de vacíos (sin escala semilogarítmica). La permeabilidad es medida directamente en un edómetro con un permeámetro de carga variable incorporado. Terzaghi (1925) presenta la teoría de la consolidación bajo los principios que el incremento de carga es inicialmente tomado por el agua existente en los poros de la arcilla y que si se admite el drenaje del agua, este exceso de presión de poros u disminuye mientras el suelo se comprime, aumentando de esta forma la tensión efectiva σ' aproximándose a la tensión total σ . De esta forma, los ensayos edométricos junto a su interpretación mediante la teoría unidimensional de consolidación, dieron luz al principio de las tensiones efectivas, $\sigma' = \sigma - u$, para una profundidad z y tiempo t . Las contribuciones de Terzaghi

plasmadas en *Erdbaumechanik* tienen el mérito de reunir y aportar análisis que dan solución a problemas de la ingeniería práctica, sentando así las bases científicas de la Mecánica de Suelos. Notar que la historia demuestra la importancia del análisis experimental, sin el cual la Mecánica de Suelos no podría existir, en conjunto con la interpretación teórica de los resultados que permite establecer procedimientos de cálculo y entendimiento físico de los fenómenos traducidos a modelos de comportamiento.

Terzaghi, después de sus notables investigaciones en el Robert College de Estambul entre 1918 y 1925 (ocho años antes había trabajado en terreno en proyectos de Ingeniería Civil y Geología), continuó investigando entre 1925 y 1929 en el MIT, entre 1929 y 1938 en Viena y a partir de 1938 se estableció en Harvard, donde se le otorgó el título de Profesor (titular) en 1946, además de trabajar en conjunto con Ralph Peck en Illinois desde 1942, quien fue su asistente en Harvard en 1939. Arthur Casagrande fue un asistente de Terzaghi en el MIT en 1926 y luego se cambió a la Universidad de Harvard, donde dictó los primeros cursos de pre y postgrado de Mecánica de Suelos. Lamentablemente, hoy en Harvard no solo no se enseña ni investiga Mecánica de Suelos, sino que no hay cabida para la Ingeniería Civil. A Casagrande se le reconoce el diseño de la cuchara que lleva su nombre para realizar ensayos de límite líquido, el ensayo hidrométrico, el ensayo de capilaridad horizontal, la caja de corte y el equipo triaxial, lo cual le permitió realizar estudios de cambio volumétrico del suelo sometido a corte. Además de evidenciar el cambio de presiones de poros durante ensayos de corte no drenados, diferenciar la resistencia entre suelos no perturbados y remoldeados, determinar la carga de preconsolidación, definir un método de clasificación unificado de suelos, la línea A en la carta de plasticidad también lleva su nombre y la definición de la línea freática en presas de tierra en estudios de escurrimiento en medios permeables. Casagrande, además, sentó las bases del estado crítico de los suelos y estudió los efectos de cargas cíclicas en arenas, conduciendo a análisis de licuación.

Es importante hacer notar que Terzaghi participa en varios proyectos importantes, como lo son la evaluación de asentamientos de una papelería fundada en depósitos profundos de arcillas altamente compresibles bajo estratos de suelos granulares, donde pudo verificar la teoría de consolidación. En 1930, Terzaghi desarrolló criterios de filtros para una presa en Algeria y en 1939 supervisa la construcción del metro de Chicago en arcilla blanda, donde aplica extensivamente ensayos de compresión no confinada y en el mismo año estudia la falla de la presa de tierra Chingford, Inglaterra. Terzaghi evalúa las fuerzas en puntales de contención en el metro de Berlín. Casagrande organiza la Primera Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones en 1936 en Harvard, oportunidad en la cual se crea la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica siendo Terzaghi su presidente hasta 1957, marcándose así el periodo de fundación de la Mecánica de Suelos moderna. La ISSMGE (*International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, www.issmge.org) es una entidad muy activa con

presencia en todos los continentes.

1.1.1. Sinopsis de la Mecánica de Suelos en Chile

Similarmente, en Chile las construcciones se realizaron inicialmente sin Mecánica de Suelos, tanto por las culturas precolombinas como durante la conquista y la colonia. A partir del siglo XVIII, la visita de varios naturalistas europeos entrega información principalmente geológica y geográfica en aspectos relevantes para la minería del cobre, plata y oro. La minería del carbón en Lota durante el siglo XIX introduce técnicas de tunelería, piques y refuerzo de galerías subterráneas. Durante la República y a pesar de no haberse desarrollado aún la Mecánica de Suelos, se construyó durante el siglo XIX una extensa red de ferrocarriles con numerosos túneles y puentes a lo largo y ancho de Chile, algunos de las cuales aún existen luego de sobrevivir varios terremotos y crecidas de ríos severas. Son notables los puentes metálicos sobre el río Bío Bío de 1889 de casi 2 km de largo y el puente o viaducto Malleco de 1890 de 350 m de largo y 102 m en su parte más alta.

El terremoto de 1939 de Chillán materializó la creación de la CORFO (Corporación de Fomento a la producción), entidad que promovió la industrialización del país creando en sus inicios ENDESA, CAP y ENAP. La generación de electricidad, acero, gas y petróleo requiere de una fuerte componente de Mecánica de Suelos. Guillermo Noguera realizó estudios de Mecánica de Suelos en Iowa State College en 1957, trabajando luego en Chile en proyectos de regadío, en ENDESA en proyectos hidroeléctricos y luego en EDIC como consultor. Fue presidente de la SOCHIGE y miembro de la ICOLD (*International Commission on Large Dams*). En el proyecto de construcción de la usina de Huachipato de CAP en 1947 en la bahía de San Vicente se aplicaron los conocimientos de Mecánica de Suelos directamente por Casagrande, quien en los años 60 emitió reportes de Mecánica de Suelos a partir de resultados de sondajes, ensayos SPT y análisis de muestras extraídas con Fernando Martínez, siendo la contraparte en Chile. Sin embargo, el gran terremoto de 1960 evidenció la falta de capacidad para abordar estudios de Mecánica de Suelos, lo cual significó un impulso a su desarrollo.

La Revista del IDIEM de la Universidad de Chile recopiló las primeras publicaciones de Mecánica de Suelos en Chile desde 1962 hasta 1983. El inicio formal de la Mecánica de Suelos en Chile se puede establecer a partir de la creación de la SOCHIGE (Sociedad Chilena de Geotecnia) en 1969. La SOCHIGE organizó el primer Congreso Chileno de Geotecnia en 1982 en Santiago. Posteriormente se llevaron a cabo los congresos en 1989 en Santiago, 1993 en La Serena, 1997 en Valparaíso, 2004 en Santiago, 2007 en Valparaíso, 2012 en Concepción y 2014 en Santiago. También cabe destacar la organización en Viña del Mar el año 1991 del IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Los primeros libros publicados son de Carlos Alliende en 1958, *Mecánica de los Suelos*, Dusan Dujisin y Jorge Rutland en 1974, *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Vial*

y el libro de Jorge Gayoso de 1985, *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Forestal*. La Mecánica de Suelos en Chile ha sido en gran parte la base para el desarrollo en el área minera y especialmente en geotecnia sísmica debido a la alta sismicidad de Chile.

Se puede destacar la investigación publicada en 1969 y 1975 sobre licuación de arenas de Gonzalo Castro realizada con Casagrande en Harvard. Es también importante destacar el artículo de 1967 sobre la falla de tranques de relaves publicado por Dobry y Álvarez en el *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Ricardo Dobry luego publica en 1971 y 1973 resultados de su investigación en el MIT con Roesset y Whitman sobre interacción fundación-estructura. A partir de 1977, Dobry desarrolla investigaciones en el *Rensselaer Polytechnic Institute* RPI en EEUU y desde 1989 comienza a realizar ensayos en centrífuga para estudiar problemas sísmicos y de licuación. Por otro lado, Eduardo Kausel estudia dinámica de fundaciones a partir de 1974 en el MIT y allí lleva a cabo una prolifera serie de trabajos teóricos en dinámica de suelos.

Pedro Ortigosa en 1968 publica sobre densificación cíclica de arenas con Robert Whitman en el MIT y luego en la Revista del IDIEM en 1972 sobre licuación de arenas bajo carga horizontal cíclica. Ortigosa ha participado en una innumerable cantidad de proyectos como consultor de Petrus, oficina de Mecánica de Suelos originalmente de Eugenio Retamal desde 1965 y a partir de 1972 como Petrus, donde se han emitido más de 2500 informes, destacando los proyectos del metro de Santiago, el Congreso de Valparaíso y el muelle de San Vicente. Ortigosa ha elaborado parte del Manual de Carreteras sobre estructuras de contención. Por otra parte, Jorge Troncoso en 1975 publica un trabajo realizado en Illinois sobre determinación del módulo de corte a partir de mediciones de velocidades de corte en función de la deformación. Posteriormente, Troncoso se ha dedicado al estudio de tranques de relaves usando el equipo CPTU como investigador de la P. Universidad Católica de Chile (PUC) y como consultor en su propia oficina de ingeniería hoy llamada Montgomery Watson, publicando artículos sobre envejecimiento de los relaves y el libro *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Antisísmica* en 1992. También hay que mencionar el trabajo numérico realizado por Fernando Rodríguez en 1977 en Madrid que, posteriormente, contribuirá al desarrollo de programas de elementos finitos en la PUC para analizar, por ejemplo, la presa el Melado, túneles del metro de Santiago y la respuesta tensodeformacional de la grava de Santiago. Por otro lado, Michel van Sint Jan ha estudiado la estabilidad de túneles en roca del metro de Washington DC a partir de 1975 hasta 1982 en su investigación en Illinois, para luego abordar problemas principalmente mineros como investigador en la PUC y asesor en su oficina MVA.

Ramón Verdugo fue alumno de Troncoso en la PUC, quien en 1983 y 1985 publicó resultados del trabajo sobre el efecto de los finos en la resistencia cíclica de los relaves a partir de la realización de una serie de ensayos triaxiales cíclicos. Ver-

dugo posteriormente trabajó en la Universidad de Tokio con el profesor Ishihara, donde publicó en 1989 y 1992 resultados de su trabajo y en 1996 un artículo en *Soils and Foundations* sobre el estado estacionario de las arenas, el cual hasta ahora ha obtenido más de 330 citas. De vuelta en Chile, Verdugo trabajó en la Universidad de La Serena, NGI (*Norwegian Geotechnical Institute*) y luego en IDIEM, donde, entre otras cosas, implementó un equipo triaxial gigante, uno de los pocos existentes en el mundo, además de estudiar presas de relave, licuación, suelos residuales y volcánicos de Chile. Verdugo ha sido consultor en muchos proyectos mineros y de infraestructura, abrió un exitoso programa de Magíster en Geotecnia en la Universidad de Chile, ha sido presidente de la SOCHIGE entre el 2008 y 2013 y en este periodo organizó el Quinto Congreso Internacional de Geotecnia Sísmica y fundó la empresa CMGI.

Issa Kort se especializó en Mecánica de Suelos en París en 1967 y luego en Grenoble en 1975, fue presidente de la SOCHIGE entre los años 2000 y 2006. En su oficina se realizaron innumerables estudios para proyectos en Santiago, destacándose los edificios CTC, CChC, WTC y Titanium y el hospital de Punta Arenas. Por otro lado, Luis Valenzuela estudió en Imperial College a fines de los años 70 y luego formó junto a otros 3 colegas Geotécnica Consultores en 1981, que desde 1999 es Arcadis. Empresa con muy activa participación en proyectos mineros y civiles de toda índole. Valenzuela ha trabajado en Brasil y ha sido presidente de la SOCHIGE y vicepresidente de la ISSMGE para Sudamérica. Tanto Kort como Valenzuela han publicado en varios congresos de geotecnia nacionales e internacionales. Varias otras oficinas de Mecánica de Suelos y Fundaciones existen hoy en día en Santiago, muchas de las cuales son reparticiones de otros países como Golder, Knight Piesold, SRK, Itasca, Terratest, Soletange Bachy, EMIN SG (Geopier), Geobruigg, Dywidag-Systems International DSI, Geovenor, CSP, Ferrara, etc. En Concepción están las empresas de prospección, laboratorios y consultoría de Mecánica de Suelos y Fundaciones: LIEM, EMPRO, Aragón, Profund, LGM, Lancuyen y OITEC, entre otras.

1.2. Geología y Mecánica de Suelos

Antes de establecer la interacción entre Geología y Mecánica de Suelos, es importante señalar que la Mecánica de Suelos se inserta dentro de la Geotecnia o Ingeniería Geotécnica. La Mecánica de Suelos es fundamental dentro de la Geotecnia, la cual también reúne, entre otros, a la Mecánica de Rocas, Fundaciones, Túneles, Represas, Geosintéticos y Dinámica de Suelos.

La Mecánica de Suelos contempla el estudio ingenieril de los suelos, sin embargo, resulta fundamental conocer y entender con anterioridad el origen geológico de los suelos. Si se trata de obviar inicialmente los estudios geológicos, principalmente en proyectos de mediana a mayor envergadura, se puede correr el riesgo de no considerar características geológicas de mayor escala que incluso condicionen la estabilidad

global de las estructuras del proyecto durante o después de su construcción. La Mecánica de Suelos está restringida a una escala de metros, lo cual no significa que un proyecto no pueda cubrir incluso varios kilómetros como en el caso de carreteras, túneles y embalses. La limitación viene del hecho de que las exploraciones geotécnicas cubren áreas puntuales y distancias reducidas relacionadas solo al proyecto en estudio. En cambio, la Geología puede entregar información de la cuenca y los cerros que rodean al proyecto. Así, un estudio geológico adecuado puede identificar, por ejemplo, zonas de deslizamientos previos de grandes volúmenes o bloques de macizos rocosos; fallas geológicas que podrían reactivarse en el caso de terremotos, además de identificar las distintas unidades litológicas, dirección de plegamientos y fracturamientos, formaciones geológicas y depósitos sedimentarios, entre otros aspectos.

La Geología aplicada a la Ingeniería Civil es muy extensa para ser desarrollada a cabalidad en este texto. Es por ello que se enseña en al menos un curso separado y además constituye una área independiente y de alta especialización llamada Ingeniería Geológica. La Ingeniería Geológica está encargada de unir los antecedentes geológicos con los requerimientos estructurales y de construcción de un proyecto y, de esta forma, lograr un diseño seguro y económicamente óptimo. No obstante, debido a que es necesario al menos identificar el origen y formación de suelos, a continuación se presentan resumidamente aspectos básicos de Geología Física con énfasis en suelos chilenos.

El desarrollo de un estudio geológico debe apuntar, entre otras cosas, a los procesos geológicos que han dado origen a los suelos sobre los cuales se fundarán las estructuras en un proyecto de ingeniería. El principio general es que los suelos provienen de una roca madre. Esta roca madre puede ser ígnea si proviene de procesos volcánicos; sedimentaria si por ejemplo ha sido formada bajo el fondo del mar o un lago; y metamórfica si posteriormente tanto rocas ígneas como sedimentarias son sometidas a altas presiones y temperaturas. Las características y propiedades de estos tres grupos de rocas pueden ser consultadas en varios libros de Geología, como por ejemplo Blyth y de Freitas (1986), Tarbuck *et al.* (2008) y Waltham (2010). En particular, las características de las rocas sedimentarias y los procesos que las forman pueden ser leídas en extenso en Boggs (1995).

Para la formación del suelo deben actuar procesos físicos y químicos que reduzcan un macizo rocoso en fragmentos más pequeños. A este proceso se le denomina meteorización. También existen otros fenómenos más complejos de erosión y tectonismo que modifican el estado de esfuerzos en el macizo rocoso, pudiendo producir reducción de esfuerzos en el primero y aumento o relajación en el segundo. Producto de estos fenómenos de meteorización, erosión y tectonismo resulta un gran grupo de suelos que se encuentran unidos a la roca madre o están muy próximos a ella. Estos suelos son denominados suelos residuales.

1.2.1. Suelos residuales

La Mecánica de Suelos presentada en la sección §1.1 se ha desarrollado principalmente para suelos sedimentarios. Es por ello que Wesley (2009, 2010) hace un recorrido por los tópicos fundamentales de la Mecánica de Suelos y presenta las semejanzas, diferencias y cuidados que se deben tener al usar los métodos y teorías desarrollados para suelos sedimentarios, pero aplicados e interpretando los resultados para suelos residuales. Se recomienda leer Wesley (2009a, 2011) como punto de partida.

El Maicillo es uno de los suelos residuales más comunes y abundantes en Chile. Es el producto de la meteorización de rocas graníticas del batolito costero. El batolito costero es una gran masa de roca intrusiva que se ha formado paralelo a la zona de subducción, a partir del enfriamiento del magma a kilómetros de profundidad (de 5 a 30 km aproximadamente) y que se emplaza a lo largo de la cordillera de la Costa desde Valparaíso hasta la cordillera de Nahuelbuta (Charrier *et al.*, 2007). Estas grandes masas de magma solidificado enterradas en la corteza terrestre, han quedado expuestas a la superficie producto del levantamiento continental ocurrido algunos cientos de millones de años y posterior erosión de mantos rocosos metamórficos y sedimentarios que lo sobreyacían. Últimamente se suma la acción antrópica, al excavar cerros y montañas ya sea en cortes de caminos y carreteras y extracción de enrocados y chancado de canteras. Granodioritas y tonalitas son las unidades que afloran y que se han visto expuestas a un fuerte proceso de meteorización física y química que ha aflojado y desmembrado las uniones entre los cristales de cuarzo, mica, feldespatos ferromagnesianos y ortoclasas. Esto resulta en el desprendimiento de bloques, algunos de los cuales pueden ser reducidos con las manos a partículas de cuarzo.

El Maicillo es un material difícil de analizar mecánicamente, debido a lo complejo de su composición. Además, no es simple establecer si su respuesta mecánica corresponde a la de una roca meteorizada o a un suelo o lo más probable, a una mezcla de ambos. En el caso de comportarse como un suelo también es complicado establecer si su respuesta mecánica será drenada, parcialmente drenada o simplemente no drenada de acuerdo a la cantidad de partículas finas y a la plasticidad que ellas posean. Esto obliga a realizar programas de ensayos de laboratorio que analicen estas interrogantes. Deslizamientos de taludes de Maicillo son frecuentes debido a la combinación de intensas lluvias de otoño e invierno y la acción antrópica. Desde su construcción en 1998, la Ruta del Itata ha sufrido una gran cantidad de deslizamientos de suelo residual en taludes de Maicillo en cortes mayores a 60° realizados en la cordillera de la Costa. Varias soluciones han sido adoptadas posterior a los deslizamientos tales como reperfilados a 45° , escalonamientos, sistemas de drenaje, técnicas de control de erosión como hidrosiembra y geomantas, estructuras de contención bajas como gaviones y muros de polines. Sin embargo, ninguna de estas soluciones ha ofrecido una solución adecuada que evite o contenga los deslizamiento. Dado que la extensión de los taludes inestables son de varios kilómetros, soluciones como *soil nailing* no

son rentables para la concesionaria, la cual prefiere interrumpir el tránsito y remover el material deslizado. Sin embargo, con este procedimiento se pone en riesgo la vida de quienes transitan debido a accidentes fatales como ha ocurrido, por ejemplo, en la Ruta de la Madera.

1.2.2. Suelos transportados y depositados

Existe otro gran grupo de suelos que no solo se desprende de la roca madre debido a la meteorización, sino que es transportado muy lejos de ella, ya sea por ríos, esteros o por el viento, o también producto de una erupción volcánica, arrastrado por glaciares o por acción de la gravedad. Estos suelos son llamados suelos transportados y depositados. De esta manera se identifican los depósitos de acuerdo a la manera o ambiente en el cual han sido depositados. Así surgen los depósitos Fluviales, Aluviales, Coluviales, Lacustres, Marinos, Eólicos y Glaciales. Sin embargo, lo más probable es que el material haya sido depositado por más de uno de estos procesos. Es por ello común ocupar términos compuestos, como depósitos Fluvio-Aluviales, Glacio-Lacustres, etc.

a) Depósitos Fluviales y Aluviales

Los depósitos Fluviales forman terrazas de sedimentos fluviales recientemente transportados por ríos y depositados en sus riberas cuando las velocidades del flujo disminuyen, como por ejemplo en Hualqui y Chiguayante Sur. Sin embargo, se denomina depósito Aluvial al mismo material depositado por un río o estero, pero que ha ocurrido en tiempos no tan recientes y a mayores velocidades de flujo. También se ocupa el término combinado Fluvio-Aluvial en el caso de terrenos que fueron o aún son inundados por el río, como por ejemplo las arenas y limos del estero Nonguén y del río Andalién desde la entrada sur de Concepción (Chaimávida, Collao), Cosmito y la desembocadura del río Andalién en Penco. Gran parte de los sectores habitados sobre las planicies de Concepción, Talcahuano, Hualpén y San Pedro de la Paz se encuentran sobre depósitos aluvio-deltaícos de arena Bío Bío, la cual ha sido depositada por los deltas del río Bío Bío cuando desembocaba en las bahías de Concepción, San Vicente y al sur de la actual desembocadura en Boca Sur y Michaihue.

En zonas montañosas, los depósitos Aluviales forman conos de deyección o abanicos Aluviales, llamados así por la forma que adquieren al desparramarse en los valles a las salidas o desembocaduras de cursos de cajones montañosos. Dado que Chile es un país montañoso, los conos de depósitos aluviales abundan. El término aluvial, por lo tanto, está asociado a aluvión que es el arrastre, en pocas horas, de gran cantidad de material montañoso debido a precipitaciones intensas sobre pendientes escarpadas. Por ejemplo, en varias quebradas de Antofagasta en junio de 1991 y en la quebrada de Macul en mayo de 1993 ocurrieron aluviones, los cuales mataron a 107 y 34 personas, respectivamente, dejando miles de damnificados. Por lo tanto, los conos de deyección próximos a las quebradas no son áreas recomendables para

habitar y construir. Se recomienda leer el artículo de van Sint Jan y Talloni (1993) que trata sobre los aluviones de Antofagasta.

b) Depósitos Coluviales

Los depósitos Coluviales se forman en la parte baja de los cerros, debido al transporte de material desde las partes altas de un cerro por acción de la gravedad y sin la intervención de un curso de agua. Este transporte puede ser debido a fenómenos de reptación (o *creep* en inglés), que es el movimiento lento por gravedad de laderas y cerros o debido a deslizamiento de taludes, los cuales son rápidos. Estos materiales pueden provenir tanto de rocas ígneas, sedimentarias como metamórficas, y al acumularse al pie de laderas forman taludes y conos de derrubio más suaves. La composición de estos depósitos es heterogénea debido a los diferentes tamaños, formas y tipos de materiales que pueden ir de trozos de rocas, gravas a arcillas. Depósitos Coluviales pueden ser encontrados en varios de los faldeos de los cerros en Pedro de Valdivia, Lonco, Villuco, Chiguayante, Camino a Santa Juana, Lengua, la desembocadura del río Bío Bío, Penco, El Golf, Lomas de San Andrés y Palomares.

c) Depósitos Marinos

Los depósitos Marinos han sido formados bajo el mar con material que ha provenido de los continentes mezclado con material presente en el mar. Los sedimentos marinos se pueden dividir en litorales, aguas someras y aguas profundas de acuerdo al lugar donde han decantado. En la costa se forman los depósitos Marinos litorales compuestos principalmente de bolones, gravas y arenas gruesas, entre las líneas de alta y baja marea. Los depósitos Marinos de la plataforma continental se encuentran entre la línea de marea baja y la profundidad a la cual no hay efecto del oleaje. Allí se depositan arenas medias y finas, limos y fango en mayores superficies que los materiales más gruesos depositados en las playas. En esta zona intermedia también se depositan conchas marinas y restos orgánicos, los cuales se preservan como fósiles. Puede llegar a ser tal la cantidad de materia orgánica calcarea (carbonato de calcio) que se forme que se crean depósitos calcáreos. Estos depósitos llegan a formar rocas sedimentarias de cal, las cuales son distinguibles en acantilados blancos que estuvieron bajo el mar en épocas geológicas pasadas. En las aguas profundas del talud y fosa continental (zona de subducción en Chile) también decanta material orgánico y mineral muy fino, formando fangos, pero más lentamente. Estos fangos, al consolidar, llegan a formar materiales más compactos. Se debe tener presente que parte del carbón, petróleo y gas, metano por ejemplo, se ha formado dentro de depósitos marinos.

Chile, por su exposición frente a más de 4000 km de costas, cuenta con innumerables depósitos Marinos. En el norte forman un material llamado Coquina, el cual está compuesto de restos de moluscos. En el litoral central ha sido estudiada la Formación Navidad, la cual aflora en varios lugares entre Valparaíso y Punta Topocal-

ma, al norte de Pichilemu (Encinas *et al.*, 2006). Los acantilados de la península de Arauco en Tubul también están formados por depósitos Marinos, lo mismo en la zona de Puerto Saavedra.

d) Depósitos Lacustres

Los depósitos Lacustres, como su nombre lo indica, han sido formados en el fondo de lagos, donde el agua es dulce y quieta. Una vez que el agua ha sido drenada o evaporada, quedan expuestos los sedimentos que han decantado. Suelen ser confundidos con los depósitos Marinos y para diferenciarlos hay que estudiar si los fósiles son de agua dulce o salada, aunque hay invertebrados que se encuentran en ambos ambientes. Los depósitos Lacustres son sedimentos por lo general de granulometría fina, más homogéneos que los Fluviales o Aluviales y tienden a formar estratigrafías horizontales. Tal vez los depósitos Lacustres más conocidos son las arcillas blandas altamente compresibles intercaladas con lentes y estratos de limos arcillosos y arenas menos compresibles de Ciudad de México D.F., ciudad construida sobre el lago de Texcoco en la antigua Tenochtitlán.

En Chile, por ejemplo, la cuenca donde se ubica San Vicente de Tagua Tagua, en la Región de O'Higgins, se encuentra sobre un antiguo lago, hoy convertido en tierra de cultivo. Los salares del norte de Chile están constituidos por depósitos Lacustres que en realidad son depósitos marinos, los cuales ya no están bajo el agua debido a la alta evaporación del desierto. En estos salares existen grandes reservas minerales de boro, litio, potasio y sodio. Al sur de Chile, en el área portuaria de Puerto Montt se han encontrado estratos expuestos finamente laminados de limos y arcillas de aproximadamente 19 m de espesor (Dobrovlny *et al.*, 1963). Los depósitos Lacustres están en plena formación bajo los lagos existentes hoy en día.

e) Depósitos Eólicos

Los depósitos Eólicos han sido formados debido al transporte de partículas finas por el viento. El viento es capaz de separar las partículas de acuerdo a su peso y, por lo tanto, de acuerdo a su granulometría. De esta manera, las partículas más finas (bajo la malla 200, 0.075 mm) pueden viajar en suspensión mayores distancias que las más gruesas. Las dunas corresponden a depósitos Eólicos de arenas homogéneas, con granulometrías uniformes, con granos generalmente redondeados y que se forman principalmente en zonas desérticas y costeras. Las dunas de Ritoque, Concón, El Tabo y Putú al norte de Constitución, son algunos ejemplos de depósitos Eólicos en Chile central. Existe un tipo de suelo limoso fino denominado Loess, el cual forma este tipo de depósitos. Debido a la actividad volcánica existente en Chile, los depósitos Eólicos provenientes de material volcánico son los que se encuentran más extendidamente repartidos en el valle central de Chile. Algunos ejemplos de tales materiales son los conocidos como Trumaos, Ñadis y Pumicita (ver Figura 1.1).

f) Depósitos Glaciares

El movimiento debido a la gravedad de grandes glaciares formados durante los periodos de glaciación ha ocasionado que se formen depósitos de materiales muy variables. El peso y capacidad abrasiva de un glaciar son tan grandes que la energía generada durante su descenso es capaz de erodar macizos rocosos ubicados tanto bajo el glaciar como a los costados. De esta manera, un glaciar esculpe y crea valles y el material arrastrado y depositado a lo largo del trayecto se conoce como morrena. Una vez que el hielo es derretido, al frente del glaciar aparecen los depósitos Glaciares.

En Chile, los glaciares creados a lo largo de la cordillera de los Andes se han abierto paso a través de las montañas llegando al valle central. Sin embargo, ya no hay rastros de varios de los depósitos Glaciares porque han sido posteriormente trasladados por aluviones, cursos de agua y el viento, formando los depósitos Aluviales, Coluviales o Eólicos anteriormente mencionados. Sin embargo, en las zona de los lagos del sur aún existen depósitos Glaciares y los lagos representan las mayores profundidades de erosión y la dirección tomada por los glaciares. Por ejemplo, en la zona de los lagos Puyehue, Todos los Santos, Rupanco, Llanquihue, el seno de Reloncaví y en Chiloé de Ancud a Quellón, pasando por Castro y Chonchi hacia el golfo de Ancud y mar interior, poseen reconocibles depósitos glaciares en la forma de conglomerados. Los canales de la Patagonia revelan la fuerte acción de los glaciares, los cuales profundizaron de tal manera su trayecto que crearon fiordos marinos. Por lo demás, en la Patagonia los efectos de la glaciación aún pueden ser visibles tanto en los glaciares de Campo de Hielos Norte como en Campo de Hielos Sur, así como también en la Antártica, donde los depósitos Glaciares están siendo formados. Información sobre depósitos Glaciares en Puerto Montt puede ser leída en Dobrovlny *et al.* (1963) y sobre la glaciación cuaternaria en Chile en Clapperton (1994).

1.3. Suelos y rocas chilenas

En este texto se utilizarán clasificaciones técnicas y geológicas, sin embargo, algunas rocas y suelos en particular, adquieren nombres propios dados por quienes están en contacto directo con estos materiales. Ya se han mencionado el Maicillo, arena Bío Bío, Coquina, Pumicita, Trumaos y Ñadis. A estos hay que agregar la Chuca o Chusca que es un material que se encuentra en las regiones del norte, desde Atacama a Tarapacá. La Chusca es un suelo liviano formado por partículas limosas y arenosas sin cohesión compuestas de sales de depositación eólica de material residual producto de la meteorización del Caliche, el cual está compuesto de Yeso, Cloruro de Sodio y otras sales asociadas al salitre. El salitre es un fertilizante natural compuesto de Nitrato de Sodio (NaNO_3) y Nitrato de Potasio (KNO_3). Los mayores depósitos de salitre del mundo se encuentran en el desierto de Atacama.

En Renca y Quilicura un suelo es llamado Sebo de Burro debido a que es una arcilla de color gris, compresible y de alta plasticidad muy similar al Mazacote. El Mazacote es un limo arcilloso también gris, compresible y de alta plasticidad que se encuentra en Punta Arenas.

La Cancagua es una roca sedimentaria areno-arcillosa cementada de color café, la cual ha sido el producto de la depositación de cenizas volcánicas como fango en ambientes marinos. Esta arenisca se puede encontrar principalmente en Valdivia y Niebla, por ejemplo, a ambos bordes del río Calle Calle y en el fuerte de Niebla. Conforman una terraza sobre la cual se han depositado sedimentos fluviales y marinos blandos. La Cancagua aflora en las partes topográficamente más altas de Valdivia: Isla Teja, plaza de Armas, calle Beucheff, Parque Municipal y calle Errázuriz (Weischet, 1963). Las estructuras fundadas sobre Cancagua sufrieron considerablemente menos daño que las fundadas en los rellenos blandos durante los terremotos de 1960 (Doyel *et al.*, 1963).

Un depósito eólico ya mencionado es la Pumicita, la cual también es denominada Ignimbrita debido a que forma depósitos de material que proviene del flujo piroclástico de cenizas, fragmentos de vidrio y de pumicita. La piedra Pómez, por ejemplo, es una especie de Pumicita producto de su estructura porosa, de donde resulta su bajo peso unitario (puede flotar en el agua). Se debe tomar en cuenta que este material ha sido lanzado desde un volcán en erupción, esto significa en un ambiente con elevadas temperaturas y presiones. Al ser soltado al exterior, se crean burbujas de gases tal como al abrir una bebida gaseosa. La Pumicita tiene varios usos en la construcción, como por ejemplo en la fabricación de hormigones livianos y como rellenos livianos en terraplenes y detrás de estructuras de contención para disminuir el empuje. Los depósitos de Pumicita de Pudahuel y Maipú son de color blanco amarillento y café claro, y se han formado a partir de erupciones del complejo volcánico Maipo.

En las zonas al poniente de los lagos del sur de Chile es posible encontrar en zonas bajas depósitos de cenizas volcánicas saturados o parcialmente saturados de muy baja permeabilidad llamados Ñadis, que en mapudungun significa pantano reciente. Los Ñadis poseen mayor cantidad de materia orgánica descompuesta que los Trumaos, pero son generalmente de menor espesor. Las cenizas volcánicas que forman tanto los Ñadis como los Trumaos no están consolidadas y tienen un alto contenido de vidrio y minerales volcánicos. Además, se han depositado sobre depósitos fluvio-glaciales constituidos por gravas redondeadas dentro de una matriz arenosa con diferentes niveles de cementación. A menos de 1 m de profundidad se desarrolla un lente de entre 2 y 4 mm de Silicato de Fierro (Fe_2SiO_4) llamado Fierrillo, de color rojizo a negro, muy duro, pero quebradizo, a través del cual incluso a las raíces de árboles les resulta difícil atravesar. Esta costra impermeable también afecta la infiltración de las aguas de lluvias y el ascenso del agua por capilaridad, debido a los grandes ángulos de contacto. Por lo tanto, son suelos que se saturan y secan rápi-

damente debido a la presencia de la barrera del Fierrillo. La Figura 1.1 muestra la distribución geográfica de depósitos de suelos volcánicos en el centro y sur de Chile. Se recomienda revisar los estudios geotécnicos sobre Trumaos y Ñadis de Chillán y Santa Bárbara realizados por Verdugo (2008), Paredes y Verdugo (2004) y Verdugo y Paredes (2004).

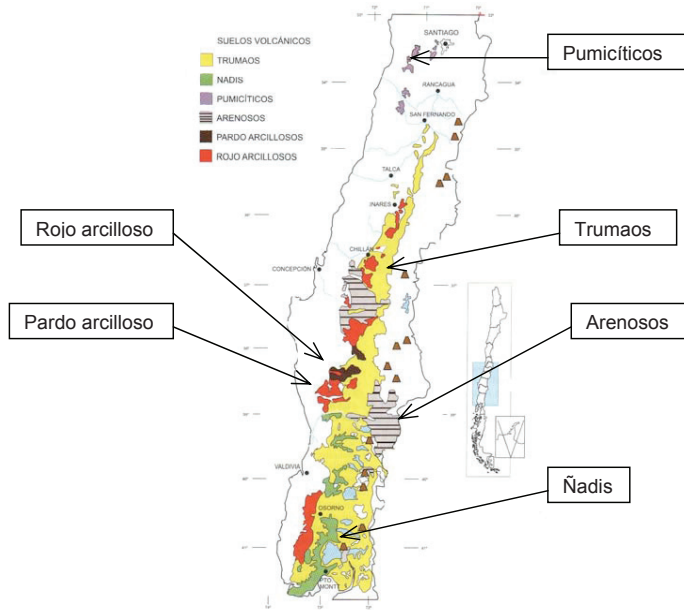


Figura 1.1: Principales tipos de suelos formados a partir de cenizas volcánicas (Paredes y Verdugo, 2004)

Los depósitos de suelos orgánicos como turba ubicados en humedales y pantanos adquieren diversos nombres dependiendo de la zona de Chile en que se encuentren. Por ejemplo, en el altiplano y en zonas montañosas de los Andes se denominan Bofedales a los sectores húmedos, los cuales son detectables por la presencia de vegetación en zonas desérticas. Entre Temuco y Osorno se denominan Gualves y en Chiloé y la Patagonia se les llama Mallín. Debido a su compresibilidad y baja resistencia al corte son suelos no recomendables para fundar estructuras.

Depósitos de gravas uniformes y limpias, es decir, casi sin arena ni suelo fino son llamados Porotera. Estos depósitos Fluviales se encuentran generalmente próximos a cauces de ríos en el valle central y son fácilmente reconocibles. El Tertel es, al igual que la Coquina, un suelo cementado y estratificado con conchuelas. El Tertel es denominado así en Atacama y se encuentra también en Coquimbo y La Serena, mientras que la Coquina recibe este nombre en Antofagasta y Tocopilla. La Tierra

Colorada es un material llamado así en Iquique y que se usa como estabilizado en caminos. Está compuesto por gravas angulares dentro de una matriz arcillosa. En general, es costumbre denominar Tierra Colorada a suelos arcillosos de color rojizo principalmente al oriente de la cordillera de la Costa y en lomas del valle central entre Talca y Osorno.

Descripciones geotécnicas de estos materiales se realizan para proyectos de ingeniería y construcción, sin embargo, existen contados estudios de investigación. Es por ello necesario investigar y profundizar el conocimiento actual del comportamiento geotécnico de estos materiales. Se debe mencionar que varios de estos suelos sí han sido bastante estudiados desde el punto de vista de la agronomía y desde el punto de vista forestal. Obviamente, los objetivos de estas disciplinas no coinciden con los de la geotecnia, no obstante, es recomendable consultar sus fuentes. En general, estas disciplinas estudian a lo más los primeros 3 a 4 m del subsuelo. Por otra parte, estudios geológicos de estos suelos y rocas pueden ser de mucha utilidad para el ingeniero geotécnico, aunque de nuevo, pueden apuntar a otros objetivos, como por ejemplo para fines ambientales, mineros o metalúrgicos.