

El terreno

Matilde González

El terreno

Matilde González

La presente obra fue galardonada en el octavo concurso
“Ajuts a l’elaboració de material docent” convocado por la UPC.

Primera edición: setembre de 2001
Reimpresión: abril de 2010
Reimpresión: octubre de 2012

Diseño de la cubierta: Ernest Castelltort

© Matilde González, 2001

© Edicions UPC, 2001
Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL
Jordi Girona Salgado 31, Edifici Torre Girona, D-203, 08034 Barcelona
Tel.: 934 015 885 Fax: 934 054 101
Edicions Virtuals: www.edicionsupc.es
E-mail: edicions-upc@upc.edu

Depósito legal: B-35098-2001
ISBN: 978-84-9880-092-0

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org <http://www.cedro.org>) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

Prólogo

Este libro pretende ser guía y manual para todos los estudiantes universitarios, principalmente los relacionados con la Arquitectura e Ingeniería, interesados en algunos temas de los expuestos en la asignatura “El terreno”; asignatura optativa de la que la autora, Matilde González Caballero, es responsable, y que sus contenidos se imparten desde el Departamento de Estructuras en la Arquitectura, en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, y algunos temas relacionados con la cimentación profunda (Fonamentacions-2) en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés.

La autora es desde 1976 arquitecta por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, y profesora asociada y encargada de curso de la asignatura *Mecánica del Suelo* desde 1982 hasta 1990, en que ya como Titular de Escuela Universitaria continúa impartiendo casi el mismo programa pero con el nombre de “*Geotècnia Bàsica a l'Arquitectura*”, dependiendo entonces del Departamento de Ingeniería del Terreno. Desde 1995, ya desde el Departamento de Estructuras en la Arquitectura y con el nombre de “*El terreno*”, el temario se concreta al estado actual y se amplía respecto a los anteriores en el aspecto estructural de los temas de cimentaciones, y se incluye el tema de elementos de contención flexible o pantallas.

El objetivo principal de la asignatura, y por tanto de lo expuesto en este libro, se puede resumir en dar a conocer las bases necesarias para entender y prever el comportamiento tenso-deformacional del suelo, a lo largo de todo el proceso de adecuación e interacción de un proyecto arquitectónico con la realidad del suelo.

En los cuatro primeros temas se dan las pautas para poder, según los casos, idealizar el suelo como un conjunto sólido elástico o plástico, a la vez que se muestra su real complejidad como un conjunto cuatrifásico (partículas minerales, agua, aire y gas), y con la posible heterogeneidad y estratificaciones de potencia o espesor variables.

También, tras la teoría del tema 5 (técnicas y medios para el reconocimiento de los suelos), se potencia la aplicación práctica: desde la interpretación de unos estudios geotécnicos; con las deducciones de datos de interés geológico-geotécnico necesarios para la decisión de un tipo u otro de cimentación, hasta manejar las fórmulas y los cálculos previsibles de resistencia y deformabilidad del suelo en respuesta a las cargas y actuaciones de la propia estructura y de otras vecinas. (temas 2, 3, 4, 8, 9 y 10).

Así mismo, se pretende ayudar a adquirir los criterios básicos que faciliten la toma de decisión en todo lo referente al suelo y al diseño y cálculo de muros de contención y cimentaciones superficiales y profundas, (temas 6, 7, 8, 9 y 11). Con todo ello se conseguirá ampliar lo más posible el entendimiento entre el arquitecto, como principal responsable del hecho arquitectónico, y los técnicos especialistas en la información geotécnica o en cimientos que el proyecto arquitectónico requiera.

Índice

1 Origen y clasificación del suelo

1.1	Introducción a la Mecánica del Suelo	13
1.2	Clasificación de suelos	15
1.3	Consistencia de los suelos	22
1.3.1	Límites de Atterberg	22
1.4	Clasificaciones científicas	24
1.5	Propiedades índice	26
1.5.1	Características físicas de volumen. Pesos específicos	26
1.5.2	Humedad natural, w	27
1.5.3	Índice de poros, e	28
1.5.4	Porosidad, n	28
1.5.6	Densidad saturada, γ_{sat}	28
1.6	Compactación	30
1.6.3	Ensayo Proctor	30

2 El agua en el suelo

2.1	Introducción	33
2.2	Estados del agua en el suelo	33
2.3	Nivel freático o nivel piezométrico	34
2.4	Capilaridad	35
2.5	Humedad de contacto	37
2.6	Movimiento del agua en el suelo. Permeabilidad	38
2.7	Coefficiente de permeabilidad: k	42
2.8	Medición de la permeabilidad en laboratorio	45
2.9	Otros movimientos no gravitatorios del agua: electroósmosis y termoósmosis	47
2.10	Otros factores que influyen en la permeabilidad	47
2.11	Determinación de la permeabilidad <i>in situ</i>	47
2.12	Tensión efectiva. Tensión neutra o tensión de poro	48
2.13	Gradiente hidráulico crítico, i_c	51
2.14	Valores de permeabilidad y drenaje	55
2.15	Consideraciones sobre el sistema agua-suelo	56

3 Compresibilidad de los suelos. Teoría de la consolidación

3.1	Introducción	59
3.2	Relaciones tensión-deformación con drenaje	59
3.3	Suelos normalmente consolidados y sobreconsolidados	60
3.4	Compresibilidad de arcillas normalmente consolidadas	61
3.5	Módulo edométrico	63

3.5.1	Coeficiente de compresibilidad volumétrica: m_v	63
3.6	Cálculo de asiento de consolidación	64
3.7	Compresibilidad de estratos preconsolidados de arcilla	66
3.8	Consolidación de las capas de arcilla. Teoría restringida de Terzaghi y Frölich	68
3.9	Coeficiente de consolidación, C_v	71
3.10	Ensayo de consolidación. Edómetro	73
3.11	Limitación de las deformaciones	76
3.12	Métodos de mejora del terreno	77

4 Estados de equilibrio estático de un suelo elástico y plástico

4.1	Problemas tensionales en Mecánica del Suelo	81
4.2	Estados de equilibrio I y II; elástico y límite	84
4.2.1	Círculo de Mohr	86
4.3	Tercera condición de equilibrio para el estado I	91
4.4	Estado de equilibrio II (precede a la rotura)	94
4.5	Tensiones en el semiespacio de Boussinesq	98
4.5.1	Carga puntual	99
4.5.2	Carga lineal	99
4.6	Tensiones características	101
4.7	Equilibrio límite	105
4.7.1	Teoría de equilibrio límite de Rankine	106
4.7.2	Introducción al estado activo y pasivo	106
4.8	Ensayos mecánicos	112
4.8.1	Ensayo de compresión simple o compresión no confinada	112
4.8.2	Ensayo de corte directo	114
4.8.3	Ensayo triaxial	115

5 Técnicas y medios de reconocimiento del terreno

5.1	Introducción	119
5.2	Normativa	119
5.3	Estudios geotécnicos	120
5.4	Campañas de reconocimiento	122
5.5	Técnicas manuales de reconocimiento	123
5.6	Técnicas mecánicas de reconocimiento. Perforaciones. Sondeos	124
5.6.1	Sondeos mecánicos	124
5.6.2	Ensayos de penetración estática	126
5.6.3	Ensayo continuo de penetración dinámica	128
5.6.4	Ensayo estándar de penetración dinámica: S.P.T.	129
5.7	Otros medios de prospección	132
5.8	Ensayos de laboratorio	135
5.9	Métodos de prospección geofísica	136

6 Teoría de empujes. Elementos de contención rígidos. Muros

6.1	Introducción. Generalidades de los muros	139
6.2	Tipología de muros	140
6.3	Interacción tierras-muro. Empujes al reposo, activo y pasivo	143
6.4	Teoría de Coulomb para el empuje activo	148
6.5	Hipótesis de Rankine para el cálculo de muros en estado activo	151

6.6	Sobrecargas	153
6.7	Muros en L (o en <i>cantilever</i>)	155
6.8	Muros de contrafuertes	156
6.9	Esquemas de armado para diferentes tipologías de muros	157
6.10	Acción del agua en los muros	158
6.11	Predimensionado de los muros	159
6.12	Acción total en muros	160
6.13	Diseño estructural del muro	162

7 Taludes y laderas

7.1	Introducción y nomenclatura	165
7.2	Análisis para la estabilidad y el diseño	166
7.3	Causas de los movimientos de ladera	166
7.4	Métodos de análisis de la estabilidad de los taludes	167
7.5	Rotura circular	171
7.5.2	Tipos de círculos de rotura críticos	172
7.5.4	Ábacos de Taylor	174
7.6	Talud indefinido	177
7.7	Medidas para incrementar la estabilidad de un talud	178
7.8	Movimientos de ladera	178
7.9	Ejemplos de roturas y desprendimientos	181

8 Cimentaciones superficiales

8.1	Generalidades	187
8.2	Bases de diseño	188
8.3	Carga de hundimiento de las cimentaciones	190
8.4	Carga admisible	191
8.5	Procedimientos teóricos para determinar la carga de hundimiento	192
8.6	Carga descentrada	197
8.7	Influencia del agua freática en la carga de hundimiento	197
8.8	Suelo estratificado	200
8.9	Determinación de la capacidad de carga mediante ensayos de placa de carga	204
8.10	Presión admisible a partir de datos del penetrómetro estático	206
8.11	Presiones admisibles en la Norma NBE-AE/88	207

9 Cimentaciones profundas

9.1	Introducción	209
9.2	Clasificaciones de los pilotes	210
9.3	Diseño y cálculo de cimentaciones profundas	211
9.4	Capacidad de carga del pilotaje	211
9.5	Determinación de la carga de hundimiento de un pilote	212
9.5.1	Terreno involucrado en la resistencia por punta	213
9.5.2	Fórmulas estáticas	214
9.5.3	Fórmulas prácticas	216
9.6	Pruebas de carga de un pilote	218
9.7	Proceso de diseño y cálculo	219
9.8	Rozamiento negativo	223
9.9	Pilotes hincados. Resistencia dinámica de pilotes	228
9.10	Resistencia del grupo de pilotes	228

9.11	Reparto de cargas en un pilotaje	230
9.12	Comprobaciones que se deben considerar en un proyecto de pilotaje	232
9.13	Asientos	233
9.14	Resumen en organigrama del diseño de un pilotaje	235

10 Teoría de asientos

10.1	Introducción. Generalidades	237
10.2	Métodos de cálculo	238
10.3	Métodos elásticos	239
10.3.1	Asientos bajo carga rectangular (Scheleicher y Terzaghi)	240
10.3.2	Steinbrenner	241
10.4	Métodos edométricos	243
10.5	Correcciones para la aproximación a la realidad	245
10.6	Determinación de asientos a partir de ensayos de campo	247
10.7	Coefficiente de balasto	249
10.8	Asientos de pilotes y pilotajes	251
10.9	Asientos diferenciales. Distorsión angular	251

11 Pantallas

11.1	Introducción	255
11.2	Estructuras de contención flexibles	255
11.3	Información previa al diseño de pantallas	256
11.4	Análisis de la información necesaria	257
11.5	Tipos de pantallas	257
11.6	Acciones en las pantallas	258
11.7	Análisis del cálculo de empujes en pantallas	259
11.7.1	Influencia de los movimientos pantalla-terreno en los empujes	259
11.8	Pantalla en voladizo	261
11.9	Influencia de la cohesión	265
11.10	Pantalla anclada	267
11.10.1	Método del soporte libre	268
11.10.2	Método del soporte fijo	271
11.11	Efecto de las sobrecargas	273
11.12	Efecto de la presión de agua y de la filtración	274
11.13	Influencia de la compactación	275
11.14	Anclajes	277
11.15	Entibaciones	281
11.16	Rotura y levantamiento del fondo de una excavación	284

Ejercicios	287
-------------------------	-----

Anexo 1 Sistema Unificado de Suelos de la ASTM	I
Anexo 2 Relaciones entre algunas unidades de medida de los sistemas más habituales	II
Anexo 3 Esquema de corte geológico de Barcelona	III

Referencias bibliográficas	V
---	---

1 Origen y clasificación del suelo

1.1 Introducción a la Mecánica del Suelo

De las definiciones existentes de esta materia se eligen las siguientes: según Schulze, ciencia que estudia los esfuerzos en el terreno, y sus efectos, y según Jiménez Salas, ciencia que se ocupa de las modificaciones que en los estados de equilibrio y de tensiones de la corteza terrestre producen las construcciones humanas.

En resumen: la Mecánica del Suelo estudia problemas de equilibrio y deformación de masas de tierra. Masas de tierra conformadas por varias capas de suelos de naturaleza y espesores diferentes. Suelos que en sí ya no son homogéneos ni monofásicos, sino que en cada uno de los diferentes tipos de suelo, nos encontramos con la fase sólida de las partículas de suelo propiamente dicho, y con otras fases como aire, agua o hielo, e incluso gas; es decir, el suelo puede llegar a ser tetrafásico. Existen conexiones con otras ciencias y disciplinas, como la Química, la Geología, la Hidráulica, etc. Las masas de tierras pueden estar sometidas a esfuerzos interiores y exteriores también de naturaleza e intensidad diferentes, como pueden ser acciones hidráulicas, vibratorias, sísmicas, gravitatorias, etc.

1.1.1 Historia. Antecedentes. Desarrollo

La Mecánica del Suelo es una ciencia relativamente joven; su nombre actual existe desde 1925, año en el que el profesor checo Karl Terzaghi publicó en Viena su tratado *Erdbaumechanik*. Es evidente que, mucho antes de Terzaghi, los constructores, ingenieros y arquitectos se habían preocupado por el suelo. Hay estudios del mismo, considerado desde el punto de vista constructivo, que se remontan a épocas muy anteriores; los habitantes prehistóricos construyeron ciudades lacustres sobre lagos, en lo que ahora es Suiza e Italia. Erigieron habitáculos sobre pilotes, los *palafitos*; esto implica cierta experiencia en el comportamiento del suelo.

Los pueblos de la Antigüedad, persas, griegos y romanos, construyeron puentes, templos monumentales, grandes obras hidráulicas como los acueductos, etc.

En la Edad Media, la construcción de las catedrales, con su gran peso, implica que ya tenían conocimientos importantes sobre el comportamiento de los suelos.

Pero es a partir del siglo XVIII cuando los estudios de las tierras tienen un desarrollo más técnico, se precisan las nociones de equilibrio, empuje de tierras sobre muros, etc.

En 1704 el mariscal Vauban publicó el *Tratado de ataque a las plazas*, y en 1706 el *Tratado de la defensa de las plazas*.

Coulomb, en 1773, presentó una memoria de los principios de su teoría sobre el empuje de tierras. Se titulaba *Ensayo sobre una aplicación de máximo y mínimo a algunos problemas de estática relativos a la arquitectura*.

El 21-3-1971, en España, se publica una ley del Ministerio de la Vivienda que “obliga a incluir en el proyecto de todo edificio un anejo de cálculo de cimentación y de las bases geológico-geotécnicas en que se fundamenta dicho cálculo”.

El objeto de esta asignatura es el conocimiento y la aprehensión de experiencias de estructuras de fundamentos o cimientos, y motivar su estudio para conseguir una correcta puesta en obra de un proyecto arquitectónico.

La Mecánica del Suelo en Arquitectura induce la aplicación de los Principios de la mecánica clásica (y de la hidráulica) a un cuerpo complejo (con posibilidad de ser tetrafásico), como es el suelo, base de la construcción arquitectónica. La Mecánica del Suelo en el campo ingenieril se denomina *Geotecnia*.

1.1.2 Origen y clasificación de los suelos

Los términos *suelo* y *roca* tienen distinto significado, según sea el campo profesional donde intervengan.

El significado de *suelo* para ingenieros y arquitectos es diferente del dado por geólogos o biólogos; éstos no valoran las características de resistencia y deformación.

El terreno desde el punto de vista constructivo y geotécnico, comprende la capa más exterior de la corteza terrestre, de espesor variable según los casos; generalmente desde cerca de un metro a unas decenas de metros. Se clasifica en dos principales categorías: *suelo* y *roca*.

- *Suelo*: también llamado roca en estado suelto, sedimento no muy consolidado o producto de meteorización, es todo agregado natural de partículas minerales resultado de la alteración química o física de las rocas, separable por medios mecánicos de poca intensidad. Ejemplos de alteración química: oxidación, hidratación, hidrólisis, disolución... Ejemplos de alteración física: variación de temperatura, crioclastia o congelación, erosión por el viento,...

- *Roca*: agregado natural de partículas minerales (más bien cristales) unidas por fuerzas cohesivas potentes y permanentes. Se suele considerar roca si su resistencia a la compresión simple, sin drenaje, q_u (o R_u), ("u" del inglés *undrained*), es mayor que 5 kg/cm².

En general las rocas duras y compactas constituyen un terreno de cimentación excelente, siempre que la solera de excavación esté libre de material alterado y las posibles diaclasas se rellenen con hormigón.

Las rocas se clasifican según su origen en *ígneas*, *sedimentarias* y *metamórficas*.

Ejemplo de ígneas: granitos, pórfidos, sienita, diorita, gabro, diabasa, ofita, gneis, basaltos, pumicita etc. Ejemplo de sedimentarias silíceas: sílex, jaspe, areniscas, etc. Ejemplo de sedimentarias arcillosas: arcillitas, margas, etc. Ejemplo de sedimentarias cálcicas: calizas, dolomías, etc. Ejemplo de metamórficas: gneis, micacitas, pizarras, esquistos, cuarcitas, serpentinas, mármoles, etc.

Normativa existente: *NBE-AE*, (Norma Básica de la Edificación), de obligado cumplimiento, y por ahora sólo recomendables *NTE-CEG* (Cimentaciones y Estudios Geotécnicos).

Básicamente, un *Estudio geotécnico* consiste en un informe de un experto, que tras prospecciones y ensayos *in situ* y en laboratorio de muestras de suelo (y/o roca), extraídas a distintas profundidades, determina los parámetros geotécnicos que caracterizan al subsuelo de cimentación.

Con los parámetros geotécnicos determinados, junto a unos datos previos de la proyectada estructura, se podrán calcular los valores previsibles de las presiones admisibles, los empujes en la estructura de contención, los asientos instantáneos o diferidos y el tiempo en que éstos se producirán, o cualesquiera de los parámetros que se precisen de la interacción suelo-estructura.

1.2 Clasificación de suelos

En realidad se ha de pluralizar, ya que existen numerosas clasificaciones:

1.2.1 Clasificación según su origen

Según el origen de sus elementos, los suelos se dividen en dos grupos:

- Si el suelo es de descomposición física y química de las rocas: *inorgánico*.
- Si el suelo es de origen esencialmente orgánico: *orgánico*.

1.2.2 Clasificación según su situación

- Si está en el mismo lugar de meteorización: *suelo residual*.
- Si está en distinto lugar del de meteorización: *suelo transportado*.

Los principales agentes del *transporte* son: el agua, el hielo, la gravedad y el viento. Según el medio de transporte se distinguen:

- *suelos coluviales* o *coluviones*: el producto de cierta meteorización (descomposición o transformación debida al viento, agua, sol, etc.) de la superficie de la roca madre que cae por gravedad. Tiene mezcla de tamaños. Un ejemplo típico es el llamado *pie de monte*. El *glacis* es un suelo coluvial que es además transportado por el agua, por lo que ya no tiene tanta diferencia de tamaños.

- *suelos aluviales*, o *aluviones*: el agua los transporta a distancias mayores y se van depositando por degradación de tamaños.

Por desgracia aún hoy día se ven algunos informes de cimentaciones con descripciones muy imprecisas en cuanto al valor descriptivo geotécnico: por ejemplo, “arena fina”, “arcilla blanda”; hay que saber que con ese mismo adjetivo se hace referencia a un gran abanico de diferentes propiedades mecánicas.

Se han buscado métodos más exactos para diferenciar distintos tipos de suelo *según su comportamiento*. Si se tiene en cuenta sólo su naturaleza, se ve que ésta se podría alterar por diferentes procedimientos: una arena suelta se transforma en densa si se la vibra adecuadamente; si es suelo cohesivo, añadiendo agua se altera su consistencia, etc.

1.2.3 Clasificación vulgar de suelos

- Arcillas: Silicatos de aluminio. Agregado de partículas microscópicas, procedentes de la descomposición química de las rocas. Son plásticas entre límites extensos de humedad. Cuando están muy secas son duras. No despegan polvo al frotarla entre los dedos. Tienen muy baja permeabilidad.
- Arcillas orgánicas: Arcillas con presencia de materia orgánica finamente dividida. Cuando están saturadas son muy compresibles, pero cuando están secas vuelven a ser duras y muestran mayor resistencia. Colores: de gris a negro. Olor característico.

- Bentonitas: Arcillas con alto grado de contenido de montmorillonita (silicato aluminico con gran capacidad de absorber agua e hincharse). La mayoría se formaron por alteración química de cenizas volcánicas. Con agua se esponjan mucho más que otras arcillas, y cuando se secan se contraen también mucho más.
- Caliches: Capas de suelo cuyos granos están cementados por carbonatos calcáreos. Estas capas se encuentran generalmente a poca profundidad. Su espesor varía de pocos centímetros a varios metros. Se dan en climas semiáridos. En Cataluña también se conocen por *tortorá*.
- Limo inorgánico: Suelo de grano fino con poca o ninguna plasticidad, generalmente con partículas de cuarzo. Se conoce también por el nombre de *polvo de roca*. Es diferente a la arcilla; se ve la diferencia mediante el *ensayo de sacudimiento*¹ o de dilatación (dilatación = reacción a la agitación).
- Limo orgánico: Suelo de grano fino, más o menos plástico, con mezcla de materia orgánica finamente dividida. Color de gris a gris oscuro. A veces tiene sulfhídrico y carbónico (H₂S, CO₂) y otros productos gaseosos originados por la descomposición de materia orgánica, lo que le da olor característico. Tiene gran compresibilidad y baja permeabilidad. En Cataluña a veces se le llama *fetge de vaca*, pero esta denominación se suele aplicar con más acierto a ciertas arcillas verde-azuladas del Plioceno o a las del Vallés (Mioceno).
Los limos son relativamente impermeables. A veces suben del fondo de una perforación como si fuesen fluidos viscosos y espesos.
- Loess: Sedimentos eólicos uniformes y cohesivos (existe un cementante calcáreo o arcilloso). Partículas entre 0,01 y 0,05 mm. Es característica la presencia de agujeros verticales debido a las antiguas raíces; eso lleva a gran permeabilidad vertical respecto a la horizontal. Si se satura, el cemento se disuelve y da grandes colapsos o asentamientos rápidos importantes.
- Marga: Forma vaga de definir varios tipos de arcillas marinas calcáreas compactas que tienen CO₃Ca en proporción mayor de 20%. Con unas gotas de ácido clorhídrico burbujea. Color verde amarronado, pero también hay colores azulados, grises e incluso rojizos. (En Cataluña, se da mucho en el Vallés).
- Molasa: Arenisca con cementante calcáreo (arenisca es una roca sedimentaria compuesta de granos de cuarzo y/o feldespato y/o mica). Bastante dura. Puede tener cementante silíceo o calcáreo (calcita).
- Morrenas: Depósitos glaciares no estratificados de arcillas, limos, arenas, cantos rodados y bolos que estuvieron bajo los hielos en periodos de avance de los glaciares.
- Sauló: Suelo residual producido por la descomposición del granito. (En Menorca se llama así a una arenisca calcárea).

¹Ensayo de sacudimiento: se toma una pasta de limo inorgánico, se satura, y se sacude en la palma de la mano; la pasta expelle agua y hace la superficie brillante. Si la pasta se dobla o chafa se vuelve opaca. Si se seca la pasta, se torna frágil, y resulta fácil despegar polvo si se frota con los dedos.

- Tosco: Suelo de composición variable con fuerte impregnación calcárea. A menudo son limos de origen eólico o *loésico*. Se da mucho en Madrid. Cuando se presenta como incrustación aislada calcárea en una base de *loess* se llama tortorá. Es un suelo que ha sufrido transporte por gravedad o lluvias o mantos de inundación.
- Turbas: Agregados fibrosos y esponjosos de fragmentos de micro y macroscópica materia orgánica descompuesta. Son extremadamente compresibles, lo que conduce a grandes asientos. Color de castaño a negro. (En inglés *peat*, Pt).
- Zahorra arcillosa: Depósito de arena y grava en yacimiento natural con un contenido de arcilla suficiente para dar cohesión a la masa.

Esta clasificación vulgar es bastante imprecisa, a veces incorrecta e incierta geotécnicamente; ya que existen muchos suelos que presentan propiedades y comportamientos muy diferentes y que sin embargo, se conocen vulgarmente con alguno de esos determinados nombres.

Para tener datos representativos del comportamiento del suelo se deberán efectuar varias pruebas o ensayos; de lo que se deduce que para una acertada comprensión e interpretación de los resultados es necesaria una *clasificación científica* de los suelos. La unificada se basa fundamentalmente en su *composición granulométrica* y en su *consistencia*.

La ordenación de las diversas fracciones de los suelos en función del tamaño de sus partículas se denomina *análisis granulométrico*.



El Laboratorio de Transporte y Mecánica del Suelo tiene editada una norma (NLT 104/58), en la que se describe el análisis granulométrico por tamizado.

Granulometría: se define como relación de porcentajes, en peso, de los distintos tamaños de grano que se encuentran en un suelo, determinados por tamizado, sedimentación, u otros medios.

Los tamices son una serie de recipientes cilíndricos (a modo de cacerolas metálicas, con bases de enrejado de alambre de distinto tupido), que sirven para seleccionar los tamaños, por medio del entramado o rejilla o malla de alambre de aberturas distintas y normalizadas (figura 1.1). Existe una *serie de tamices* normalizados por la ASTM (*American Society of Testing Materials*):

serie gruesa (designación / abertura de malla en mm),

ejemplos: 4"/ 101,6; 2"/ 50,8; (1/4)" / 6,35

serie fina (designación / abertura de malla en mm),

ejemplos: 4 / 4,76; 8 / 2,38; 10 / 2,0; 100 / 0,14; 200 / 0,074

Fig. 1.1 Tamices

Tanto la preparación de muestras de suelo para los distintos ensayos, como los ensayos que se deben realizar, están normalizados (NLT-101/58).

El análisis granulométrico del suelo que se quiere estudiar se hace por tamizado hasta un tamaño de tamiz de 0,074 mm, (nº 200), y se puede continuar, si es preciso, por sedimentación -este método se describirá más adelante-.

El tamizado consiste fundamentalmente en disponer una serie de tamices normalizados, uno sobre otro y de mayor a menor abertura de malla (figura 1.1), y tamizar o cribar una determinada cantidad de suelo, del que se ha consignado su peso inicial, por ejemplo 1 kg; tras someter al conjunto a vibrado, ya sea manual o mecánico, se pesa la cantidad de suelo retenida en cada uno de los tamices, y con esos datos se calculan -por diferencia del peso total con el retenido- los porcentajes que pasan por cada uno de los tamices, o sea el tanto por ciento de suelo con partículas menores que la abertura del tamiz considerado. Con esos resultados se pueden graficar *curvas granulométricas* (figura 1.2): se dispone en eje de abscisas el tamaño en mm de las partículas y/o el nº del tamiz (en escala logarítmica), y en el de ordenadas, el % del peso de suelo que pasa.

Se cometerán graves errores si sólo a partir de estos estudios granulométricos se quiere sacar consecuencias generales del comportamiento del suelo, como por ejemplo, relación con la permeabilidad; ya que esta depende en gran medida de la forma de los granos, y por lo tanto puede ser diferente para suelos de igual granulometría. Igualmente, falla la relación con el parámetro “ángulo de fricción interna”, muy importante en Geotecnia, ya que también es función de la forma de los granos.

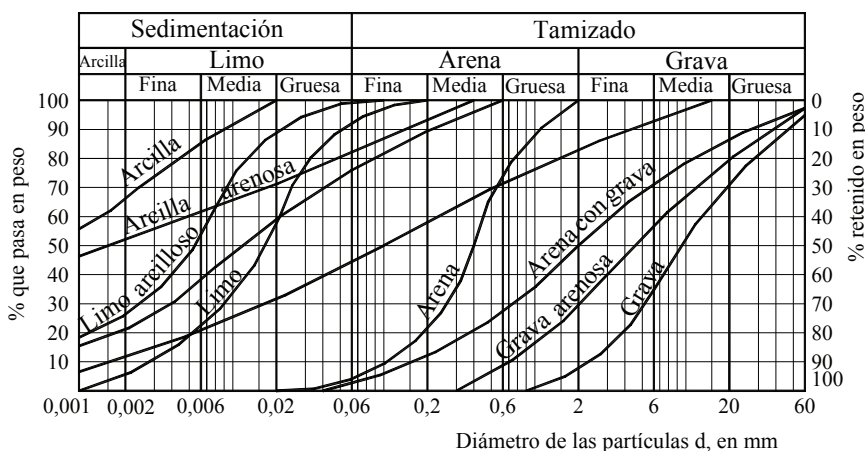


Fig. 1.2 Ejemplos de curvas granulométricas

1.2.4 Principales clasificaciones granulométricas

La mayoría de normas internacionales tienden a coincidir en ensayos y clasificaciones, por ejemplo en la serie de tamices para el análisis granulométrico.

Designación de los tamices A.S.T.M. (American Society of Testing Materials) y su correspondiente abertura de malla en mm:

Tamiz nº	200	40	10	4	2"	4"
# en mm	0,074	0,42	2,0	4,76	50,3	100

a) Según la International Society of Soil Science:

<i>Denominación</i>	<i>Tamaño de partículas</i>
Gravas	entre 60 mm y 2mm
Arena gruesa	entre 2 mm y 0,2 mm
Arena fina	entre 0,2 mm y 0,02 mm
Limo	entre 0,02 mm y 0,002 mm
Arcilla	menor de 0,002 mm ($< 2 \mu$)

b) Según la normativa española, N.T.E.- C.E.G.:

<i>Denominación</i>	<i>Tamaño de partículas.</i>
Bolos	mayor de 63 mm
Gravas gruesas	de 63 mm a 20 mm
Gravas medias	de 20 mm a 6 mm
Gravas finas	de 6 mm a 2 mm
Arenas gruesas	de 2 mm a 0,6 mm
Arenas medias	de 0,6 mm a 0,2 mm
Arenas finas	de 0,2 mm a 0,08 mm
Limos y arcillas	menor de 0,08 mm

c) Clasificación usual según el tamaño de los granos; (coincide con la mayoría de clasificaciones internacionales):

<i>Tipo</i>	<i>Denominación</i>	<i>Tamaño de partículas</i>
Suelos no cohesivos	Bolos (ripios, bloques, cantos rodados)	de 200 mm a 60 mm
	Gravas (gruesas y finas -gravilla-)	de 60 mm a 20 mm y de 20 a 2 mm
	Arenas (gruesas y finas)	de 2 a 0,2 mm y de 0,2 a 0,06 mm
	Limos	de 0,06 mm (60μ) a 2μ
Suelos cohesivos	Arcillas	menores de 2μ

La identificación de suelos por medio de sus tres elementos principales (tres órdenes de tamaño de partículas: porcentajes de arena, limo y arcilla), se simplifica en el *diagrama triangular* o de Feret, (del Bureau of Public Road) (figura 1.3).

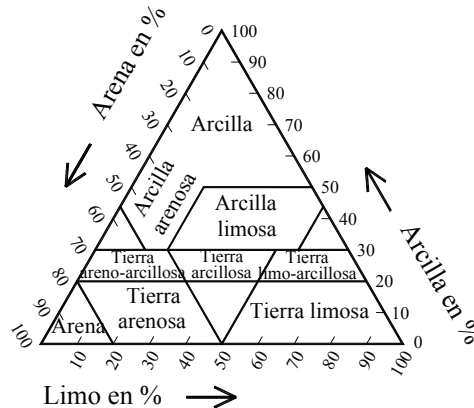


Fig. 1.3 El suelo se representa por un punto situado en el interior del triángulo

d) Clasificación según la Norma Básica de Edificación, N.B.E:

Los terrenos de cimentación se clasifican en consideración a su comportamiento frente a las cargas de cimentación, y a efectos de determinar las presiones admisibles, del siguiente modo:

- Rocas.
- Terrenos sin cohesión.
- Terrenos coherentes.
- Terrenos deficientes.

Las *rocas* se subdividen en:

- Rocas isótropas, como granitos, dioritas, etc.
- Rocas estratificadas, como pizarras, esquistos, etc.

Dentro de los *terrenos sin cohesión* se consideran tres tipos:

- Terrenos de graveras, si predominan gravas y gravillas al menos en un 30%.
- Terrenos arenosos gruesos, si predominan las arenas gruesas y medias y contienen menos del 30% de gravas y gravillas y menos del 50% de arenas finas y limo inorgánico.
- Terrenos arenosos finos, si predominan las arenas finas y limos inorgánicos en más del 50% y contienen menos del 30% de gravas y gravillas.

Los *terrenos coherentes*, formados fundamentalmente por arcillas, se clasifican según su consistencia y resistencia a compresión simple, R_u . (resistencia obtenida sin confinar ni drenar el suelo, $R_u = q_u$):

- Terrenos arcillosos duros: resistencia a compresión simple, $R_u > 4 \text{ kg/cm}^2$.
- Terrenos arcillosos semiduros: R_u entre 2 y 4 kg/cm^2 .

- Terrenos arcillosos blandos: con humedad natural se amasan fácilmente y permiten obtener entre las manos cilindros de 3 mm de diámetro. Su R_u está entre 1 y 2 kg/cm².
- Terrenos arcillosos fluidos: los terrones, con su humedad natural, presionados en la mano cerrada, fluyen entre los dedos. Su resistencia a la compresión simple, R_u , es inferior a 1 kg/cm².

Los *terrenos deficientes*, en general no son aptos para la cimentación, y se subdividen en tres tipos:

- Fangos inorgánicos; limos inorgánicos y arcillas con gran cantidad de agua.
- Terrenos orgánicos.
- Terrenos de relleno o echadizo.

1.2.5 Diferencias entre suelos de similar granulometría

Dado que diferentes tipos de suelo pueden tener una granulometría bastante similar, se han de tener en cuenta otros aspectos que muestran más claramente sus diferencias.

Diferencias entre limos y arcillas:

Limos (entre 0,06 mm y 0,002 mm)	Arcillas (< 0,002 mm)
- Tacto áspero. - Se secan con relativa rapidez y no se pegan a los dedos. - Los terrones secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a polvo con los dedos.	- Tacto suave. - Se secan lentamente y se pegan a los dedos. - Los terrones secos se pueden partir, pero no reducir a polvo con los dedos.

Diferencias entre arenas y limos:

Arenas (entre 2 mm y 0,06 mm)	Limos (entre 0,06 mm y 0,002 mm)
- Partículas visibles. - En general, no plásticas. - Los terrenos algo secos tienen una ligera cohesión, pero se reduce a polvo fácilmente entre los dedos.	- Partículas invisibles. - En general, algo plásticos. - Los terrenos secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a polvo con los dedos.

Diferencias entre gravas y arenas:

Gravas (>2 mm)	Arenas (entre 2mm y 0,06 mm)
- Los granos no se apelmazan aunque estén húmedos, debido a la pequeñez de las tensiones capilares.	- Los granos se apelmazan si están húmedos, debido a la importancia de las tensiones capilares.

1.3 Consistencia de los suelos

Un suelo que posea algo de cohesión (trabazón, coherencia...), según su naturaleza y la cantidad de agua que tenga, puede presentar propiedades que lo incluyan en el estado sólido, semisólido plástico y semilíquido o viscoso. Así, se ve que su consistencia puede ser variada con la humedad. El contenido de humedad que produce el paso de un estado a otro es distinto para diferentes suelos arcillosos. (Esta propiedad se utiliza para clasificar las arcillas). La transición natural no es brusca: ante posibles arbitrariedades se vio la necesidad de definir unos límites. Atterberg, agrónomo, en 1911 estableció los tres límites que separan la consistencia en 4 estados.

Tabla 1.1 Diagrama de consistencias de suelos finos, de Atterberg

Humedad, w , creciente →				
Estados:	sólido	semisólido	plástico	semilíquido
Consistencia:	<i>dura</i>	<i>semidura</i>	<i>plástica</i>	<i>fluida</i>
Límites:		w_r	w_p	w_l

1.3.1 Límites de Atterberg

- w_L : *límite líquido*. Contenido de humedad, en % respecto del peso de suelo seco, según el cual se considera que el suelo pasa de la consistencia plástica a la líquida, de acuerdo con el ensayo normalizado de Casagrande (NLT-105/72, y UNE 7-377-75): dos secciones de una pasta de suelo (figura 1.4) alcanzan a tocarse cuando la taza o cuchara que las contiene es sometida a un número de impactos. Se experimenta con diferentes humedades, anotando los diferentes número de impactos. El límite líquido se considera el correspondiente a 25 impactos

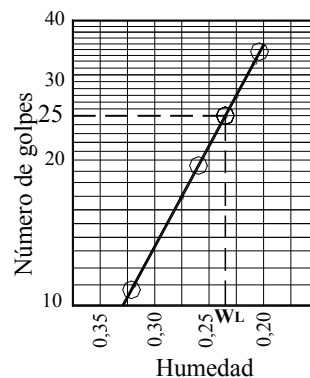
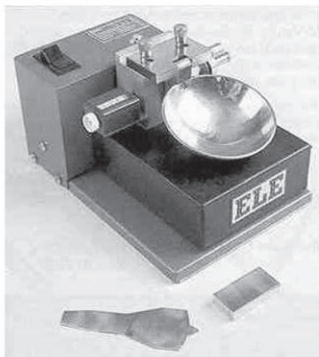


Fig. 1.4 Cuchara de Casagrande y gráfico del ensayo

- w_p : *límite plástico* (o límite inferior del estado plástico). Contenido de humedad, en % respecto del peso de suelo seco, por el cual el suelo deja de tener consistencia plástica, según se determina en el correspondiente ensayo: la fracción de suelo que pasa por el tamiz 40 (# 0,42 mm), amasado y

transformado en cilindros de unos 8 g de masa y 3 mm de diámetro, empieza a resquebrajarse o fracturarse -se rueda entre la palma de la mano y una superficie lisa que no absorba humedad, (norma NLT 106/58), se efectúan varios cilindritos de suelo, y a continuación en un pesa-filtros tarado se determina su humedad, y el promedio de ésta se toma como valor resultado-.

• w_R : *límite de retracción*. Contenido de humedad por debajo del cual una pérdida de humedad no trae aparejada una reducción de volumen; si baja la humedad del suelo, éste se torna de color más claro.

Se suelen relacionar esos valores de humedad para distinguir diferentes comportamientos de los suelos con finos. Así, los valores más utilizados son:

- *Índice de plasticidad*: $I_p = w_L - w_P$

- *Índice de consistencia*: $B = I_c = \frac{w_L - w}{I_p}$

- *Índice de fluidez o liquidez*: $I_f = I_l = \frac{w - w_P}{I_p}$

La consistencia en el dominio o estado plástico se puede considerar pastosa, blanda o firme, según vaya reduciéndose su grado de humedad. Los valores del índice de consistencia y el de fluidez, en esos casos son:

$B = 0$ ----- $0,5$ ----- $0,75$ ----- 1 , correspondiendo: $I_f = 1$ ----- $0,75$ ----- $0,5$ ----- 0 .

(Cuando $I_f = 0$, $w \rightarrow w_P$, $\Rightarrow B = 1$; cuando $I_f = 1$, $w \rightarrow w_L$, $\Rightarrow B = 0$)

Muchas de esas relaciones se representan en el *gráfico de plasticidad de Casagrande* (figura 1.5):

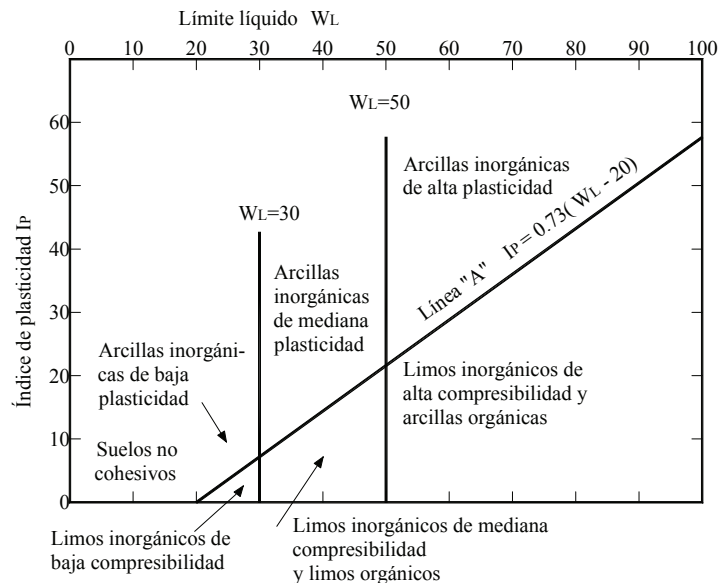


Fig 1.5

Tabla 1.2 Valores típicos de límite líquido e índice de plasticidad (según Costet)

Tipo de suelo	Límite líquido	Índice de plasticidad
arena	$W_L \leq 35$	$I_p \leq 35$
limo	$20 \leq W_L \leq 60$	$5 \leq I_p \leq 25$
arcilla	$W_L \geq 35$	$I_p \geq 15$

Otro valor utilizado para evaluar el comportamiento de suelos arcillosos es el llamado *índice de actividad*, A , que relaciona al índice de plasticidad con el porcentaje de partículas de tamaño arcilla:

$$A = \frac{I_p}{\%(< 2\mu)}$$

1.4 Clasificaciones científicas

Para dar a conocer las propiedades de un suelo determinado, y adoptando los principios de la Mecánica del Suelo, se vio la necesidad de concretar unas clasificaciones científicas, basadas en la *granulometría* y en la *plasticidad*.

- *Sistema de Clasificación Unificada de Suelos*, se basa en propiedades granulométricas y de plasticidad, y agrupa los suelos respecto a su comportamiento como material constructivo.

Primera división de los suelos:

- suelos *de grano grueso*, pasa menos del 50%, en peso, por el tamiz 200 (abertura de 0,074 mm).
- suelos *de grano fino*, pasa más del 50%, en peso, por el tamiz 200.
- suelos *de estructura orgánica*, identificables por el olor, el color negruzco y el tacto esponjoso.

Pt: Es el símbolo de estos últimos suelos; de estructura orgánica, son altamente compresibles, un claro ejemplo es la turba.

Segunda división de los suelos:

Los *de grano grueso*, retenidos en el tamiz 200, se siguen estudiando con otro tamiz, y se les asignan unas letras mayúsculas, como símbolo representativo de su identidad y características:

G: Si pasa menos del 50%, en peso, por el tamiz n° 4, ($\# = 5$ mm), se denominan gravas (del inglés *gravel*).

Además, según el porcentaje de finos se les asigna una segunda letra. Si pasa menos del 5% por la malla del tamiz 200 se tendrán: GW o GP:

GW: Gravas que pueden tener muy pocos finos (de 0 a 5 %) y estar *bien graduadas* (*well* en inglés), con variados tamaños, que cumplen determinadas relaciones entre sus porcentajes.

GP: Gravas que tienen la granulometría muy uniforme: *mal graduadas* o *pobrementemente graduadas* (*poor* en inglés).

Ahora bien, si el porcentaje de finos es mayor del 12%, la segunda letra será función de los finos:

GC: Si los finos que hay en la grava son plásticos, arcillosos.

GM: Si las gravas tienen más finos ($\geq 12\%$) que no son plásticos.

De la segunda división, la otra posibilidad con los de grano grueso es que pase más del 50%, en peso, por el tamiz n° 4 ($\# = 5 \text{ mm}$):

S: Si pasa más del 50% por el tamiz n° 4, de abertura de malla de medio centímetro, se denominan arenas, símbolo S, (del inglés *sand*).

Como antes se hizo con las gravas, también en función del porcentaje de finos se distinguen con una segunda letra:

SW: Arenas con casi ningún fino (0 a 5%) y bien graduadas.

SP: Arenas mal graduadas con poco o nada de finos.

SM: Arenas con más finos ($\geq 12\%$) no plásticos.

SC: Arenas arcillosas, o sea que la fracción fina ($\geq 12\%$) es plástica.

La segunda división de los *de grano fino* se hace en relación con su límite líquido y plástico, y se representa en el diagrama de plasticidad de Casagrande (figura 1.5).

Los símbolos se establecen con el siguiente criterio: la primera letra corresponde al tipo de suelo fino (M, C, O), y la segunda a su característica de plasticidad, baja o alta (L o H):

M: Corresponde a limo inorgánico, (del sueco *moh* y del inglés *mud*), suelo de poca a casi nula plasticidad.

C: Corresponde a arcillas inorgánicas de plasticidad media a alta, (*clay* en inglés).

O: Corresponde a limos o arcillas con gran componente orgánico.

La segunda letra asignada en la segunda división (ver diagrama de plasticidad), será:

L: Si el $w_L \leq 50$, (límite líquido bajo, del inglés *Low*).

H: Si el $w_L \leq 50$, (límite alto, del inglés: *Height*).

Hazen vio que la permeabilidad de las arenas, en estado suelto, dependía de dos cantidades, C_u y C_c (coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura), deducidas de su curva granulométrica:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

Para ser GW se debe cumplir $C_u \geq 4$, y para ser SW $C_u \geq 6$. (Paradoja: cuanto mayor es el *coeficiente de uniformidad* C_u , menos uniforme es el suelo).

La curvatura suave y cóncava determina que para G y S, C_c debe ser entre 1 y 3. Estos valores se diferencian según los autores; así, para Caquot granulometría abierta será si $C_u \geq 2$, y en Normas DIN granulometría abierta será si $C_u \geq 5$. Cuanto más cerrada es la granulometría de un suelo, más pronunciada es la pendiente de la parte central de la curva.

Otro dato importante que se deduce del estudio granulométrico es el D_{10} = Diámetro eficaz de Allen Hazen = diámetro de partículas correspondientes al 10% del peso del suelo, en la curva granulométrica; es decir, el 10% del peso de suelo seco que tiene un tamaño menor que ese diámetro (o si se quiere, el 90% del suelo está formado por partículas mayores que ese diámetro).

Sedimentación es el proceso que se sigue para clasificar los suelos finos (suelos que pasan por tamiz 200, de abertura de malla 0,074 mm), proceso que fundamentalmente se basa en la ley de Stokes. La velocidad de caída (v) de una esfera (diámetro D) con peso específico γ_s , sumergida en un fluido de peso específico γ_w y viscosidad η es:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} \times D^2$$

Para partículas de densidad $2,65 \text{ g/cm}^3$, en agua a 20°C , la viscosidad $\eta = 1 \text{ cP} \equiv 0,001 \text{ Pa.s} \Rightarrow \Rightarrow v \text{ (cm/s)} = 9000 D^2 \text{ (cm}^2\text{)}.$

En el laboratorio se opera en una suspensión de débil concentración (15 a 20 g/litro de suelo en agua). En el proceso de sedimentación la velocidad de caída de las partículas será función de su diámetro, por lo cual, a una determinada profundidad (z) y al cabo de un tiempo (t) desde el inicio del proceso, las partículas que allí se encuentren serán de diámetro menor o igual al D (deducido al despejar en la fórmula anterior).

Se calculan en determinados tiempos y a determinada profundidad las dimensiones de las partículas: siguiendo el *método de la pipeta* o el del *hidrómetro*, se determina la relación entre el peso (en concentración, $C(z,t)$), de las partículas en la profundidad z al cabo del tiempo t , y el peso (en la concentración $C(z, t = 0)$) de las partículas que existían en el momento inicial en esa profundidad; con ello se deduce el *porcentaje, en peso, de partículas con diámetro menor que D respecto al total*; los datos calculados se llevarán a la gráfica de la curva granulométrica (figura 1.2).

- *Clasificación de Burmister*: es otra clasificación bastante utilizada, la cual es descriptiva. Se suele emplear aún en muchas informaciones geotécnicas. Describe un determinado suelo que pueda tener diferentes porcentajes de dos o más tipos de suelo, con una regla de denominación, primero nombra el tipo de suelo que está en mayoría, el principal, usado como sustantivo y, a continuación, expresa con determinadas palabras la existencia y cantidad del otro u otros componentes o tipos de suelo, de acuerdo con los porcentajes siguientes:

- “y” (si tiene un 50% del otro componente),
- “con algo” (si tiene de un 20 a un 35% del otro componente),
- “con poco” (si tiene de un 10 a un 20% del otro componente),
- “con trazas” (si tiene menos del 10% del otro componente).

1.5 Propiedades índice

1.5.1 Características físicas de volumen. Pesos específicos

• Peso específico aparente de un suelo *in situ*, no sumergido (por encima del nivel freático), se representa por γ , y equivale a decir: peso de la muestra de suelo que ocupa un volumen unitario. Esto implica también el agua comprendida entre sus partículas sólidas:

$$\gamma = \frac{P_T}{V_T} = \frac{\text{peso total del suelo}}{\text{volumen total}}$$

En Mecánica del Suelo se utiliza indistintamente el concepto de peso específico o de densidad, (no se distingue entre kg peso o kg masa).

• Peso específico absoluto del sólido o densidad de las partículas sólidas:

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s}$$

Valores tipo de densidad de partículas sólidas:

- γ_s de suelos arcillosos: 2,5 a 2,9 $\rightarrow$ 2,7 t/m³ o g/cm³
- γ_s de suelos arenosos: 2,5 a 2,65 $\rightarrow$ 2,6 t/m³ o g/cm³

La densidad de las partículas sólidas varía poco, pues en general éstas son componentes de óxidos de Si y Al (SiO_2 , Al_2O_3) $\equiv$ 70% de los minerales del suelo. El aluminio y el silicio son elementos que ocupan los lugares 13 y 14 en la tabla de clasificación de pesos atómicos: p.a. = 26,98 y 28,09; ello nos conduce a constatar que las partículas sólidas minerales constitutivas de los suelos tienen una densidad entre 2,4 y 2,9 t/m³.

- Peso específico seco o densidad seca:

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V_T}$$

γ_d equivale al peso de las partículas minerales secas (desprovistas de agua intersticial -secar en estufa a 110°-), en relación al volumen total de la muestra de suelo:

- En arenas oscila entre 1,4 y 1,8 t/m³.
- En arcillas oscila entre 0,8 y 2 t/m³.

La densidad del agua es 1 g/cm³, o 1 t/m³, o 10³ kg/m³, a 4°C. (En U.S.I. = 9,8 kN/m³).

1.5.2 Humedad natural, w

El contenido en agua de un suelo, o humedad natural, w, es la relación de pesos (en porcentaje) de agua respecto al suelo seco (puede variar entre 0 y tendiendo a infinito).

$$w = \frac{P_w}{P_s}$$

Puede tener valores de 600% o más en casos de suelos tipo piedra pómez, o suelos orgánicos procedentes de lagunas, etc.

Valores tipo de w:

- arena $\rightarrow$ de 20 a 30%
- arcilla $\rightarrow$ de 20 a 60%
- turba o suelo orgánico $\rightarrow$ de 200 a 2000%

Esquema de las fases del suelo (figura 1.6):

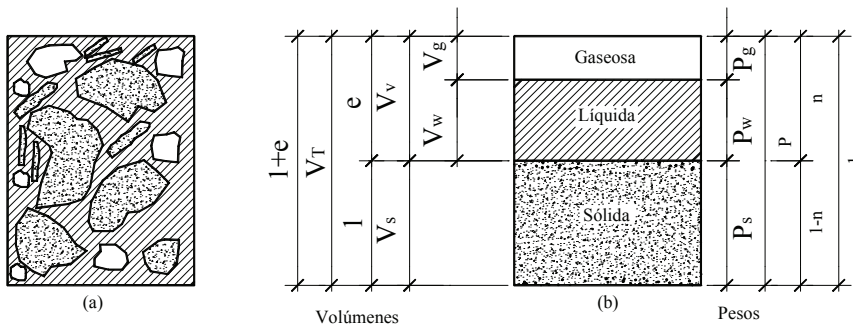


Fig. 1.6 Relación entre las fases de un suelo. a) elemento de suelo natural; b) división del anterior elemento en fases.

1.5.3 Índice de poros, e

Índice de huecos, índice de poros, o relación de vacíos, es la relación volumétrica de huecos respecto a la parte sólida; se da en tanto por uno. Varía de 0 a casi ∞ :

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Tabla 1.3 Valores de $e_{\max}$ y $e_{\min}$ de los principales tipos de suelo

tipos de suelo	$e_{\max}$	$e_{\min}$
arena	0,9	0,2
limo	1,1	0,4
arcilla blanda	2,3	0,6
turba	2,5	2,0

1.5.4 Porosidad, n

Otra manera de valorar los poros o volumen de vacíos del suelo (de una muestra representativa del mismo) es relacionándolo con el volumen total del suelo considerado. Es la fracción del volumen total ocupada por poros (que pueden estar llenos de aire, o de agua, o de mezcla de ambas):

$$n = \frac{V_v}{V_T}$$

Varía de 0 a 1. Se da en % o en decimal. Para arena de un mismo tamaño varía entre 0.48 y 0.26 (sólo por vibrado).

Valores tipo de la porosidad:

- En suelos no cohesivos (arenas), de 0,26 a 0,48.
- En suelos cohesivos (arcillas), de 0,30 a 0,70 (pueden excepcionalmente llegar a 0,90).

Relación entre la porosidad y el índice de poros (figura 1.6):

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad ; \quad e = \frac{n}{1 - n}$$

1.5.5 Densidad húmeda, $\gamma_h \equiv \gamma_n$

Es la densidad natural, con la humedad natural que tiene en ese momento, o aparente $\equiv \gamma_n$. Suele valer alrededor de 2 t/m³:

$$\gamma_h = \frac{P_s + P_w}{V_T} = \frac{P_s}{V_T} + \frac{P_w}{V_T} \times \frac{P_s}{P_s} = \gamma_d + \gamma_d \times w = \gamma_d (1 + w)$$

1.5.6 Densidad saturada, γ_{sat}

También es el peso específico aparente o natural del suelo saturado. El peso del agua que contiene, P_w , es máximo; es decir, se suponen todos sus poros ocupados con agua. Es el valor máximo que puede alcanzar la densidad húmeda:

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{P_s + P_w}{V_T} = \frac{\gamma_s (1 - n) + n \gamma_w}{1} = \gamma_d + n \gamma_w$$

1.5.7 Densidad sumergida, γ'

Es el peso específico aparente del suelo cuando está bajo el nivel freático y, por tanto, experimenta el empuje de Arquímedes. Su valor es el de la densidad saturada menos la densidad del agua:

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = (\gamma_d + n\gamma_w) - \gamma_w = \gamma_d - \gamma_w(1 - n)$$

1.5.8 Humedad de saturación, w_{sat}

Es la humedad máxima que puede tener el suelo. Se determina por la relación entre pesos de la cantidad máxima de agua que puede tener el suelo (saturado), y el peso de las partículas sólidas:

$$w_{sat} = \frac{P_w}{P_s} = \frac{\gamma_w n}{\gamma_s (1 - n)} = \frac{n}{\gamma_s (1 - n)} = \frac{n}{\gamma_d} = \frac{e}{\gamma_s}$$

Relación importante entre γ_d y γ_s en la que se constata que siempre γ_d es menor que γ_s :

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V_t}, \quad \gamma_s = \frac{P_s}{V_s}$$

Si se opera con las anteriores relaciones: $\gamma_s V_s = \gamma_d V_t$, y si se considera $V_t = 1$, y $V_s = 1 - n$, entonces:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s V_s}{V_t} = \gamma_s V_s = \gamma_s (1 - n)$$

1.5.9 Grado de saturación, S_r

Relación entre el volumen de agua que tenga el suelo y el volumen de huecos del mismo. También se puede expresar como la relación entre la humedad natural de la muestra representativa del suelo y la humedad de saturación que tendrá esa muestra si se satura:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{w}{w_{sat}} = \frac{w\gamma_s}{e} = \frac{w\gamma_d}{n}$$

Estos datos sirven para clasificar las arenas según su grado de saturación:

si S_r es 0:	arena seca
de 1 a 25%	ligeramente húmeda
de 25 a 50%	húmeda
de 50 a 75%	muy húmeda
de 75 a 99%	mojada
y si es cercano al 100%	saturada

1.5.10 Densidad relativa de las arenas, D_r

También se le llama *grado de compacidad del suelo granular*, I_D o D_r : se determina relacionando la diferencia entre el índice de huecos máximo de ese suelo y el índice de huecos que realmente tiene en las condiciones de estudio, con respecto a la diferencia máxima de índices de huecos o vacíos que pueda tener ese suelo:

$$D_r = \frac{e_{máx} - e}{e_{máx} - e_{min}}$$

Las arenas también se clasifican según su densidad relativa, que varía de 0 a 1:

Clasificación según la densidad relativa:

- si D_r es menor de $1/3 \rightarrow$ - arena floja,
- si D_r va de $1/3$ a $2/3 \rightarrow$ - arena media,
- si D_r es mayor de $2/3 \rightarrow$ - arena compacta.

1.6 Compactación

Proceso mecánico por el cual se reajustan más íntimamente las partículas del suelo; se consigue, entre otros efectos, más densidad, menos permeabilidad, se reducen las posibilidades de deformación del terreno y, entre otras cosas, mejora su capacidad portante.

1.6.1 Densidad seca máxima, $\gamma_{d(max)}$

De un suelo se puede obtener su densidad seca máxima cuando se compacta en unas condiciones determinadas de humedad y energía de compactación.

1.6.2 Humedad óptima, w_{opt}

w_{opt} es la humedad para la cual una compactación determinada produce una densidad seca máxima.

Tipos de suelo

Nº	Descripción	% Arena	% Limo	% Arcilla	LL	IP
1	Arena bien graduada	88	10	2	16	-
2	Marga arenosa bien graduada	72	15	13	16	-
3	Marga arenosa de graduación media	73	9	18	22	4
4	Arcilla limo arenosa	5	33	35	28	9
5	Arcilla limosa	5	64	31	36	15
6	Limo de loess	5	85	10	26	2
7	Arcilla homogénea	6	22	72	67	40
8	Arena mal graduada	94	8	-	-	-

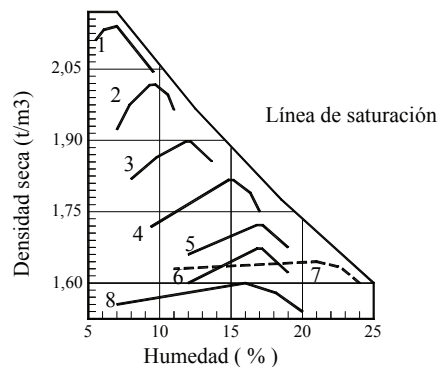


Fig. 1.7

1.6.3 Ensayo Proctor

El ensayo normalizado de esta experiencia de compactación (la γ_d varía con la energía de compactación y con la humedad) se denomina *Proctor*, en honor al ingeniero americano que lo desarrolló.

El ensayo Proctor (NLT-107/72) consiste básicamente en conseguir unas relaciones entre humedades y densidades, que se plasman en puntos del gráfico cartesiano -en ordenadas la densidad seca, y en abscisas la humedad- (figura 1.7).

El proceso, normalizado, se puede resumir como sigue: la muestra de suelo, con poca o casi nula humedad, se subdivide en tres partes, cada una de las cuales se somete al apisonado (pisón de 2,5 kg y 5 cm de diámetro, y altura de caída de 30,5 cm), con 26 golpes distribuidos por la superficie. Al repetir el proceso de apisonado para las otras dos partes, se obtiene el conjunto de las tres partes del suelo compactado en el molde estandarizado (molde de cilindro metálico de 1 litro de capacidad). Se determina su densidad y humedad, con lo que se obtiene un punto de la gráfica. Aumentando algo la humedad del suelo, un 2 ó 3%, se repite el proceso tantas veces como puntos se quieran obtener (generalmente de 5 a 7 puntos), que determinan, al unirlos, una curva característica, en la que fácilmente se observa el valor de la densidad seca máxima, a la que le corresponderá un valor de humedad llamada óptima (ver gráficos de las figuras 1.7 y 1.8).

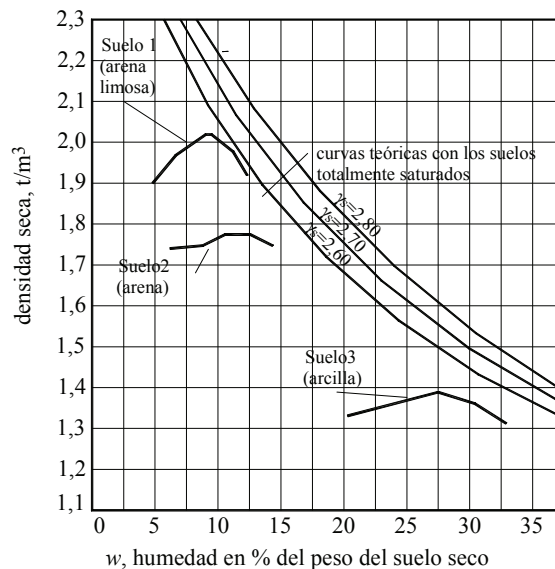


Fig. 1.8

Cuando el suelo tiene partículas de tamaño superior a $3/4''$ ($\approx 1,9 \text{ cm}$) se suele emplear el ensayo Proctor Modificado, en el cual el molde es mayor (2,32 l), y el número de golpes para cada una de las capas es de 60, y también, son mayores las dimensiones del pisón; en una proporción adecuada para que la energía de compactación por unidad de volumen sea aproximadamente igual en ambos ensayos ($5,7 \text{ kp.cm/cm}^3$).

Entre las conclusiones del estudio del ensayo Proctor, destaca la relación entre la resistencia y la deformabilidad, observable al verificar que para una misma energía de compactación la resistencia a la deformación aumenta al aumentar la densidad y disminuye al aumentar el valor de la humedad óptima.

En el control de compactación de rellenos bajo edificios, se recomienda que la humedad de compactación esté comprendida en un entorno de $\pm 2\%$ de la w_{op} , para suelos del tipo ML, en $\pm 3\%$ de w_{op} , para los CL y MH, y en $\pm 5\%$ de w_{op} para suelos CH (con potencial de moderado a bajo de expansividad). Para esos suelos cohesivos una densidad seca correspondiente al 95% del Proctor suele ser suficiente.

2 El agua en el suelo

2.1 Introducción

Después de haber analizado las propiedades más importantes y necesarias para una identificación y clasificación de los suelos, se sigue con el estudio de las propiedades mecánicas relacionadas con una de sus fases, la fase líquida, que generalmente se refiere al agua en sus diferentes formas o estados. Se ciñe al área de aplicación y control que corresponde a un arquitecto.

2.2 Estados del agua en el suelo

Se distinguen fundamentalmente dos estados:

-1) de unión íntima o combinación química: *agua de constitución* (por ejemplo, en el yeso: $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), la cual forma parte de la estructura química de las partículas sólidas del suelo, ejemplo de ello es el *agua de cristalización*, que no se puede drenar, y que sólo es eliminable por procedimientos que alterarían su composición. Esto no interesa en el presente nivel de Mecánica del Suelo.

- 2) de unión física. En este estado se distinguen:

-2.a) agua retenida por fuerzas no capilares, retenida principalmente por atracción eléctrica, dado el carácter dipolar de sus moléculas, las cuales tienen una atracción físico-química. Esta es el agua de adherencia en las arcillas, a la cual deben su plasticidad. También se llama *agua pelicular*, pues rodea las partículas del suelo como una fina piel, y queda sujeta a él por fuerzas de adhesión, de atracción físico-química. Ejemplo de ello es el caso de arenas con cierta humedad de contacto, que presentan un fenómeno parecido a la cohesión (“cohesión aparente”, que se explica en el apartado 2.5). Estas aguas de retención no pueden desplazarse por gravedad. No se captan mediante los sistemas de drenaje.

-2.b) agua retenida por fuerzas capilares. Se encuentra en los canalillos que dejan entre sí las partículas del terreno, llamados conductos capilares. Se mantiene en ellos por las fuerzas de la capilaridad. El agua en los capilares continuos proviene del agua de gravedad, (agua de la zona saturada, en el interior del terreno), estando sostenida por ella y siendo la aportación permanente mientras haya agua en el acuífero. El agua en ese estado se llama *capilar* continua o sostenida. Ese tipo de agua acompaña a la fuente de alimentación, (agua de gravedad), en sus fluctuaciones.

Cuando un terreno recibe una aportación exterior de agua (lluvia o nieve), se produce una saturación de los huecos en las capas superiores, y el agua desciende por gravedad. Al cesar la aportación, transcurrido un cierto tiempo, desaparece el estado de saturación pero parte del agua queda retenida en el terreno por