



**mr**  
manual de referencia

INGENIERÍA CIVIL, TOPOGRAFÍA Y CONSTRUCCIÓN

# PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN PARA LA COMPACTACIÓN Y MEJORA DEL TERRENO

Víctor Yepes Piqueras



**Editorial**  
Universitat Politècnica  
de València

# Procedimientos de construcción para la compactación y mejora del terreno

Víctor Yepes Piqueras



**Editorial**

Universitat Politècnica  
de València

Colección *Manual de referencia*

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita:

Yepes, V. (2021). *Procedimientos de construcción para la compactación y mejora del terreno*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.

Los contenidos de esta publicación han sido evaluados mediante el sistema *doblo ciego*, siguiendo el procedimiento que se recoge en [http://bit.ly/Evaluacion\\_Obras](http://bit.ly/Evaluacion_Obras)

© Víctor Yepes Piqueras

© 2021, Editorial Universitat Politècnica de València

Venta: [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es) / Ref.: 0428-03-01-01

Maquetación: Enrique Mateo, Triskelion Diseño Editorial

Imprime: Byprint

ISBN: 978-84-9048-603-0

Impreso bajo demanda

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con los autores, puede enviar un correo a [edicion@editorial.upv.es](mailto:edicion@editorial.upv.es)

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo [edicion@editorial.upv.es](mailto:edicion@editorial.upv.es)

# Agradecimientos

Un manual de construcción resulta incompleto e incluso incomprensible sin una buena documentación gráfica capaz de apoyar el texto explicativo. Este libro no hubiera sido posible sin la colaboración de muchos años de los profesores que forman parte de la unidad docente de la asignatura de “Procedimientos de Construcción” de la Universitat Politècnica de València. Asimismo, me gustaría agradecer de forma expresa a Ignacio Serrano ([desdeelmurete.com](http://desdeelmurete.com)) y a Juan Carlos Montejano (Menard) la cesión del uso de sus fotografías para este libro. También agradezco el permiso que he recibido para el uso de algunas imágenes de empresas dedicadas a la maquinaria y a la construcción. Una parte de las imágenes se han referenciado también por su enlace en internet para su acceso por parte de aquellas personas interesadas. El resto de las imágenes, aquellas sin referenciar, se corresponden con figuras elaboradas por el autor o bien proceden del fondo documental de la unidad docente, material que se ha utilizado durante años para la explicación, a lo largo de muchos años, de las asignaturas correspondientes al Grado de Ingeniería Civil, Grado de Ingeniería de Obras Públicas y a la titulación de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Por último, y no menos importante, me gustaría agradecer a los revisores anónimos que han evaluado este texto por las sugerencias recibidas, muchas de las cuales han permitido mejorar la calidad de la obra. También agradezco al equipo de la Editorial de la Universitat Politècnica de València, y en especial a María Remedios Pérez García, su esmero y trabajo para hacer de este libro un Manual de Referencia.



# Prólogo

La docencia de una asignatura como “Procedimientos de Construcción” resulta complicada debido a que se debe enseñar al futuro ingeniero civil cómo hacer las obras. Eso incluye no solo las fases constructivas, sino también aspectos de gran relevancia como es el conocimiento de la maquinaria y los medios auxiliares, la seguridad y salud, el impacto ambiental de las obras y, sobre todo, el conocimiento básico necesario en geotecnia, resistencia de materiales, mecánica, cálculo de estructuras, gestión de empresas, planificación de obras y economía. Todo ello para acertar en la selección del mejor proceso constructivo para una obra determinada. Y todo este conocimiento debe abordarse con una experiencia nula o muy pequeña del alumnado en relación con la realidad física de las obras.

La pregunta es inmediata: ¿cómo podemos llevar la obra al estudiante en un aula? Resulta evidente la necesidad de que los futuros profesionales pisen las obras lo máximo posible y realicen prácticas en empresa. Pero esta experiencia no es suficiente para adquirir las competencias y conocimientos necesarios.

El problema crece cuando este tipo de asignaturas de construcción se imparten en los primeros cursos de los grados. En los planes antiguos, “Procedimientos Generales de Construcción y Organización de Obras” se impartía en los últimos cursos, incluso en paralelo con la asignatura de Proyectos. Ello permitía al estudiante aplicar todos los conocimientos adquiridos con anterioridad y hacía que la asignatura se pudiese entender con mayor profundidad.

Pero el problema sigue siendo el mismo. Me acuerdo que esta asignatura la estudié en cuarto curso de la titulación de ingeniero de caminos, canales y puertos, cuando el plan se desarrollaba en seis cursos. En aquella época, hablo del año 1986, D. Hermelando Corbí Abad, profesor de la asignatura, utilizaba todos los medios disponibles en su momento como el proyector de opacos, fotografías que nos pasábamos de mano en mano o catálogos de máquinas o de empresas para que nos imagináramos cómo se podría hacer una obra. Y, sobre todo, pizarra, mucha pizarra. Tomábamos apuntes en clase y teníamos fotocopias mecanografiadas por el profesor que nos servían a modo de texto. Todo se complementaba con abundantes visitas a obras y excursiones organizadas que nos abrían los ojos, el compañerismo y la ilusión por esta apasionante profesión.

Cuando en el año 1994 empecé a impartir por primera vez la asignatura, tuve que recurrir a todo tipo de estrategias disponibles en aquel momento. Era entonces profesor asociado, más joven, pero con años ya de experiencia en el sector público y privado. Usábamos vídeos en VHS, transparencias que nos permitían ahorrar mucha

pizarra, fotografías y catálogos. Se completaba con las visitas a obra. Pero el problema de acercar la realidad al estudiante seguía siendo complicado. Además, las técnicas constructivas, y sobre todo las máquinas y los elementos auxiliares, cambiaban de forma acelerada. Todo demasiado rápido para los medios de los que disponíamos.

Sin embargo, la aparición de los ordenadores, el *PowerPoint* y, sobre todo, internet, revolucionó todo con el cambio de milenio. Nada volvió a ser como antes. La información y las novedades se acumularon en mi ordenador. Cientos de fotografías, vídeos y documentación se perdía entre las carpetas de mi disco duro. Había que poner orden.

El descubrimiento de las ventajas que tenía disponer de una bitácora digital fue algo que revolucionó mi forma de impartir las clases de esta asignatura. En efecto, el 5 de marzo de 2012 empecé el que iba a ser un blog personal para organizar la información que tenía dispersa en mi ordenador. Fue una auténtica revolución. Podía ordenar por entradas información dispersa sobre temas de construcción, incluyendo fotografías, vídeos y enlaces a otros documentos. Nada volvería a ser lo mismo. Los estudiantes disponían de una herramienta con la que tener toda la información, no solo de clase, sino que esta la podían ampliar hasta donde quisieran buceando en internet. Así nació el “Blog de Víctor Yepes” <https://victoryepes.blogs.upv.es/>, que hoy tiene casi 1 500 artículos y más de 5 000 visitas diarias. Además, con la potencia de las redes sociales, toda la información se multiplicaba de forma exponencial.

El paso siguiente era el lógico y normal. Se trataba de depurar y mejorar la información para hacer un libro. Así surgieron una serie de textos docentes que, bajo el nombre de Manual de Referencia, edita la Universitat Politècnica de València. Además, este libro en particular, sirve de base para un curso en línea, gratuito y masivo que, bajo el mismo nombre, se imparte desde este mismo año en la plataforma edX, donde colabora nuestra universidad. En el enlace <https://www.edx.org/course/introduccion-procedimientos-construccion-obra-civil> se puede acceder al curso en cualquier momento, con la posibilidad de obtener un certificado oficial de dicho curso.

En cuanto a la estructura de este libro, realmente tiene dos grandes partes, una dedicada a la compactación mecánica de los suelos y, la segunda, que se centra en las técnicas de mejora del terreno. Si bien es cierto que la compactación mecánica no deja de ser una técnica de mejora del terreno, por su importancia y generalidad en las obras, se ha tratado como una parte diferenciada. También podréis encontrar un buen número de referencias y una cantidad nada desdeñable de preguntas tipo test con sus respuestas para averiguar si habéis comprendido bien lo explicado en el texto. Al final podréis localizar un índice temático que, de buen seguro, servirá para encontrar información de forma rápida.

La necesidad de un libro como este surge para rellenar un hueco editorial importante. Si bien se pueden encontrar cientos de libros de gran calidad en materias tales como la geotecnia y la mecánica de suelos, la resistencia de materiales y cálculo

de estructuras, la hidráulica, etc., son pocos los que se dedican a desgranar los procedimientos constructivos, la maquinaria y los medios auxiliares necesarios para ello.

El reto fue bastante importante. Se trató de estructurar información muy dispersa, técnicas clásicas con otras de rabiosa actualidad, maquinaria que, año tras año, deja a los modelos anteriores obsoletos. Y, afortunadamente, es posible que, en unos años, parte de las técnicas contenidas en este volumen queden como recuerdos del pasado, dando paso a la robotización, la inteligencia artificial, los gemelos digitales y otras muchas técnicas emergentes que van a desdibujar la forma que tenemos de entender las obras.

Por último, y aunque se ha realizado un esfuerzo minucioso por revisar el manuscrito, es posible que pueda existir alguna errata típica de una obra que se edita por vez primera. Asumo la responsabilidad de cualquier error y, en la medida de lo posible, trataré de subsanar y mejorar los aspectos o sugerencias que me hagáis llegar.

Este libro, a partir de ahora, deja de ser mío y pasa a ser vuestro. Espero que sirva para todos los estudiantes y profesionales que quieran introducirse al maravilloso mundo de las obras, y en particular, a aquellos que tienen que luchar, día a día con el terreno donde se van a asentar.

Valencia, a 21 de julio de 2021



# Índice

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>iii</b>
<b>Prólogo .....</b>	<b>v</b>
<b>Capítulo 1. La naturaleza de los suelos y su compactación.....</b>	<b>1</b>
1.1. Composición y clasificación de suelos .....	3
1.2. Materiales de un terraplén.....	8
1.3. Efectos de la compactación .....	11
1.4. Deformaciones .....	12
1.5. Porosidad y permeabilidad.....	12
<b>Capítulo 2. Determinación de la compactación de un suelo.....</b>	<b>17</b>
2.1. Curvas de compactación.....	19
2.2. Densidad de los suelos granulares .....	22
2.3. Ensayo Proctor.....	23
2.4. Sistemas de compactación .....	26
2.4.1 Compactación normal.....	26
2.4.2 Compactación seca .....	27
2.5. Ensayos de resistencia .....	28
2.5.1 Ensayo CBR .....	29
2.5.2 Placa de carga con placa .....	32
<b>Capítulo 3. Fundamentos de las técnicas de compactación mecánica .....</b>	<b>35</b>
3.1. Diagramas de carga-deflexión .....	37
3.2. Tiempo y velocidad de aplicación de la sobrecarga.....	39
3.3. Ciclos de carga-descarga.....	40
3.4. Distribución de presiones bajo una superficie.....	42
<b>Capítulo 4. Equipos de compactación mecánica .....</b>	<b>45</b>
4.1. Compactadores estáticos.....	48
4.1.1 Apisonadoras estáticas de rodillos lisos .....	48
4.1.2 Compactadores estáticos de rodillos de patas apisonadoras .....	52
4.1.3 Compactadores estáticos de ruedas neumáticas .....	55

4.1.4	Rodillos de malla o de reja .....	60
4.1.5	Compactador por impactos con rodillo de perfil lobular.....	61
4.2.	Compactadores vibratorios .....	62
4.2.1	Compactadores vibratorios cilíndricos.....	64
4.2.2	Compactadores de pequeño tamaño y de tracción manual .....	72
4.3.	Compactadores de zanja .....	76
<b>Capítulo 5. Práctica constructiva de la compactación .....</b>		<b>79</b>
5.1.	Selección del equipo y método de compactación .....	81
5.1.1	Elección del compactador en suelos finos.....	81
5.1.2	Elección del compactador en suelos de grano grueso con finos.....	82
5.1.3	Elección del compactador en suelos de grano grueso sin finos.....	82
5.1.4	Elección del compactador en pedraplenes.....	82
5.2.	Espesor de tongada y número de pasadas óptimo.....	85
5.3.	Normas y recomendaciones de trabajo.....	87
5.4.	El control de la compactación .....	89
5.4.1	Control de recepción o de producto terminado.....	90
5.4.2	Control del proceso.....	96
5.4.3	Los nucleodensímetros como aparatos de medida .....	97
5.4.4	Penalizaciones.....	98
5.5.	Condiciones de seguridad en la maquinaria de compactación.....	98
5.6.	Costes y productividad.....	101
5.6.1	Estructura del coste .....	101
5.6.2	Costes horarios fijos y variables .....	102
5.6.3	Coste intrínseco y complementario de una máquina.....	103
5.6.4	Producción de un compactador .....	106
<b>Capítulo 6. Técnicas de mejora del terreno .....</b>		<b>109</b>
6.1.	Introducción a las técnicas de mejora del terreno.....	111
6.2.	Clasificaciones de las técnicas de mejora y refuerzo del terreno .....	112
6.3.	Sustitución del terreno como técnica de mejora .....	120
<b>Capítulo 7. Mejora por consolidación del terreno.....</b>		<b>123</b>
7.1.	La precarga como técnica de mejora de terrenos.....	125
7.2.	Los drenes verticales como técnica de mejora de terrenos.....	128
7.3.	Consolidación por vacío de suelos.....	132
<b>Capítulo 8. Columnas de grava.....</b>		<b>137</b>
8.1.	Columnas de grava ejecutadas por medios convencionales .....	142
8.2.	Columna de grava mediante vibrodesplazamiento .....	144
8.3.	Columna de grava mediante vibrosustitución .....	147

8.4. Columnas de grava compactada.....	149
8.5. Pilotes de arena compactada.....	151
8.6. Columnas encapsuladas con geotextil.....	154
<b>Capítulo 9. Refuerzo por inclusiones rígidas .....</b>	<b>157</b>
9.1. Pilotes de compactación .....	161
9.2. Pilotes de hormigón <i>in situ</i> huecos de gran diámetro .....	162
9.3. Pilotes de hormigón <i>in situ</i> en forma de X o Y .....	165
9.4. Columnas de hormigón vibrado .....	166
9.5. Columnas de módulo controlado.....	167
9.6. Columnas de cal.....	169
9.7. Columnas de grava inyectada.....	172
<b>Capítulo 10. Compactación profunda de suelos .....</b>	<b>175</b>
10.1. Mejora del terreno mediante vibrocompactación .....	177
10.2. Mejora del terreno mediante Terra-Probe .....	180
10.3. Método vibroalás para mejora de suelos no cohesivos .....	182
10.4. Compactación por resonancia de suelos .....	184
10.5. Compactación dinámica.....	186
10.6. Compactación dinámica rápida .....	189
10.7. Sustitución dinámica .....	191
10.8. Compactación con explosivos.....	193
10.9. Compactación por impulso eléctrico .....	196
10.10. Compactación por hidrovolidura .....	198
<b>Capítulo 11. Inyección del terreno.....</b>	<b>201</b>
11.1. Inyección de suspensiones inestables .....	211
11.2. Inyección de suspensiones estables.....	217
11.3. Inyección de lechadas químicas .....	221
11.4. Inyección de alta presión: <i>jet-grouting</i> .....	<b>226</b>
11.5. Inyecciones de compactación .....	231
11.6. Inyecciones de hidrofracturación.....	233
<b>Capítulo 12. Mezcla profunda de suelos .....</b>	<b>237</b>
12.1. Springsol: columnas de suelo-cemento .....	240
12.2. Pantallas por mezcla profunda de suelos .....	243
12.3. Pantallas de suelo-cemento con hidrofresa .....	245
12.4. Pantallas de lodo autoendurecible armado.....	248
12.5. Pantallas delgadas de lodo .....	250
12.6. Pantallas de geomembranas.....	252

<b>Capítulo 13. Refuerzo del terreno</b> .....	<b>257</b>
13.1. Tierra reforzada con acero: Tierra Armada® .....	259
13.2. Suelo reforzado .....	260
13.3. Anclajes .....	262
13.3.1 Clasificaciones de los anclajes .....	263
13.3.2 Zonas de un anclaje .....	265
13.3.3 Ejecución de un anclaje .....	266
13.4. Claveteado o cosido del terreno: <i>soil nailing</i> .....	<b>271</b>
<b>Capítulo 14. Estabilización de terrenos</b> .....	<b>273</b>
14.1. Estabilización de suelos con ligantes .....	275
14.1.1 Estabilización de suelos con cal .....	276
14.1.2 Estabilización de suelos con cemento .....	279
14.1.3 Estabilización de suelos con ligantes hidrocarbonados .....	281
14.2. Capas y bases de grava tratadas .....	282
14.2.1 Capas y bases tratadas: gravacemento .....	282
14.2.2 Capas y bases tratadas: gravaemulsión .....	285
14.2.3 Capas y bases tratadas: gravaescoria .....	287
14.2.4 Capas y bases tratadas: gravacenza .....	289
14.3. Estabilización térmica de terrenos .....	290
14.3.1 Mejora de terrenos por calentamiento .....	290
14.3.2 Congelación del terreno .....	291
14.4. Estabilización biológica de terrenos .....	296
<b>Capítulo 15. El control del agua en las excavaciones</b> .....	<b>299</b>
15.1. Clasificación de las técnicas de control del agua en excavaciones .....	301
15.2. Selección del sistema de control del nivel freático .....	304
15.3. Bombeos superficiales y sumideros .....	308
15.4. Zanjas perimetrales .....	310
15.5. Pozos filtrantes profundos .....	314
15.6. Lanzas de drenaje ( <i>wellpoints</i> ) .....	318
15.7. Pozos eyectores .....	321
15.8. Electroósmosis .....	323
<b>Referencias</b> .....	<b>327</b>
<b>Anexo. Cuestiones de autoevaluación</b> .....	<b>335</b>
Respuestas seleccionadas .....	397
<b>Índice temático</b> .....	<b>404</b>

# La naturaleza de los suelos y su compactación

## Índice

- |     |                                       |
|-----|---------------------------------------|
| 1.1 | Composición y clasificación de suelos |
| 1.2 | Materiales de un terraplén            |
| 1.3 | Efectos de la compactación            |
| 1.4 | Deformaciones                         |
| 1.5 | Porosidad y permeabilidad             |



La mejora del terreno, en su sentido más amplio, se refiere a la alteración de cualquier propiedad para mejorar su comportamiento. La forma más usual de mejorar el terreno es incrementar su compacidad. Entre los principales métodos se encuentra la compactación (aumento de la densidad por medios mecánicos), la precarga (por colocación de una carga temporal) y el drenaje (rebaja o eliminación de la presión del agua intersticial). Estos métodos y otros pueden emplearse solos o combinados entre sí.

La compactación, por tanto, es el proceso que aumenta la densidad de un material aplicando fuerzas externas, que pueden ser estáticas o dinámicas. Los efectos conseguidos son la disminución de los huecos, el incremento del rozamiento interno de las partículas y la impermeabilización. Ello confiere al material cualidades de resistencia al hundimiento o rotura por esfuerzo cortante, y a deformaciones por cambios de volumen. Además, se reduce la permeabilidad, estabilizando los taludes y conservando las condiciones de los materiales puestos en obra.

Este procedimiento constructivo se utiliza en carreteras, calles y autopistas, pistas de aterrizaje, presas de tierra, terraplenes para líneas férreas, cimentaciones en edificación, etc. La compactación representa entre el 3 y 5% de los costos globales de la construcción siendo muy significativa su importancia en la calidad y la duración del proyecto.

Los factores básicos que determinan los resultados de la compactación son:

- El tipo de suelo.
- Las condiciones de empleo en obra (espesor de capa y humedad).
- El método de compactación y la energía aplicada.

## 1.1. Composición y clasificación de suelos

Se entiende por **suelo** al seudosólido constituido por un conjunto de partículas sólidas que forman una estructura en cuyo seno existen huecos ocupados por agua y aire en proporciones variables. A efectos prácticos, podemos considerar como “suelo” aquel material que puede ser excavado sin el uso de explosivos, para diferenciarlo de la “roca”. Se observa en la Figura 1 los componentes de un suelo, con las notaciones que sobre sus pesos y volúmenes permiten definir parámetros que caracterizan su estado físico.

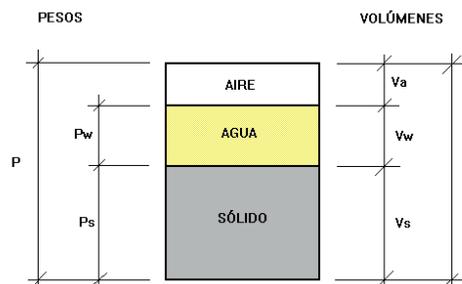


Figura 1. Componentes de un suelo.

Peso específico de las partículas sólidas	$\gamma_s = P_s / V_s$
Peso específico del agua	$\gamma_w = P_w / V_w$
Peso específico aparente del suelo	$\gamma = P / V$
Peso específico seco del suelo	$\gamma_d = P_s / V$
Humedad o contenido de agua	$\omega = P_w / P_s$
Densidad relativa de las partículas sólidas	$G = \gamma_s / \gamma_w$
Porosidad	$n = (V_a + V_w) / V$
Índice de huecos	$e = (V_a + V_w) / V_s$
Huecos de aire	$n_a = V_a / V$
Grado de saturación	$S_r = V_w / (V_a + V_w)$

Los suelos se pueden clasificar atendiendo a su historia geológica, composición y propiedades físicas. Las partículas que los forman pueden ser de composición química muy variada y de tamaños y formas diferentes.

Los suelos que encontramos en la superficie terrestre proceden de las formaciones rocosas. Estos pueden haber sido transportados –por acción del agua, viento o glaciares– o no, nombrándose estos últimos suelos residuales.

Se denomina **granulometría** de un suelo a la distribución, en tamaños, de sus partículas. Las ordenadas de su gráfica se refieren al porcentaje, en peso, que pasan por el tamaño correspondiente. Los límites que separan los diferentes tamaños, son convencionales, pero se admiten las denominaciones recogidas en la Tabla 1, según la norma EN ISO 14688 (anteriormente, DIN 4022).

**Tabla 1.** Denominación de los componentes de un suelo por su tamaño.

Denominación	Tamaño en mm	
Piedra	> 60	
Grava	Gruesa	20 - 60
	Media	6 - 20
	Fina	2 - 6
Arena	Gruesa	0,6 - 2
	Media	0,2 - 0,6
	Fina	0,06 - 0,2
Limo	Grueso	0,02 - 0,06
	Medio	0,006 - 0,02
	Fino	0,002 - 0,006
Arcilla	< 0,002	

Esta caracterización de las partículas por tamaños, permite diferenciar dos estructuras de suelos, unos típicamente **granulares** (gravas y arenas sueltas), y otros **finos** (arcillas y limos). Las gravas no pueden retener agua capilar por el tamaño de los huecos entre partículas, a diferencia de las arenas que mantienen unidas sus partículas si existe cierta humedad debido a las tensiones capilares del agua intergranular (falsa cohesión). Los limos no son observables a simple vista, tienen

más cohesión que las arenas en estado seco y una pequeña plasticidad en estado húmedo. Las arcillas suelen tener ya propiedades coloidales, uniéndose sus partículas por fuerzas de cohesión debidas a los potentes campos iónicos desarrollados en la superficie de cada grano. En la Figura 2 se observa la denominación habitual de un suelo en función de su curva granulométrica típica.

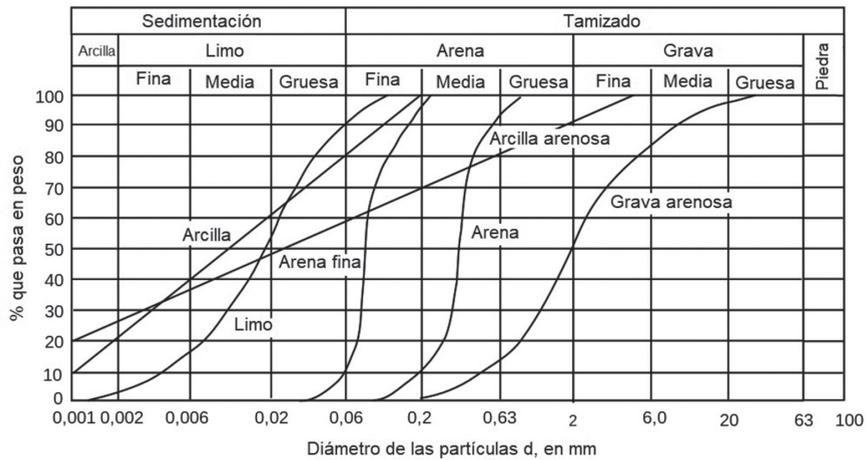


Figura 2. Curvas granulométricas.

Se ha recogido en la Tabla 2 la relación existente entre los tamices UNE y ASTM, pues es habitual en algunos libros de texto utilizar indistintamente una u otra denominación.

Tabla 2. Relación tamices UNE y ASTM.

Tamaños nominales de abertura		Tamaños nominales de abertura	
mm	ASTM	mm	ASTM
80	3"	5,0	N° 4
63	2 1/2"	2,5	N° 8
50	2"	2,0	N° 10
40	1 1/2"	1,25	N° 16
25	1"	0,630	N° 30
20	3/4"	0,315	N° 50
12,5	1/2"	0,160	N° 100
10,0	3/8"	0,080	N° 200
6,3	1/4"		

Se definen algunos coeficientes característicos relacionados con la forma de la curva granulométrica. Así, por ejemplo, el **coeficiente de uniformidad**, introducido por Hazen:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

y el **coeficiente de curvatura**:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

siendo  $D_x$  el diámetro correspondiente al  $x\%$  en la curva granulométrica.  $D_{10}$  es el llamado diámetro efectivo y está estrechamente relacionado con la permeabilidad de un suelo. Un valor de  $C_c$  entre 1 y 3 corresponde a suelos bien graduados. Los suelos uniformes dan valores de  $C_u$  inferiores a 5, y los muy uniformes, valores inferiores a 2,5.

Se denomina **límite plástico** al grado de humedad para el que se considera que el suelo comienza a ser plástico, y **límite líquido** al que considera que el suelo empieza a fluidificarse. La diferencia entre los anteriores se denomina índice de plasticidad.

Existen distintas clasificaciones de suelos en función de la composición, granulometría y plasticidad de la porción sólida. La primera clasificación de carácter general la desarrolló Casagrande en 1942 y la adoptó el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. (1952). Se denomina Clasificación de Suelos USC (*Unified Soil Classification*). Con posterioridad, la American Society for Testing Materials la incluyó entre sus métodos normalizados (ASTM: D 2487-69). En la Tabla 3 se encuentran los criterios de clasificación según Casagrande.

**Tabla 3.** Criterios de clasificación de los suelos según Casagrande.

Símbolo	Características generales		
GW			Bien graduadas
GP	GRAVAS (> 50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (finos < 5%)	Pobremente graduadas
GM		Con finos (finos > 12%)	Componente limoso
GC			Componente arcilloso
SW			Bien graduadas
SP	ARENAS (< 50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (finos < 5%)	Pobremente graduadas
SM		Con finos (finos > 12%)	Componente limoso
SC			Componente arcilloso
ML	LIMOS	Baja plasticidad (LL < 50)	
MH		Alta plasticidad (LL > 50)	
CL	ARCILLAS	Baja plasticidad (LL < 50)	
CH		Alta plasticidad (LL > 50)	
OL	SUELOS ORGÁNICOS	Baja plasticidad (LL < 50)	
OH		Alta plasticidad (LL > 50)	
Pt	TURBA	Suelos altamente orgánicos	

La clasificación U.S.C divide los suelos en grupos, nombrados por dos letras mayúsculas, correspondientes a las iniciales de los nombres ingleses de los suelos

más representativos de ese grupo. Se dividen en suelos de grano grueso, suelos de grano fino y suelos de estructura orgánica.

Los suelos de grano grueso se subdividen en gravas y suelos con grava “símbolo G” (*gravel*), y arenas y suelos arenosos “símbolo S” (*sand*). Pueden estar bien graduados “W” (*well graded*) o mal graduados “P” (*poor graded*). Los suelos de grano fino se subdividen por medio de su límite líquido. Pueden ser arcillas “C” (*clay*) o limos “M” (*mo*, en sueco). El “símbolo L” (*low compressibility*) se usa para suelos con límite líquido de 50 o menos, y el “símbolo H” (*high compressibility*) para suelos con límites líquidos que excedan de 50. La turba y otros suelos altamente orgánicos se designan con el “símbolo Pt” (*peat*, turba) y no están subdivididos.

La clasificación AASHTO constituye el sistema internacional más empleado para clasificar los suelos en carreteras. Los suelos se dividen en siete grupos principales según su granulometría y límites de Atterberg (Figura 3).

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)						Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)				
	A-1		A-3 <sup>A</sup>	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...	...	...	B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.	N.P.	N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. <sup>B</sup>
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno						Regular a malo				

<sup>A</sup> La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A3 sobre A2.

<sup>B</sup> El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30.

**Figura 3.** Clasificación AASHTO de suelos para carreteras.

Fuente: [http://www.wikivia.org/wikivia/index.php?title=Clasificaci%C3%B3n\\_AASHTO](http://www.wikivia.org/wikivia/index.php?title=Clasificaci%C3%B3n_AASHTO).

No se describen otras clasificaciones desarrolladas para los suelos. En la bibliografía pueden verse algunas como la de la “*Federal Aviation Agency Method of Soil and Subgrade Classification*”, la europea DIN 18196, etc. Pero por su interés y adecuación, resalta la Clasificación Francesa de tierras para terraplenes, que atiende a datos climáticos y de humedad del suelo *in situ* y establece recomendaciones sobre la manipulación de cada tipo de terreno.

## 1.2. Materiales de un terraplén

Un suelo es utilizable si es posible su correcta puesta en obra y si durante la vida útil de la obra, esta permanece estable y sin deformaciones incompatibles con su uso. Estas dos condiciones están en función de las características intrínsecas del material y del estado natural en que se encuentre, especialmente de su humedad.

Los materiales a utilizar en un terraplén son aquellos fáciles de apisonar y que una vez compactados son resistentes a la deformación y poco sensibles a los cambios de humedad o a las heladas.

En España, el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales establece, en su artículo 330 “*Terraplenes*”, distintos tipos de suelos, en función de su granulometría, plasticidad, resistencia a la deformación o capacidad de soporte, posibilidad de entumecimiento, densidad máxima Proctor y contenidos de materia orgánica. Se dividen en suelos intolerables, tolerables, adecuados y seleccionados.

El Pliego distingue en los terraplenes cuatro zonas: cimiento, núcleo, espaldón y coronación. El **cimiento** lo define como “*la parte inferior de un terraplén en contacto con la superficie de apoyo, siendo su espesor mínimo de un metro*”, la **coronación** sería “*la parte superior del relleno tipo terraplén, sobre la que se apoya el firme, con un espesor mínimo de dos tongadas y siempre mayor de cincuenta centímetros*”. El **espaldón** es “*la parte exterior de relleno tipo terraplén que, ocasionalmente, formará parte de los taludes del mismo. No se considerarán parte del espaldón los revestimientos tipo vegetal, enchachados, protecciones antierosión, etc.*” El **núcleo** es la “**parte del terraplén comprendida entre el cimiento y la coronación**”. Se nombra **explanada** al nivel del asiento del firme. En la Figura 4 se ha representado la zonificación bajo la explanada de una carretera, con sus diferentes partes.

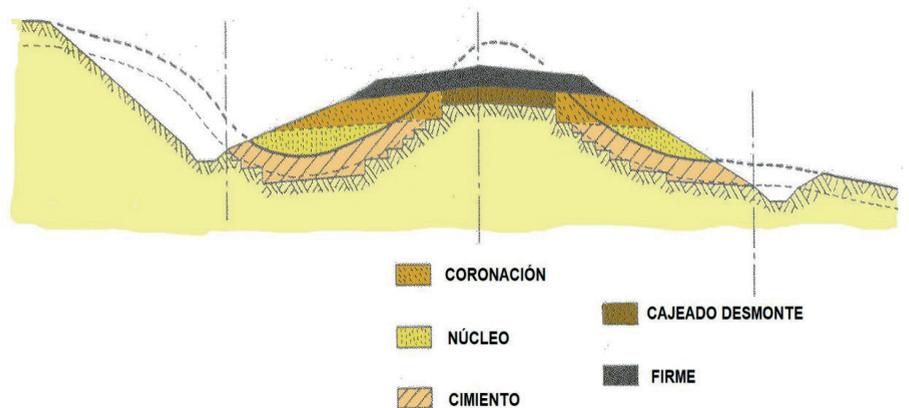


Figura 4. Zonificación bajo la explanada de una carretera.

Sin embargo, hay que matizar al respecto que, una vez eliminada la cobertura vegetal, puede existir una zona, en contacto con el firme -que es la parte superior del terraplén, y por tanto debería ser coronación-, pese a estar por debajo de la superficie original del terreno, y en segundo lugar, que si hay que hacer excavación adicional por presencia de material inadecuado, se ejecuta un “cajeado de desmonte”, que es una unidad de obra que debe cumplir especificaciones distintas a las exigidas al cimiento, por lo que deberemos diferenciarla. Por tanto, se propone definir el cimiento como “aquella parte del terraplén por debajo de la superficie original del terreno, que no corresponde a coronación ni a cajeado de desmonte”.

Los suelos inadecuados no cumplen las condiciones mínimas requeridas a los tolerables, y no pueden usarse en ninguna zona del terraplén. En núcleos y cimientos pueden emplearse los tolerables, adecuados o seleccionados. Los núcleos sujetos a inundación se formarán solo con suelos granulares (adecuados o seleccionados). En coronación deberán usarse suelos adecuados o seleccionados, aunque se pueden admitir los tolerables mejorados o estabilizados con cemento o cal. En la Figura 5 se ha representado el uso de los diferentes tipos de suelos, según lo prescrito en el PG-3, en función de la zonificación del terraplén.

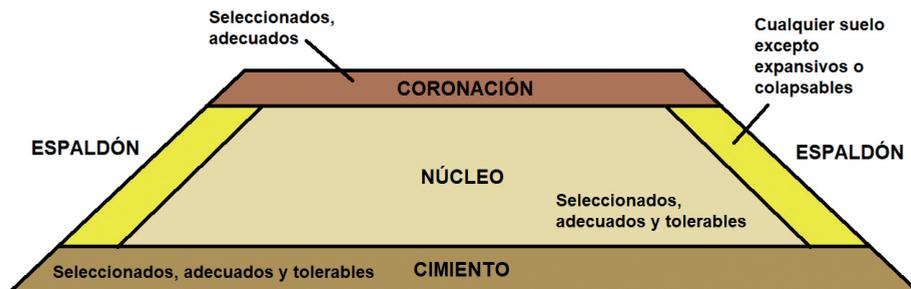


Figura 5. Uso de suelos en función de la zonificación del terraplén, según PG-3.

A efectos del artículo 330 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), los rellenos tipo terraplén estarán constituidos por materiales que cumplan alguna de las dos condiciones granulométricas siguientes:

- Cernido, o material que pasa por el tamiz de 20 mm > 70%.
- Cernido por el tamiz 0,080 mm  $\geq$  35%.

Se considerarán como **suelos seleccionados** aquellos que cumplen las siguientes condiciones:

- Contenido en materia orgánica MO < 0,2%, según UNE 103204.
- Contenido en sales solubles en agua, incluido el yeso, SS < 0,2%, según NLT 114.
- Tamaño máximo  $D_{\max} \leq 100$  mm.

- Cernido por el tamiz 0,40 UNE  $\leq 15\%$  o que en caso contrario cumpla todas y cada una de las condiciones siguientes:
  - Cernido por el tamiz 2 UNE  $< 80\%$ .
  - Cernido por el tamiz 0,40 UNE  $< 75\%$ .
  - Cernido por el tamiz 0,080  $< 25\%$ .
  - Límite líquido LL  $< 30$ , según UNE 103103.
  - Índice de plasticidad IP  $< 10$ , según UNE 103103 y UNE 103104.

Se considerarán como **suelos adecuados** los que no pudiendo ser clasificados como suelos seleccionados cumplan las condiciones siguientes:

- Contenido en materia orgánica MO  $< 1\%$ , según UNE 103204.
- Contenido en sales solubles, incluido el yeso, SS  $< 0,2\%$ , según NLT 114.
- Tamaño máximo  $D_{\max} \leq 100$  mm.
- Cernido por el tamiz 2 UNE  $< 80\%$ .
- Cernido por el tamiz 0,080 UNE  $< 35\%$ .
- Límite líquido LL  $< 40$ , según UNE 103103.
- Si el límite líquido LL  $> 30$ , el índice de plasticidad IP  $> 4$ , según UNE 103103 y UNE 103104.

Se considerarán como **suelos tolerables** los que no pudiendo ser clasificados como suelos seleccionados ni adecuados, cumplen las condiciones siguientes:

- Contenido en materia orgánica MO  $< 2\%$ , según UNE 103204.
- Contenido en yeso  $< 5\%$ , según NLT 115.
- Contenido en otras sales solubles distintas del yeso SS  $< 1\%$ , según NLT 114.
- Límite líquido LL  $< 65$ , según UNE 103103.
- Si el límite líquido LL  $> 40$  el índice de plasticidad será IP  $> 0,73$  (LL-20).
- Asiento en ensayo de colapso inferior al 1%, según NLT 254, para muestra remoldeada según el ensayo Proctor Normal UNE 103500, y presión de ensayo de 0,2 MPa.
- Hinchamiento libre según UNE 103601 inferior al 3%, para muestra remoldeada según el ensayo Proctor Normal UNE 103500.

Se considerarán como **suelos marginales** los que no pudiendo ser clasificados como suelos seleccionados, ni adecuados, ni tampoco como suelos tolerables, por el incumplimiento de alguna de las condiciones indicadas para éstos, cumplan las siguientes condiciones:

- Contenido en materia orgánica MO  $< 5\%$ , según UNE 103204.
- Hinchamiento libre según UNE 103601  $< 5\%$ , para muestra remoldeada según el ensayo Proctor Normal UNE 103500.
- Si el límite líquido LL  $> 90$ , el índice de plasticidad IP  $< 0,73$  (LL-20).

Se considerarán **suelos inadecuados**:

- Los que no se puedan incluir en las categorías anteriores.
- Las turbas y otros suelos que contengan materiales perecederos u orgánicos tales como tocones, ramas, etc.
- Los que puedan resultar insalubres para las actividades que sobre los mismos se desarrollen.

### 1.3. Efectos de la compactación

El objetivo perseguido con la construcción de un terraplén es que tanto las cargas fijas como las repetitivas produzcan, en el primer caso, deformaciones y asientos diferenciales acotados -que no dañen la posible estructura que se apoye en el mismo-, o bien, en el segundo, que las deformaciones sean recuperables al cesar las cargas. Podría pensarse en el primer caso de una estructura apoyada sobre un relleno, y en el segundo, de un terraplén que soporte el firme de una carretera. Otro propósito es obtener una resistencia a rotura por esfuerzo cortante mínima, que dependerá de la cohesión y del rozamiento interno entre las partículas. Estas condiciones se mantendrán a lo largo de la vida útil del terraplén.

Durante la **compactación** se provoca la compresión del terreno, la expulsión de parte del gas y una recolocación de las partículas sólidas, que facilitarán los objetivos antes descritos. La compactación es un proceso rápido, elaborado por capas, donde no tiene lugar una variación de la humedad del suelo. Otras formas de aumentar la resistencia a la deformación podrían ser la adición de ligantes o aditivos que consigan mayores fuerzas de cohesión entre las partículas. Después le sigue un proceso de **consolidación**, -que es distinto del anterior-, en el cual lentamente, por la acción del propio peso y de las sobrecargas, se expulsa aire y eventualmente agua de los poros, con asientos posteriores.

El incremento de compacidad en un suelo disminuirá los huecos entre las partículas, con mayor trabazón entre ellas, aumentando sus fuerzas de cohesión y el rozamiento interno entre los granos. Con ello se dificulta el movimiento entre ellos y, por consiguiente, disminuirán las deformaciones.

El agua es necesaria para desarrollar las fuerzas de cohesión entre los granos, pero un exceso puede hacerlas desaparecer. Incluso una presión en succión de los gases contenidos en el suelo mantendrá unidas las partículas.

Por consiguiente, la compactación **estabiliza** el terraplén, ya que:

- Aumenta su compacidad (su densidad seca).
- Incrementa la trabazón de su estructura.
- Aproxima el contenido de humedad al óptimo (así es como debe realizarse la compactación).

- Al bajar el contenido de gases provoca una presión intersticial negativa.
- Dificulta la variación del grado de humedad, y por tanto aumenta la estabilidad.

## 1.4. Deformaciones

Si la magnitud de una carga externa no provoca desplazamientos relativos entre los granos, ni roturas o deformaciones plásticas, una vez desaparezca se recuperará la forma del suelo, apareciendo deformaciones **elásticas**.

En el caso de que la carga sea mayor, surgen deformaciones permanentes que **no se recuperarán** cuando cese. La aplicación de un esfuerzo vertical provocará un descenso de la capa de terreno. El esfuerzo vertical induce tensiones laterales cuando el terreno se encuentra confinado. Al desaparecer la tensión vertical, aún quedan las horizontales, que pueden recuperar parte de la deformación vertical ocasionada por la carga. Este fenómeno se nomina **“amasado”**.

Cuando ya no existe carga sobre el terreno, las tensiones internas remanentes se relajan paulatinamente, sobre todo en terrenos finos, provocando asientos que disminuyen con el tiempo: son **deformaciones de fluencia**.

Resumiendo, un proceso típico de deformación de un suelo sometido a cargas exteriores produce las siguientes deformaciones:

- Deformaciones no recuperables originadas por dislocaciones intergranulares, que aparecen con muy poco retraso respecto de la carga que las origina.
- Deformaciones elásticas debidas a la compresión de las partículas y que, a causa de las anteriores, se desarrollan con un mayor retraso respecto a la carga que las origina.
- Deformaciones de recuperación de las anteriores y nuevas no recuperables, pero de sentido contrario a las primeras, al descargar el suelo.
- Deformaciones de fluencia debidas al relajamiento de las tensiones internas y que se desarrollan durante cierto tiempo después de descargar el terreno.

Una estimación grosera sobre el asiento máximo que tendrá un terraplén compactado al 95% del Proctor Normal del lado seco, con un suelo tolerable o adecuado, es de 0,5% H.

## 1.5. Porosidad y permeabilidad

Se ha descrito anteriormente la **porosidad** como la relación entre el volumen de huecos y el total. Un parámetro análogo es el índice de huecos, que relaciona su volumen con el de sólidos. Estas relaciones permiten estudiar la variación que experimenta el peso específico seco de un suelo en función de su volumen de huecos. De sus definiciones, se deducen las siguientes expresiones:

$$n = \frac{e}{1+e} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

$$e = \frac{n}{1-n} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Estas fórmulas permiten comprobar que, conforme aumenta la proporción de huecos, es menor el peso unitario seco del suelo. Sin huecos, el peso específico seco coincide con el de las partículas.

Considerando que parte de los huecos pueden estar ocupados por agua, se puede describir el comportamiento que tiene el suelo en cuanto a su peso específico seco y contenido de humedad. Se deduce de las definiciones que:

$$n_a = 1 - \gamma_d \cdot \left( \frac{\omega}{\gamma_w} + \frac{1}{\gamma_s} \right) \quad \text{Ecuación 1.7}$$

$$S_r = \frac{\omega}{\left( \frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{1}{G} \right)} \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Si el suelo está saturado de agua, dichas fórmulas describen la llamada **curva de saturación**:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{\left( \omega + \frac{1}{G} \right)} \quad \text{Ecuación 1.9}$$

Para un caso particular, en el cual  $G=2,60$ , y con una variación de huecos de alrededor 0 (saturación) al 40%, se obtiene la Figura 6.

El interés de estas curvas es que, conocida la humedad, se deduce directamente el máximo peso unitario seco que puede alcanzar un terreno, estando este saturado. En la práctica tomaremos un 95% de la densidad seca calculada de este modo, pues es difícil llegar al grado de saturación unidad en los casos habituales.

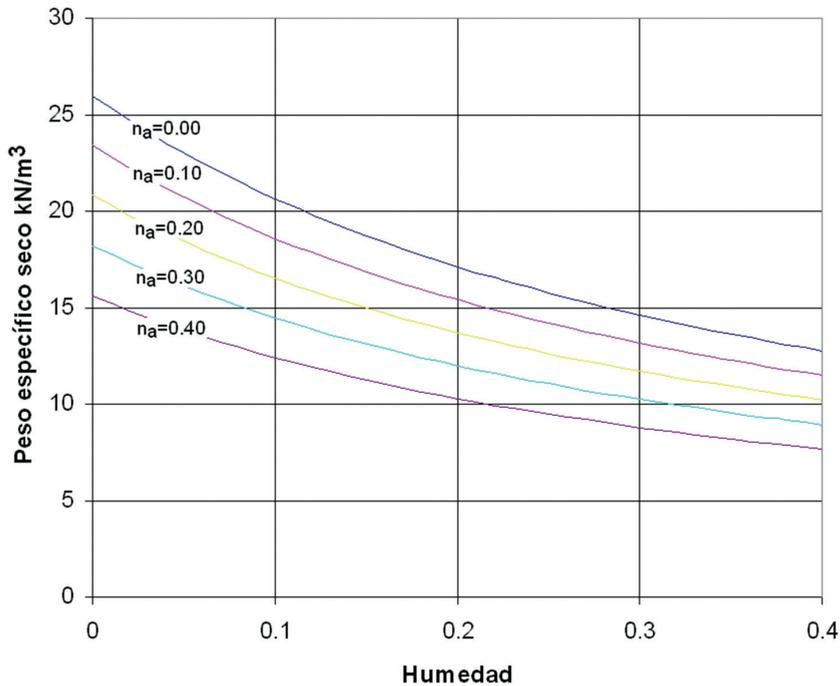


Figura 6. Peso específico seco-huecos de aire.

Análogamente, conocida la humedad y el peso específico seco, se obtiene el grado de saturación y, por consiguiente, el margen de variación de humedad que sufre el suelo, una vez compactado.

El peso específico aparente del suelo, en función del contenido de agua y del peso específico seco es:

$$\gamma = \gamma_d \cdot (1 + \omega) \quad \text{Ecuación 1.10}$$

Una cualidad de los terrenos, -relacionada con la dimensión de los huecos más que con su volumen total-, es la **permeabilidad**. Dicha propiedad expresa la facilidad con la cual un fluido es capaz de atravesar la unidad de superficie de un terreno sometido a un gradiente hidráulico determinado. En el año 1856, Henry Darcy demostró experimentalmente, para el flujo unidireccional de agua mediante las arenas de la ciudad de Dijon, la ley que recibe su nombre:  $v = k \cdot i$ , siendo  $k$  una constante denominada “coeficiente de permeabilidad”, que tiene las dimensiones de una velocidad, y siendo  $i$  el “gradiente hidráulico”.

Si los huecos son de pequeño tamaño, su permeabilidad también, tal como ocurre con las arcillas. Los limos y las arenas presentan mayores permeabilidades.

En los **terrenos anegados** no se desarrollan tensiones capilares, y el agua más bien sirve de lubricante. El suelo será deformable. Sin embargo, frente a una sobrecarga, los terrenos permeables pueden compactarse con facilidad si se retira el exceso de agua (arenas limpias de granulometría cortada, por ejemplo). En terrenos impermeables, una sobrecarga transmitirá tensiones al agua, considerada como no compresible, elevándose la presión intersticial. En estas circunstancias ocurre el denominado “**efecto colchón**”, por el cual se producen grandes desplazamientos de las partículas, que se recuperan con prontitud, pues las partículas están como flotando en el agua, comportándose el suelo como un fluido viscoso. Es evidente, en estas condiciones, la nula efectividad de una compactación. Se puede considerar, con carácter orientativo, que este fenómeno ocurre con grados de saturación superiores al 90%.



## Determinación de la compactación de un suelo

Índice	
2.1.	Curvas de compactación
2.2.	Densidad de los suelos granulares
2.3.	Ensayo Proctor
2.4.	Sistemas de compactación
	Compactación normal
	Compactación seca
2.5.	Ensayos de resistencia
	Ensayo CBR
	Placa de carga con placa



**Para seguir leyendo, inicie el  
proceso de compra, click aquí**