

Materiales para sistemas de drenaje subterráneo



Materiales para sistemas de drenaje subterráneo

ESTUDIO FAO
RIEGO Y
DRENAJE

60

Rev. 1

Por

L.C.P.M. Stuyt

ALTERRA, Wageningen University and Research Centre
Wageningen, Países Bajos

W. Dierickx

Departamento de Ingeniería Rural
Merelbeke, Bélgica

J. Martínez Beltrán

Unidad de Fomento y Aprovechamiento de Aguas
División de Tierras y Aguas de la FAO

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

ISBN 978-92-5-305427-5

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión de material contenido en este producto informativo para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización escrita de los titulares de los derechos de autor, siempre que se especifique claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción del material contenido en este producto informativo para reventa u otros fines comerciales sin previa autorización escrita de los titulares de los derechos de autor. Las peticiones para obtener tal autorización deberán dirigirse al:

Jefe de la Subdivisión de Políticas y Apoyo en Materia de Publicación Electrónica de la División de Comunicación de la FAO

Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Roma, Italia

o por correo electrónico a:

copyright@fao.org

ÍNDICE

Introducción	1
HISTORIA	1
MATERIALES DE DRENAJE ACTUALES	2
PROBLEMAS CON MATERIALES DE DRENAJE	3
ALCANCE DE ESTA PUBLICACIÓN	3
Tuberías de drenaje, accesorios y estructuras auxiliares	5
TUBERÍAS DE DRENAJE	5
Tubos de cerámica	5
Tubos de hormigón	6
Tuberías de drenaje de plástico	6
ACCESORIOS DE TUBERÍAS	8
Tapones terminales	9
Acoples	9
Reductores	10
Conexiones de tuberías	10
ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN	10
Puentes de dren	10
Tubos rígidos	10
ENTRADAS	10
Entradas ciegas	10
Entradas superficiales	13
ESTRUCTURAS DE CONEXIÓN	13
Cajas de unión	13
Pozos de registro	13
SALIDAS	13
Salidas por gravedad	13
Salidas por bombeo	16
ESTRUCTURAS ESPECIALES	16
Reductores de pendiente	16
Dispositivos de limpieza	16
Estructuras para drenaje controlado y riego subterráneo	19
Materiales envolventes	21
MATERIALES	21
Envolturas minerales granulares	21
Envolturas orgánicas	22
Envolturas sintéticas	23
ESPECIFICACIONES PARA ENVOLTURAS DE DREN	26
Especificaciones para envolturas de grava	27
Especificaciones para envolturas enrolladas previamente	30
DISPONIBILIDAD Y COSTE	35

REVISIÓN DE EXPERIENCIA LOCAL SOBRE MATERIALES DE DRENAJE	36
Zonas áridas y semiáridas	37
Trópicos húmedos	39
Zonas templadas	39
Flujo de entrada de agua en el dren y dentro de la tubería	43
FLUJO HACIA EL DREN	43
RESISTENCIA AL FLUJO DE APROXIMACIÓN Y ENTRADA	45
FLUJO DE ENTRADA DE AGUA EN LA TUBERÍA DE DRENAJE	48
Gradiente de salida	48
Gradiente hidráulico crítico	49
Gradiente de fallo hidráulico	51
RESISTENCIA DE ENTRADA DE TUBERÍAS DE DRENAJE	52
Dren sin envoltura	52
Dren con envoltura	56
Dren con un entorno poco permeable	58
CAPACIDAD DE DESAGÜE DE TUBERÍAS DE DRENAJE	58
El problema de la obstrucción de tuberías y envolturas	61
OBSTRUCCIÓN MINERAL	61
Procesos en suelos en torno a drenes	61
Obstrucción de tuberías	65
OBSTRUCCIÓN QUÍMICA Y BIOQUÍMICA	66
Ocre de hierro	66
Depósitos de yeso y cal	70
Depósitos de manganeso	71
Precipitado sulfuroso	71
Sulfuro de hierro	71
PENETRACIÓN DE RAÍCES EN TUBERÍAS DE DRENAJE	71
Directrices para predecir la necesidad de una envoltura	73
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	74
Textura del suelo	74
Estabilidad estructural	76
Contenido de humedad	78
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO	78
Capacidad de intercambio de cationes	79
Salinidad del suelo	79
Sodicidad del suelo	79
CALIDAD DEL AGUA	80
Agua de riego	81
Agua freática	81
CRITERIOS DE PREDICCIÓN	82
Directrices para instalar y mantener materiales de drenaje	83
INSTALACIÓN DE MATERIALES DE DRENAJE SUBTERRÁNEO	83
Procedimientos de instalación	83
Directrices para tuberías de drenaje	85
Directrices para envolturas	87

MANTENIMIENTO DE TUBERÍAS DE DRENAJE	88
Limpieza con agua a presión	88
Experiencia empírica con agua a presión en el noroeste de Europa	91
Directrices para inyectar agua	92
Investigación sobre materiales de drenaje	95
CARACTERÍSTICAS DEL SUELO Y PARÁMETROS DE ENVOLTURA RELEVANTES	95
EVALUACIÓN DE LABORATORIO SOBRE LA APLICABILIDAD DE ENVOLTURA	96
Modelos de tanque de arena	96
Permeámetros de flujo paralelo	98
Directrices para investigación con permeámetro	100
EVALUACIÓN DE CAMPO DE LA APLICABILIDAD DE ENVOLTURA	102
Investigación de campo	102
Directrices para investigación de campo	103
RECOMENDACIONES PARA FUTURA INVESTIGACIÓN	106
Tuberías de drenaje	107
Envolturas de dren	107
Propiedades del suelo	109
Estabilidad de agregados	109
Normas para tuberías y envolturas	111
PARÁMETROS DE ENSAYO PARA TUBERÍAS DE DRENAJE	112
Tubos de cerámica y hormigón	112
Tubos de hormigón	112
Tuberías de plástico	112
PARÁMETROS DE ENSAYO PARA ENVOLTURAS	112
Materiales granulares	112
PLM y geotextiles	112
Geotextiles	113
NORMAS DE AMÉRICA DEL NORTE	113
NORMAS EUROPEAS	114
Referencias	117
ANEXO Borrador de norma europea para tuberías de drenaje de cloruro de polivinilo corrugado	129

Lista de figuras

1. Tapones finales	9
2. Acoples	9
3. Reductor para tubería de drenaje	10
4. Conexiones de tuberías	11
5. Puente de dren	11
6. Uso de tubos rígidos para cruzar un camino, un curso de agua o una fila de árboles	12
7. Entrada ciega	12
8. Entradas superficiales	12
9. Cajas de unión	14
10. Cámaras de inspección (pozos de registro)	14
11. Salidas por gravedad	15
12. Cubeta de bombeo de drenaje	17
13. Reductores de pendiente	17
14. Tubo de acceso para limpieza de laterales de un sistema de drenaje compuesto	18
15. Sistemas de drenaje controlado: (a) codo y tapón con elevador; (b) tapón con derivación; (c) estructura compleja con vertedero de pared	18
16. Envoltura PLM de fibra de coco	22
17. Envoltura PLM hecha de fibras de desecho de polipropileno (PP-300)	24
18. Envoltura PP-450	24
19. Envoltura PP-700	25
20. Envoltura PS-1000	25
21. Envoltura Typar	26
22. Resistencias al flujo de agua hacia un dren que funciona a plena capacidad (a) y sus pérdidas de carga correspondientes (b)	43
23. Flujo de aproximación y pérdida de carga total para evaluar el funcionamiento de un sistema de drenaje en campos experimentales	46
24. El área del flujo de aproximación consta del dren, con o sin envoltura, del relleno alterado de la zanja y del suelo sin alterar	47
25. Flujo horizontal	49
26. Flujo radial	49
27. Gradiente de salida i_{ex} expresado como la relación $i_{ex}K/lqL$ para flujo radial en función del radio del dren r_o	50
28. Flujo radial hacia un dren ideal (a) y hacia un dren real (b)	52
29. Influencia de un flujo parcialmente radial sobre la resistencia de entrada a drenes reales	54
30. Posibles límites entre suelo y aberturas de dren	54
31. Flujo teórico hacia un dren ideal revestido con una envoltura	56

32. Radios efectivos (r_{ef}) para drenes de diferente radio (r_o) con cuatro ranuras longitudinales continuas en función del espesor de la envoltura (d_e) para $\kappa_e=10$	57
33. Filtro natural	62
34. Erosión de contacto	62
35. Torta filtrante	63
36. Disgregación del suelo	63
37. Ejemplo de un subsuelo estratificado (izquierda) y de un subsuelo con macroporos orientados verticalmente formados en antiguos canales de raíces (derecha)	64
38. Imágenes que muestran envolturas de dren y macroporos activos	64
39. Ilustración de la heterogeneidad de los tipos de obstrucción mineral detectados en el interior de envolturas voluminosas	65
40. Clases de textura	75
41. Curvas de distribución del tamaño de partícula	76
42. Rango de la distribución del tamaño de partícula de suelos que pueden causar obstrucción de drenes	77
43. Limpieza con inyección de agua con un equipo de presión media	89
44. Sección transversal de un permeámetro para evaluar interacciones suelo-envoltura	99

Lista de cuadros

1. Relaciones de gradación entre suelo y diámetros de material envolvente granular graduado	29
2. Relaciones del tamaño grava/acuífero máximas permisibles	29
3. Valores ajustados para el espesor de sedimentación (mm) mediante un modelo de regresión, dependiendo del tamaño efectivo de abertura de los poros de la envoltura (O_{90}) y del tipo de envoltura (fina o gruesa), para observaciones hechas en tres campos experimentales en los Países Bajos	33
4. Coste relativo de envolturas PLM en los Países Bajos en 1998, expresado como porcentaje del coste de la envoltura respecto a una tubería de PVC corrugado junto con un producto revestido previamente, sin incluir el coste de instalación. El tamaño O_{90} está especificado en paréntesis	37
5. Materiales de drenaje usados en varios países	38
6. Aplicabilidad de envolturas de dren enrolladas previamente más populares en los Países Bajos	40
7. Resistencias de entrada y relaciones r_{ef} / r_o de tuberías de drenaje sin envoltura	55
8. Riesgo de formación de ocre según el método de Ford y el de tiras de papel indicador	68
9. Problemas con la tasa de infiltración de agua en el suelo relacionada con la RAS_{iw} y la CE_{iw} del agua de riego	81
10. Relación entre presión en bomba, presión en boquilla y caudal, para una manguera flexible de 20 mm de diámetro interno y 300 m de longitud	90
11. Clasificación de acuerdo a la «fracción de la pérdida de carga del flujo de aproximación»	105
12. Clasificación de acuerdo con la «resistencia al flujo de aproximación» o la «pérdida de carga del flujo de aproximación»	105
13. Normas-ASTM para tubos de drenaje de cerámica y hormigón	113
14. Normas de Estados Unidos de América y Canadá para tuberías de plástico corrugado	113
15. Norma europea (EN) para geotextiles y productos relacionados con ellos que pueden ser útiles cuando se usan como envolturas en drenaje agrícola	115

Prólogo

Se necesitan sistemas de drenaje subterráneo fiables que controlen capas freáticas y salinidad, con objeto de mantener o mejorar la productividad de las tierras regables y contribuir al desarrollo rural de zonas bajas de los trópicos húmedos. Además, estos sistemas continúan siendo importantes como medio de control de capas freáticas en algunas áreas de las zonas templadas. La selección de materiales apropiados (tuberías y envolturas) y su correcta instalación y mantenimiento son esenciales para un funcionamiento correcto y duradero de sistemas de drenaje subterráneo. Esto fue reconocido en el Estudio FAO de Riego y Drenaje 9, *Materiales de Drenaje*, publicado en 1972. En esa época, la experiencia sobre materiales de drenaje provenía principalmente de proyectos situados en las zonas templadas del noroeste de Europa y de Estados Unidos de América. Desde entonces, también se ha conseguido experiencia valiosa en países tropicales, la cual puede ser útil y como tal debería estar a disposición de las comunidades de profesionales. En las últimas dos décadas se han hecho importantes avances en ingeniería de drenaje, especialmente en lo que se refiere a materiales y a técnicas de instalación. Este adelanto se ha conseguido como resultado de un gran número de proyectos de investigación y de experiencia práctica, incluso en tierras bajo riego. Por tanto, ha sido necesario actualizar el Estudio FAO de Riego y Drenaje 9.

Ingenieros de campo y contratistas encargados de nuevos proyectos de drenaje necesitan directrices prácticas para seleccionar e instalar tuberías de drenaje y envolturas. Sin embargo, la selección de materiales de drenaje depende de varios factores, de los cuales los más importantes son disponibilidad, durabilidad y coste. Se necesita un procedimiento que permita a los ingenieros predecir si es necesaria la instalación de envolturas. Las directrices para esta selección deben considerar además las especificaciones de los materiales requeridas y estas directrices deben estar disponibles para ayudar a los contratistas en su valoración sobre si los materiales disponibles cumplen dichas especificaciones.

El objetivo de este Estudio es proporcionar esta información práctica a ingenieros de drenaje y contratistas. La publicación se basa en el conocimiento actual del flujo de entrada de agua en tuberías de drenaje y envolturas, y en las propiedades y aplicabilidad de estos materiales. También incluye directrices para valorar la necesidad de envolturas y para la selección del material envolvente más adecuado en relación con las condiciones locales. También se han incluido directrices para la instalación y mantenimiento de materiales de drenaje, así como especificaciones y normas para estos materiales que puedan usarse en documentos de licitación para ejecución de obras de drenaje subterráneo. Además, contiene directrices prácticas para realización de investigaciones de laboratorio y campo a fin de evaluar el funcionamiento de materiales de drenaje.

Agradecimientos

Los autores agradecen a W. H. van der Molen, profesor jubilado de la Universidad de Wageningen, Países Bajos, a L. S. Willardson, que trabajó como profesor en la Universidad del Estado de Utah, Logan, Estados Unidos de América, y a J. Cavelaars, experto de drenaje retirado de Arcadis Euroconsult, Arnhem, Países Bajos, por su disponibilidad para revisar el manuscrito de la versión en inglés. Se han apreciado muchísimo sus sugerencias, observaciones y contribuciones para mejorar su esquema, contenido técnico y legibilidad.

Los autores también desean agradecer el apoyo de H. Wolter, Director de la División de Fomento de Tierras y Aguas de la FAO durante la preparación de este Estudio de Riego y Drenaje en su versión en inglés.

Se reconoce especialmente a P. Thévenet, Director de Wavin, Varennes sur Allier, Francia, y coordinador del Grupo de Trabajo 18 de CEN/TC 155, por su autorización para incluir el borrador de la norma europea sobre tuberías de drenaje de cloruro de polivinilo corrugado, como un anexo de este Estudio.

También se agradece a Horman Wrapping BV, Países Bajos, por su autorización para publicar las figuras 16 a 21.

Finalmente se dan las gracias a la Sra. C. D. Smith-Redfern por formatear el texto, figuras y cuadros de la versión final en lengua inglesa, así como a C. Rosell por la traducción y a J. Martínez Beltrán por la revisión y edición de la versión final en español, y a la Sra. B. El Zein por el formateo de este texto definitivo para su impresión.

Lista de símbolos

Símbolo	Descripción	Dimensión
A	Área de sección transversal (m^2)	L^2
C_u	Coefficiente de uniformidad	-
CE	Conductividad eléctrica ($dS\ m^{-1}$)	$T^3I^2M^{-1}L^{-3}$
CE_e	Conductividad eléctrica de una pasta de suelo saturada con agua hasta el límite líquido ($dS\ m^{-1}$)	$T^3I^2M^{-1}L^{-3}$
CE_s	Conductividad eléctrica de una solución de suelo a capacidad de campo ($dS\ m^{-1}$)	$T^3I^2M^{-1}L^{-3}$
CE_{gw}	Conductividad eléctrica de agua freática ($dS\ m^{-1}$)	$T^3I^2M^{-1}L^{-3}$
CE_{iw}	Conductividad eléctrica de agua de riego ($dS\ m^{-1}$)	$T^3I^2M^{-1}L^{-3}$
CIC	Capacidad de intercambio de cationes (meq/100 g)	-
c_o	Cohesión (Pa)	$ML^{-1}T^{-2}$
D_x	Diámetro de partícula del x% del tamaño del material envolvente granular (μm)	L
D_5	Diámetro de partícula del 5% del tamaño del material envolvente granular (μm)	L
D_{15}	Diámetro de partícula del 15% del tamaño del material envolvente granular (μm)	L
D_{30}	Diámetro de partícula del 30% del tamaño del material envolvente granular (μm)	L
D_{50}	Diámetro de partícula del 50% del tamaño del material envolvente granular (μm)	L
D_{100}	Diámetro de partícula del 100% del tamaño del material envolvente granular (μm)	L
d	Diámetro interno de tubería (cm)	L
d_e	Espesor de envoltura (cm)	L
d_x	Diámetro de partícula del x% del tamaño del material del suelo (μm)	L
d_{10}	Diámetro de partícula del 10% del tamaño del material del suelo (μm)	L
d_{15}	Diámetro de partícula del 15% del tamaño del material del suelo (μm)	L
d_{50}	Diámetro de partícula del 50% del tamaño del material del suelo (μm)	L
d_{60}	Diámetro de partícula del 60% del tamaño del material del suelo (μm)	L
d_{85}	Diámetro de partícula del 85% del tamaño del material del suelo (μm)	L
d_{90}	Diámetro de partícula del 90% del tamaño del material del suelo (μm)	L
dh	Pequeño incremento de carga hidráulica (m)	L
dl	Pequeño incremento de longitud (m)	L

Símbolo	Descripción	Dimensión
dr	Pequeño incremento de distancia radial (m)	L
FL	Fracción de lavado	-
H	Altura de un modelo de tanque de arena (m)	L
h	Pérdida de carga (m)	L
h_e	Pérdida de carga de entrada (m)	L
h_h	Pérdida de carga horizontal (m)	L
h_r	Pérdida de carga radial (m)	L
h_t	Pérdida de carga total (m)	L
h_v	Pérdida de carga vertical (m)	L
h_{ap}	Pérdida de carga del flujo de aproximación (m)	L
I_p	Índice de plasticidad del suelo	-
i	Gradiente hidráulico del flujo de agua en el suelo	-
i_c	Gradiente hidráulico crítico	-
i_f	Gradiente de fallo hidráulico	-
i_{ex}	Gradiente de salida	-
K	Conductividad hidráulica ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
K_e	Conductividad hidráulica de una envoltura ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
	Conductividad hidráulica de suelo alterado en una zanja de dren ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
K_h	Conductividad hidráulica horizontal del suelo ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
K_r	Conductividad hidráulica radial del suelo ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
K_s	Conductividad hidráulica del suelo ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
K_v	Conductividad hidráulica vertical del suelo ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
K_{ap}	Conductividad hidráulica de la zona de flujo de aproximación ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
k_M	Parámetro recíproco del coeficiente de rugosidad de Manning ($m^{1/2}\ s^{-1}$)	$L^{1/3}T^{-1}$
L	Espaciamiento entre drenes (m)	L
	Longitud de un modelo de tanque de arena (m)	L
n	Coefficiente de rugosidad de Manning ($s\ m^{-1/3}$)	$TL^{-1/3}$
	Factor de concentración del agua de riego en el suelo	-
O_{90}	Diámetro de poro del 90% del tamaño de abertura del material envolvente (μm)	L
p	Relación entre flujo radial total y sectorial	-
PSI	Porcentaje de sodio intercambiable	-
Q	Caudal ($m^3\ s^{-1}$)	L^3T^{-1}
q	Caudal específico ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
RAS	Relación de adsorción de sodio ($meq^{1/2}\ l^{-1/2}$)	$M^{1/2}L^{-3/2}$
RAS_e	Relación de adsorción de sodio de una pasta de suelo saturada con agua hasta el límite líquido ($meq^{1/2}\ l^{-1/2}$)	$M^{1/2}L^{-3/2}$
RAS_s	Relación de adsorción de sodio de una solución de suelo a capacidad de campo ($meq^{1/2}\ l^{-1/2}$)	$M^{1/2}L^{-3/2}$

Símbolo	Descripción	Dimensión
RAS_{gw}	Relación de adsorción de sodio del agua freática ($\text{meq}^{1/2} \text{l}^{-1/2}$)	$M^{1/2}L^{-3/2}$
RAS_{iw}	Relación de adsorción de sodio del agua de riego ($\text{meq}^{1/2} \text{l}^{-1/2}$)	$M^{1/2}L^{-3/2}$
r	Radio de un equipotencial circular (m) Distancia desde el centro del dren (m)	L L
r_e	Radio de la interfase suelo-envoltura (m)	L
r_o	Radio de un dren ideal (m) Radio exterior de un dren (m)	L L
r_{ef}	Radio efectivo o equivalente (m)	L
S	Distancia entre corrugaciones de una tubería corrugada (m)	L
SDT	Sólidos disueltos totales (mg l^{-1})	ML^{-3}
s	Gradiente hidráulico del flujo dentro de una tubería	-
W	Resistencia al flujo ($d \text{ m}^{-1}$) Anchura de un modelo de tanque de arena (m)	TL^{-1} L
W_e	Resistencia al flujo de entrada ($d \text{ m}^{-1}$)	TL^{-1}
W_h	Resistencia al flujo horizontal ($d \text{ m}^{-1}$)	TL^{-1}
W_r	Resistencia al flujo radial ($d \text{ m}^{-1}$)	TL^{-1}
W_t	Resistencia al flujo total ($d \text{ m}^{-1}$)	TL^{-1}
W_v	Resistencia al flujo vertical ($d \text{ m}^{-1}$)	TL^{-1}
W_{ap}	Resistencia al flujo de aproximación ($d \text{ m}^{-1}$)	TL^{-1}
W_{DS}	Masa de una muestra de suelo secada en estufa (g)	M
W_{LL}	Masa de una muestra de suelo al límite líquido (g)	M
W_{PL}	Masa de una muestra de suelo al límite plástico (g)	M
*	Subíndice v (vertical), h (horizontal), r (radial), e (entrada) o t (total)	-
α	Factor de resistencia al flujo	-
α_e	Factor de resistencia al flujo de entrada	-
α_h	Factor de resistencia al flujo horizontal	-
α_r	Factor de resistencia al flujo radial	-
α_t	Factor de resistencia al flujo total	-
α_v	Factor de resistencia al flujo vertical	-
α_e^*	Resistencia al flujo en función del área sectorial con flujo radial	-
α_e'	Factor de resistencia de entrada de la propia tubería de drenaje si está revestida por una envoltura	-
α_{ap}	Factor de resistencia al flujo de aproximación	-
$\alpha_{e,e}$	Factor de resistencia de entrada del dren y de la envoltura circundante	-
$\alpha_{(e,e)W}$	Factor de resistencia de entrada del dren y de la envoltura circundante según Widmoser (1968)	-
β	Ángulo de flujo radial sectorial (rad)	-
ϕ	Ángulo de fricción interna o resistencia al corte (rad)	-

κ_e	Relación entre las conductividades hidráulicas de envoltura y suelo circundante	-
σ_e	Tensión efectiva de las partículas de suelo o tensión entre partículas (Pa)	$ML^{-1}T^{-2}$
τ_f	Resistencia al corte por unidad de superficie (Pa)	$ML^{-1}T^{-2}$
Δh	Incremento de carga hidráulica (m)	L
Δl	Incremento de longitud (m)	L

Capítulo 1

Introducción

HISTORIA

Cuando comenzó el drenaje de tierras agrícolas en la región Mesopotámica hace cerca de 9000 años no había tuberías (Van Schilfgaarde, 1971). Muy probablemente el drenaje subterráneo se realizaba con grava y piedras o con materiales voluminosos permeables, tales como manojos de ramas de árboles y arbustos que se colocaban atados en el fondo de una zanja. Las primeras tuberías de drenaje, que aparecieron hace aproximadamente 4000 años, fueron descubiertas en el valle del Bajo Indo (Ami, 1987). En Europa, los primeros sistemas de drenaje subterráneo se instalaron al inicio de la era Cristiana, pero este tipo de drenaje fue prácticamente olvidado en los siglos siguientes.

Alrededor del año 1544 reaparecieron en Inglaterra sistemas de drenaje, cuando los holandeses comenzaron a exportar hacia ese país el saber de sus ingenieros, que eran reputados expertos en la construcción de sistemas de drenaje y diques. Cornelius Vanderdelf fue el primer holandés que llevó a cabo trabajos de drenaje en Inglaterra al inicio del siglo XVII, seguido posteriormente por otros famosos ingenieros como Cornelius Vermuyden y Joos Croppenburgh (Chapman, 1956). Poco más tarde se utilizaron tejas semicirculares a modo de drenes en Escocia y en la Europa continental. Estas tejas deben considerarse los predecesores de los tubos de drenaje de cerámica, de aquí su nombre. Seguidamente se utilizaron drenes sencillos en forma de herradura, este tipo de drenes sobre placas planas, drenes en forma de D con base plana y finalmente tubos de sección circular. En 1840, la invención en Inglaterra del extrusor de tubos de cerámica favoreció la difusión del drenaje de tierras en Europa. Hace aproximadamente dos siglos, se introdujo el drenaje de tubería en los Estados Unidos de América. Durante el período siguiente, se colocaban a mano tubos de cerámica manufacturados mecánicamente y alrededor de 1960 se generalizó la instalación mecánica. La introducción de tuberías de drenaje de plástico perforado en la década de 1960 incrementó la efectividad, eficiencia y economía de instalación.

Se han hecho tuberías de drenaje con tablas (drenes de caja) y ladrillos; tubo de cerámica en forma de herradura y con sección circular; tubo de hormigón; tubo perforado de fibra bituminosa y tubería perforada de plástico liso y corrugado. Actualmente, se utilizan con frecuencia tuberías corrugadas aunque también tubos de hormigón y de cerámica. La selección del material depende de factores económicos de la zona en cuestión.

Schwab y Fouss (1999) sintetizaron los avances más significativos del drenaje de tierras agrícolas. En orden cronológico, las primeras actuaciones fueron las siguientes:

- Instalación del primer dren de tubería en los Estados Unidos de América (1835).
- Invención del extrusor de tubo en Inglaterra (1840).
- Fabricación del primer tubo de drenaje con arena y cemento en los Estados Unidos de América (1862).
- Uso de máquinas zanjadoras (1880).
- Introducción del tubo liso de PE en los Estados Unidos de América (1948).
- Primera utilización de tubería de PVC lisa y rígida en los Países Bajos (1959).
- Introducción de la primera tubería de PVC flexible en Alemania (1963).
- Instalación de la primera tubería de PE flexible corrugado en Estados Unidos de América (1965).
- Aparición de las máquinas de rejón (1969).

- Primera norma para tubería de PE corrugado, la ASTM F405 (1974).
- Preparación de una norma en los Países Bajos para envoltura enrollada previamente (1981).
- Primer borrador de norma ISO para tuberías de PVC corrugado, (ISO/DIS 8771, 1985).
- Preparación del borrador de norma-EN para tuberías de PVC corrugado (CEN/TC155/WG18, 1994).

Más datos históricos sobre materiales de drenaje pueden encontrarse en Weaver (1964) y Van Someren (FAO, 1972).

MATERIALES DE DRENAJE ACTUALES

En la actualidad se usan materiales de drenaje que comprenden tuberías de drenaje y sus accesorios, envolturas y estructuras auxiliares de drenaje. Ahora están claramente establecidos sin ambigüedades criterios para diseñar tuberías de drenaje, tanto en lo que respecta a tamaño de tubería, disposición y geometría de perforaciones, así como a material de tubería.

Cuando se instala un dren subterráneo en ciertos suelos puede ser necesario tomar ciertas medidas para proteger la tubería de drenaje de la entrada de partículas de suelo. Pueden entrar partículas o agregados de suelo en la tubería a través de las perforaciones de su pared, debido a la fuerza de arrastre del agua. Este proceso nunca puede impedirse completamente pero puede reducirse substancialmente o incluso paralizarse mediante el uso de material externo poroso colocado alrededor de la tubería. El medio poroso diseñado con este fin se denomina «envoltura de dren» aunque erróneamente se ha llamado con frecuencia «filtro de dren». El funcionamiento de un filtro es tal que al retener el material de suelo puede llegar a obturarse o causar la obstrucción del suelo circundante. Al contrario, una buena «envoltura de dren» restringe la entrada de sedimentos, proporciona material de alta conductividad hidráulica y estabilidad estructural en torno al dren, y no se obstruye con el tiempo.

El diseño de envolturas *convencionales* no es un gran problema. Estas envolturas, que pertenecen a la *primera generación de envolturas*, son de grava, conchas trituradas o materiales orgánicos sueltos como residuo de turba. En Estados Unidos de América se han desarrollado progresivamente criterios para diseñar envolturas granulares minerales (Willardson, 1974). Existen criterios bien fundamentados para el diseño de envolturas granulares tradicionales (de grava y arena gruesa) y se han aplicado en la práctica con éxito (Terzaghi y Peck, 1961).

En muchas zonas escasea o no se encuentra material envolvente de grava adecuadamente clasificada y por ello constituye el coste principal de instalar drenes. Además, el manejo y la colocación de grava alrededor de una tubería de drenaje es una operación engorrosa que origina altos costes de instalación. Esto ha llevado a buscar materiales más livianos sustitutivos de envolturas de grava.

Generalmente, los materiales envolventes alternativos constaban de fibras orgánicas como las que se encuentran en residuos de cultivos. En áreas donde la grava era cara se utilizaron con éxito durante muchos años envolturas de turba ya mencionadas. En intentos posteriores para reducir el coste de sistemas de drenaje y simplificar su instalación mecánica, la *segunda generación de envolturas*, que incluye materiales envolventes en forma de tiras, reemplazó gradualmente a los materiales orgánicos sueltos. Un rollo de estos materiales puede transportarse en una zanjadora y colocarse sobre una tubería mientras se instala. Los primeros materiales elaborados en forma de tiras fueron de turba fibrosa, paja de lino y fibras de coco. Al mismo tiempo, una envoltura tan tradicional como la turba de alta calidad comenzó a escasear, impulsando la búsqueda de alternativas. En la década de 1960, se utilizaron tiras de láminas de fibra de vidrio que eran económicamente accesibles y fáciles de manejar.

Tras la introducción de tuberías corrugadas en 1962 se abandonó el uso de materiales envolventes en forma de tiras. En Europa aparecieron envolturas orgánicas fibrosas que podían revestir tuberías corrugadas antes de su instalación. Podía entonces instalarse conjuntamente tubería y envoltura en forma de dren revestido. Esto redujo los costes de instalación en aproximadamente un 50 por ciento.

Aunque el uso de envolturas orgánicas se difundió ampliamente su propensión a la descomposición microbiana fue un inconveniente. Por ello, la última y *tercera generación de envolturas*, las sintéticas, ha ganado popularidad bastante rápidamente. Su uso es común en América del Norte y Europa y está aumentando rápidamente en países como Egipto, Pakistán y la India. Las envolturas sintéticas son tiras de geotextiles que revisten una tubería de drenaje o coberturas de fibras sintéticas sueltas. La mayor parte de las envolturas de fibra sintética se fabrican a partir de material reciclado, como son las fibras residuales de polipropileno procedentes de fabricar alfombras.

PROBLEMAS CON MATERIALES DE DRENAJE

La instalación de drenes de forma tradicional, o sea manualmente, no puede hacerse bajo condiciones adversas, como son las ocasionadas por capas freáticas someras o por un estado de humedad generalizada. Con frecuencia, esta restricción ha evitado el mal funcionamiento de sistemas de drenaje instalados manualmente y ha asegurado su larga duración. La velocidad de instalación ha aumentado drásticamente con la mecanización de las obras, pero el control de su calidad (p. ej. la precisión de la pendiente) resulta más difícil, especialmente tras la aparición de la tubería corrugada flexible. También es posible instalar drenes en condiciones adversas pero es difícil de supervisar, porque tanto contratistas como empresas constructoras tratan de tener sus máquinas operativas el mayor tiempo posible, debido a que los costes fijos de la maquinaria de instalación son altos. A partir de 1965, el uso de láser para controlar la pendiente mejoró la precisión de instalación.

La mecanización de instalar drenes, así como la utilización de nuevos tipos de envolturas de dren, ha llevado por un lado a reducir costes, pero por otro han surgido una serie de problemas hasta entonces desconocidos. Algunos de estos problemas se han presentado al instalar drenes en suelos muy húmedos o al utilizar nuevos tipos de envolturas que no pueden usarse en todo tipo de suelos.

El uso de una envoltura de dren depende fundamentalmente de las propiedades físicas de los suelos. Sin embargo en la práctica, el proceso de selección depende de la disponibilidad y coste. Especialmente en zonas áridas, donde se instalan sistemas de drenaje para controlar el anegamiento y salinización de los suelos, es necesario prioritariamente encontrar alternativas asequibles a envolturas de grava, que potencialmente son excelentes pero caras. La considerable investigación llevada a cabo y la experiencia práctica acumulada, desde la década de 1960 hasta fines de la década de 1980, han proporcionado directrices para diseñar envolturas y seleccionar materiales para distintos tipos de suelos.

ALCANCE DE ESTA PUBLICACIÓN

El objetivo de este nuevo Estudio FAO de Riego y Drenaje sobre *materiales para sistemas de drenaje subterráneo* es describir y evaluar el conocimiento existente sobre materiales de drenaje, especialmente en lo relativo a tuberías de drenaje y envolturas. Esta publicación incluye directrices para su selección, diseño e instalación, prescripciones técnicas para documentos de contratación de obras de drenaje subterráneo y también consideraciones sobre mantenimiento de drenes. Se ha hecho cierto esfuerzo para investigar en profundidad los criterios existentes y analizar sus semejanzas y contradicciones. Esta investigación ha dado por resultado un conjunto de criterios de aplicación práctica para materiales envolventes.

El conocimiento actual sobre materiales de drenaje y su conveniencia puede ser de interés de ingenieros y contratistas para su aplicación. Esta publicación no es un «manual de materiales de drenaje» para expertos en drenaje, sino una *guía de aplicación* preparada en principio en beneficio de ingenieros proyectistas y contratistas.

En esta publicación se han tratado los temas siguientes:

- Descripción de las tuberías de drenaje subterráneo existentes y de algunas estructuras auxiliares (Capítulo 2).
- Evaluación de las propiedades de envolturas de dren y de su conveniencia para aplicaciones específicas, como resultado de observaciones en áreas piloto y de simulaciones analógicas en laboratorios (Capítulo 3).
- Análisis del conocimiento existente sobre el flujo de entrada de agua en envolturas y drenes (Capítulo 4).
- Directrices para evaluar la necesidad de envolturas y para seleccionar el material envolvente más apropiado en función de las condiciones locales (Capítulos 5 y 6).
- Directrices para instalar y mantener materiales de drenaje (Capítulo 7).
- Necesidades de investigación sobre materiales de drenaje (Capítulo 8).
- Revisión y evaluación de normas y especificaciones existentes sobre tuberías de drenaje y envolturas utilizadas actualmente (Capítulo 9 y Anexo).

Capítulo 2

Tuberías de drenaje, accesorios y estructuras auxiliares

TUBERÍAS DE DRENAJE

Durante muchos años se han utilizado predominantemente tubos de cerámica y hormigón hasta que alrededor de 1960 aparecieron los tubos de drenaje de plástico liso. Desde poco tiempo después, las tuberías de plástico corrugado son las más utilizadas.

Los tubos de cerámica, hormigón o plástico dan resultados satisfactorios si reúnen las normas de calidad establecidas y se instalan correctamente. Las tuberías para colectores son de hormigón o plástico, aunque este último material no es competitivo para diámetros superiores a 200 mm. Sin embargo, pueden instalarse con cierta facilidad colectores de plástico corrugado perforado, revestidos de una envoltura laminar, si el suelo circundante consiste de arena movediza o tiene otras propiedades que le dan inestabilidad. Una vez instalado el colector puede actuar como dren suprimiendo la inestabilidad del suelo y posibilitando conectar drenes laterales, instalar pozos de registro o ambas cosas.

En teoría, existen criterios válidos para seleccionar distintos tipos específicos de tubería de drenaje, pero en la práctica, la selección se basa fundamentalmente en la disponibilidad local y en la comparación de costes. Además, puede ser de interés considerar las siguientes observaciones (Schultz, 1990):

- Si se dispone de todo tipo de tubería el uso de la de plástico corrugado tiene ventajas indudables (Apartado *Tuberías de drenaje de plástico*).
- Si no se dispone de tuberías, lo más práctico y más fácil de llevar a cabo es fabricar localmente tubos de hormigón, ya que su fabricación es económica a pequeña escala y necesita menos pericia que la requerida para otro tipo de tubo. Las tuberías de plástico ocupan una posición intermedia, pues en cantidades relativamente grandes es posible fabricarlas localmente a partir de materia prima importada.
- Para la instalación mecánica son más adecuadas las tuberías de plástico y tienen la ventaja de que una instalación incorrecta afecta menos su funcionamiento.
- Generalmente, el coste de fabricación de tubos de menor diámetro (es decir <100 mm) es similar para tubos de cerámica, hormigón o plástico. Sin embargo, para tuberías de mayor diámetro por lo general lo más barato es el hormigón y lo más caro el plástico.

Tubos de cerámica

El tubo de cerámica puede ser poroso o vidriado. Los tubos se adosan en la zanja del dren y el agua entra a través de las uniones entre dos tubos contiguos. El de tipo poroso generalmente tiene este tipo de uniones pero también puede unirse mediante una pieza con forma de aro (llamado «collar» o «unión de campana»). Este tipo de tubo es más caro y su costo adicional solamente se justifica en suelos muy blandos. Los tubos de buena calidad están bien cocidos y no tienen grietas ni burbujas. No debe utilizarse tubo de cerámica con grietas o con otros defectos visibles ni con malformaciones.

Los tamaños de tubería de drenaje estándar son 50, 65, 75, 80, 100, 130, 160 y 200 mm de diámetro interno. En el Reino Unido la medida nominal mínima de diámetro interno es 75 mm, que tiene capacidad de transporte de agua más que suficiente, por lo que si se usan tubos de cerámica para drenes laterales el diámetro raramente es un factor

de diseño relevante. El espesor de pared varía entre 12 y 24 mm y puede expresarse como $0,08d+8$ mm, siendo d el diámetro interno del tubo expresado en mm. Los tubos de cerámica corrientes tienen una longitud de 300 o 333 mm, aunque en algunos países existen tubos de mayor longitud. En Alemania, los tubos de cerámica se fabricaban con surcos longitudinales en su parte externa para, en combinación con materiales envolventes, facilitar el flujo de agua a lo largo del dren.

El tubo de cerámica es muy duradero y muy resistente a alterarse y deteriorarse en suelos agresivos, p. ej. en suelos ricos en sulfatos y en compuestos químicos corrosivos, por lo que pueden utilizarse en casi toda circunstancia. El tubo de cerámica es más liviano que el de hormigón y tiene una excelente resistencia, pero es frágil (especialmente el tipo alemán con surcos) por lo que debe manejarse con cuidado. Los tubos de cerámica requieren un manejo manual considerable, aunque los fabricantes lo han mejorado mediante varios métodos de transporte y manejo.

La fabricación de tubos de cerámica requiere mucha pericia y una planta bien equipada. Las características principales de calidad son uniones rectas, ausencia de grietas y homogeneidad de la materia prima (arcilla bien mezclada). La tasa de absorción máxima de agua de los tubos después de haber estado sumergidos durante 24 horas debe ser menor del 15 por ciento del peso del tubo. El peso de 1000 tubos debe exceder ciertos valores mínimos, p. ej. 1400 kg para tubo de 60 mm de diámetro y 2000 kg para tubo de 80 mm de diámetro.

En ciertas zonas todavía se colocan tubos de cerámica y de hormigón manualmente en una zanja excavada a mano o mecánicamente. Estos tubos pueden cubrirse con materiales voluminosos o con «envolturas» en forma de tira.

Los tubos de cerámica deben instalarse de manera que queden perfectamente alineados. La separación máxima entre dos tubos contiguos no debe superar 3 mm, excepto en caso de suelo arenoso donde no debe superar $2d_{85}$, siendo este valor el tamaño de partícula para el que el 85 por ciento de las partículas de suelo, referido a su peso en seco, tienen un diámetro menor.

Tubos de hormigón

Se ha usado tubo de hormigón a gran escala, p. ej. en Egipto, Irak y otros países. Se utiliza si no se dispone de tubo de cerámica o si se necesitan grandes diámetros. Los tubos de hormigón se usan por lo general para tamaños medios o grandes, con tubos de 0,60, 0,91, 1,22 y 2,40 m de largo y diámetros internos de 100, 150 y 200 mm o incluso mayores. Generalmente se refuerzan tubos de más de 300 mm de diámetro interno. Normalmente se colocan adosados por sus extremos.

La fabricación de tubos de hormigón es más sencilla que la de tubos de cerámica. Los tubos deben estar bien hechos y acabados, sin grietas ni desconchones y debidamente curados.

Deben usarse solamente tubos de hormigón cuando los análisis de suelo y agua freática muestren que las condiciones son favorables para su uso. Se pueden deteriorar tubos hechos con cemento común en suelos ácidos o ricos en sulfatos o cuando el agua contiene sales alcalinas u otros compuestos químicos. No deben usarse tubos de hormigón si los colectores llevan residuos industriales o domésticos. Para resistir la agresión química (p. ej. ácidos o sulfatos) deben usarse cementos especiales altamente resistentes a sulfatos y hormigón de alta densidad.

Los tubos de hormigón se pueden desintegrar lentamente a causa de su alteración y son erosionables por un flujo rápido de agua que transporte materiales abrasivos. Sin embargo, en muchos casos, su instalación permanente es duradera y se justifica.

Tuberías de drenaje de plástico

La principal ventaja de las tuberías de plástico respecto a los tubos de cerámica y hormigón es su menor peso por unidad de longitud, con la consiguiente reducción

considerable del coste de transporte. Otro factor de ahorro adicional es la menor necesidad de mano de obra en su instalación.

Inicialmente, las tuberías de plástico liso se hacían de cloruro de polivinilo rígido (PVC) con ranuras longitudinales para la entrada de agua. Sin embargo, este tipo de tubos nunca tuvo una amplia utilización, ya que fueron sustituidos rápidamente por tuberías de plástico corrugado disponibles desde 1963. Estas tuberías dieron tan buenos resultados que gradualmente reemplazaron a los tubos de cerámica y hormigón. Este proceso de sustitución aún continúa en muchos países. La forma corrugada de las paredes no solamente da flexibilidad a la tubería sino que además, para la misma cantidad de materia prima utilizada, la hace más resistente a la compresión que la tubería lisa.

La aparición de tubería corrugada marcó un hito en la historia del drenaje de tierras agrícolas. Esta tubería flexible es muy adecuada para instalación mecánica y por tanto los costes de instalación se reducen considerablemente. Además, la tubería corrugada ha facilitado el desarrollo de técnicas de instalación sin apertura de zanja.

La sustitución de los tubos de cerámica y hormigón por tuberías de plástico corrugado era esperable ya que este tipo de tubería tiene grandes ventajas, a saber:

- Su peso más liviano facilita el manejo aún en caso de tramos muy largos.
- La gran continuidad de la tubería facilita su manejo, causa menos problemas de alineación y reduce demoras en el suministro de tubería, incrementándose así la velocidad de instalación de las máquinas de drenaje.
- La flexibilidad y posibilidad de enrollado facilita el manejo, transporte e instalación.
- El acceso de agua se facilita porque el área perforada es mayor y está distribuida más uniformemente.
- Su revestimiento con materiales envolventes es más fácil.
- La ejecución de obras es más adecuada al no haber uniones demasiado anchas ni defectos de alineación.
- La necesidad de mano de obra es menor y, por ende, el coste de mano de obra en la fabricación, manejo, transporte e instalación es también menor.
- Es inerte a todos los compuestos químicos del suelo más frecuentes.

Las tuberías corrugadas también presentan desventajas respecto a los tubos de cerámica y hormigón:

- Se deterioran por radiaciones ultravioletas si se exponen a la luz solar durante largos períodos, especialmente las tuberías de PVC.
- Son más quebradizas a bajas temperaturas.
- Tienen mayor riesgo de deflexión a altas temperaturas y de excesivo alargamiento durante la instalación.
- Presentan menor resistencia a deflexión bajo carga permanente.
- Tienen riesgo de aplastamiento por efecto de una carga repentina, p. ej. por derrumbe de la pared de la zanja o por piedras.
- Para igualdad de diámetro interno tienen menor capacidad de transporte debido a la rugosidad de las corrugaciones.
- No son resistentes al fuego.
- No se pueden recolocar fácilmente en el campo sin dañarlas con la barra que se usa con tubos de cerámica y hormigón.

Los drenes de plástico corrugado son de PVC, polietileno de alta densidad (PE) o polipropileno (PP). La preferencia por alguno de esos materiales se basa en factores económicos. En Europa, los drenes corrugados son principalmente de PVC, excepto en el Reino Unido donde son de PE y en menor grado de PP. En Estados Unidos de América y en Canadá la mayor parte de las tuberías de drenaje son de PE, principalmente por el menor precio de la materia prima. Ambas tuberías, de PVC o PE, pueden ser de buena calidad aunque estas materias primas tienen diferentes propiedades físicas:

- La menor rigidez del PE hace que las tuberías se puedan deformar fácilmente bajo carga, sobre todo a temperaturas de alrededor de 40°C y si están sometidas a tensión longitudinal.
- Las tuberías de PVC son más susceptibles a la radiación ultravioleta y se vuelven quebradizas por su exposición al sol; por ello, debe evitarse almacenar tuberías al aire libre sin protección.
- A bajas temperaturas las tuberías de PVC son más quebradizas que las de PE; por ello, las de PVC no deben instalarse a temperaturas externas por debajo de 3°C ya que el riesgo de agrietarse es demasiado alto.
- El PVC se ablanda a 80°C y las tuberías de drenaje se deforman si se exponen a tal temperatura. Especialmente en zonas áridas y semiáridas debe tenerse especial cuidado en evitar tales condiciones de almacenamiento.
- El PVC tiene algunos inconvenientes ambientales ya que cuando se quema forma ácido clorhídrico.

En el noroeste de Europa se utilizan tuberías de PP con fines agrícolas pero su uso no está muy extendido, aunque son adecuadas en invernaderos ya que resisten el calor y toleran la desinfección de suelos con vapor.

Por lo general, las medidas *europas* de tubería se refieren al diámetro externo, siendo 40, 50, 65, 80, 100, 125, 160 y 200 mm los diámetros estándar, aunque también existen diámetros mayores. Las medidas *norteamericanas* de tubería se refieren al diámetro interno y son de 102, 127, 152, 203, 254, 305, 381, 457 y 610 mm. El diámetro interno es por lo general 0,9 veces el externo. Las tuberías de plástico corrugado de diámetros inferiores a 250 mm se distribuyen en rollos y las de diámetros superiores en piezas de 6 m de largo.

El agua entra en las tuberías corrugadas a través de perforaciones hechas en el valle de las corrugaciones. Son frecuentes aberturas longitudinales o «ranuras» pero también orificios circulares. Las perforaciones pueden tener un diámetro o una anchura de ranura que varía de 0,6 a 2 mm. La longitud de las ranuras es aproximadamente 5 mm pero en tuberías de mayor diámetro puede ser mayor. Las perforaciones deben distribuirse uniformemente en la pared de la tubería, por lo general al menos a lo largo de cuatro filas con un mínimo en cada fila de dos perforaciones cada 100 mm. En Europa, el área de perforación debe ser al menos 1200 mm² por metro de tubería.

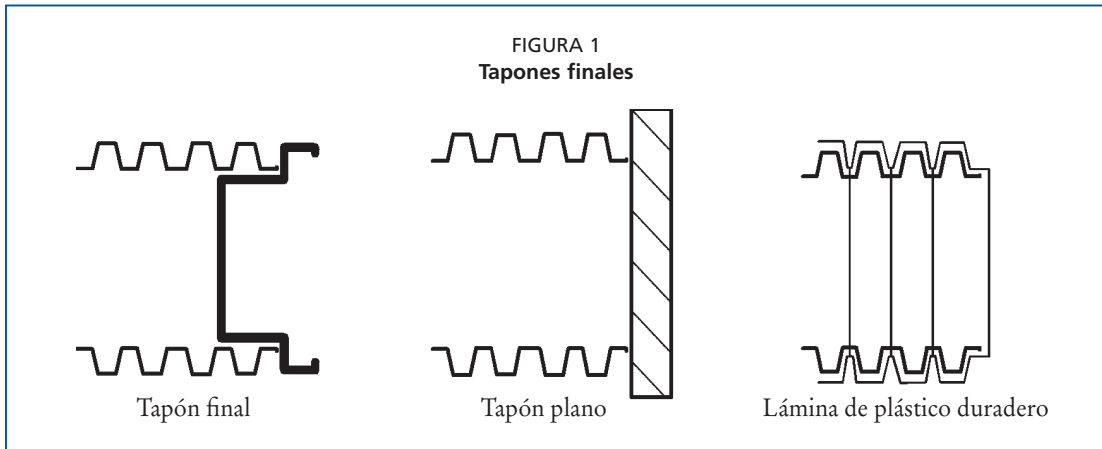
La instalación mecánica de tuberías de plástico corrugado es muy sencilla. Generalmente, las tuberías de menor diámetro se portan embobinadas en la máquina y se desenrollan a medida que prosigue la instalación. Las tuberías de mayor diámetro generalmente se disponen sobre el campo y se van colocando con la máquina. En cualquier caso, para prevenir daños y estiramiento longitudinal de los tubos, siempre es necesario supervisar con detenimiento las tuberías y controlar su correcta instalación. Es muy importante controlar regularmente la calidad de tuberías de plástico corrugado. Parte de un programa de ensayo debe ser el estudio del efecto del impacto de cargas repentinas, simulando el derrumbe de la pared de la zanja sobre la tubería a temperaturas similares a la ambiental durante la instalación.

ACCESORIOS DE TUBERÍAS

Los sistemas de drenaje subterráneo requieren accesorios y estructuras especiales como son: conexiones entre tuberías (acoples, reductores, uniones, tapones terminales), salidas por gravedad o mediante bombeo, cajas de unión, cámaras de inspección (pozos de registro), puentes de dren, tubos rígidos sin perforar, entradas ciegas, entradas superficiales, dispositivos para drenaje controlado o para riego subterráneo y también para limpieza. Los fabricantes de tubería hacen algunas conexiones, otras son fabricadas por compañías especializadas y otros accesorios se construyen in situ.

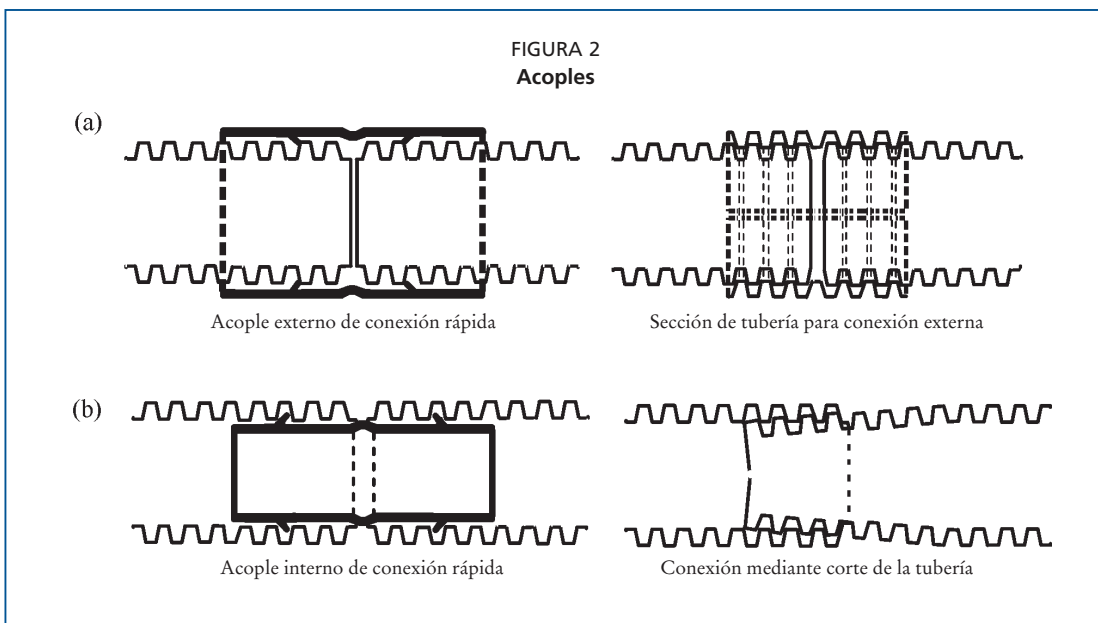
Tapones terminales

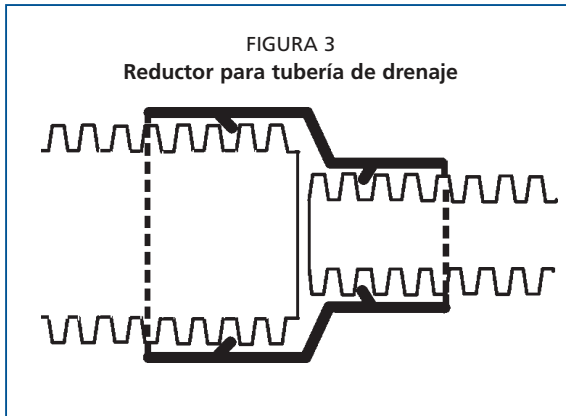
Los tapones terminales impiden la entrada de partículas de suelo en el extremo final del dren aguas arriba. Pueden hacerse del mismo material de la tubería pero puede usarse también con esta finalidad cualquier material plano duradero (Figura 1).



Acoples

Generalmente las tuberías corrugadas tienen acoples externos de «conexión rápida» para unir tuberías del mismo diámetro. Alternativamente, puede usarse un trozo de tubo del mismo diámetro que se corta para facilitar su colocación alrededor de ambos extremos de tubería y se fija firmemente con cinta o alambre para mantenerlo en su lugar durante la instalación (Figura 2a). Pueden usarse acoples internos (Figura 2b) si se coloca tubería sin apertura de zanja, para impedir la separación de las tuberías conectadas mientras pasan por el mecanismo de alimentación de tubería (Schwab y Fous, 1999). También pueden conectarse tuberías internamente cortando el extremo de la tubería de aguas arriba y formando un cono que se enchufa en el extremo de la tubería de aguas abajo. Estas conexiones no son muy fiables y dificultan el flujo de agua y de sólidos en suspensión.





Reductores

Los reductores conectan los extremos de dos tuberías de diferente diámetro (Figura 3).

Conexiones de tuberías

Para todo tipo de tuberías se dispone comercialmente de una gran variedad de conexiones hechas de diferentes materias primas. Generalmente, las conexiones para tubos de cerámica, hormigón y plástico corrugado son manufacturadas por los propios fabricantes de tubería y por tanto raramente son intercambiables.

Las piezas en cruz, en forma de *T* y de *Y*

conectan laterales con colectores o colectores entre sí (Figura 4a). Muchas conexiones se fabrican con extremos de varias medidas (Figura 4b) facilitándose así la unión de colectores y laterales de distinto tamaño (Schwab y Fouss, 1999). Los extremos de las conexiones se cortan o se adaptan en el campo eliminando alguno de sus componentes para ajustarlas al diámetro requerido. Actualmente, para conectar laterales con colectores se utilizan conexiones sencillas con codos o piezas en *T* colocados en la parte superior del colector (Figura 4c).

ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN

Puentes de dren

Normalmente las tuberías se colocan en suelo natural sin alterar, que tiene suficiente resistencia para soportarlas. Sin embargo, cuando un dren pasa por un lugar blando donde el suelo todavía no se ha asentado, p. ej. una antigua zanja rellenada, debe utilizarse un puente para mantener el nivel del tubo durante el asentamiento del suelo. Estos puentes pueden hacerse con piezas de madera sobre las que se coloca el dren o mediante un tubo rígido (véase el Apartado *Tubos rígidos*) protegiendo el dren (Figura 5).

Tubos rígidos

Las tuberías de drenaje pueden conectarse o introducirse en un tubo rígido, de hormigón reforzado, de plástico o revestido de acero, cuando se necesita cruzar: un camino, un curso de agua, una cuneta, un suelo inestable (véase el Apartado *Puentes de dren*), una fila de árboles para impedir la entrada de raíces en las tuberías, u otros obstáculos (Figura 6).

ENTRADAS

Entradas ciegas

Las entradas ciegas tienen por objeto drenar aguas estancadas a la vez que interceptan sedimentos. Consisten en una zanja situada sobre el dren que se rellena con material poroso (Figura 7). Como material de relleno son preferibles materiales duraderos como piedras, grava o arena gruesa. Su graduación puede variar desde el material más fino en la superficie hasta la fracción más gruesa en el fondo, aunque también la zanja puede rellenarse con un único material poroso apropiado. La ventaja de las entradas ciegas es su bajo coste inicial y la no interferencia con operaciones de labranza. Sin embargo, este tipo de entradas ha sido generalmente insatisfactorio porque tienden a obstruirse en la superficie con partículas finas de suelo y otros sedimentos.

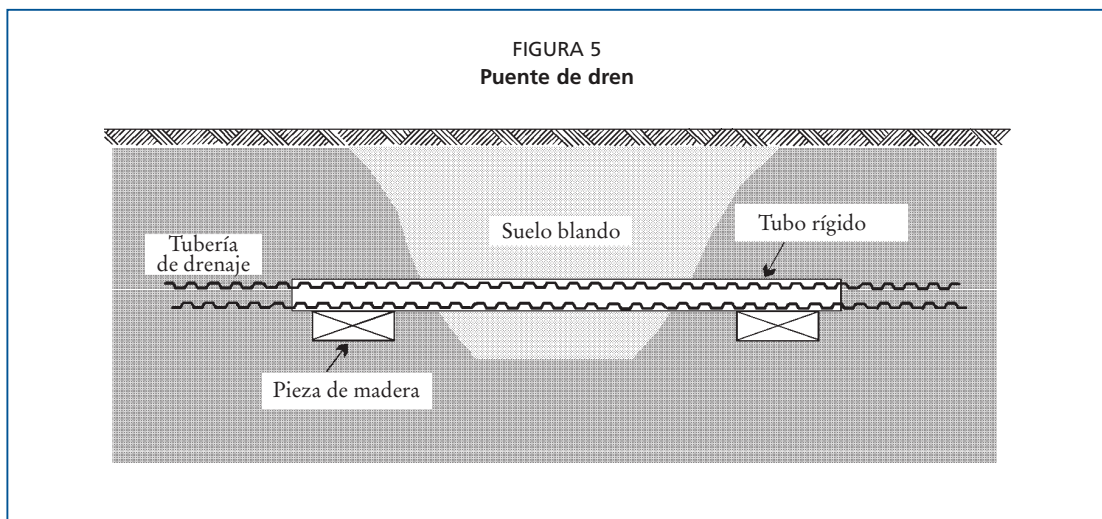
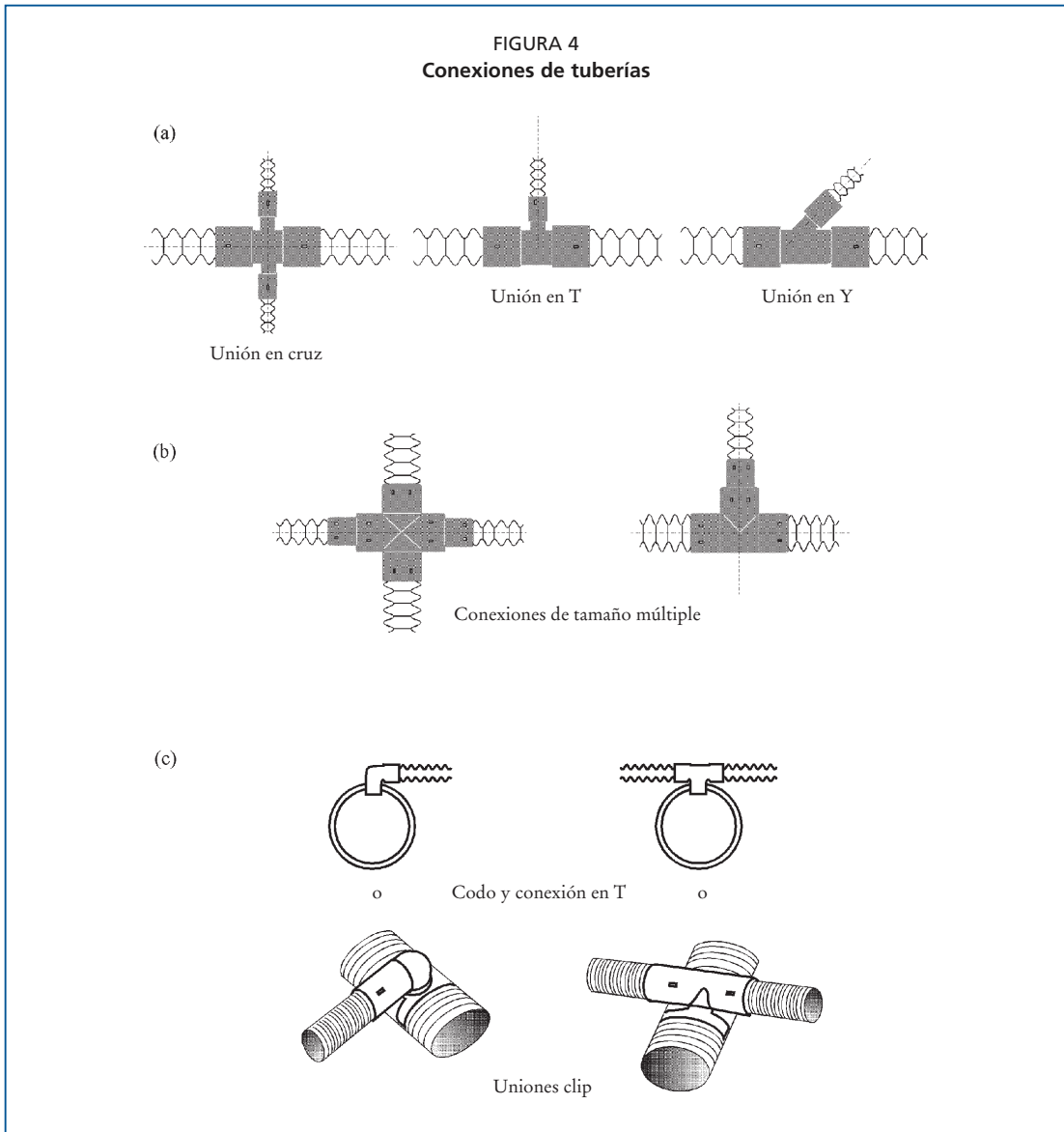


FIGURA 6
Uso de tubos rígidos para cruzar un camino, un curso de agua o una fila de árboles

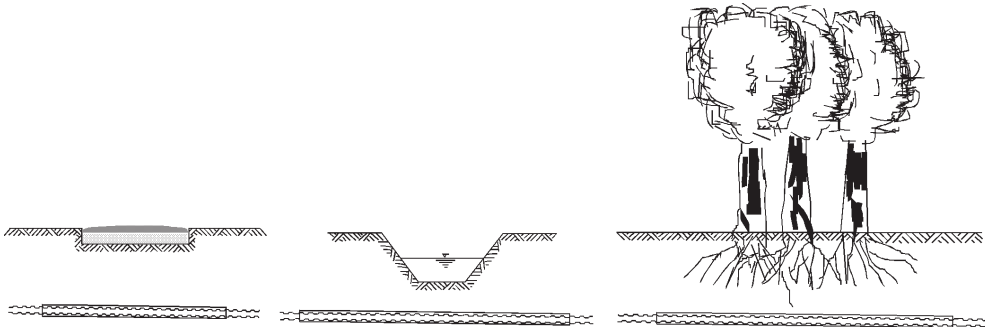


FIGURA 7
Entrada ciega

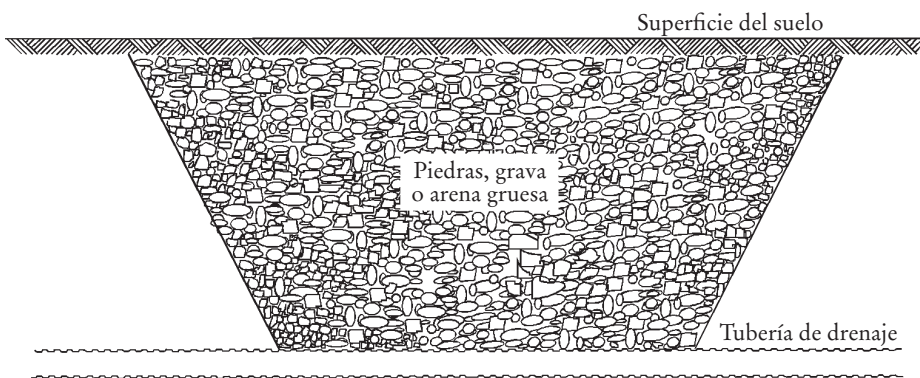
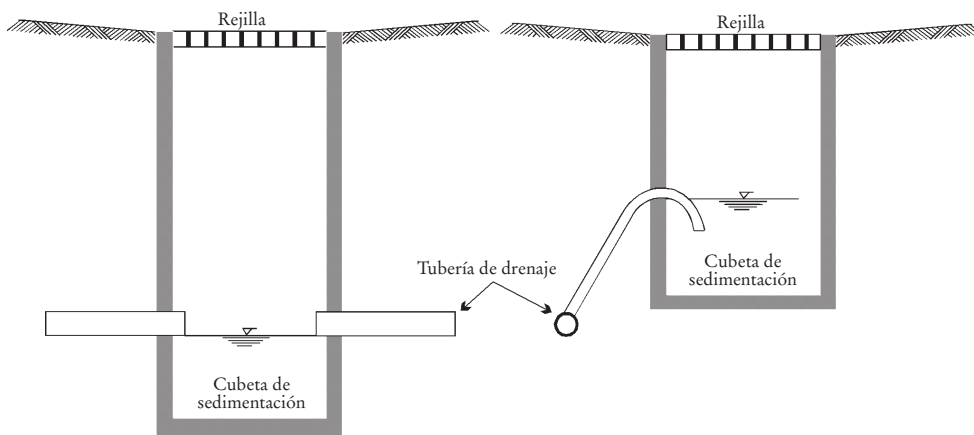


FIGURA 8
Entradas superficiales



Entradas superficiales

Las entradas de agua superficial se utilizan algunas veces para evacuar agua superficial de ciertas áreas localizadas a través de un sistema de drenaje, si no es posible o impracticable la construcción de zanjas. Es esencial tener una cubeta de sedimentación para impedir o reducir el colmatado de los drenes. Este tipo de entrada puede ubicarse en la línea del colector aunque es preferible situarla junto al mismo y conectarla con el colector mediante un sifón (Figura 8) como medida preventiva de un mantenimiento insuficiente. Generalmente, las entradas superficiales se hacen de mampostería o de hormigón in situ, pero también se pueden usar tubos de plástico rígido o de hormigón. Usualmente, se instala una rejilla para evitar la entrada de residuos y basura.

ESTRUCTURAS DE CONEXIÓN

Cajas de unión

Las cajas de unión se utilizan en el lugar en que se unen dos o más drenes (laterales y colectores o colectores entre sí) o donde cambian el diámetro o la pendiente del colector. Pueden ser prefabricadas (Figura 9a) o hechas in situ de mampostería u hormigón, pero también se pueden usar tubos de plástico rígido o de hormigón. Las cajas de unión pueden disponer de una cubeta de sedimentación e incluso rebasar la superficie del terreno (Figura 9b). La solera de la cubeta de sedimentación debe estar al menos 0,30 m por debajo del comienzo de la tubería de aguas abajo. Para facilitar la sedimentación en la cubeta, la salida de los laterales que desaguan en la caja debe colocarse al menos 0,10 m por encima de la parte superior del colector que sale de esta estructura. Las cajas de unión enterradas no estorban las labores agrícolas si su tapa se coloca al menos a 0,40 m por debajo de la superficie del terreno, pero también pueden quedar a la vista en caso de ser necesarias limpiezas o inspecciones. Si la tapa está a nivel del suelo la caja de unión es similar a una cámara de inspección, pero en este caso se entorpecen las labores agrícolas.

La posición de las cajas y de los pozos de registro enterrados (véase el Apartado *Pozos de registro*) debe quedar bien documentada, aunque, a pesar de ello, con frecuencia es difícil encontrarlas. Si no tienen componentes de acero, se debe colocar una tapa con barras metálicas a fin de identificar su presencia con un detector de metales.

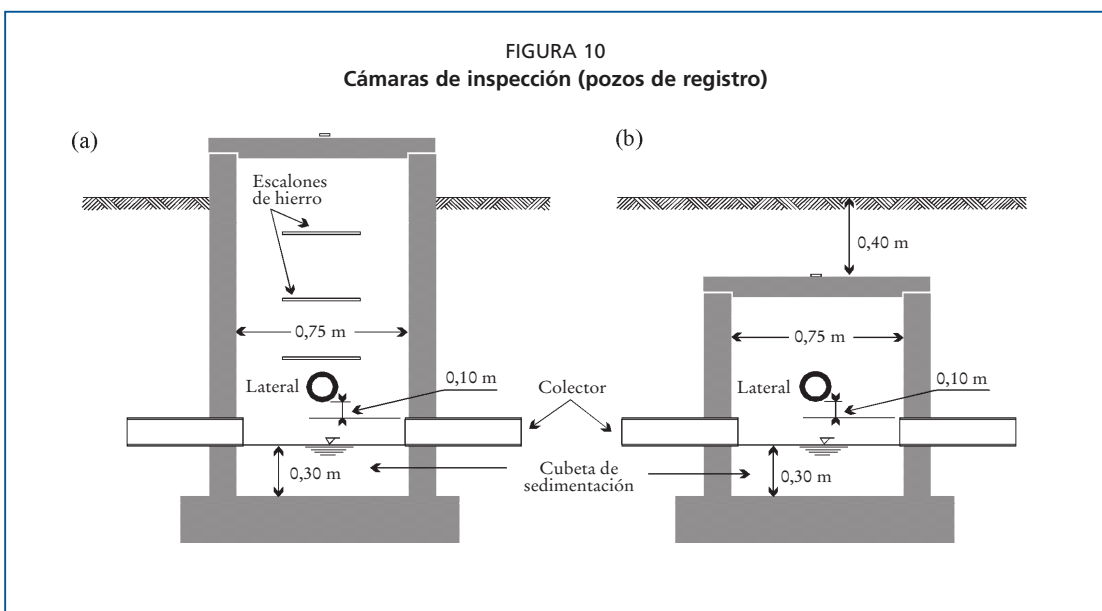
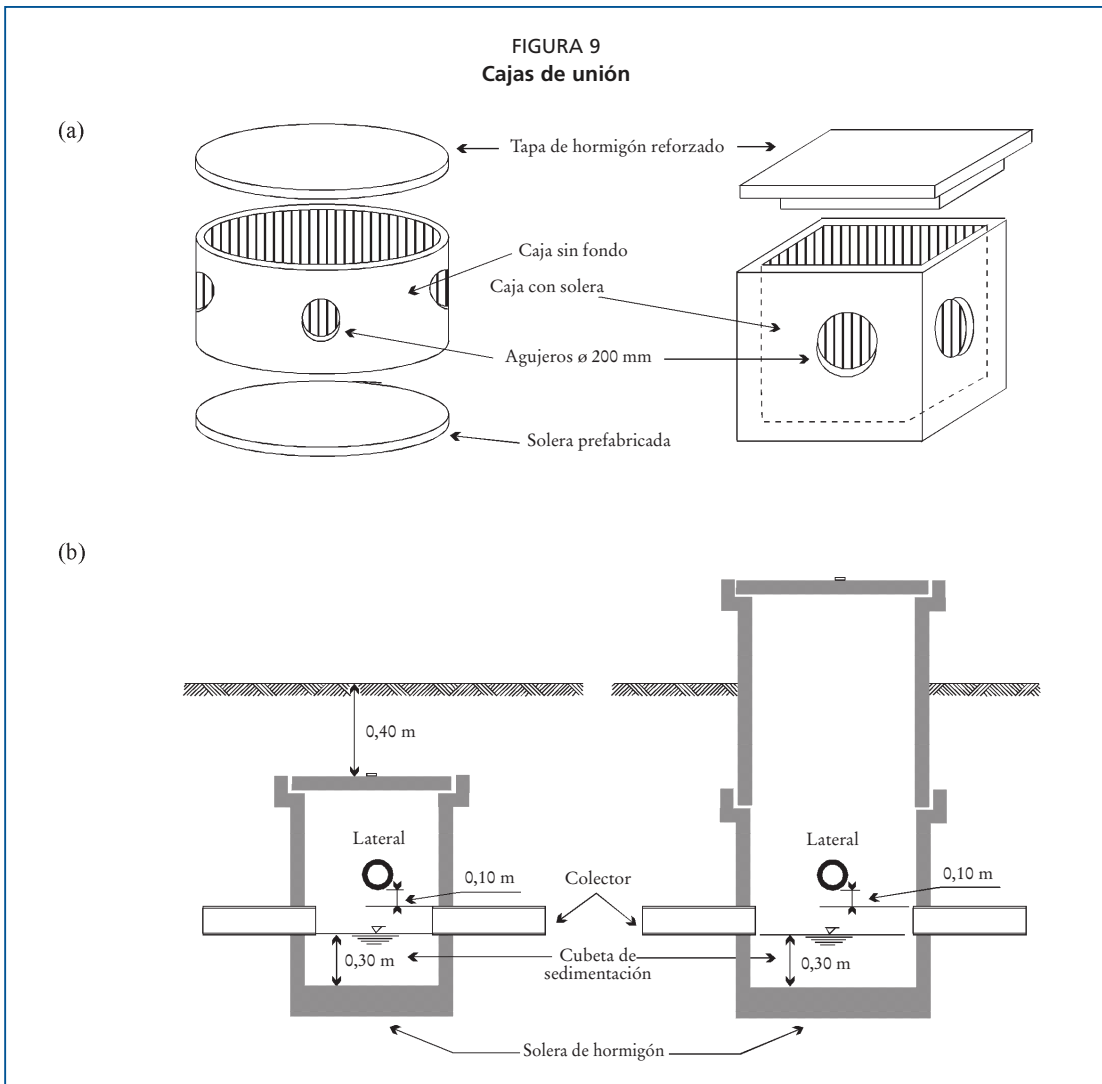
Pozos de registro

Las cámaras de inspección o pozos de registro difieren de las cajas de unión provistas de cubeta de sedimentos por disponer de accesos por si los drenes necesitan inspección o limpieza. Pueden construirse de mampostería o de hormigón pero también se ha utilizado con éxito madera de secuoya (Luthin, 1978). Los pozos de registro profundos se construyen con varios aros de hormigón reforzado. Para permitir el descenso de un operario hasta la línea de drenes deben tener la dimensión suficiente y disponer de peldaños metálicos fijados a la pared (Figura 10a). Si las tapas de los pozos de registro están por encima de la superficie del terreno interfieren las labores. Para evitar este problema se pueden construir tapas a 0,40 m de profundidad, con el inconveniente de la necesidad de excavar en cada inspección (Figura 10b).

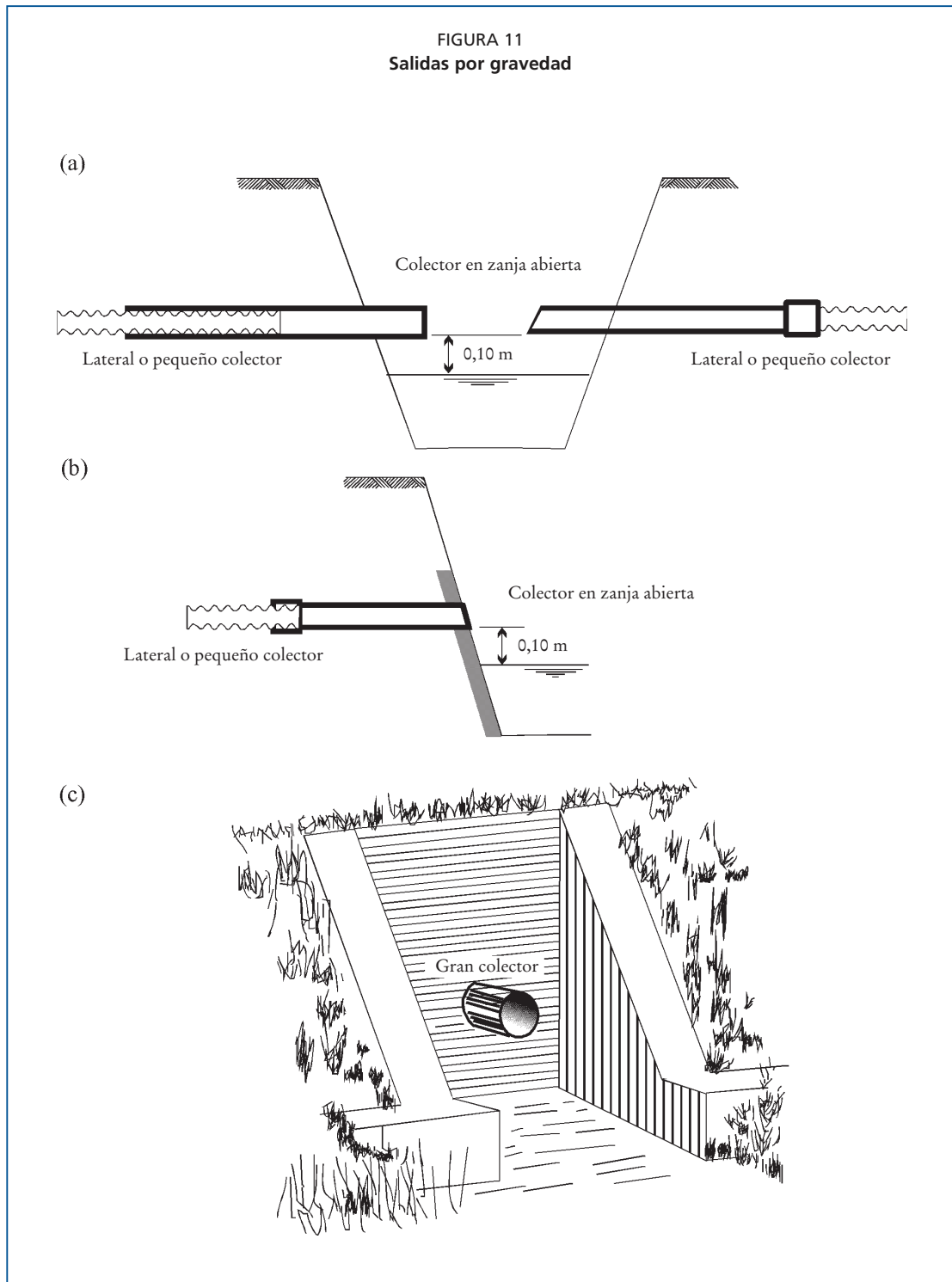
SALIDAS

Salidas por gravedad

La salida de drenes laterales y colectores debe protegerse si desaguan por gravedad a un sistema de drenes abiertos. La salida debe funcionar perfectamente ya que afecta al funcionamiento de todo el sistema de drenaje. La salida de drenes laterales y colectores pequeños puede protegerse mediante un tubo rígido sin perforar de plástico, acero galvanizado, hormigón reforzado u otros materiales. La longitud de estos tubos varía entre 1,5 y 5,0 m, dependiendo del diámetro de la tubería de drenaje, del riesgo de penetración de raíces de vegetación de los taludes y del riesgo de erosión debajo del



tubo o en el punto de desagüe. Cerca de la salida no debe utilizarse material envolvente alguno, especialmente grava, y los últimos metros del relleno de todo el perfil de la zanja del dren deben compactarse bien. El tubo de salida puede conectarse con la tubería de drenaje o recibirla y al menos la mitad de su longitud debe estar enterrada (Figura 11a).



La principal función de las salidas de drenes es impedir la erosión del talud de zanja. Para ello, el tubo sin perforar debe ser lo suficientemente largo para desaguar sobre el agua de la zanja. Para evitar desplomes puede ser necesario apoyarlo mediante un pequeño poste o una barra.

A veces se utilizan salidas más cortas que no rebasan el talud de zanja junto con piezas de protección del talud. Estas piezas pueden ser tubos de plástico cortados por la mitad o canaletas de cemento para conducir agua (Figura 11b). Este tipo de salidas también puede utilizarse cuando hay riesgo de obstrucciones de hielo.

A pesar de los esfuerzos realizados aún no se ha encontrado una solución adecuada para resolver el problema de la interferencia de las salidas con el mantenimiento de zanjas. Los tubos de salida de plástico resisten la corrosión debida a los compuestos químicos de suelo y agua, pero la quema de la vegetación de los taludes de zanja para su mantenimiento puede serles fatal.

Los drenes colectores más grandes justifican el uso de pequeñas estructuras de mampostería, hormigón hecho in situ o con elementos prefabricados (Figura 11c). Las salidas deben tener una rejilla desmontable para impedir la entrada de pequeños animales. Aunque las salidas a zanjas abiertas pueden estar sumergidas durante períodos cortos durante tormentas, en general no lo están y deben situarse a 0,10-0,15 m por encima del nivel de agua de la zanja correspondiente a flujo normal (Figura 11).

Salidas por bombeo

Se utilizan bombas para el desagüe de un sistema de drenaje a una zanja de evacuación si no es posible desaguar por gravedad porque la profundidad de la salida es insuficiente. Esta situación es común en sistemas de drenaje profundos diseñados para el control de salinidad en regiones áridas y semiáridas. En otras zonas, puede necesitarse bombeo si lo requieren los niveles del agua exterior en las salidas del sistema. Los drenes colectores desaguan en una cubeta de almacenamiento de agua con solera de hormigón, donde una bomba controlada mediante un flotador vacía periódicamente la cubeta (Figura 12). Las salidas por bombeo son más caras que las salidas por gravedad, no solo a causa del coste inicial de la inversión sino también a los costes de mantenimiento y al consumo de energía.

Las salidas por bombeo están equipadas con un motor (eléctrico o diesel), bombas y tuberías para elevar el agua de drenaje a una salida superficial donde desagua por gravedad. Las cubetas pequeñas pueden construirse con tubos de plástico de gran diámetro, de acero corrugado revestido de asfalto o con tubos de hormigón, mientras que las más grandes deben construirse con aros de hormigón reforzado, de mampostería o de hormigón reforzado.

ESTRUCTURAS ESPECIALES

Reductores de pendiente

En tierras con pendiente puede necesitarse un reductor de gradiente para en las tuberías de drenaje reducir la velocidad del agua si es excesiva e impedir su erosión y el subsiguiente movimiento del agua a través de canales formados exteriormente a la tubería. Pueden hacerse con tubos de plástico o de hormigón o construirse de mampostería o de hormigón (Figura 13). De hecho, son cajas de unión ciegas muy altas, con el tubo de entrada cerca de la parte superior y el tubo de salida cerca de la solera de la caja.

Dispositivos de limpieza

Aunque la limpieza de tuberías de drenaje bien diseñadas e instaladas adecuadamente debe ser la excepción y no la regla, hay circunstancias en que los drenes requieren limpieza periódica, p. ej. si se forma ocre de hierro. La limpieza de laterales de un sistema de drenaje compuesto con uniones ciegas solamente es posible si se desmantelan algunas de estas conexiones. Sin embargo, uniones especiales como las de la Figura 14

FIGURA 12
Cubeta de bombeo de drenaje

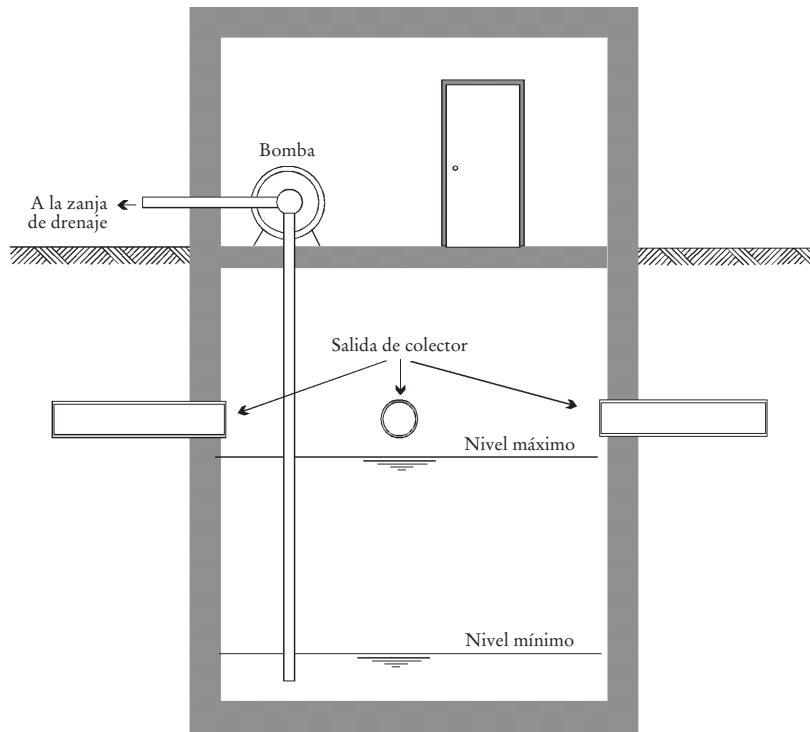
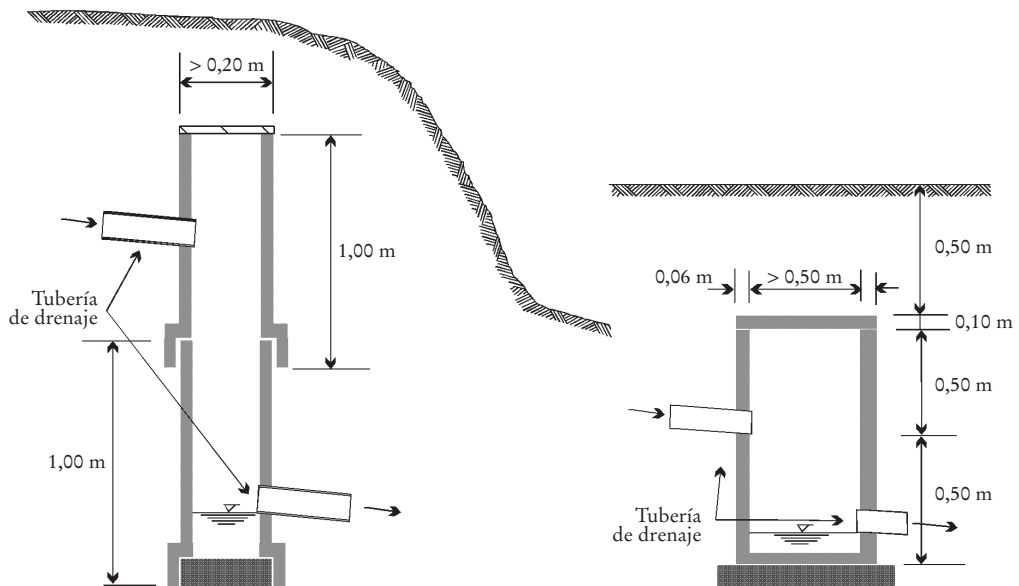
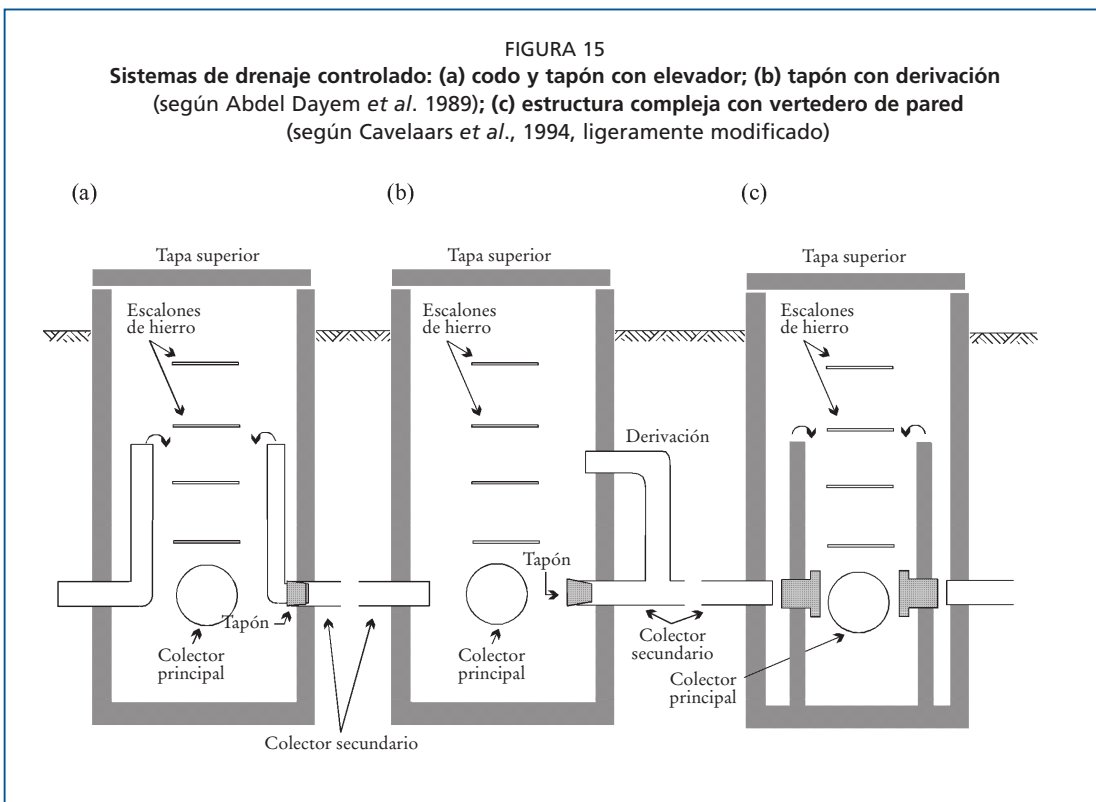
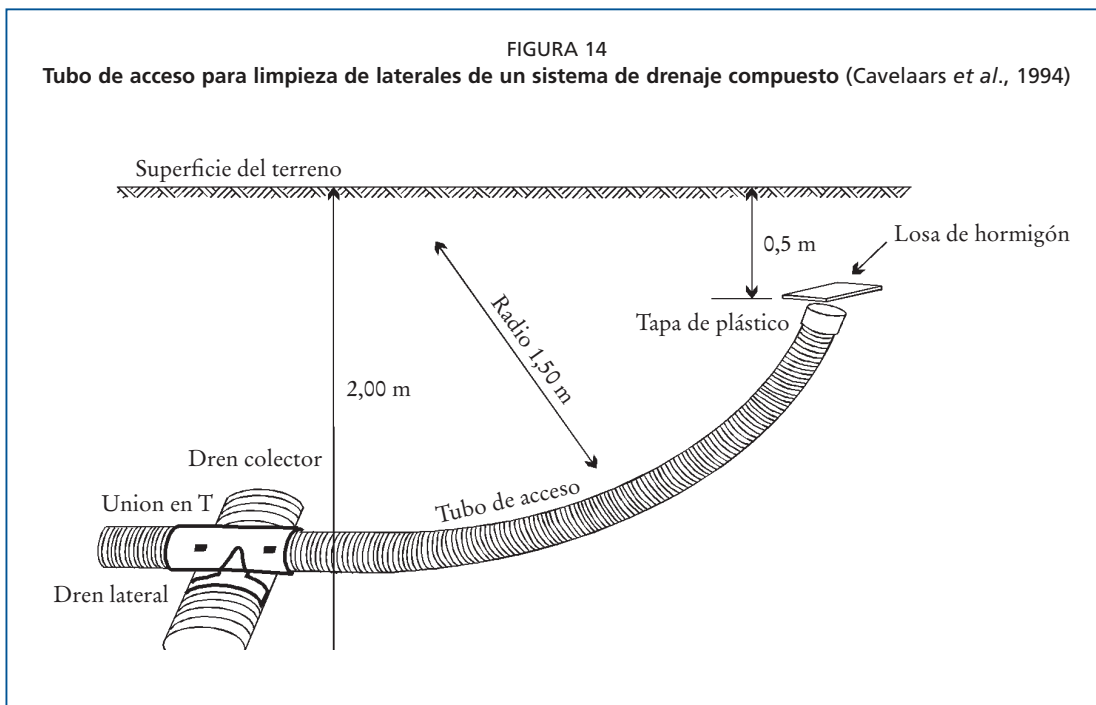


FIGURA 13
Reductores de gradiente (según Eggelmann, 1978)



facilitan la limpieza mediante inyección de agua, sin necesidad de excavar y desmantelar uniones. Una tapa de hormigón con barras de hierro situada encima del tubo de acceso permite su fácil localización desde la superficie del terreno con un detector de metales (Cavelaars *et al.*, 1994).



Estructuras para drenaje controlado y riego subterráneo

Puede haber razones para reducir temporalmente el drenaje, p. ej. por consideraciones ambientales, lavado injustificado y perjudicial de fertilizantes en invierno, riego suplementario y regímenes especiales de manejo de agua para arroz y otros cultivos. Los dispositivos para drenaje controlado pueden instalarse en zanjas abiertas o en drenes enterrados. Para impedir filtraciones alrededor de la estructura deben usarse tubos sin perforar de una longitud de 5 m que dirigen los drenes tanto hacia dentro de la estructura de control como hacia fuera de ella. Pueden utilizarse dispositivos de control sencillos como codos o tapones con un elevador (Figura 15a), o un tapón con una derivación (Figura 15b). En zanjas abiertas se utilizan frecuentemente vertederos de pared. También pueden utilizarse estructuras muy sofisticadas con vertederos de pared (Figura 15c), sensores para el control del nivel de agua, tanto de flotador como eléctricos, colocados en una cubeta situada ya en la línea del dren o a mitad de distancia entre drenes (Madramootoo *et al.*, FAO/ICID, 1997; Schwab y Fouss, 1999). Sin embargo, pueden fabricarse localmente dispositivos de control, sencillos y fiables, con los medios disponibles. Las estructuras de control se construyen de mampostería, de hormigón hecho in situ o con elementos prefabricados.

Algunas veces se utilizan tuberías colocadas sin pendiente que sirven tanto para drenaje como para riego, pero no es necesario mientras el gradiente sea suficientemente pequeño. Se necesitan controles automáticos para mantener el nivel de agua en las salidas de drenaje, que a su vez sirven como entrada de los sistemas de riego subterráneo. No debe practicarse riego subterráneo en zonas áridas donde la salinidad del suelo es un problema potencial.

Capítulo 3

Materiales envolventes

El material poroso colocado alrededor de un dren subterráneo para protegerlo de sedimentación y mejorar su comportamiento hidráulico debe llamarse envoltura de dren. Es importante distinguir entre la definición y la función de una envoltura y la de un filtro.

Durante la elaboración inicial de criterios de diseño de envolturas de dren, a menudo se utilizaron como base de investigación los criterios existentes sobre filtros. Por esta razón, la palabra «filtro» a menudo se usa erróneamente cuando se hace referencia a envolturas de dren. Un filtro es por definición «una sustancia porosa a través de la cual pasa un gas o un líquido para retener materia en suspensión» (Merriam-Webster, 1993). El filtrado también se define como «la retención de suelo u otras partículas sujetas a fuerzas hidráulicas al mismo tiempo que se permite el paso de fluidos» (ISO 10318, 1990). Por tanto, si un *filtro* se utiliza como una envoltura de dren puede eventualmente obstruirse, porque partículas de materia podrían depositarse sobre o dentro del mismo reduciendo su permeabilidad.

Las *envolturas* tienen por objeto mejorar la permeabilidad alrededor de una tubería y actuar como obstáculos permeables para impedir la entrada de cantidades perjudiciales de partículas y agregados de suelo en tuberías de drenaje. Aún así, la mayoría de las partículas pequeñas de suelo y de materia orgánica, suspendidas en el agua que fluye hacia un dren, pasarán efectivamente a través de una envoltura adecuadamente seleccionada y bien instalada sin causar obstrucciones. El material envolvente relativamente grueso colocado alrededor del dren debe estabilizar el suelo mecánica e hidráulicamente, pero no actuar como un filtro.

Además de las funciones ya descritas, las envolturas de dren pueden mejorar las condiciones de la solera del dren. Esta función está asociada principalmente a envolturas de grava en suelos inestables. La grava mejora mecánicamente el sistema suelo-envoltura-dren sirviendo de solera y soporte lateral para tuberías de plástico de gran diámetro (Framji *et al.*, 1987).

Los materiales envolventes usados para proteger drenes subterráneos comprenden casi todos los materiales porosos permeables que están disponibles económicamente en grandes cantidades. Según la composición de las sustancias usadas pueden clasificarse en tres categorías generales: envolturas minerales, orgánicas y sintéticas.

MATERIALES

Envolturas minerales granulares

Las envolturas minerales consisten principalmente de arena gruesa, grava fina y piedras machacadas, que se colocan por debajo y alrededor de la tubería de drenaje durante su instalación. Si estos materiales están bien diseñados e instalados dan buenos resultados, ya que son voluminosos y pueden retener relativamente grandes cantidades de material de suelo sin que su funcionamiento se vea afectado. En muchos casos han funcionado satisfactoriamente durante muchos años en las más diversas circunstancias. Tradicionalmente, el material envolvente de dren más general y ampliamente utilizado es arena gruesa naturalmente graduada o grava fina conteniendo un mínimo de elementos finos. Este material puede ser tan duradero como el propio suelo. Las envolturas bien

diseñadas de grava cribada satisfacen todas las funciones mecánicas e hidráulicas de una envoltura de dren y son las ideales desde un punto de vista físico.

La grava cernida debe ser homogénea, una mezcla bien graduada de arena limpia y grava libre de limo, arcilla y materia orgánica, elementos que podrían afectar adversamente su permeabilidad. Debe evitarse el uso de partículas de caliza ya que un alto porcentaje de cal en envolturas de grava puede causar incrustaciones. Además, la gradación de envolturas de grava debe hacerse de acuerdo con parámetros establecidos (véase el Apartado *Especificaciones para envolturas de grava*).

La utilización de grava como envoltura de dren es actualmente motivo de polémica. Una de las conclusiones de un simposio llevado a cabo en Wageningen, Países Bajos, en 1986, fue la siguiente: «La grava continúa siendo en la actualidad el material filtrante más confiable. En vista del coste de la grava, la elaboración de criterios para diseñar materiales sintéticos merece la máxima prioridad» (Vos, 1987). Sin embargo, en una conferencia llevada a cabo en Lahore, Pakistán, en 1990, que tuvo como objetivo principal el diseño y aplicación de envolturas, se concluyó que los ingenieros no familiarizados con envolturas sintéticas se resistían a recomendar su uso (Vlotman, 1990). Sin embargo, considerando la tendencia actual se puede asumir que envolturas sintéticas gradualmente reemplazarán el uso de grava como material envolvente en futuros proyectos de drenaje.

Envolturas orgánicas

Varios materiales orgánicos, muchos de ellos subproductos de producción agrícola, se han utilizado como envolturas de dren con buenos resultados. Al ser voluminosos pueden usarse en casos donde son de importancia tanto la retención de partículas como la función hidráulica. Pueden aplicarse materiales orgánicos directamente en la zanja sobre la tubería de drenaje como material suelto o pueden recubrir la tubería de drenaje como materiales sueltos enrollados previamente (PLM-sigla en inglés de Prewrapped Loose Materials). Una forma intermedia de aplicación es colocarlos en fajas sobre la tubería de drenaje, aunque esta modalidad está actualmente obsoleta.

Los materiales orgánicos incluyen paja de cereales y de lino, hojas de cedro, bambú, zuros de maíz, virutas de madera, carrizo, ramas de brezo, tepes de césped, residuos de turba y fibra de coco (Juusela, 1958; Framji *et al.*, 1987).

En el noroeste de Europa (Alemania, Bélgica y los Países Bajos) las envolturas orgánicas más comunes eran de turba, paja de lino y fibra de coco. El uso de residuos de turba fibrosa cubriendo tuberías de drenaje ha sido una práctica común hasta fines de la década de 1950. Se ha comprobado que la conductividad hidráulica de los residuos de turba a menudo decrece drásticamente debido a la expansión de la envoltura en condiciones de humedad continua debida p. ej. al riego subterráneo (Rozendaal y Scholten, 1980).

Durante el período siguiente se utilizó paja de lino, que se aplicó originariamente en fajas y más tarde como envoltura enrollada previamente. Sin embargo, el grosor de la envoltura de lino no siempre garantizó la función de retención de partículas. Otras envolturas orgánicas se han utilizado en menor escala, porque estos materiales no siempre estaban disponibles en las cantidades necesarias y su manejo era a

FIGURA 16
Envoltura PLM de fibra de coco



menudo laborioso. El uso de paja no tuvo buenos resultados porque generalmente se descomponía formando una capa de baja permeabilidad alrededor de la tubería.

A fines de la década de 1960 apareció la fibra de coco (Figura 16) (Jarman y Jayasundera, 1975). Al ser relativamente barata se impuso rápidamente en el mercado ya que los residuos de turba de alta calidad comenzaron a escasear y a aumentar de precio (Meijer, 1973) y al mismo tiempo la industria del lino comenzó a declinar. Además, la fibra de coco, al ser más fina, fue considerada un material envolvente más adecuado que la paja de lino cuya estructura es más gruesa. Muy pronto se vio que la fibra de coco era a menudo sensible a la descomposición microbiana (Meijer y Knops, 1977; Antheunisse, 1979, 1980, 1981). Estas envolturas generalmente se descomponían totalmente en un plazo de dos a cinco años, sobre todo en suelos con *pH* mayor de 6. Una década más tarde, muchos agricultores se quejaban de la obstrucción mineral de sus drenes, por lo que se estableció un proyecto de investigación para estudiar el problema. Se hicieron más de 1000 excavaciones, que confirmaron que los problemas de obstrucción mineral, aunque en parte debidos al tamaño grande de los poros de la envoltura de fibra de coco, se debían principalmente a la descomposición de las substancias orgánicas (Blom, 1987).

A mediados de la década de 1980 se hicieron varios intentos para retardar o detener la descomposición de materiales envolventes orgánicos. En Alemania y Francia se utilizó un material llamado «Super-Cocos», cuyas fibras estaban impregnadas con sulfato de cobre (CuSO_4) para matar las bacterias que producían descomposición (Antheunisse, 1983, 1984). Además, algunos materiales contenían alambre de cobre muy fino. Las envolturas «Super-Cocos» tuvieron un éxito limitado porque su descomposición fue solo demorada unos pocos años. Además, la legislación ambiental ilegalizó la instalación de «Super-Cocos» porque los productos químicos se lixiviaban rápidamente. Todavía se usan envolturas de fibra de coco en el noroeste de Europa dado su precio relativamente bajo, pero su uso está disminuyendo en favor de materiales sintéticos.

Las envolturas orgánicas nunca han sido populares en países de climas áridos, porque la relativamente alta temperatura del suelo favorece la actividad microbiana y consecuentemente acelera su descomposición. En tierras bajo riego de los trópicos áridos los materiales envolventes orgánicos frecuentemente fracasan (Van der Molen y Van Someren, 1987). Los buenos resultados de las envolturas orgánicas en los países escandinavos, donde principalmente se utilizó turba fibrosa y viruta de madera, fueron debidos a la menor actividad microbiana por ser las temperaturas del suelo más bajas.

La vida útil y adecuación de materiales orgánicos como envolturas de drenes subterráneos no puede ser predicha con certeza. Eventualmente, la mayoría de las envolturas orgánicas se descompondrán sin causar un serio impacto sobre la estabilidad estructural del suelo circundante. Por tanto, estos materiales deberían usarse solamente en suelos que llegan a ser mecánicamente estables pocos años después de la instalación del sistema de drenaje (Van Zeijts, 1992). Además, las envolturas orgánicas pueden causar reacciones químicas en el suelo que las rodea, pudiendo este proceso dar lugar a la obstrucción bioquímica del dren. Si es probable que ocurra obstrucción con ocre de hierro se justifica la resistencia a instalar envolturas orgánicas. Incluso materia orgánica que se mezcla accidentalmente con material de relleno de zanjas puede aumentar considerablemente el riesgo de obstrucción del dren con ocre (Capítulo 5).

El rápido deterioro de las envolturas de fibra de coco ha estimulado la búsqueda de alternativas sintéticas asequibles. El hecho de que puedan fabricarse envolturas sintéticas más fácilmente según criterios específicos de diseño que las orgánicas, ha influido significativamente en su desarrollo.

Envolturas sintéticas

Materiales sueltos enrollados previamente

Un PLM sintético es una estructura permeable hecha de materiales sueltos (hilos

orientados aleatoriamente, fibras, filamentos, granos, gránulos o cuentas) que revisten una tubería de drenaje corrugada y que se mantienen en su lugar bien mediante una red especial, atados con cuerdas o con ambas cosas. Generalmente, compañías especializadas revisten tuberías de drenaje de plástico corrugado con envolturas PLM sintéticas y en algunos casos en las mismas fábricas de tubería. El producto terminado debe ser lo suficientemente fuerte para resistir el manejo e instalación sin sufrir daño.

Los PLM sintéticos incluyen varios materiales polímeros. Las fibras pueden ser de poliamida (PA), poliéster (PETP-siglas en inglés del tereftalato de polietileno), polietileno (PE) y polipropileno (PP). Las cuentas sueltas de poliestireno (PS) pueden colocarse alrededor de drenes como PLM en láminas perforadas o en mallas de cuerda («geo-rejillas» o «geo-redes»). Las cuentas están sometidas a la compresión debida a la carga del suelo, lo que puede reducir la permeabilidad de la envoltura (Willardson *et al.*, 1980). En varios países europeos, donde la profundidad de drenes varía entre 0,9 y 1,2 m, el efecto de la carga del suelo es sin embargo relativamente pequeño. En el noroeste de Europa cada vez son más usadas envolturas PLM hechas de fibras de restos de PP y también en zonas áridas donde reemplazan a la grava que es más cara.

A continuación se informa sobre los materiales envolventes que se muestran en las

Figuras 17-20. Las cifras sobre cuotas de mercado de varios materiales envolventes corresponden a los Países Bajos en 1997 y se presentan solamente con fines ilustrativos. Los datos se basan en las *longitudes instaladas* de tuberías de drenaje revestidas.

En Bélgica se instalan envolturas PLM hechas de fibras de desecho de polipropileno (PP-300) (Figura 17) casi exclusivamente en proyectos de drenaje privados (cuota: 6 por ciento).

La *envoltura PP-450* (Figura 18) es una envoltura PLM fabricada a partir de filamentos continuos voluminosos. Estos filamentos son residuos de producción de alfombras de fibra de PP. En los Países Bajos constituyen el material envolvente más popular (cuota: 65 por ciento).

La envoltura *PP-700* es un material PLM hecho de fibras nuevas de PP (Figura 19). Revestir tuberías con esta envoltura es bastante laborioso de ahí su mayor precio (cuota: 4 por ciento). Se usa principalmente para diámetros de tubería mayores de 160 mm.

Ocasionalmente se utilizan desechos de fibras de PA debido a la decreciente disponibilidad de fibras de desecho de PP a precios competitivos. Al contrario de las fibras de PP, las fibras de PA absorben agua y como resultado los rollos pueden aumentar substancialmente su peso. Además,

FIGURA 17
Envoltura PLM hecha de fibras
de desecho de polipropileno (PP-300)



FIGURA 18
Envoltura PP-450



para envolturas revestidas homogéneas es más difícil procesar fibras de PA por problemas con la electricidad estática.

El *PS-1000* es un material envolvente PLM fabricado de cuentas compresibles de PS contenidas en una red (Figura 20) y se instala casi exclusivamente en áreas agrícolas donde se cultivan bulbos para flores (cuota: 7 por ciento). En estas áreas, el agua freática contiene una cantidad relativamente alta de partículas en suspensión y el PS ha demostrado ser una envoltura muy eficaz. En este caso, resulta una buena inversión a pesar del mayor precio del PS-1000, ya que ningún agricultor se puede permitir tener sistemas de drenaje que no funcionen.

Los materiales sintéticos se deterioran cuando se exponen a radiación solar (rayos ultravioletas). Experimentos llevados a cabo en un clima templado con envolturas PLM hechas de fibras de PP han indicado que el deterioro puede ser peligroso en tres años (Dierickx, 1998b). La velocidad de deterioro será el doble en zonas áridas y semiáridas donde la radiación anual media duplica la de regiones templadas. Sin embargo, una vez que se han instalado envolturas PLM sintéticas hechas de materias primas adecuadas (p. ej. fibras recicladas de PP) no son sensibles a la descomposición. Por ello, estos materiales son confiables y sustitutos asequibles de envolturas convencionales orgánicas y de grava.

El revestimiento con materiales sueltos está limitado a diámetros de hasta 200 mm. Una vez que las envolturas PLM recubren drenes funcionan similarmente a geotextiles.

Envolturas de geotextil

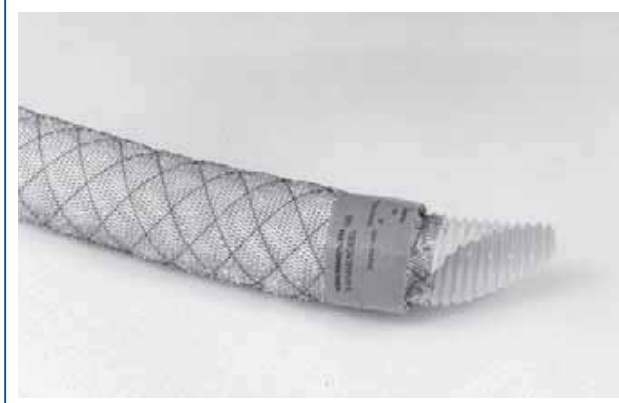
De acuerdo con la norma prEN¹ 30318 (1998) un geotextil se define como un «material textil (sintético o natural) polimérico, permeable y liso, que puede ser tejido, no tejido o tricotado, usado en ingeniería civil para aplicaciones geotécnicas, en contacto con suelos o con otros materiales». Esta definición incluye su aplicación en agricultura, dado que en muchos países la ingeniería civil comprende la de drenaje.

Los geotextiles tejidos se fabrican entrelazando, por lo general en ángulos rectos, dos o más juegos de hilos, fibras, filamentos, cintas u otros elementos. Los geotextiles no tejidos son láminas, sencillas o múltiples, hechos de fibras, filamentos u otros

FIGURA 19
Envoltura PP-700



FIGURA 20
Envoltura PS-1000



¹ prEN es un borrador de norma europea (EN) no finalizado aún.

elementos orientados en una dirección o aleatoriamente. Los geotextiles tricotados se fabrican intercalando uno o más hilos, fibras, filamentos u otros elementos.

Las fibras usadas para producir geotextiles se hacen con las mismas materias primas usadas para los PLM, o sea: poliamida (PA), poliéster (PETP), polietileno (PE) y polipropileno (PP). Las fibras de geotextiles pueden ser monofilamentos, multifilamentos o cintas; estas últimas pueden ser planas, fibriladas o retorcidas. La combinación de materias primas, configuración de fibras y técnicas de tricotado, enlazado o tejido dan lugar a muchos tipos de geotextiles que se diferencian en su apariencia y en sus propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas.

En principio, pueden usarse geotextiles como material envolvente para tuberías de drenaje ya que poseen dos propiedades importantes que debe tener una envoltura de dren: permeabilidad al agua y retención de partículas de suelo. Además, facilitan la aceptación de agua por las tuberías de drenaje y transportan agua en su plano a lo largo de la pared de tubería. Sin embargo, raramente se usan geotextiles tejidos para fabricar envolturas de dren, lo que únicamente se justifica por su relativamente alto precio porque sus especificaciones son sin duda favorables.

En algunos países europeos donde se usan PLM orgánicos y sintéticos hay una resistencia permanente a usar geotextiles como envolturas de dren, porque se asume que su textura fina puede favorecer la obstrucción mineral y por ocre. Aún así, en países con industria geotextil como Canadá, Estados Unidos de América y Francia, estas envolturas se usan con éxito a gran escala. Experimentos de laboratorio, ensayos de campo y experiencias prácticas no dan una evidencia clara del riesgo de obstrucción de geotextiles de textura fina si están bien seleccionados e instalados. Sin embargo, en algunas circunstancias no deberían usarse prioritariamente geotextiles de textura fina (véase el Capítulo 5).

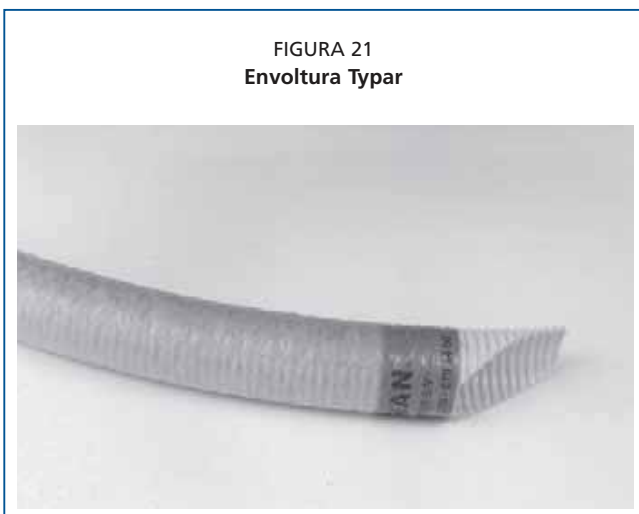
Un ejemplo de una envoltura de geotextil es *Typar*, que es una marca comercial de una tela no tejida hecha de filamentos continuos de polipropileno al 100 por cien sin aglutinantes extraños (Figura 21).

Revestir drenes con geotextiles puede hacerse para cualquier diámetro. Pueden atarse alrededor del dren corrugado tiras de geotextil o colocarse como una funda en él una vez que sus bordes se han cosido.

Los geotextiles también son vulnerables a degradación si se exponen a luz solar e intemperie. Rankilor (1992) recomienda que la exposición de geotextiles a la intemperie no sea superior a dos meses en zonas templadas y solo una semana en zonas áridas y

semiáridas. Los geotextiles fabricados de materia prima orgánica como el yute se descomponen de la misma manera que los PLM orgánicos, mientras que los geotextiles sintéticos, de la misma forma que los PLM sintéticos, no se deterioran.

FIGURA 21
Envoltura Typar



ESPECIFICACIONES PARA ENVOLTURAS DE DREN

En 1922, Terzaghi desarrolló criterios para «filtros» a fin de controlar filtraciones de una presa. Desde entonces estos criterios se han ensayado para su aplicación en envolturas de drenes subterráneos. Terzaghi recomendó que el material del «filtro» debía ser mucho

más permeable que el material base del suelo, pero no ser tan grueso como para que el material base entrara en el «filtro». Los trabajos de Terzaghi han servido de base para muchos otros trabajos hechos desde entonces para el diseño de envolturas de grava. Para envolturas de dren, sus criterios de diseño han sido probados y modificados, pero sus conceptos originales han sido generalmente aceptados.

Van Someren (FAO, 1972) describió investigaciones y directrices para seleccionar y usar materiales de drenaje (tuberías y envolturas) en varios países. En Bélgica y en los Países Bajos se hicieron esfuerzos para desarrollar criterios de diseño especiales para PLM. Los criterios de diseño convencionales fueron en gran medida determinados en laboratorios con modelos analógicos, basados en consideraciones teóricas, y verificados en ensayos de campo. La determinación en el campo del flujo de agua y del movimiento de partículas de suelo cerca de tuberías de drenaje revestidas no fue sencilla sin alterar el sistema. Además, los datos obtenidos con experimentación de campo son inevitablemente confusos ya que son específicos de cada lugar. Resultados obtenidos en algunos lugares no son necesariamente replicables en otros.

Knops *et al.* (1979) publicaron el primer conjunto de directrices completas para seleccionar envolturas enrolladas previamente que se usaban entonces en suelos holandeses. Posteriormente, una serie de proyectos de investigación y de sus evaluaciones prácticas correspondientes, llevados a cabo por varias compañías e instituciones, produjeron criterios para diseñar y usar envolturas de dren hechas de PLM en los Países Bajos (Huinink, 1992; Stuyt, 1992a; Van Zeijts, 1992). Muchos estudios de campo se han hecho sobre los posibles factores que afectan la sedimentación de tuberías.

Las envolturas de dren deben cumplir ciertas especificaciones pero la evaluación visual de los materiales es también importante. Un sistema de drenaje no operará correctamente si las envolturas presentan problemas debido a defectos de enrollado, manejo o instalación, aunque se hayan usado los mejores materiales y se cumplan todas las especificaciones.

Especificaciones para envolturas de grava

En numerosas publicaciones están ampliamente tratadas especificaciones para envolturas de grava. En este apartado se describen todos los temas más importantes. Se dispone de criterios de diseño apropiados para envolturas granulares tradicionales (grava y arena gruesa) que han sido aplicados con éxito en la práctica (Terzaghi y Peck, 1961; Vlotman *et al.*, 2000; Stuyt y Willardson, 1999).

El *US Army Corps of Engineers* y el *US Bureau of Reclamation* han hecho amplios estudios sobre envolturas de grava. Como resultado de ellos se dispone de un conjunto de especificaciones para envolturas de grava cernida que han utilizado con éxito el *Soil Conservation Service* (SCS, 1973), el *US Bureau of Reclamation* (USBR, 1993) y también fuera de Estados Unidos de América.

La curva granulométrica de cierta envoltura de grava debe ajustarse al suelo que se va a drenar y a las perforaciones de la tubería (Willardson, 1979). Además, la grava debe ser internamente estable para evitar la erosión interna de la envoltura. El procedimiento general para diseñar una envoltura de grava para un determinado tipo de suelo es el siguiente:

- Analizar mecánicamente el tamaño de partícula de suelo y de la envoltura de grava propuesta.
- Comparar las dos curvas de distribución del tamaño de partícula.
- Decidir, según algún criterio de diseño, si el material envolvente de grava propuesto es adecuado.

Los criterios de diseño consisten en reglas que indican cómo deducir la distribución del tamaño de partícula necesaria para una envoltura de grava adecuada, a partir de datos de distribución del tamaño de partícula de suelo, para garantizar un funcionamiento satisfactorio de la envoltura.

Crterios de Terzaghi

Los primeros criterios propuestos por Terzaghi (*US Army Corp of Engineers*, 1941) para lo que consideró un «filtro» son los siguientes:

- El diámetro de partícula del 15 por ciento del tamaño del material del filtro (D_{15})² deberá ser al menos cuatro veces mayor del diámetro del 15 por ciento del tamaño de partícula del material del suelo (d_{15}):

$$D_{15} \geq 4 d_{15}$$

Este requisito hará que el material filtrante sea alrededor de diez veces más permeable que el suelo.

- El 15 por ciento del tamaño del material de filtro (D_{15}) no deberá ser más de cuatro veces mayor que el 85 por ciento del tamaño del material del suelo (d_{85}):

$$D_{15} \leq 4 d_{85}$$

Este requisito evitará que las partículas finas de suelo pasen a través del material filtrante.

Bertram (1940), Karpoff (1955) y Juusela (1958) sugirieron criterios de diseño de «filtros» similares o modificados para su uso con drenes subterráneos.

Crterios del US Soil Conservation Service (SCS)

El SCS (1971) ha plasmado los resultados de investigación sobre envolturas de grava en una especificación para evaluar materiales granulares naturales o clasificados artificialmente para su uso como materiales envolventes de dren. Estas especificaciones han sido reemplazadas por otras publicadas más recientemente (SCS, 1988), que distinguen entre «filtro» y «envoltura». La recomendación para materiales naturalmente graduados o una mezcla de arena media y gruesa con grava fina y media para su uso como envolturas es la siguiente:

$$D_{100} \leq 38 \text{ mm}$$

$$D_{30} \geq 250 \mu\text{m}$$

$$D_5 \geq 75 \mu\text{m}$$

Criterios adicionales se recomiendan para impedir la excesiva finura de un material envolvente para su uso en suelos de textura más fina (SCS, 1988):

$$D_{15} < 7 d_{85} \text{ pero } D_{15} \geq 0,6 \text{ mm}$$

$$D_{15} > 4 d_{15}$$

Crterios del US Bureau of Reclamation (USBR)

Para tubos rígidos sin perforaciones el *US Bureau of Reclamation* considera un sistema único la distancia entre juntas, la longitud del tubo y la conductividad hidráulica del material envolvente. Su Manual de Drenaje (USBR, 1978, 1993) contiene gráficos que consideran todos estos factores. El Cuadro 1, tomado de este manual, recomienda gradaciones de envolturas para suelos con diferentes tamaños de paso del 60 por ciento.

En Pakistán, para algunos suelos problemáticos salinos y de textura fina los criterios del USBR dieron lugar a envolturas de grava que fueron obviamente demasiado gruesas, ya que permitían que cantidades excesivas de materiales finos de suelo entraran en los drenes (Vlotman *et al.*, 1990).

² El diámetro de partícula D_x del porcentaje x del tamaño en peso del material filtrante se define como el diámetro del cedazo por el que pasa el x por ciento. Esto también es válido para el parámetro del suelo d_x .

CUADRO 1
Relaciones de gradación entre suelo y diámetros de material envolvente granular graduado (según USBR, 1978, 1993)

Suelo, 60% pasa (diámetro de partículas, mm)	Límites de gradación para envoltura (diámetro de partículas, mm)											
	Límites inferiores, porcentaje de paso						Límites superiores, porcentaje de paso					
	100	60	30	10	5	0	100	60	30	10	5	0
0,02-0,05	9,52	2,0	0,81	0,33	0,3	0,074	38,1	10,0	8,7	2,5	-	0,59
0,05-0,10	9,52	3,0	1,07	0,38	0,3	0,074	38,1	12,0	10,4	3,0	-	0,59
0,10-0,25	9,52	4,0	1,30	0,40	0,3	0,074	38,1	15,0	13,1	3,8	-	0,59
0,25-1,00	9,52	5,0	1,45	0,42	0,3	0,074	38,1	20,0	17,3	5,0	-	0,59

Otros criterios

Como el diseño de paquetes de grava para pozos es similar al de envolturas para drenes subterráneos, los criterios desarrollados por Kruse (1962) para paquetes de grava también pueden aplicarse a envolturas de grava. Estos criterios se basan en la relación del 50 por ciento del tamaño del material del paquete (envoltura) con el 50 por ciento del tamaño del acuífero (suelo) y en la uniformidad de la textura de acuífero y grava (véase el Capítulo 6, Apartado *Propiedades físicas del suelo*). Kruse (1962) observó en todas las relaciones grava-acuífero que el movimiento de arena se reducía al disminuir la uniformidad de la grava (es decir, aumentando su coeficiente de uniformidad) y por ello distinguió entre suelo y paquetes de grava uniformes hasta un coeficiente de uniformidad de 1,78, y suelo y envoltorio de grava no-uniformes para valores mayores. En el Cuadro 2 se muestran las relaciones del tamaño de partículas máximas permisibles propuestas para distintas combinaciones de textura de acuífero y paquete de grava para impedir un movimiento excesivo de material del acuífero.

Además de la relación del 50 por ciento del filtro con el material del acuífero, Pillsbury (1967) también usó la desviación estándar de la diferencia entre los tamaños del 95 por ciento y del 50 por ciento de la curva de gradación de la envoltura de grava dividida entre 1,645 como un criterio para su efectividad. Pillsbury (1967) presentó un gráfico de la relación del tamaño del 50 por ciento envoltura-acuífero respecto a esta desviación estándar, que fue dividido en dos áreas. Envolturas que caían por debajo del límite fueron consideradas insatisfactorias. Pillsbury recomendó una relación envoltura-acuífero menor de 24, basándose en observaciones de algunas envolturas de dren que habían fallado en el Valle Imperial de California. Concluyó que la arena para hacer hormigón que satisface la norma de la American Society for Testing Materials (ASTM) con un tamaño del 50 por ciento menor de 1 mm y una desviación estándar mayor de 1,0 podría ser una envoltura satisfactoria en la mayor parte de condiciones.

Sherard *et al.* (1984a, b) elaboraron criterios para filtros para proteger estructuras hidráulicas. Aunque no fueron preparados para drenaje subterráneo, los principios pueden ser igualmente aplicados para el diseño de envolturas de grava. Los autores establecieron que si un filtro no fallaba con el flujo inicial de agua probablemente era seguro permanentemente. Materiales de granulometría variable dieron mejores resultados que materiales uniformes.

CUADRO 2
Relaciones del tamaño grava/acuífero máximas permisibles (según Kruse, 1962)

Textura del acuífero	Textura del paquete de grava	Relación del tamaño de partícula grava/acuífero (D_{50}/d_{50})
Uniforme (inestable)	Uniforme (inestable)	9,5
Uniforme (inestable)	No-uniforme (estable)	13,5
No-uniforme (estable)	Uniforme (inestable)	13,5
No-uniforme (estable)	No-uniforme (estable)	17,5

Sherard *et al.* (1984b) describieron ensayos con suelos de textura fina y con respecto a tamaños de filtro y de suelo concluyeron lo siguiente:

- En limos arenosos y arcillas (d_{85} de 0,1-0,05 mm) un $D_{15}/d_{85} \leq 5$ es seguro.
- En arcillas de grano fino (d_{85} de 0,03-0,1 mm) un $D_{15} < 0,5$ mm es seguro.
- En limos de grano fino con pequeña cohesión (d_{85} de 0,03-0,1 mm) un $D_{15} < 0,3$ mm es seguro.
- En suelos excepcionalmente finos ($d_{85} < 0,02$ mm) un $D_{15} < 0,2$ o menor es seguro.

Arenas y arenas con grava que contienen fracciones de arena fina y tienen un D_{15} igual o menor de 0,05 mm pueden ser un filtro adecuado aún para las arcillas más finas. Para arcillas con algo de arena ($d_{85} > 1,0$ mm), un filtro con un $D_{15} = 0,5$ mm podría satisfacer el criterio $D_{15}/d_{85} \leq 5$. Para arcillas más finas el criterio $D_{15}/d_{85} \leq 5$ no es satisfactorio, pero los suelos más finos tienden a ser estructuralmente estables y no es probable que fallen. Finalmente, Sherard *et al.* (1984b) encontraron que grava bien graduada fue un filtro excelente para limo muy uniforme o para arena fina uniforme y que no era necesario que la curva de gradación de la envoltura tuviera aproximadamente la misma forma que la curva de gradación del suelo. Envolturas de grava que tengan un D_{15} de 0,3 mm y un $D_{15}/d_{85} \leq 5$ con menos de un 5 por ciento de material más fino que 0,074 mm, serán satisfactorias como materiales envolventes para la mayor parte de suelos problemáticos.

Dieleman y Trafford (FAO, 1976) revisaron los criterios para seleccionar materiales envolventes de grava e incluyeron algunos comentarios respecto a la selección de envoltura para suelos problemáticos. Dierickx (1992b) presentó un resumen de criterios para envoltura de grava procedentes de Estados Unidos de América y el Reino Unido. Este resumen indica claramente que los criterios de diversos orígenes no concuerdan, aún si se tiene en cuenta la diferencia entre la función (mecánica) del «filtro» y la función (hidráulica) de la «envoltura». Este hecho ha generado nuevos proyectos de investigación que obtuvieron nuevos hallazgos, p. ej. la mejora de los criterios existentes que pueden usarse para perfeccionar el diseño de envolturas de grava (Vlotman *et al.*, 1997). Otro hallazgo de interés fue que partículas redondeadas y angulares dieron resultados equivalentes (Vlotman *et al.*, 1992b).

Especificaciones para envolturas enrolladas previamente

Las envolturas enrolladas previamente pueden ser PLM orgánicas, PLM sintéticas y geotextiles. Sus propiedades físicas tales como espesor y masa por unidad de superficie son importantes para controlar la uniformidad de envolturas y su conformidad con las normas de diseño requeridas. El tamaño de aberturas característico, conductividad hidráulica y repelencia del agua determinan las propiedades hidráulicas de envolturas enrolladas previamente. Si se usan materiales granulares sueltos también pueden usarse parámetros de distribución del tamaño de partícula. Dependiendo del tipo de tuberías de drenaje usadas y de la forma en que los materiales envolventes son enrollados a su alrededor, algunas propiedades mecánicas de las envolturas como compresibilidad, daño por abrasión, resistencia a tensión y resistencia a punzadura estática, pueden ser parte de las especificaciones.

En los Países Bajos, las recomendaciones para diseñar y utilizar PLM se han basado en: proyectos de investigación concurrentes, estudios teóricos, modelos matemáticos, estudios empíricos en campos experimentales, modelos analógicos en laboratorios y experiencia práctica durante un período de 30 años (1960-1990) (Stuyt, 1992a).

Espesor

El *espesor* de envolturas enrolladas previamente sirve de referencia para la uniformidad y conformidad. Además, el espesor de una envoltura es considerado un factor importante en análisis teóricos, ya que tiene influencia sobre la capacidad de retención de suelo, la resistencia de entrada de tuberías de drenaje y el gradiente de salida en la interfase suelo-envoltura.

La principal función de una envoltura es retener partículas de suelo. En este aspecto, los criterios de diseño del espesor de envoltura son irrelevantes. Sin embargo, pueden tener porosidades mayores envolturas más gruesas, lo cual explica su popularidad cuando es previsible que haya obstrucción química. Por tanto, al proceder a seleccionar una envoltura, su espesor es un parámetro importante y a menudo significativo en términos de seguridad.

El espesor de una envoltura debería ser una especificación importante si se desea reducir la resistencia de entrada o si la reducción de la resistencia de entrada es el único objetivo del uso de una envoltura (véase el Capítulo 4, Apartado *Resistencia al flujo de aproximación y entrada*). Aunque una envoltura fina puede reducir sustancialmente la resistencia de entrada, la reducción óptima se obtiene con un espesor de 5 mm, siempre que la conductividad hidráulica del geotextil no sea el factor limitante, lo que por general no ocurre (Nieuwenhuis y Wesseling, 1979; Dierickx, 1980). Un mayor incremento de espesor no tiene una influencia marcada en la resistencia de entrada aunque el radio efectivo continúe aumentando, ya que una envoltura relativamente permeable reemplaza el material del suelo que es generalmente menos permeable.

Cuando se utilizan envolturas para reducir el gradiente de salida (véase el Capítulo 4, Apartado *Gradiente de salida*), el espesor de envoltura también es un parámetro de diseño importante. El procedimiento de diseño del espesor de envoltura, tal como ha sido propuesto por Vlotman *et al.* (2000) muestra que aún geotextiles finos (≤ 1 mm) pueden reducir considerablemente el gradiente de salida en la interfase suelo-envoltura. Sin embargo, cuanto mayor sea el diámetro del dren menor será el gradiente hidráulico cerca del dren. Por tanto, envolturas «gruesas» o «voluminosas» (es decir, de espesor > 5 mm) se consideran generalmente más seguras que las finas, sobre todo si los drenes se usan ocasionalmente para drenaje controlado o para riego subterráneo (infiltración subterránea).

Para PLM, la especificación de un espesor mínimo fue introducida para garantizar una cobertura completa con una envoltura más o menos homogénea. De acuerdo a la norma-EN provisional (CEN/TV155/WG18, 1994) se requieren los siguientes espesores mínimos:

- PLM fibroso, sintético: 3 mm (p. ej. fibras PP).
- PLM granular, sintético: 8 mm (p. ej. gránulos de polistireno).
- PLM fibroso, orgánico: 4 mm (p. ej. fibras de coco).
- PLM granular, orgánico: 8 mm (p. ej. virutas de madera, serrín).

La norma-EN provisional especifica además que el promedio del espesor de cada prueba no se debe desviar más del 25 por ciento del declarado por el fabricante.

Se encuentran geotextiles disponibles desde tejidos laminares muy finos hasta materiales de tipo alfombra gruesos.

Masa por unidad de área

La masa por unidad de área no es un criterio de selección y por tanto no está especificada. La determinación de la masa puede llevarse a cabo como medida de control de la uniformidad y conformidad. De acuerdo con la norma-EN provisional, para asegurar que el producto sea homogéneo la masa no debería desviarse más del 25 por ciento de la masa especificada por el fabricante.

Tamaño de abertura característico y criterio de retención

El tamaño de abertura característico, derivado de la distribución del tamaño de poros o curva porométrica de la envoltura, es el criterio de selección más importante ya que determina la efectividad de la envoltura para retener material del suelo circundante.

Generalmente, la retención de partículas de suelo no es problema ya que se dispone de telas muy finas. Sin embargo, investigación de laboratorio y experiencia práctica han revelado que las envolturas finas son vulnerables a obstrucción y colmatado mineral.

La obstrucción de una envoltura es la disminución del número de sus orificios activos cuando el material se pone en contacto con un suelo. Por otro lado, el colmatado es la reducción con el tiempo de los orificios activos de una envoltura debido a la acumulación gradual de partículas dentro y sobre su superficie, p. ej. por partículas suspendidas en agua turbia. Por ello, las especificaciones para envolturas deberían cubrir tanto criterios de retención de suelo como criterios para impedir la obstrucción y colmatado de la envoltura. Investigación intensiva ha dado como resultado criterios para retención de partículas de suelo y recomendaciones con respecto a los problemas de obstrucción y colmatado.

La capacidad de una envoltura para retener material del suelo se expresa como la relación entre el tamaño de poros característico de una envoltura y el tamaño de partícula característico del suelo en contacto con dicha envoltura. En muchos países se utiliza con buenos resultados el O_{90} como tamaño de poro característico para PLM orgánicos y sintéticos y también para geotextiles.

El O_{90} de una envoltura de dren es el tamaño de poro para el que el 90 por ciento de los poros de dicha envoltura es menor. Por lo general, el valor O_{90} se obtiene cerniendo en seco fracciones de arena bien conocidas, por lo que la envoltura por sí misma se usa como cedazo, y se mide la cantidad retenida de cada fracción. También se aplica con este propósito cernido húmedo o hidrodinámico, que usa suelo graduado y por lo general da valores menores de O_{90} que los que se obtienen con cernido en seco.

En 1994, un grupo de trabajo de investigadores e ingenieros desarrolló en Europa un nuevo sistema de clasificación de PLM. Definieron tres clases de envolturas según el tamaño de abertura efectivo de los poros de la envoltura (O_{90}) como sigue:

PLM-XF extrafino	$100 \mu\text{m} \leq O_{90} \leq 300 \mu\text{m}$.
PLM-F fino	$300 \mu\text{m} \leq O_{90} \leq 600 \mu\text{m}$.
PLM-S estándar	$600 \mu\text{m} \leq O_{90} \leq 1100 \mu\text{m}$.

En la norma-EN provisional (CEN/TC155/WG18, 1994) se han aceptado solamente dos clases de PLM, a saber PLM-F y PLM-S.

En los Países Bajos, las directrices prácticas para el uso de envolturas consideran tres valores de O_{90} «estándar»: 450, 700 y 1000 μm , siendo con mucho el de 450 μm el más ampliamente usado en una gran variedad de suelos. Estas cifras fueron aceptadas una vez que Stuyt (1992a) confirmó la evidencia de la validez del parámetro O_{90} utilizando datos de campo. En Bélgica, el O_{90} de una envoltura PLM debe variar entre 600 y 1000 μm para obras públicas de drenaje.

Un **criterio de retención** frecuentemente usado, también llamado criterio de filtro o factor «puente» de una envoltura, es la relación O_{90}/d_{90} . En esta relación, d_{90} es el diámetro de partícula del suelo en contacto con la envoltura donde el 90 por ciento de las partículas en peso es menor. Otros numerosos criterios de retención han sido propuestos en la literatura científica, que han sido publicados en cuadros sinópticos, p. ej. por Dierickx (1993) y Vlotman *et al.* (2000). Sin embargo, el número de criterios confunde al ingeniero proyectista, sobre todo porque muchos criterios son contradictorios. Esto se explica porque los criterios fueron elaborados bajo condiciones de límite muy diferentes y usando técnicas y equipos diversos.

Experimentos de laboratorio han indicado claramente que la probabilidad de retención de partículas de suelo es mayor cuando el tejido es más grueso. Por tanto, el tamaño de poro característico de una envoltura puede ser mayor para envolturas gruesas para una misma capacidad de retención. Sin duda, los criterios de retención están ligados al espesor de envoltura.

A partir de estudios de laboratorio con modelos de suelos analógicos, Dierickx (1987) y Dierickx y Van der Sluys (1990) dedujeron los siguientes simples criterios de retención para uso en drenaje subterráneo:

- $O_{90}/d_{90} \leq 5$ para envolturas «gruesas» ≥ 5 mm (PLM).
- $O_{90}/d_{90} \leq 2,5$ para envolturas «finas» ≤ 1 mm (geotextiles).

Para envolturas con un espesor variable entre 1 y 5 mm, la relación O_{90}/d_{90} puede ser interpolada paso a paso (Dierickx, 1992a) o linealmente (Vlotman *et al.*, 2000). El procedimiento paso a paso da un valor de O_{90}/d_{90} para un rango de espesores y es en cierto modo más práctico que el procedimiento lineal que proporciona un valor específico de O_{90}/d_{90} para cada espesor.

Los criterios de retención para espesores de PLM y geotextiles entre 1 y 5 mm de acuerdo con el procedimiento de fases sucesivas son:

- $O_{90}/d_{90} \leq 3$ para espesores entre 1 y 3 mm.
- $O_{90}/d_{90} \leq 4$ para espesores entre 3 y 5 mm.

Considerando el criterio de retención de una envoltura fina, la mayoría de los problemas en drenaje subterráneo serán evitados para envolturas en las que el $O_{90} \geq 200 \mu\text{m}$.

Observaciones de campo de Stuyt (1992a, b) confirmaron en gran medida los resultados de laboratorio. Stuyt investigó con una mini-cámara de vídeo la relación entre el tamaño O_{90} de materiales envolventes y el espesor de la capa de sedimento dentro de tuberías cinco años después de su instalación. En total se investigaron 9634 m de drenes (184 laterales) con tuberías que tenían diámetros externos de 60 y 65 mm. En los Países Bajos, no se toleran generalmente capas de sedimento mayores de 15 mm. El tamaño d_{90} de los suelos fue en la mayor parte de los casos de aproximadamente 150 μm . La correlación entre el espesor de la capa de sedimento dentro de las tuberías y el tamaño O_{90} de la envoltura fue significativa (Cuadro 3). Sin reparar en la medida O_{90} , las envolturas voluminosas retuvieron más suelo que las finas. Envolturas con valores mayores de O_{90} , es decir las que tenían aberturas más grandes, presentaban peores propiedades de retención. La materia prima con la cual se fabricaron las envolturas no fue significativa. Stuyt (1992a) también encontró que las relaciones O_{90}/d_{90} propuestas anteriormente eran válidas para los suelos problemáticos investigados. La mayor parte de las envolturas utilizadas en los campos experimentales tenían relaciones O_{90}/d_{90} más bien altas (4 a 5).

Experimentos con agua turbia o cargada con partículas de suelo en suspensión indican que los geotextiles son vulnerables al colmatado cuando $O_{90}/d_{90} \leq 1$ (Dierickx, 1990; Faure, 1991). Por tanto, la relación $O_{90}/d_{90} = 1$ es el límite más bajo para la retención de partículas de suelo, para cualquier espesor de envoltura. Los fenómenos de obstrucción y colmatado de una envoltura no son sin embargo tan evidentes, ni en experimentos de laboratorio con suelos ni en experimentos de campo. Por ello, el límite mínimo $O_{90}/d_{90} \geq 1$ debe considerarse más una recomendación que un criterio de diseño rígido.

En la investigación llevada a cabo por Stuyt (1992a), envolturas con un valor de O_{90}/d_{90} cercano a 1 tuvieron espesores de sedimento tan bajos que las envolturas parecían actuar como filtros. Por ello, en el caso de geotextiles finos la relación O_{90}/d_{90} debería estar próxima al límite superior. Por otro lado, el límite superior, establecido en 5 para materiales voluminosos (Dierickx, 1987), parece ser seguro para PLM voluminosos,

CUADRO 3
Valores ajustados para el espesor de sedimentación (mm) mediante un modelo de regresión, dependiendo del tamaño efectivo de abertura de los poros de la envoltura (O_{90}) y del tipo de envoltura (fina o gruesa), para observaciones hechas en tres campos experimentales en los Países Bajos (según Stuyt, 1992a)

O_{90} (μm)	Campo experimental					
	Uithuizermeeden		Valthermond		Willemstad	
	Fina	Voluminosa	Fina	Voluminosa	Fina	Voluminosa
250	2,1	0,9	4,5	0,8	9,7	8,5
500	3,9	2,6	6,3	2,5	11,0	10,2
1000	5,6	4,3	8,0	4,3	13,2	11,9

dato que se tolera un espesor máximo de sedimento de 15 mm en tuberías de diámetro externo de 60 y 65 mm (Cuadro 3). En suelos con cierta cohesión, y por tanto con cierta estabilidad estructural, han sido utilizadas con éxito envolturas voluminosas con relaciones O_{90}/d_{90} tan altas como 7.

Por ello, en Bélgica y los Países Bajos el criterio de retención O_{90}/d_{90} aplicado satisfactoriamente para envolturas, fue adoptado como principal parámetro de diseño. Las recomendaciones para la utilización de envolturas se basan también en algunas consideraciones adicionales (Huinink, 1992; Van Zeijts, 1992) pero el criterio O_{90}/d_{90} es el más importante.

Tejidos fabricados localmente tales como urdimbre de alfombras, que satisfagan o puedan satisfacer los requisitos anteriores con algunas modificaciones, son tan adecuados como geotextiles importados. Por tanto, pueden usarse como materiales envolventes fiables.

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica de envolturas debe ser mayor que la del suelo para reducir la resistencia de entrada de tuberías de drenaje, de forma que no exista presión hidráulica fuera de la envoltura. De las investigaciones de Nieuwenhuis y Wesseling (1979) y Dierickx (1980) se puede concluir que una reducción sustancial de la resistencia de entrada se obtiene cuando $K_e/K_s \geq 10$, donde K_e es la conductividad hidráulica de la envoltura y K_s la del suelo (véase el Capítulo 4, Apartado *Dren con envoltura*).

La conductividad hidráulica, perpendicular o en el plano de la envoltura, difícilmente puede ser un problema, porque las envolturas son mucho más permeables que el suelo circundante que deben retener. Aún bajo carga, la conductividad hidráulica de envolturas compresibles satisfará los requisitos de conductividad.

Sin embargo, si se colocan envolturas en contacto con suelo, pueden llenar los poros partículas de suelo y obstruir parcialmente sus orificios con resultado de disminución de la conductividad hidráulica en la interfase suelo-envoltura. Además, las envolturas se pueden colmatar como resultado de depósitos de partículas, precipitados químicos o de ambos y con el tiempo llegar a ser menos permeables. Es muy difícil evaluar la obstrucción y colmatado de envolturas. De cualquier manera, se puede asumir que si se tiene en cuenta el límite inferior de los criterios de retención se garantiza una relación favorable de conductividad hidráulica.

Repelencia del agua

Los PLM no presentan problemas para mojarse mientras que los geotextiles pueden tenerlos y la repelencia del agua puede ser un problema. Esta repelencia conlleva que se necesita una mínima carga hidráulica sobre el geotextil antes de que a través de él empiece a fluir agua (Lennoz-Gratin, 1992). Una vez que ha entrado agua en la tubería a través de la envoltura, el problema de la repelencia se soluciona y por lo general no se repetirá. La resistencia a empaparse también disminuye cuando el geotextil entra en contacto con un suelo húmedo. Trabajo de investigación llevado a cabo por Dierickx

En resumen, pueden aceptarse los siguientes criterios de retención para geotextiles y PLM:

$1 \leq O_{90}/d_{90} \leq 2,5$ para espesor de envoltura ≤ 1 mm.

$1 \leq O_{90}/d_{90} \leq 3,0$ para espesor de envoltura entre 1 y 3 mm.

$1 \leq O_{90}/d_{90} \leq 4,0$ para espesor de envoltura entre 3 y 5 mm.

$1 \leq O_{90}/d_{90} \leq 5,0$ para espesor de envoltura ≥ 5 mm.

$O_{90} \geq 200 \mu\text{m}$.

Para minimizar el riesgo de colmatado mineral se recomienda que $O_{90}/d_{90} \geq 1$; además generalmente se prefieren envolturas que tengan relaciones O_{90}/d_{90} cercanas al límite superior del rango de valores propuesto.

(1996a) mostró que el problema de empapamiento es principalmente un problema inicial de geotextiles secos. La carga inicial necesaria para la mayoría de los geotextiles ensayados es menor de 2 mm. En otros casos varía entre 5 y 30 mm pero un geotextil necesitó una carga inicial de 64 mm. Aunque la repelencia del agua inicial no parece ser general, no deben usarse como envoltura de dren geotextiles que presenten este fenómeno, para evitar el riesgo de deterioro de la estructura del suelo cerca de la envoltura debido a acumulación inicial de agua.

De acuerdo con la norma ISO 811 (1981) para la determinación de la resistencia a penetración de agua en materiales textiles, en los países de la Unión Europea se ha adoptado un procedimiento de ensayo para examinar cualitativamente en geotextiles la repelencia del agua (prEN 13562, 1999).

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de las envolturas son en su mayoría de importancia secundaria. No presentan problemas específicos geotextiles usados como envoltura de dren, ya que son diseñados para ello y se usan normalmente en las circunstancias más complejas. Además, los problemas que surgen ocasionalmente en su manejo (p. ej. rasgaduras) pueden repararse antes de la instalación.

La *compresibilidad* de envolturas comprimibles tiene un gran efecto sobre el tamaño de abertura característico y sobre la conductividad hidráulica. El tamaño de los orificios normalmente disminuye en estado comprimido de modo que un factor de seguridad surge automáticamente. La conductividad hidráulica también decrece, si bien la naturaleza altamente permeable de la envoltura asegura que la relación de conductividad hidráulica se obtenga también en estado comprimido. Además, la compresibilidad de las envolturas más gruesas compuestas de fibras también más gruesas es pequeña, pero no deberían usarse como envoltura de dren envolturas gruesas fácilmente compresibles hechas de fibras finas.

Abrasión es el desgaste de una parte de la envoltura por fricción con otro material, ya sea durante el transporte o instalación de tuberías de drenaje revestidas previamente. Los agujeros debidos a abrasión o a cualquier otra causa, detectados antes de la instalación, deben repararse en el campo si no son desmedidos. Es menos probable que ocurra abrasión durante la instalación, dado el escaso tiempo que la tubería forrada discurre a través de la máquina.

Los geotextiles se enrollan manual o mecánicamente alrededor de tuberías de drenaje, por lo que es necesaria cierta *resistencia a la tracción*. Dierickx (1994) propuso una resistencia a la tracción de 6 kN/m determinada de acuerdo al ensayo de tracción de gran anchura (EN ISO 10319, 1996). Los geotextiles deben formar puentes entre las corrugaciones de tuberías de drenaje grandes y no deben ceder entre las corrugaciones a causa de la carga de suelo. Por tanto, la elongación debe ser pequeña, pero este requisito tiene significado solamente si el geotextil está enrollado apretadamente. Como esto nunca ha sido un problema práctico tampoco se han establecido requisitos de elongación.

La *resistencia a la punzadura estática* también es solamente aplicable en drenes con corrugaciones grandes donde un geotextil fuertemente enrollado puentea las corrugaciones. El geotextil debe resistir la carga del suelo entre corrugaciones y a punzaduras causadas por piedras o terrones de suelo duro. Estos fenómenos son simulados por un ensayo de punzadura estática, mediante el cual puede determinarse la fuerza requerida para hacer pasar un émbolo plano a través de un geotextil. No existen requisitos ya que este problema nunca ha ocurrido en drenaje subterráneo.

DISPONIBILIDAD Y COSTE

La disponibilidad y el coste de los materiales de drenaje están estrechamente interrelacionados. Los costes varían continuamente dado que dependen de varios factores parcialmente impredecibles, tales como la tasa de cambio de divisa y el coste de mano

de obra. Como referencia, en este capítulo se dan varias indicaciones sobre costes de materiales de drenaje.

Aquí no se especifica el coste de envolturas de grava porque la disponibilidad local de material granular adecuado está declinando rápidamente. Además, el coste de instalación depende en gran parte de circunstancias locales. En el Proyecto Integrado de Mejora de Suelos y Aguas en Egipto (ISAWIP-siglas en inglés), el coste de envolturas de grava locales era cuatro veces el de envolturas de tejido sintético importadas de Canadá (Metzger *et al.*, 1992). En el Cuarto Proyecto de Drenaje del Instituto Internacional de Investigaciones sobre Anegamiento y Salinidad (IWASRI-siglas en inglés) de Pakistán, el coste de envolturas sintéticas fue un 40 por ciento menor que el coste de envolturas de grava. La instalación de envolturas sintéticas fue además más fácil y más rápida (IWASRI, 1997). Así, aún si el precio de la grava es competitivo, se deben agregar los costes de combustible y de mano de obra, y por tanto es irrelevante considerar solamente el precio de la materia prima. Vlotman *et al.* (2000) citan costes de envolturas de grava (material y transporte) en varios proyectos en Pakistán. En todos los proyectos, los costes de material y transporte de materiales sintéticos fueron inferiores al coste de la grava. Lamentablemente, en este análisis no se incluyó el alto coste de instalación de grava comparado con el de instalación de tuberías revestidas previamente. La relación coste/beneficio es ciertamente favorable a envolturas PLM y a geotextiles.

Las envolturas PLM hechas de fibras de PP y de fibras de coco dominan el mercado en el noroeste de Europa. Sólo ocasionalmente se utilizan envolturas PLM hechas de fibras de turba.

En el Cuadro 4 se presenta, como indicación del coste de materiales de drenaje, el de tuberías y envolturas PLM en los Países Bajos. Los precios absolutos no se dan, pero se especifica el coste relativo de tubería y material envolvente para varios diámetros de tuberías y materiales envolventes. Las cifras están basadas en tubería de PVC corrugada y se obtuvieron de contratistas con una producción elevada. El precio de instalación de un metro de tubería de drenaje forrada previamente es aproximadamente igual al de un metro de tubería de 60 mm sin envoltura.

En el Cuadro 4 se puede observar que el precio de envoltura PLM más bajo comprende una parte sustancial del precio de una tubería revestida previamente, especialmente en tuberías de menor diámetro. En 1998, en los Países Bajos hubo un ligero incremento del precio de fibras de residuos de polipropileno. Estas fibras no se encuentran ya disponibles en las grandes cantidades que fueron utilizadas anteriormente. Las compañías holandesas de envoltura de tubería están experimentando con otros materiales de residuos sintéticos, en un esfuerzo por comercializar envolturas competitivas para los próximos años.

La selección de un material envolvente depende de varios factores siendo el precio obviamente importante. La facilidad de manejo del material es también un factor a tener en cuenta. Las envolturas de fibra de coco liberan cantidades sustanciales de polvo durante el manejo e instalación, sobre todo en tiempo seco, mientras que las de fibra de PP no. Experiencias previas de los agricultores son importantes porque en general tienden a solicitar una envoltura similar a la usada anteriormente.

REVISIÓN DE EXPERIENCIA LOCAL SOBRE MATERIALES DE DRENAJE

Es esencial una caracterización adecuada de las propiedades del suelo, condiciones de campo (p. ej. la profundidad de la capa freática) y propiedades físicas de los materiales envolventes. En este contexto, el término «suelos problemáticos» es más bien vago y necesita una nueva definición. Esto también ocurre con los materiales envolventes, porque una descripción genérica como «envoltura de PP» no tiene significado alguno, ya que puede abarcar todo el intervalo desde geotextiles finos hasta PLM voluminosos.

Generalmente, en un proceso de selección de una envoltura es muy útil comparar sistemáticamente la experiencia obtenida en otros lugares. Las envolturas sintéticas, ya

CUADRO 4

Coste relativo de envolturas PLM en los Países Bajos en 1998, expresado como porcentaje del coste de la envoltura respecto a una tubería de PVC corrugado junto con un producto revestido previamente, sin incluir el coste de instalación. El tamaño (O_{90}) está especificado en paréntesis

Coste relativo de varios materiales envolventes										
Diámetro de tubería (mm)	Longitud de rollo (m)	Typar	Fibras de coco	Fibras de residuos de polipropileno	Fibras de residuos de polipropileno	Envoltura tejida de poliéster	Fibras de coco	Gránulos de poliestireno en red	Fibras de polipropileno	Fibras de polipropileno (pesada)
		(270)	(1000)	(300)	(450)	(400)	(700)	(1000)	(700)	(700)
50	200	43	46	47	49	50	54	-	60	75
60	150	40	50	44	46	46	50	71*	57	73
65	150	35	39	39	41	41	46	62	52	69
80	100	33	37	39	41	41	43	-	49	65
100	100	31	40	40	42	37	43	-	47	64

* El diámetro externo de la tubería de 60 mm forrada es 100 mm, o sea el espesor de la envoltura es 20 mm.

sean PLM o geotextiles, han demostrado ser confiables y durante los últimos 20 años se han utilizado con éxito en Canadá, Estados Unidos de América y Europa. Estos materiales también se han usado satisfactoriamente en experiencias de campo a gran escala en Egipto y Pakistán. En este último país también se han usado como envoltura para drenes interceptores. Esto demuestra la posibilidad de transferir materiales sintéticos de una región a otra.

Framji *et al.* (1987) resumieron el uso de materiales envolventes en un gran número de países. Estos datos se han incluido en el Cuadro 5, que se ha ampliado con información adicional de otras fuentes, incluyendo la proporcionada por los participantes en el Curso Internacional de Drenaje de Tierras (Wageningen, 1997-1999). En el siguiente apartado se describen brevemente algunas experiencias locales que se consideran meramente informativas.

Zonas áridas y semiáridas

En *Etiopía*, en el proyecto de drenaje *Melka Sadi Pilot* se llevaron a cabo ensayos para evaluar envolturas de drenaje. En un proyecto piloto se probaron tres envolturas diferentes, que comprendían ceniza roja disponible localmente, grava y un filtro de tela manufacturado. El coste de la grava fue seis veces el del filtro de tela. El funcionamiento de grava y ceniza fue mejor que el del filtro de tela (Woudeneh, 1987).

En *Egipto*, funcionaron satisfactoriamente materiales envolventes voluminosos producidos localmente como fibras de residuos de PP y PA (O_{90} de 330 y 400 μm respectivamente) (Dierickx, 1992a). Sin embargo, el forrado de tuberías de drenaje no fue satisfactorio ocasionalmente. El hilo de las tuberías revestidas previamente era flojo y el material envolvente no cubría totalmente la tubería. Tras el transporte y manejo en campo aparecían áreas sin cubrir en muchas partes de la envoltura y además el precintado de las mismas en ambos extremos del rollo algunas veces era inadecuado por lo que la envoltura quedaba suelta (DRI, 1997).

En los distritos de riego del noroeste de *México* se fabrican localmente tubos de PE corrugado de un diámetro de 100 mm para laterales y de 150 mm para colectores. Deben cumplir con las normas ASTM (Capítulo 9). Las tuberías para colectores son aproximadamente dos veces más caras que las de laterales. Como envoltura de dren se usan láminas de poliéster cuyo coste es el 30 por ciento del coste de la tubería forrada.

Un resultado interesante de recientes proyectos de ensayo de envolturas en *Pakistán* es que los materiales sintéticos producidos en el país funcionaron bien en laboratorio y han mostrado potencial para su uso en campo. No es improbable que IWASRI pueda

recomendar eventualmente a la *Water and Power Development Authority* de Pakistan (WAPDA) el reemplazo de envolturas de grava por materiales sintéticos fabricados localmente. Estos materiales dieron mejores resultados que materiales más finos locales e importados y por tanto son objeto de ensayos de campo adicionales. En el proyecto de recuperación de tierras y control de la salinidad *Mardan Scarp* de Pakistan, Dierickx *et al.* (1995) recomendaron envolturas con un O_{90} entre 200 y 400 μm .

En *Perú*, están fácilmente disponibles grava y arena gruesa a un coste muy razonable y han sido instaladas con éxito a mano y con máquinas zanjadoras. El uso de tubos de cerámica y hormigón no ha tenido mucho éxito. Muchos suelos son muy inestables y la instalación correcta de drenes fue complicada. La instalación manual fue bastante lenta y la anchura de excavación en la superficie del terreno fue de 6 a 15 veces la de la zanja abierta por una máquina zanjadora. Los tubos de hormigón fueron caros porque tuvieron que fabricarse con cemento resistente a sulfatos, ya que la mayor parte de los suelos del Perú que son aptos para agricultura contienen altos niveles de sulfato de calcio. Además, el ritmo de producción de tubos de hormigón fue bastante bajo. Entre 1983 y 1985 se instalaron 400 km de tubería corrugada de 65 y 100 mm. Estas tuberías fueron fabricadas en Perú con un extrusor importado de Europa (De la Torre, 1987).

Trópicos húmedos

En *Costa Rica*, se importaron tuberías corrugadas de Estados Unidos de América para drenar plantaciones frutales, principalmente plataneras, especialmente en arenas de textura de media a gruesa. En suelos más finos, con baja estabilidad estructural, las tuberías fueron en su mayoría forradas previamente con geotextiles, p. ej. con poliamida hilada (Murillo, 1987).

En *la India*, se fabrican localmente materiales de drenaje. Se han instalado sistemas de drenaje de tierras agrícolas únicamente de forma experimental. Se han colocado drenes sin material envolvente en suelos arcillosos pesados y los sistemas funcionan satisfactoriamente. Se han utilizado con éxito geotextiles hechos localmente y raramente han surgido problemas (Oosterbaan, 1998). A mediados de la década de los ochenta se investigó en áreas piloto el funcionamiento de sistemas de drenaje subterráneo instalados en zanjas excavadas a mano y usando tubos de cerámica (Singh, 1987). En 1998, la mayoría de los sistemas de drenaje se instalaba manualmente.

Zonas templadas

En *Bélgica*, dejaron de instalarse tubos de cerámica en 1975 cuando fueron reemplazados por tuberías de PVC corrugado. El uso de envolturas está muy difundido porque en casi todos los suelos existe riesgo potencial de colmatado. Los materiales envolventes han evolucionado desde paja de lino y fibras de coco hasta fibras sintéticas sueltas. Actualmente se usa casi exclusivamente fibra de PP sintético suelto pero la fibra de coco todavía está disponible.

Para sistemas de drenaje subterráneo de tierras agrícolas en los *países escandinavos* a menudo se usa serrín de coníferas como material envolvente. En *Dinamarca*, en suelos inestables la tubería de drenaje se protege del colmatado mineral mediante una lámina sintética colocada por debajo de la tubería y con grava o serrín a los lados y por encima de la tubería. En *Noruega*, el 50 por ciento del serrín se descompone después de 20 años, aunque algunos drenes han estado en operación más de 30 años, lo cual puede deberse a las bajas temperaturas de Escandinavia. El serrín se aplica en capas de 50 a 70 mm de espesor (Mortensen, 1987).

Aproximadamente el 60 por ciento de las tuberías de drenaje instaladas en la antigua *Alemania Occidental* fueron con envoltura (Eggelsmann, 1982). Se han usado ampliamente envolturas orgánicas de turba, paja de centeno y fibra de coco. Se fabricaron incluso envolturas de viruta de madera conteniendo taninos a fin de impedir o reducir la formación de ocre (Eggelsmann, 1978). Se han utilizado diversas clases de

fibras y gránulos sintéticos pero los materiales más usados son geotextiles y envolturas de fibra de PP suelto.

Solamente el 5 por ciento de las tuberías de drenaje instaladas en **Francia** necesitan material envolvente. Las envolturas han evolucionado simultáneamente con las tuberías y mecanización del drenaje. Inicialmente se usaron ampliamente envolturas de fibra de coco, pero el riesgo de descomposición microbiológica de esta fibra obligó al uso de envolturas de fibra sintética suelta y más adelante de geotextiles. En la actualidad se utilizan casi exclusivamente geotextiles (Lennoz-Gratin, 1987).

En los **Países Bajos**, las recomendaciones para la selección de PLM son las siguientes (Huinink, 1992; Van Zeijts, 1992):

- No deben usarse envolturas conteniendo fibra de turba y «PP-450» en caso de riesgo potencial de ocre de hierro y si los drenes se utilizan también para riego subterráneo durante el verano.
- No requieren envolturas los suelos arcillosos evolucionados o «maduros» con un contenido de arcilla superior al 25 por ciento.
- Para la mayoría de otros suelos, como los arcillosos «inmaduros» con un contenido de arcilla superior al 25 por ciento y arenosos (francos), francos (arenosos), franco limosos y turbosos, puede seleccionarse cualquier envoltura siguiendo las recomendaciones especificadas en el Cuadro 6.
- Se excluyen suelos arcillosos con un contenido de arcilla menor al 25 por ciento, limos y arenas muy finas, que deberían drenarse con «PP-450» o en caso de ocre de hierro solamente con «PP-700».

En los Países Bajos, se usan materiales envolventes «finos» solamente con gran precaución y solo en suelos arenosos muy finos y altamente inestables (diámetro de partículas medio < 120 µm). Por diversas razones este tipo de envolturas nunca ha

CUADRO 6

Aplicabilidad de envolturas de dren enrolladas previamente más populares en los Países Bajos (adaptado de Huinink, 1992)

Material envolvente	Tipo de suelo ¹						
	Suelos con contenido de arcilla > 25 % a la profundidad del dren		Suelos con contenido de arcilla < 25 %, suelos francos y de textura muy fina, arenas estructuralmente inestables (diámetro de partícula medio < 120 µm)		Arenas francas y depósitos eólicos	Suelos arenosos (diámetro de partícula medio > 120 µm)	Suelos turbosos y turbas con capa superior del suelo arcillosa
	¿Perfil del suelo maduro al nivel de drenes?						
	Sí	No	Sí	No			
Envolturas «voluminosas» (con espesor ≥1mm)							
Coco (O_{90} = 700 o 1000 µm)	Ninguna ²	Sí			Sí	Sí	Sí
Mezcla turba/coco, fibras de turba	Ninguna ²	Sí ³			Sí ³	Sí ³	Sí ³
Fibras de polipropileno de 450 µm	Ninguna ²	Sí ³	Sí ³	Sí ³	Sí ³	Sí ³	Sí ³
Fibras de polipropileno de 700 µm	Ninguna ²	Sí	-- ⁴	-- ⁴	Sí	Sí	Sí
Gránulos de poliestireno	Ninguna ²	Sí			Sí	Sí	Sí
Envolturas «finas» (con espesor <1 mm)							
Láminas de fibra de vidrio, Cerex, Typar, envoltura tejida	Ninguna ²		Sí ^{3,5}			Sí ^{3,5}	

¹En perfiles de suelos estratificados la selección de envoltura debe basarse en la capa con menor contenido de arcilla.

²No es necesaria envoltura; el suelo es estructuralmente estable y el riesgo de colmatado mineral de la tubería de drenaje es pequeño.

³No instalar este material envolvente si hay riesgo de colmatado con ocre de hierro o si los drenes se usan para drenaje controlado o para riego subterráneo.

⁴Usar este material envolvente solamente si hay un serio peligro de que el ocre de hierro ciegue los drenes.

⁵No usar una envoltura fina si el perfil del suelo a la profundidad de drenes contiene capas de turba.

llegado a ser muy popular. El precio de las envolturas finas no es competitivo y la mayoría de agricultores prefieren simplemente envolturas que tengan «un espesor visible y sustancial», ya que están convencidos que estas envolturas ofrecen un mejor servicio que las finas. Datos fiables, obtenidos en proyectos de investigación en áreas piloto que muestran claramente que este punto de vista «tradicional» no está siempre justificado, no han tenido un efecto apreciable. *La tradición es sin duda un factor importante cuando se procede a la selección de materiales de drenaje, especialmente envolturas.*

En las Marismas del estuario del Guadalquivir, en el sur de *España*, los tubos de cerámica son los más utilizados, aunque también se han usado tuberías de plástico corrugado. Los tubos de cerámica tienen un diámetro interior de 80 mm y una sección exterior cuadrada con un pequeño agujero longitudinal en cada esquina para asegurar una cocción uniforme de la arcilla durante el proceso de fabricación. Los drenes de PVC corrugado tienen un diámetro de 50 mm. La diferencia de coste entre los drenes de cerámica y PVC es pequeña y por tanto los agricultores prefieren los tubos de cerámica de diámetro mayor (Martínez Beltrán, 1987). Los drenes se instalaron durante la estación seca cuando el nivel freático estaba por debajo del nivel de drenes. Estos drenes no requieren envolturas porque los suelos de las Marismas son muy estables debido a que su contenido en arcilla supera el 65 por ciento. Nunca se ha observado colmatado mineral de tuberías de drenaje excepto en drenes cuyas salidas a colectores abiertos han estado sumergidas durante períodos de lluvias intensas.

En suelos franco arcillosos y franco limosos de la cuenca del Ebro, en el noreste de España, se instalaron en la década de 1970 drenes de PVC corrugado con envoltura de fibra de coco. No hay información sobre el funcionamiento de estos materiales de drenaje. También se han instalado drenes de PVC corrugados con envoltura de fibra sintética en suelos arenosos del delta del Ebro.

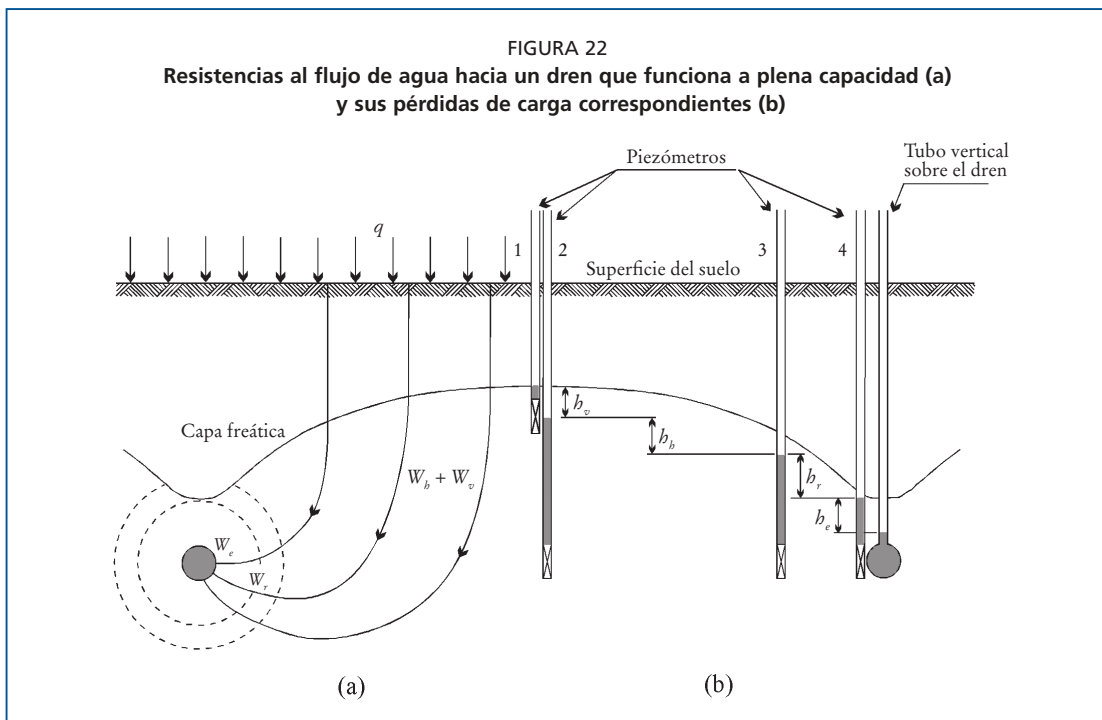
Capítulo 4

Flujo de entrada de agua en el dren y dentro de la tubería

FLUJO HACIA EL DREN

Según Ernst (1954), el flujo del agua hacia un dren subterráneo consta de: flujo vertical descendente desde el nivel freático hasta el nivel del dren, flujo horizontal hacia el área próxima al dren, flujo radial hacia el dren y flujo de entrada de agua en el propio dren. Cada uno de estos flujos está sometido a una *resistencia* específica (Figura 22a). Para flujo en régimen permanente, la resistencia total es la suma de las resistencias vertical, horizontal, radial y de entrada. Estas resistencias pueden determinarse mediante piezómetros estratégicamente ubicados (Figura 22 b). Los piezómetros son tubos rígidos sin perforar de pequeño diámetro, con un filtro corto en su extremo inferior. El nivel del agua en el piezómetro representa la carga hidráulica en el suelo alrededor del filtro. Las diferencias de carga son una medida de las resistencias mencionadas. La pérdida total de carga (h_c) es la suma de todas las diferencias indicadas en la Figura 22b:

- La *pérdida de carga vertical* (b_v) es la diferencia de nivel de agua entre los piezómetros 1 y 2, situados en el punto medio entre dos drenes, con los filtros situados respectivamente en la proximidad del nivel freático y a la profundidad del dren.
- La *pérdida de carga horizontal* (b_h) debida principalmente al flujo horizontal hacia el dren, es la diferencia de nivel de agua entre los piezómetros 2 y 3, con los filtros situados en el nivel del dren, respectivamente en el punto medio entre dos drenes y en la cercanía del dren.



- La *pérdida de carga radial* (h_r) es la diferencia de nivel de agua entre los piezómetros 3 y 4, con filtros situados en el nivel del dren, respectivamente a cierta distancia del dren y junto al dren.
- La *pérdida de carga de entrada* (h_e) es la diferencia de nivel de agua entre el piezómetro 4 y un tubo situado sobre el dren.

La relación entre la pérdida de carga y la correspondiente resistencia es la siguiente:

$$h_* = q L W_* \quad (1)$$

Donde h = diferencia de carga (m).

L = espaciamiento entre drenes (m).

q = caudal específico (m/d).

W = resistencia (d/m).

* = subíndice v (vertical), r (radial), e (entrada) o t (total).

La pérdida de carga total es entonces:

$$h_t = h_v + h_b + h_r + h_e \quad (2)$$

Algunas veces las resistencias W son reemplazadas por coeficientes sin dimensión α que son independientes de la conductividad hidráulica del suelo:

$$\alpha_* = K_* W_* \quad \text{o} \quad W_* = \alpha_* / K_* \quad (3)$$

Donde K = conductividad hidráulica (m/d).

α = factor geométrico (sin dimensión).

Por tanto, la carga total puede expresarse por:

$$h_t = q L (W_v + W_b + W_r + W_e) = q L (\alpha_v / K_v + \alpha_b / K_b + \alpha_r / K_r + \alpha_e / K_e) \quad (4)$$

Ésta y otras teorías de drenaje, que se usan para calcular espaciamientos entre drenes, se basan en un conjunto de suposiciones relacionadas con el dren y las propiedades físicas de los suelos en que están ubicados. Aunque estas suposiciones son una aproximación, en la práctica el resultado es por lo general satisfactorio. Una de estas suposiciones es que el dren es un «dren ideal» sin resistencia de entrada, por lo que se considera una línea equipotencial. Generalmente se asume que el entorno del dren (material envolvente y suelo alterado de zanja) tiene tal conductividad hidráulica en comparación con la de suelo natural sin alterar, que puede desestimarse la resistencia de entrada, aunque la experiencia práctica ha mostrado que esto no siempre puede ser cierto. Sin embargo, es necesario investigar, tanto teórica como empíricamente, en qué casos se pueden presentar resistencias de entrada considerables.

A pesar de la existencia de un sistema de drenaje, puede producirse encharcamiento y exceso de agua en el suelo durante lluvias intensas, debido a la presencia de una capa de baja permeabilidad cerca de la superficie del suelo que origina una capa de agua colgada. También puede deberse a la compactación causada por maquinaria pesada, a la dispersión causada por lluvias intensas y en campos de deportes como resultado del juego. Esta capa de baja permeabilidad simplemente impide que el agua percole a la capa freática, pero no tiene ninguna relación con el sistema de drenaje subterráneo.

Como la FAO ha preparado directrices y programas de cálculo para el diseño de sistemas de drenaje subterráneo (FAO, 2007), este capítulo se limitará a analizar la influencia en el funcionamiento del dren de la resistencia de entrada y del flujo de agua en la tubería.

RESISTENCIA AL FLUJO DE APROXIMACIÓN Y ENTRADA

El agua entra en un dren real a través de un número finito de perforaciones, que representan como máximo del uno al dos por ciento del área total de la pared de tubería. Aunque un dren real no altera el esquema general del flujo radial, las líneas de corriente convergen hacia las perforaciones en la proximidad del dren. Esto causa una *resistencia de entrada* (W_e) y una pérdida de carga en la entrada (h_e).

De acuerdo con la ecuación (1) y considerando la ecuación (3), la relación entre la pérdida de carga de entrada y la resistencia de entrada es la siguiente:

$$h_e = qLW_e = \frac{qL}{K_e} \alpha_e \quad (5)$$

La resistencia de entrada de un dren real puede calcularse teóricamente para ciertas formas y disposición de sencillas perforaciones o puede obtenerse si el esquema de flujo, tanto hacia un dren ideal como hacia un dren real, puede simularse con precisión (véase el Apartado *Resistencia de entrada de tuberías de drenaje*). En la mayoría de casos, la resistencia de entrada se obtiene empíricamente a partir de la pérdida de carga de entrada. Teóricamente, la pérdida de carga de entrada puede obtenerse directamente mediante la lectura de piezómetros colocados dentro y fuera del dren (Figura 22b). Sin embargo, en la práctica el piezómetro 4 se coloca a cierta distancia del dren para evitar la alteración del suelo causada al instalar el dren (Figura 23) y por ello la pérdida de carga medida incluye no solo la pérdida de carga de entrada sino también parte de la debida a la resistencia radial.

Cavelaars (1967) introdujo el concepto de «resistencia del flujo de aproximación» (W_{ap}) y de «pérdida de carga debida al flujo de aproximación» (h_{ap}) para esta área de flujo (Figura 23). De forma similar a la ecuación (5), la relación entre ambos parámetros del flujo de aproximación es la siguiente:

$$h_{ap} = qLW_{ap} = \frac{qL}{K_{ap}} \alpha_{ap} \quad (6)$$

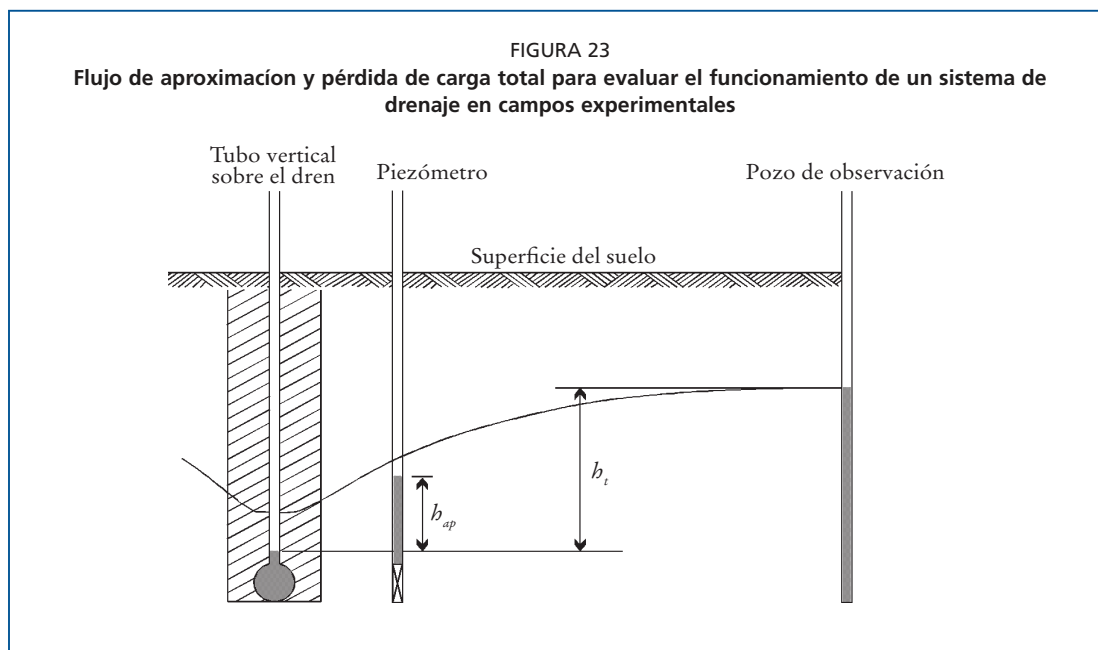
La carga medida (h_{ap}) resulta de la resistencia de entrada, de la resistencia del suelo alterado alrededor del dren y de la resistencia radial en el suelo sin alterar, como se muestra en la figura 24, para un dren instalado en una zanja. También esto es válido para la instalación de drenes sin apertura de zanja, pero la zona alterada en este caso no está tan claramente delimitada como en el caso anterior.

La pérdida de carga determinada en campos experimentales es la pérdida de carga del flujo de aproximación, aunque comúnmente se llama «pérdida de carga de entrada» y se utiliza para calcular la «resistencia de entrada», p. ej. según Dieleman y Trafford (FAO, 1976).

También puede ser útil expresar la pérdida de carga del flujo de aproximación como un porcentaje de la pérdida de carga total. Para determinar la pérdida de carga total, pueden instalarse a media distancia entre dos drenes, tanto un piezómetro (piezómetro 1, figura 22b) como un pozo de observación (Figura 23). A diferencia del piezómetro, que está perforado solamente en su base, el pozo de observación está perforado en casi toda su longitud.

El flujo en la proximidad del dren es muy complejo, debido a la alteración del suelo, cuyas características físicas son heterogéneas y cambian con el tiempo y por ello son

La convergencia de líneas de corriente hacia las perforaciones de un dren real origina una resistencia adicional al flujo y una pérdida de carga, en comparación con el flujo a un dren ideal imaginario. La resistencia adicional se llama resistencia de entrada y la correspondiente pérdida de carga se denomina pérdida de carga de entrada.

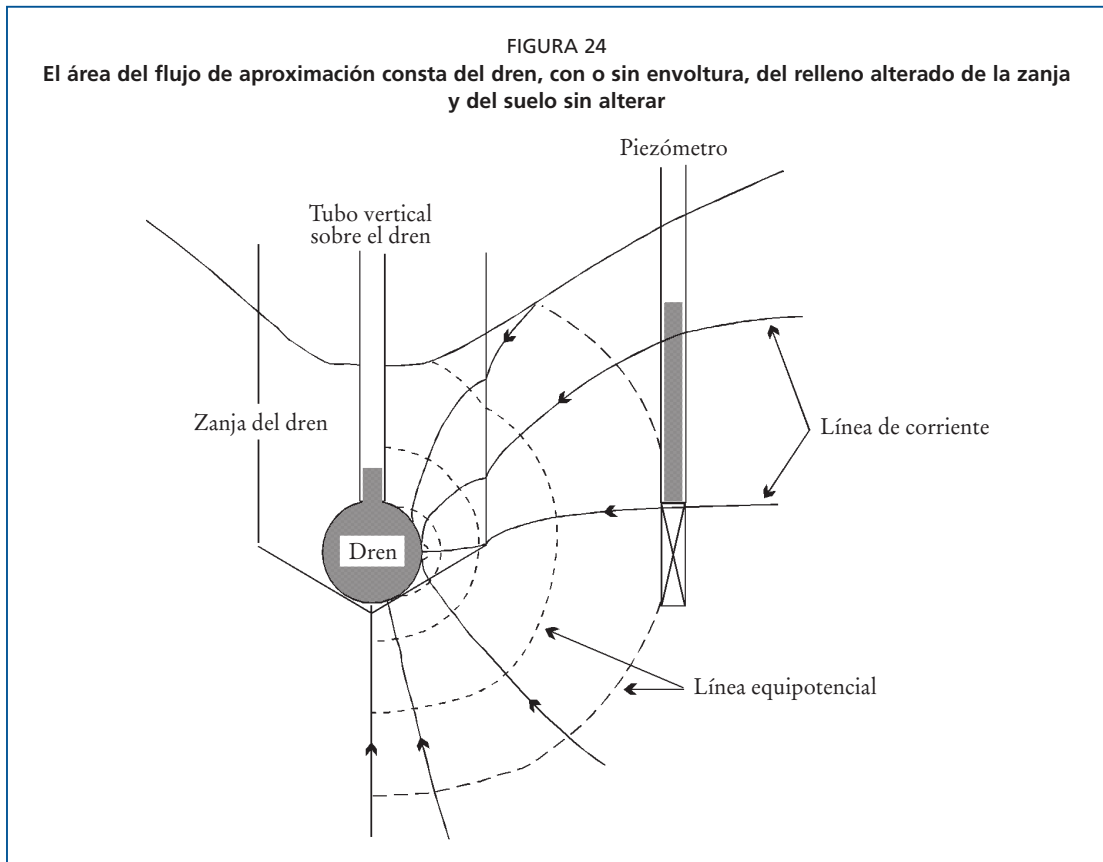


difíciles de predecir. La pérdida de carga debida al flujo de aproximación (h_{ap}) depende de las propiedades físicas de este suelo alterado en torno al dren (K_{ap}), del espaciamiento entre drenes y de los materiales de drenaje utilizados. Sin embargo, un buen material envolvente puede reducir α_{ap} a valores tan bajos que el dren puede funcionar casi como un dren ideal.

Lo mismo ocurre si el suelo alrededor del dren es muy permeable, p. ej. si $K_{ap}=10$ m/d. Esto ocurre sobre todo en suelos arcillosos con zanjas que han sido rellenadas o en suelos arcillosos y franco arcillosos bien estructurados con drenes instalados sin apertura de zanja. Por ello, en estos suelos la resistencia de entrada raramente es problemática, incluso si no se utiliza envoltura de dren. Esto se debe a que el agua en la proximidad de la tubería de drenaje a menudo sigue trayectorias preferenciales a través del relleno de zanja o a través de grietas y fisuras creados por una máquina que no abre zanja. La existencia de flujo preferencial está determinada por la relación entre la conductividad del suelo natural y la del suelo alterado, que puede tener permanentemente una conductividad hidráulica mayor. Sin embargo, algunos suelos alterados una vez que se han asentado, pueden llegar a ser menos permeables que el suelo natural. El suelo alterado en seco favorece en muchos casos el funcionamiento del drenaje, independientemente de si es homogéneo o heterogéneo o si el agua sigue trayectorias preferenciales o no.

Para que sea efectivo un sistema de drenaje subterráneo es necesario que las condiciones físicas del suelo en la proximidad del dren sean buenas. Solamente en esos casos materiales de drenaje apropiados funcionarán correctamente. En este contexto, «*buenas condiciones físicas del suelo*» es sinónimo de un suelo físicamente estable e hidráulicamente permeable. Este tipo de suelo que tiene agregados estables, se considera «*un suelo bien estructurado*».

La resistencia de entrada, la resistencia de suelo alterado y la resistencia radial son conceptos teóricos que no pueden separarse físicamente ni tampoco medirse separadamente en el campo. La pérdida de carga medida es la suma global de todas las pérdidas de carga que pueden considerarse teóricamente en el área del flujo de aproximación.



La instalación de drenes subterráneos origina cambios importantes en las propiedades físicas del suelo que rodea el dren. Estas propiedades son difíciles de cuantificar sobre todo porque no pueden observarse con precisión. Aún así, las propiedades físicas del suelo son fundamentales para el futuro éxito o fracaso del sistema de drenaje. Después de la instalación es necesario que se restablezca cierto equilibrio a medida que el suelo, de una forma u otra, se asienta alrededor del dren. La fuerza más importante que incide en este proceso es la fuerza de arrastre del agua freática que fluye hacia el dren. Son también importantes las fuerzas entre las partículas de suelo y los agregados que resisten a esta fuerza de arrastre. Además, la capacidad de retención de la tubería o de la envoltura del dren tiene una función importante. Según la forma de instalación de los drenes -con máquina zanjadora o sin apertura de zanja- la estructura del suelo alrededor del dren será «dañada», o en otras palabras, debilitada. En consecuencia, la capacidad natural del suelo para resistir las fuerzas perjudiciales del agua freática disminuirá. Un factor adicional, que complica la situación, es el hecho que la densidad del flujo de agua freática es mayor donde la estabilidad estructural del suelo es por lo general menor, o sea cerca del dren donde convergen las líneas de corriente.

El suelo puede compactarse localmente, especialmente cuando los drenes se colocan en húmedo. Si se instalan con un rejón vertical sin abrir zanja alguna, el efecto perjudicial sobre la estructura del suelo depende de la profundidad de instalación y del

La resistencia de entrada, definida por Dieleman y Trafford (FAO, 1976), es de hecho una resistencia del flujo de aproximación y difiere básicamente del concepto teórico de resistencia de entrada.

contenido de agua del suelo en el momento de la instalación. Hasta cierta profundidad, el rejón puede levantar el suelo creando fisuras y macroporos. Sin embargo, por debajo de esta profundidad crítica, el peso del suelo impide que se levante. En cambio, el suelo se desplaza lateralmente, se compacta y pule, y se destruyen localmente fisuras y macroporos naturales (Van Zeijts y Naarding, 1990).

FLUJO DE ENTRADA DE AGUA EN LA TUBERÍA DE DRENAJE

Gradiente de salida

La ley de Darcy describe el flujo laminar de agua a través de un medio poroso y expresa la proporcionalidad existente entre el caudal que fluye a través de una sección transversal y la pérdida de carga hidráulica por unidad de longitud, o entre el caudal específico y el gradiente hidráulico:

$$Q = KA \frac{dh}{dl} = KAi \quad (7)$$

Donde Q = caudal (m³/d).
 A = área de la sección transversal (m²).
 K = conductividad hidráulica (m/d).
 dh = pérdida de carga hidráulica (m).
 dl = distancia en la que se mide dh (m).
 i = gradiente hidráulico o pérdida de carga por unidad de longitud (= dh/dl).

Si las líneas de corriente son paralelas (Figura 25), el gradiente hidráulico i es el siguiente:

$$i = \frac{\Delta b}{\Delta l} = \frac{Q}{AK} \quad (8)$$

En este caso, para un Q dado, el gradiente hidráulico i es el mismo en cualquier punto de la región de flujo ya que A y K son constantes. De esta manera, el gradiente de salida i_{ex} o el gradiente donde el agua abandona el suelo es igual al gradiente hidráulico a través del sistema, que es constante.

Sin embargo, en el caso de flujo radial (Figura 26), el área de la sección transversal por unidad de longitud del dren a una distancia r del centro del dren es $2\pi r$ y las líneas de corriente convergen. La descarga por metro lineal de dren es la siguiente:

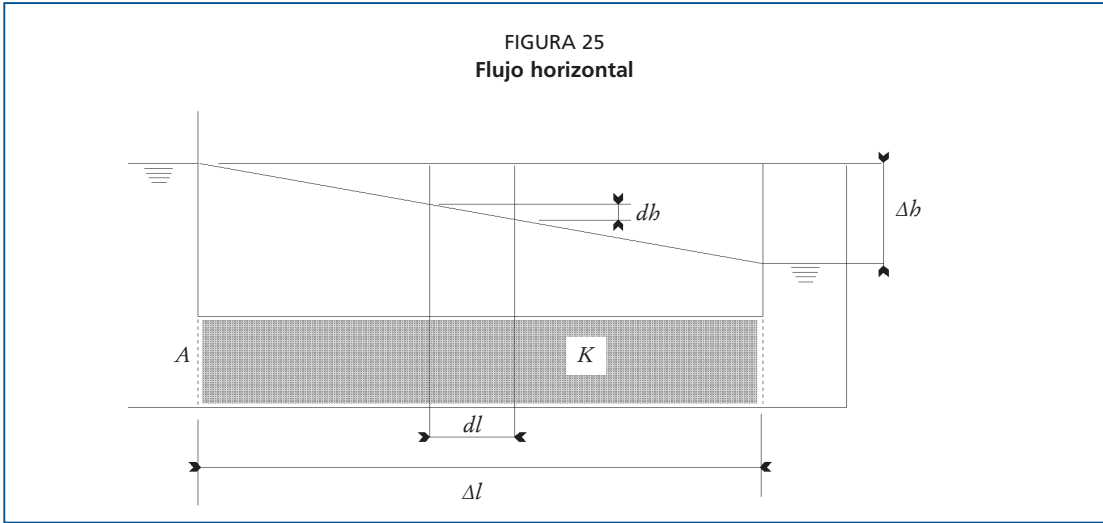
$$qL = 2\pi r K \frac{dh}{dr} \quad (9)$$

y el gradiente hidráulico:

$$i = \frac{dh}{dr} = \frac{qL}{2\pi r K} \quad (10)$$

donde q es el caudal específico (para flujo en régimen permanente igual al exceso de lluvia o de riego en m/d), L el espaciamiento entre drenes (m), y qL el caudal por metro lineal de dren (m²/d). En este caso, el gradiente hidráulico i ya no es constante para cierto caudal por metro lineal de dren sino que aumenta a medida que disminuye r y viceversa.

El gradiente de salida (i_{ex}) es el gradiente hidráulico con el cual el agua abandona un medio y entra en otro. La interfase entre distintos medios puede ser suelo-agua, suelo-aire, suelo-envoltura, envoltura-agua o envoltura-aire. Cuando el agua entra en un dren, el medio que abandona puede ser el suelo o el material envolvente. El medio en el que entra puede ser agua o aire.



Considerando el flujo radial hacia un dren ideal, es decir completamente permeable, el gradiente de salida i_{ex} al abandonar el agua el suelo y entrar en el dren es mayor que en cualquier otro lugar de la región de flujo y es inversamente proporcional al radio del dren (Figura 27). Para drenes reales, las líneas de corriente convergen hacia las perforaciones de la pared de tubería, de modo que el gradiente de salida en las perforaciones es aún mayor. Sin embargo, para el cálculo del espaciamiento entre drenes un dren ideal de menor diámetro r_o puede «reemplazar» a un dren real perforado (Apartado *Dren sin envoltura*). En teoría, el gradiente de salida en el límite de este supuesto dren ideal de menor diámetro es igual al gradiente de salida en las perforaciones de un dren real.

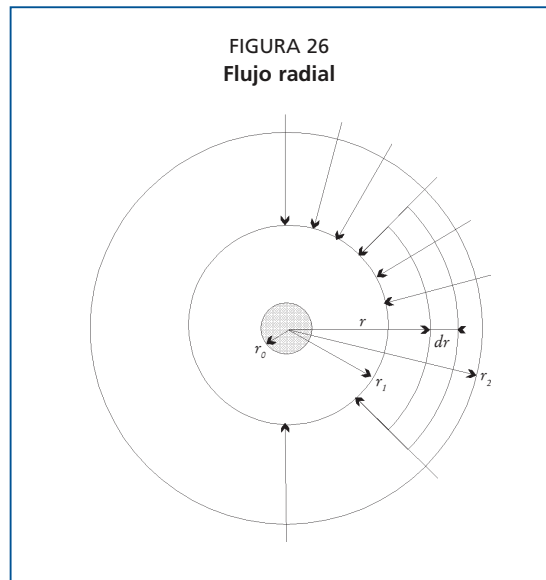
El concepto de flujo radial se basa en suposiciones que simplifican la situación real. Sin embargo, generalmente el flujo en la proximidad del dren no es completamente radial sino algo muy diferente, es decir irregular, en función de las propiedades hidráulicas del suelo cerca del dren. Por ello, las líneas equipotenciales de agua freática no son necesariamente concéntricas al centro del dren. En cambio, son más bien excéntricas y aún irregulares. Este hecho a menudo complica evaluar el gradiente real de salida en situaciones reales.

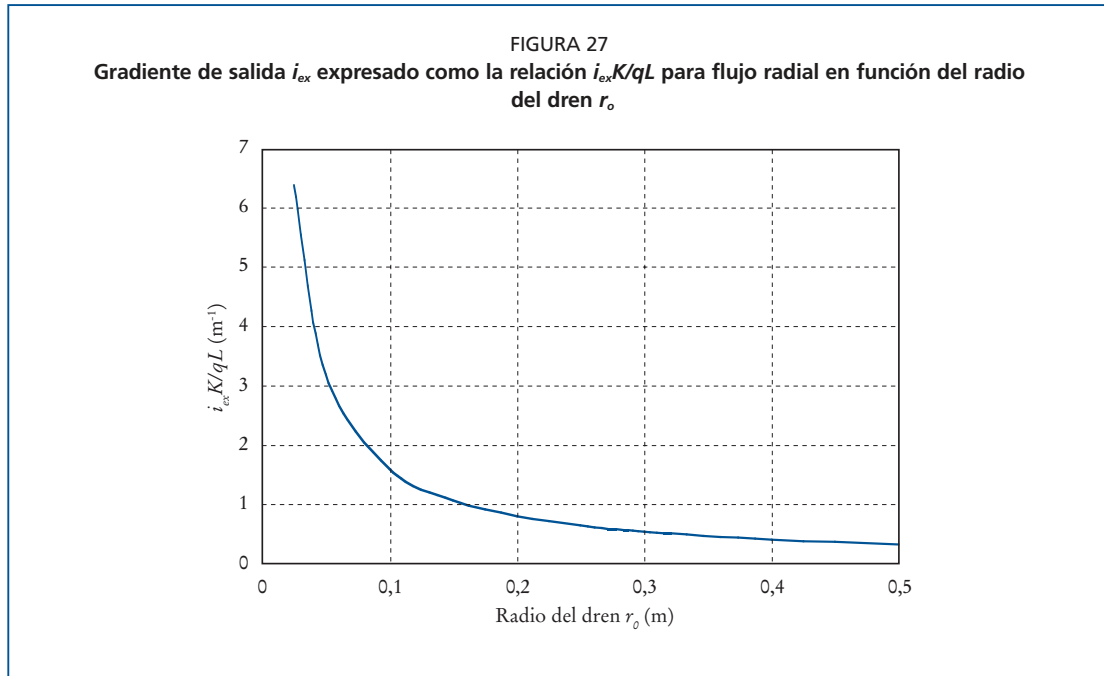
Gradiente hidráulico crítico

El flujo de agua con un gradiente de salida alto es rápido y enérgico. Puede ejercer suficiente fuerza de arrastre para superar la resistencia al corte del suelo. En este caso, las partículas de suelo pueden comenzar a desplazarse originando localmente la consecuente erosión alrededor del dren. Se denomina *gradiente hidráulico crítico* al gradiente hidráulico que origina este fenómeno.

La resistencia al corte de un suelo, que se opone al movimiento de partículas de suelo y a su erosión, se expresa mediante la ecuación de Coulomb:

$$\tau_f = c_o + \sigma_e \tan\phi \quad (11)$$





Donde τ_f = resistencia al corte por unidad de superficie (Pa).
 c_o = cohesión (Pa).
 σ_e = tensión efectiva de las partículas de suelo o tensión entre partículas (Pa).
 ϕ = ángulo de fricción interna o de resistencia al corte.

Los suelos cohesivos, como son los arcillosos, poseen uniones firmes entre sus partículas y están en su mayor parte formados por agregados. Los suelos poco cohesivos, como son los arenosos, carecen de uniones entre las partículas individuales ($c_o = 0$) y constan de partículas sueltas, por tanto:

$$\tau_f = \sigma_e \tan\phi \quad (12)$$

La carga del suelo y la presión del agua determinan las tensiones entre partículas σ_e . Mayores cargas de suelo y menor presión del agua aumentan la tensión efectiva y reducen el riesgo de erosión. Sin embargo, en suelos arenosos pueden formarse puentes estables que forman arcos de 5 a 8 veces el diámetro de los granos de arena (Peschl, 1969). Por tanto no entra arena normalmente en las perforaciones que tienen un diámetro menor a 5-8 veces el diámetro de los granos (excepto unos pocos granos de arena que pueden escapar mientras se están estableciendo arcos).

El agua que fluye a través de un medio poroso ejerce una presión sobre las partículas de suelo en la dirección del movimiento, que se denomina *presión del flujo*. Si esta presión actúa en la dirección y sentido de la gravedad (flujo descendente) la tensión efectiva de las partículas de suelo aumenta y el riesgo de erosión disminuye. Sin embargo, si la

El gradiente crítico depende de la tensión efectiva y de la cohesión del suelo. En suelos sin cohesión y sin carga de suelo, el gradiente hidráulico crítico es aproximadamente igual a uno. Esta situación ocurre en caso de flujo ascendente de agua freática. En suelos cohesivos, también debe considerarse la fuerza de cohesión. En estos suelos, el gradiente hidráulico crítico será mayor que el de suelos que carecen de cohesión, ya que depende de la fortaleza de las uniones que cohesionan partículas y agregados de suelo.

presión del flujo actúa en sentido inverso a la gravedad (flujo ascendente), la tensión entre partículas puede decrecer substancialmente o puede incluso anularse, dando lugar a una situación altamente inestable conocida como «arena movediza»; p. ej. en lugares de fuertes movimientos ascendentes de agua se forman pequeños «volcanes de lodo». La presión del flujo perpendicular a la gravedad causa un movimiento lateral de partículas de suelo cuando se rebasa la resistencia al corte. Se denomina *gradiente crítico* (i_c) al gradiente hidráulico en el que la fuerza estructural del suelo llega a ser despreciable.

Si la presión del flujo excede la resistencia al corte del suelo habrá erosión porque el suelo pierde su fuerza estructural. Dado que la presión del flujo es proporcional al gradiente hidráulico que actúa, la erosión comenzará tan pronto como el gradiente hidráulico de salida i_{ex} iguale al gradiente hidráulico crítico i_c del suelo (Terzaghi y Peck, 1965).

No se considera la erosión interna por la que se mueven partículas de suelo por sí mismas. Generalmente, ocurre en suelos alcalinos, especialmente cuando el suelo reacciona con fenoltaleína ($pH > 8,5$). En estos suelos puede producirse erosión interna si se separan partículas finas de suelo por sí mismas del armazón formado por fracciones más gruesas y con el flujo de agua se mueven a través de grietas y otros macroporos del suelo. Esto puede causar un flujo de drenaje de aspecto turbio de apariencia «lechosa» y además obstrucción interna del armazón del suelo.

Gradiente de fallo hidráulico

El gradiente hidráulico crítico aumenta si existe exceso de carga y si aumenta la cohesión del suelo. De acuerdo con estas suposiciones, Samani y Willardson (1981) propusieron el concepto de *gradiente de fallo hidráulico* (i_f) que es el gradiente hidráulico en el cual un suelo no puede resistir la fuerza de arrastre del flujo de agua. El suelo pierde su estabilidad estructural y comienza a fluir hacia el dren, posiblemente a través de su envoltura. Entonces el sistema de drenaje probablemente deja de funcionar, porque este proceso puede reducir substancialmente la conductividad hidráulica de la envoltura.

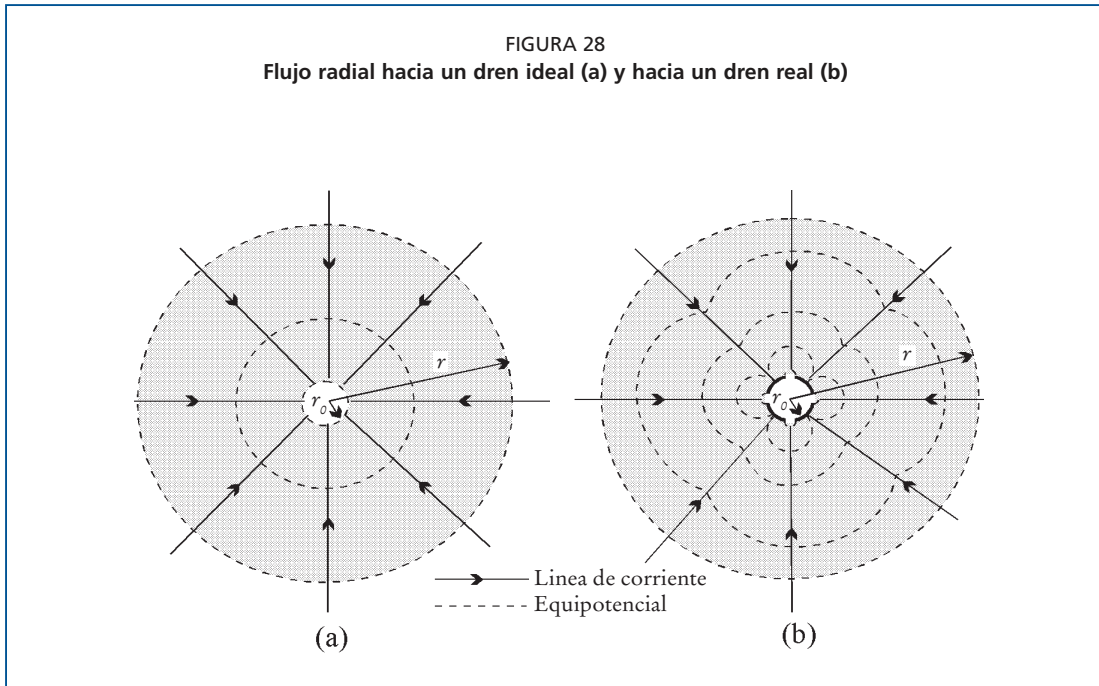
Samani y Willardson (1981) determinaron que el gradiente de fallo hidráulico depende del índice de plasticidad del suelo (Capítulo 6). Sin embargo, la relación determinada no es intercambiable entre suelos de regiones húmedas y áridas. Aún así, se determinó buena correlación entre el gradiente de fallo hidráulico y una combinación del índice de plasticidad y de la conductividad hidráulica del suelo, si ésta se incluye en el concepto del i_f . Esta correlación es válida tanto para regiones húmedas como áridas. Vlotman *et al.* (2000) usaron los datos de Samani y Willardson (1981) para deducir una relación empírica que es ligeramente diferente de la original:

$$i_f = e^{(0,332-1,14K+1,07 \ln I_p)} \quad (13)$$

Donde i_f = gradiente de fallo hidráulico.
 K = conductividad hidráulica del suelo (m/d).
 I_p = índice de plasticidad del suelo.

El índice de plasticidad es una medida de la plasticidad del suelo. Se define como la diferencia de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa de suelo

El concepto de i_f puede ser útil como instrumento para decidir la aplicación de una envoltura voluminosa para incrementar el radio r y de esta manera reducir el gradiente de salida i_{ex} cerca del dren a un valor inferior al valor i_f del suelo. Aún así, el concepto de i_f nunca ha encontrado una amplia aplicación. Por tanto, la experiencia obtenida hasta ahora con el i_f como instrumento para diseñar envolturas de dren es muy reducida.



secado en estufa, de un suelo en sus límites líquido y plástico (ICID, 1996):

$$I_p = 100(W_{LL} - W_{PL})/W_{DS} \quad (14)$$

Donde W_{LL} = masa de muestra de suelo en el límite líquido (g).
 W_{PL} = masa de muestra de suelo en el límite plástico (g).
 W_{DS} = masa de muestra de suelo secado en estufa (g).

Sin embargo, la ecuación (13) considera solamente propiedades del suelo, pero no los efectos de la sobrecarga y los tipos de envoltura, pues si no el i_f puede no ser constante para cierta condición del suelo. Por tanto, el concepto de i_f es esencialmente el mismo que el de gradiente hidráulico crítico.

RESISTENCIA DE ENTRADA DE TUBERÍAS DE DRENAJE

En el Apartado *Resistencia al flujo de aproximación y entrada* se consideró que la pérdida de carga que se observa cerca de un dren lateral se debe a la *resistencia al flujo de aproximación* y es la *suma total* de la *resistencia de entrada* y de la *resistencia al flujo* en el suelo que circunda al dren. Por ello, el efecto de drenes subterráneos (con envoltura) sobre el funcionamiento del drenaje no puede determinarse de esta forma. Sin embargo, es importante que pueda evaluarse el efecto de las propiedades hidráulicas de tuberías de drenaje y envolturas sobre el funcionamiento del drenaje. Por tanto, en este apartado se consideran estas propiedades.

Dren sin envoltura

El flujo hacia un dren puede establecerse si se puede determinar analíticamente, como puede hacerse con el flujo radial. La pérdida de carga, debida al flujo radial hacia un dren ideal que funciona a plena capacidad, en un suelo homogéneo e isotrópico (Figura 28a) que tiene una conductividad hidráulica K , es la siguiente:

$$h_r = qLW_r = \frac{qL}{K} \alpha_r = \frac{qL}{2\pi K} \ln \frac{r}{r_0} \quad (15)$$

en la que:

$$\alpha_r = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r}{r_o} \quad (16)$$

donde r = radio de una línea equipotencial circular (m).

r_o = radio de un dren ideal (m).

El radio r debería ser elegido de modo que la línea equipotencial tenga realmente una forma circular y el flujo hacia el dren sea radial. Es decir, el efecto de las perforaciones de la tubería sobre la línea equipotencial elegida debe ser insignificante. La pérdida de carga del flujo de aproximación debida al flujo radial hacia un *dren real* (Figura 28b) puede calcularse mediante la ecuación (6) que también puede expresarse de la forma siguiente:

$$h_{ap} = qL(W_r + W_e) = \frac{qL}{K}(\alpha_e + \alpha_r) \quad (17)$$

Dado que la ecuación (16) describe el flujo radial hacia un dren ideal, la resistencia de entrada es:

$$\alpha_e = \alpha_{ap} - \alpha_r \quad (18)$$

En este caso, la resistencia de entrada a un *dren real* es la diferencia entre la resistencia del flujo de aproximación a un dren real y la resistencia al flujo radial hacia un *dren ideal*.

La resistencia de entrada α_e depende exclusivamente de la tubería de drenaje y es por ello una constante dependiente de la forma y disposición de perforaciones si existe flujo radial en toda la circunferencia del dren. Si existe flujo radial solamente en una sección de la circunferencia del dren (Figura 29) la resistencia al flujo depende del área del sector donde realmente existe flujo radial hacia el dren (Boumans, 1963). La resistencia de entrada real (α_e^*) es inversamente proporcional al sector de flujo:

$$\alpha_e^* = \frac{2\pi}{\beta} \alpha_e \quad (19)$$

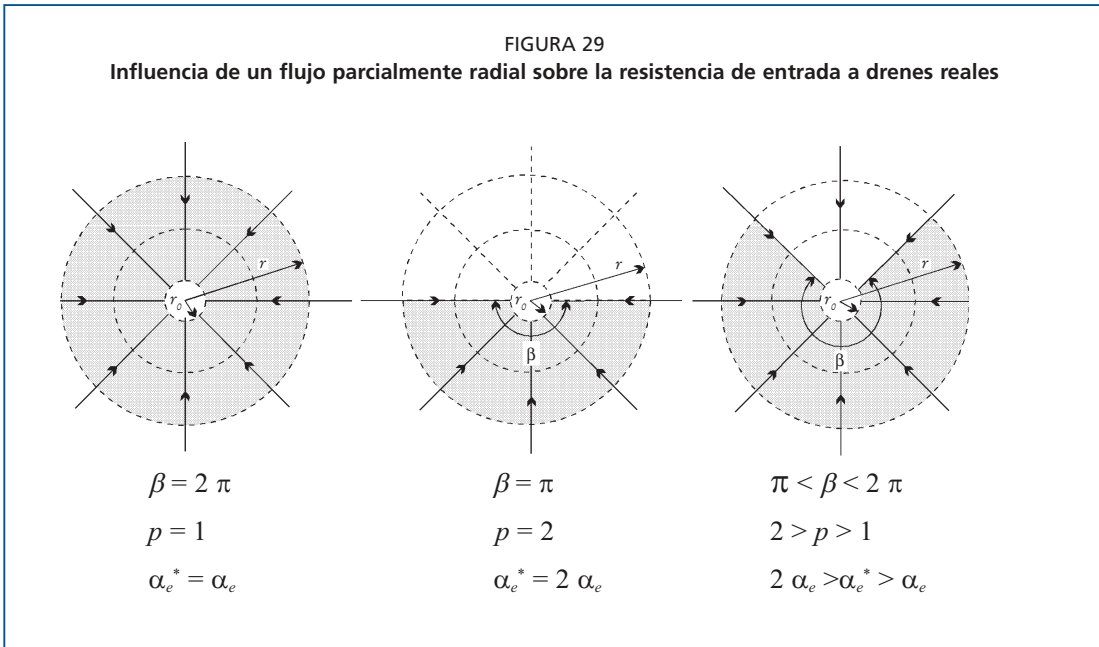
donde β = ángulo del sector donde existe flujo radial (radianes, 0-2 π).

La transición entre suelo y perforaciones de tubería también afecta a la resistencia de entrada dado que la resistencia es provocada por la convergencia de líneas de corriente hacia esos orificios. La resistencia de entrada aumenta si existe cualquier tipo de obstrucción y disminuye con el arrastre de partículas de suelo. El límite entre suelo y perforaciones de tubería puede tener múltiples configuraciones geométricas. Pueden existir los límites siguientes (Figura 30):

- Las perforaciones están llenas de suelo.
- El suelo forma un límite plano con las perforaciones (condiciones de límite plano).
- El suelo cerca de las perforaciones se ha eliminado y se forma un límite en forma de arco (condiciones de límite arqueado).
- El suelo cerca de las perforaciones se ha eliminado y se forma un límite irregular.

El límite arqueado es la configuración que se encuentra más frecuentemente en el campo (Peschl, 1969). De acuerdo con Stuyt (1992a) este límite puede tener una configuración tridimensional más compleja. Las aberturas que se aprecian en la figura 30 pueden representar:

- Separaciones entre tubos de drenaje.
- Perforaciones circulares en tubos de plástico.
- Ranuras rectangulares en tubos de plástico.

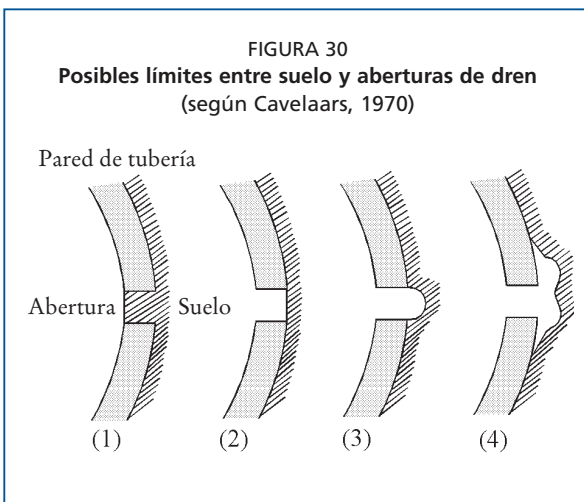


La forma de la pared exterior de tubería -lisa o corrugada- afecta la resistencia de entrada, especialmente si las perforaciones están en el valle de corrugaciones como es el caso más común. La sedimentación de las corrugaciones con partículas de suelo causa los mayores efectos. Si las corrugaciones están llenas de suelo, la geometría de los límites del suelo con las perforaciones es bastante importante; si no lo están, el límite influye decisivamente en la resistencia de entrada. La forma de las corrugaciones (en «onda» o en «bloque») tiene solamente una influencia menor.

Para ciertas formas y disposición de perforaciones en las paredes de tubería exteriormente lisa, la resistencia de entrada puede determinarse analíticamente para límites arqueados y planos. Dierickx (1980) hizo una extensa revisión de soluciones analíticas y comprobó su exactitud con un modelo electrolítico. Dierickx (1999) sintetizó soluciones más sencillas, pero aún así suficientemente exactas. Sin embargo, en muchos casos, y para drenes corrugados, la resistencia de entrada se determina mediante investigación con modelos. Es posible obtener resultados precisos con un modelo electrolítico, dado que las condiciones de límite y la conductividad hidráulica

son conocidas con exactitud. Esto no ocurre si se usan modelos de arena ya que en este caso las configuraciones están peor definidas.

Soluciones analíticas e investigación con modelos han revelado que en *aberturas circulares* entre tubos de cerámica y hormigón la resistencia de entrada depende principalmente de la distancia entre aberturas y del diámetro exterior del tubo, pero la anchura de abertura solo influye ligeramente. Por ello, el aumento de la anchura de abertura es una manera ineficaz de reducir la resistencia de entrada, mientras que aumenta el riesgo de intrusión de partículas de suelo. Si los



tubos segmentados están perforados la resistencia de entrada también se reduce, pero este tipo de tubos se usan exclusivamente en Estados Unidos de América. Como la distancia entre *tubos de cerámica y hormigón* no puede reducirse, la única forma de disminuir su resistencia de entrada es usar tubos de mayor diámetro.

La forma más eficaz para reducir la resistencia de entrada de tuberías de drenaje con *perforaciones circulares* es aumentar el número y diámetro de las perforaciones. Aunque no existen drenes con *ranuras longitudinales continuas*, sus propiedades pueden simularse mediante modelos matemáticos, siendo la investigación de sus propiedades útil: el aumento del número de ranuras es más efectivo que el incremento del ancho de ranura y del diámetro de dren. Por tanto, la forma más efectiva para reducir la resistencia de entrada en drenes con *ranuras longitudinales discontinuas* es aumentar el número de filas con ranuras. La resistencia de entrada de drenes con *orificios circulares discontinuos* puede reducirse disminuyendo el espaciamiento entre filas perforadas e incrementando el diámetro del dren, siendo el ancho del orificio menos importante.

De acuerdo con Childs y Youngs (1958), un dren real puede sustituirse por un dren ideal de menor radio denominado *radio equivalente o efectivo* (r_{ef}). Introduciendo el valor de α_p de la ecuación (16) en la ecuación (18) se obtiene:

$$\alpha_{ap} = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r}{r_o} + \alpha_e \tag{20}$$

De forma similar a la ecuación (16), la resistencia radial al flujo hacia un dren ideal con la misma resistencia se determina con la siguiente expresión:

$$\alpha_{ap} = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r}{r_{ef}} \tag{21}$$

de donde se deduce que:

$$r_{ef} = r e^{-2\pi\alpha_{ap}} = r_o e^{-2\pi\alpha_e} \tag{22}$$

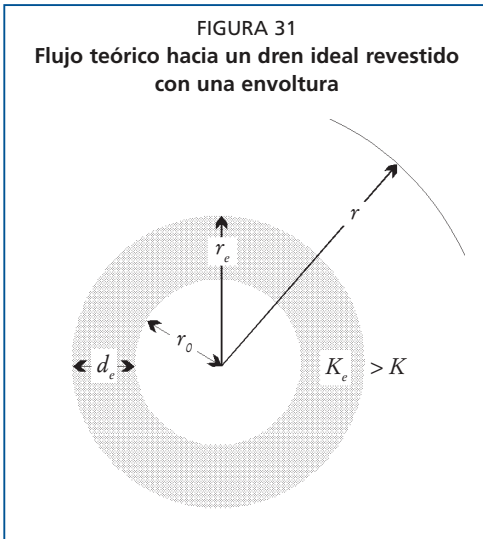
Como el radio efectivo depende de la resistencia de entrada puede usarse dicho radio como alternativa a la resistencia de entrada: cuanto menor es la resistencia de entrada mayor es el radio efectivo.

En el Cuadro 7 se presentan valores de resistencias de entrada de varias tuberías de drenaje. Los valores determinados por Dierickx (1993) proceden de investigación con modelo electrolítico, asumiendo que las corrugaciones de tuberías flexibles están

Aunque se encuentran en publicaciones distintos valores de resistencia de entrada, los tubos de cerámica y hormigón generalmente tienen mayor resistencia que las tuberías de plástico liso, que tienen perforaciones distribuidas más uniformemente. A su vez, las tuberías de plástico liso tienen mayor resistencia de entrada que las de plástico corrugado que tienen más perforaciones y mayor área perforada.

CUADRO 7
Resistencias de entrada y relaciones r_{ef}/r_o de tuberías de drenaje sin envoltura

Tipo de tubería de drenaje	Dierickx (1993)		Smedema y Rycroft (1983)	
	α_e (sin dimensiones)	r_{ef}/r_o (sin dimensiones)	α_e (sin dimensiones)	r_{ef}/r_o (sin dimensiones)
Cerámica y hormigón	1,0 - 3,0	$1,9 \cdot 10^{-3} - 6,5 \cdot 10^{-9}$	0,4 - 2,0	$8,1 \cdot 10^{-2} - 3,5 \cdot 10^{-6}$
Plástico liso	0,6 - 1,0	$2,3 \cdot 10^{-2} - 1,9 \cdot 10^{-3}$	0,4 - 0,6	$8,1 \cdot 10^{-2} - 2,3 \cdot 10^{-2}$
Plástico corrugado	0,3 - 0,6	$1,5 \cdot 10^{-1} - 2,3 \cdot 10^{-2}$	0,05 - 0,1	$7,3 \cdot 10^{-1} - 5,3 \cdot 10^{-1}$



llenas de suelo y que el suelo forma un límite plano con las perforaciones. Smedema y Rycroft (1983) no mencionan referencia alguna pero probablemente sus valores fueron determinados mediante modelos de tanque de arena. El cuadro también contiene la relación $r_{ef}/r_o (= e^{-2\pi\alpha_e})$ para mostrar el efecto de la resistencia de entrada en el radio efectivo de un dren.

Dren con envoltura

Como la resistencia de entrada de tuberías de drenaje puede ser del mismo orden que la resistencia total al flujo en el suelo (Widmoser, 1968), cualquier cambio de permeabilidad en la zona inmediata al dren puede tener una gran influencia en el funcionamiento del sistema de drenaje. Las envolturas de dren tienen normalmente una conductividad hidráulica mayor que la del suelo circundante, por lo que contribuyen a la disminución de la resistencia de

entrada de tuberías de drenaje.

Si a una envoltura de espesor d_e y una conductividad hidráulica $K_e > K$ reviste un dren ideal (Figura 31), la resistencia total al flujo radial es:

$$\alpha_r = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r}{r_e} + \frac{1}{2\pi\kappa_e} \ln \frac{r_e}{r_o} \quad (23)$$

donde r_e = radio de la interfase suelo-envoltura (m).

$\kappa_e = K_e/K$ es la conductividad hidráulica relativa o relación entre la conductividad hidráulica de la envoltura y la del suelo circundante.

Definir la resistencia de entrada no presenta dificultad especial en drenes sin envoltura (Apartado *Dren sin envoltura*). Sin embargo, la resistencia de entrada de un dren con envoltura depende de la conductividad hidráulica de la envoltura en relación con la del suelo circundante así como del espesor de envoltura. Cuando se usa una envoltura, es posible dar varias definiciones de resistencia de entrada.

Alternativa 1

Si la resistencia de entrada depende de la propia tubería de drenaje, una envoltura no causa ningún cambio en dicha resistencia y solo cambia la resistencia total al flujo. A medida que el espesor y la conductividad hidráulica de una envoltura faciliten el flujo radial en el suelo circundante, la resistencia de entrada α'_e de la propia tubería de drenaje es:

$$\alpha'_e = \frac{\alpha_e}{\kappa_e} \quad (24)$$

mientras que las resistencias al flujo radial en envoltura y suelo son los otros componentes de la resistencia al flujo de aproximación, por tanto:

$$\alpha_{ap} = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r}{r_e} + \frac{1}{2\pi\kappa_e} \ln \frac{r_e}{r_o} + \alpha'_e \quad (25)$$

y si el radio efectivo (r_{ef}) se considera:

$$\alpha_{ap} = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r}{r_{ef}} \quad (26)$$

Por ello, el radio efectivo pasa a ser:

$$r_{ef} = \frac{r_o^{1/\kappa_e}}{r_e^{(1/\kappa_e)-1}} e^{-2\pi\alpha'_e} \quad (27)$$

Alternativa 2

Alternativamente la resistencia de entrada puede expresarse como resistencia del dren y de la envoltura que lo rodea combinando los dos últimos términos de la ecuación (25):

$$\alpha_{e,e} = \alpha'_e + \frac{1}{2\pi\kappa_e} \ln \frac{r_e}{r_o} \quad (28)$$

Entonces, la resistencia al flujo de aproximación pasa a ser:

$$\alpha_{ap} = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r}{r_e} + \alpha_{e,e} \quad (29)$$

Para un dren ideal donde $\alpha'_e=0$ la resistencia de entrada expresada por la ecuación (28) da la resistencia de la envoltura al flujo radial. El radio efectivo puede calcularse combinando las ecuaciones (26) y (29):

$$r_{ef} = r_e e^{-2\pi\alpha_{e,e}} \quad (30)$$

Alternativa 3

Widmoser (1968) definió la resistencia de entrada ($\alpha_{(e,e)W}$) como la diferencia de la resistencia al flujo entre un dren con envoltura y un dren ideal del mismo diámetro r_o y por ello:

$$\alpha_{(e,e)W} = \left(\frac{1}{2\pi} \ln \frac{r}{r_e} + \frac{1}{2\pi\kappa_e} \ln \frac{r_e}{r_o} + \alpha'_e \right) - \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r}{r_o} \quad (31)$$

que después de algunas simplificaciones resulta finalmente en la siguiente expresión:

$$\alpha_{(e,e)W} = \alpha'_e + \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\kappa_e} \ln \frac{r_e}{r_o} - \ln \frac{r_e}{r_o} \right) \quad (32)$$

mientras que la resistencia al flujo de aproximación es:

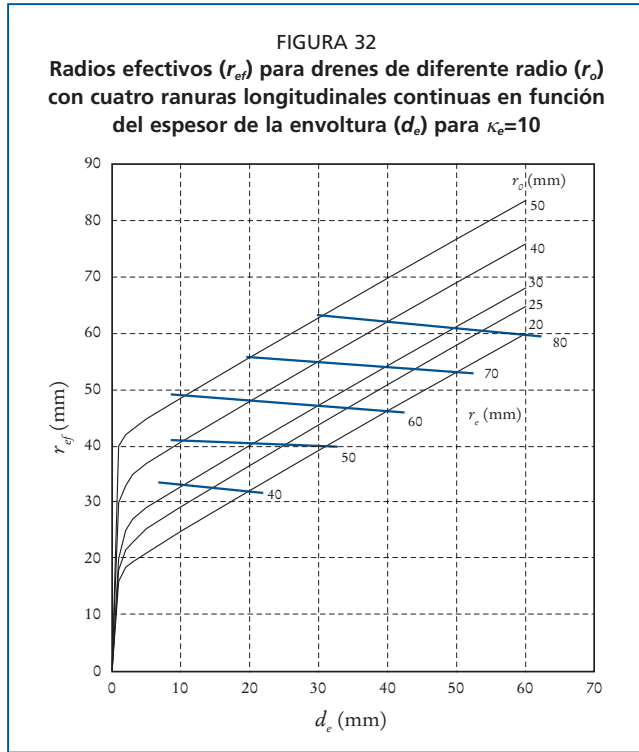
$$\alpha_{ap} = \alpha_{(e,e)W} + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r}{r_o} \quad (33)$$

Combinando las ecuaciones (26) y (33) se obtiene para el radio efectivo:

$$r_{ef} = r_o e^{-2\pi\alpha_{(e,e)W}} \quad (34)$$

Aunque Widmoser (1968) podría haber dado la definición correcta de resistencia de entrada de un dren con envoltura, es obvio que según el análisis anterior el radio efectivo de un dren con una envoltura bien especificada es independiente de cualquier definición que se use para resistencia de entrada.

Las tuberías de drenaje de plástico corrugado con una perforación en cada corrugación y revestidas con una envoltura fina «lámina» que cubre las corrugaciones y las mantiene libres de suelo, hace que la superficie del dren sea mucho más permeable



El radio efectivo de un dren con envoltura aumenta si tanto la conductividad hidráulica como el grosor de la envoltura aumentan. El uso de una envoltura suficientemente permeable ($\kappa_e \geq 10$) y con espesor adecuado ($d_e \geq 5\text{m}$) alrededor de un dren reduce drásticamente la resistencia de entrada. Si ($\kappa_e \geq 10$) y ($d_e \geq 5\text{m}$) drenes con envolturas que tengan el mismo radio externo (r_e) tienen casi el mismo radio efectivo (r_{ef}) para cualquier radio de tubería (r_o) y espesor de envoltura, d_e (Figura 32). Por ello, puede ser más económico seleccionar el diámetro mínimo del dren para asegurar su capacidad de descarga y revestirlo con una envoltura relativamente gruesa, que seleccionar una tubería de mayor diámetro forrada con una envoltura relativamente fina, ya que las tuberías de mayor diámetro son más caras que la mayor cantidad de material envolvente que sería necesaria para obtener el mismo diámetro externo r_e .

y reduce considerablemente la resistencia de entrada (Willardson y Walker, 1979; Salem y Willardson, 1992). Se obtiene una reducción sustancial de la resistencia de entrada si la envoltura instalada tiene una conductividad hidráulica al menos 10 veces mayor que la del suelo circundante. Preferiblemente, el espesor de envoltura debe ser al menos 5 mm (Nieuwenhuis y Wesseling, 1979; Dierickx, 1980). Especificaciones más favorables no disminuyen significativamente la resistencia de entrada. Sin embargo, un espesor mayor de envoltura aumenta el radio efectivo ya que el suelo alrededor del dren es reemplazado por una envoltura relativamente más permeable.

Dren con un entorno poco permeable

Obviamente las obras de drenaje deben llevarse a cabo en circunstancias que no pongan en peligro la estabilidad estructural del suelo. El contenido de humedad del suelo es un factor crítico ya que las obras de drenaje realizadas con zanjadoras en suelo húmedo pueden deteriorar la estructura del suelo excavado, llegando a ser el entorno del dren menos permeable que el suelo natural circundante. Las técnicas de instalación de drenes sin apertura de zanja y de drenaje topo pueden compactar el suelo alrededor del dren o del canal topo formando una zona menos permeable alrededor. La entrada de partículas de suelo en la envoltura o la formación de precipitados químicos pueden ocasionar una oclusión parcial de los poros de la superficie externa de la envoltura y reducir su conductividad hidráulica.

Investigación experimental muestra que si una envoltura tiene un espesor sustancial, p. ej. $> 5\text{mm}$, y su conductividad hidráulica es menor del 10 por ciento de la del suelo circundante, la resistencia de entrada puede ser muy grande y consecuentemente el radio efectivo del dren se reduce a valores extremadamente pequeños, principalmente a causa de la restricción del flujo en las capas menos permeables que rodean el dren. Si el dren dispone de envoltura, el bruñido y la compactación del suelo circundante influye en la resistencia de entrada menos que la obstrucción de la envoltura, pero aún así el radio efectivo puede reducirse a valores inaceptables.

Las diferencias entre las resistencias de entrada de varios tipos de tuberías de drenaje pueden ser importantes si los drenes se instalan sin envoltura. Sin embargo, las características hidráulicas del medio colindante -tanto el suelo o la envoltura y el suelo- son mucho más relevantes que las especificaciones de dichas tuberías.

CAPACIDAD DE DESAGÜE DE TUBERÍAS DE DRENAJE

La capacidad de desagüe de tuberías de drenaje es un componente esencial del diseño de sistemas de drenaje y está incluida en todos los tratados de drenaje de tierras. La información disponible o bien es exhaustiva (Cavelaars *et al.*, 1994) o trata directamente

Una capa poco permeable, ya sea alrededor de un dren sin envoltura o de un dren con una envoltura más permeable, influye adversamente en el funcionamiento de materiales de drenaje y por tanto siempre debe evitarse.

sólo los fundamentos y algunos ejemplos útiles (Smedema y Rycroft, 1983; Smedema *et al.*, 2004). En esta publicación se describen solamente los aspectos más relevantes de acuerdo con Dierickx (1993). Los lectores que deseen obtener más información sobre este tema pueden consultar las publicaciones mencionadas. Framji *et al.* (1987) han proporcionado información adicional sobre procedimientos de diseño (es decir fórmulas) en varios países. En la publicación de Smedema y Rycroft (1983) pueden consultarse ábacos para la determinación rápida de los diámetros necesarios para tuberías. La FAO ha preparado dos programas informáticos para calcular el diámetro de tuberías de drenaje (FAO, 2007).

A menudo es económicamente interesante incrementar el diámetro de drenes colectores e incluso de drenes laterales en la dirección del flujo, ajustando el diámetro al caudal que aumenta en el sentido de la salida del dren. Cavelaars (1979) trató este aspecto en profundidad y en la publicación de Smedema y Rycroft (1983) se incluye un ejemplo sencillo. La publicación de la FAO sobre diseño de sistemas de drenaje también incluye el diseño de drenes de diámetro múltiple (FAO, 2007).

El diseño hidráulico de tuberías de drenaje se basa en fórmulas que relacionan caudal con diámetro de tubería, rugosidad hidráulica de la pared de tubería y gradiente hidráulico. Se usan fórmulas diferentes para tuberías lisas y corrugadas.

Los tubos de cerámica, hormigón y plástico liso se consideran hidráulicamente lisos. Sus capacidades de desagüe pueden calcularse a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach. La capacidad de desagüe de tuberías corrugadas puede calcularse a partir de la ecuación de Chézy-Manning. Para drenes laterales es aconsejable adoptar un diámetro mínimo para compensar defectos de pendiente y alineación, y algún asentamiento que eventualmente pudiera ocurrir, asegurando así la capacidad de desagüe del sistema de drenaje. En países europeos se adopta un diámetro mínimo de 50 o 60 mm; en otros lugares, el diámetro mínimo es 80 mm y en Estados Unidos de América es 100 mm. Para drenes colectores se calcula la longitud correspondiente a una tubería de diámetro dado para cierto gradiente hidráulico.

En la ecuación de Chézy-Manning, la rugosidad hidráulica (o «resistencia a fricción») de la pared de tubería se expresa mediante el coeficiente de Manning (n) o su parámetro inverso, k_M . Para tuberías de drenaje con diámetros de 50 a 200 mm con pequeñas corrugaciones, el coeficiente de rugosidad es $n = 0,0143 \text{ s m}^{-1/3}$ (o su valor inverso $k_M = 70 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$). A partir de los resultados de Irwin (1982, 1984), Boumans (1988) estableció que el valor k_M para tuberías de diámetros mayores con corrugaciones grandes puede expresarse con la fórmula siguiente:

$$k_M = 18,7 d^{0,21} S^{-0,38} \quad (35)$$

en la que d (m) y S (m) son respectivamente el diámetro interior de tubería y la longitud entre corrugaciones. Para la mayoría de tuberías con corrugaciones grandes puede adoptarse un coeficiente de rugosidad $n = 0,02 \text{ s m}^{-1/3}$ (o $k_M = 50 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$).

El tipo de tubería y el gradiente hidráulico determinan la capacidad de desagüe de tuberías de drenaje, cuyo cálculo puede basarse en dos principios (Wesseling y Homma, 1967; Wesseling, 1987):

- El *principio de transporte con flujo uniforme* que asume que a plena capacidad la tubería de drenaje transporta un caudal constante en toda su longitud.
- El *principio de drenaje con flujo variable* que supone una entrada constante de agua freática en el dren a lo largo de toda su longitud, con un caudal que aumenta progresivamente a lo largo de la tubería.

De la aplicación de estos dos principios y de las características de la tubería se ha obtenido el siguiente conjunto de ecuaciones:

Principio de transporte

Principio de drenaje

Cerámica, hormigón y tubos de plástico liso:

$$Q = 50 d^{2,714} s^{0,572} \quad (36)$$

$$Q = 89 d^{2,714} s^{0,572} \quad (37)$$

Tuberías corrugadas con corrugaciones pequeñas (en general tuberías con diámetros de 50 a 200 mm):

$$Q = 22 d^{2,667} s^{0,5} \quad (38)$$

$$Q = 38 d^{2,667} s^{0,5} \quad (39)$$

Tuberías corrugadas con corrugaciones grandes (en general tuberías con diámetros de más de 200 mm):

$$Q = 15 d^{2,667} s^{0,5} \quad (40)$$

$$Q = 27 d^{2,667} s^{0,5} \quad (41)$$

donde

Q = caudal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

d = diámetro interno (m).

s = gradiente hidráulico (sin dimensión).

Todas las ecuaciones se han deducido para tuberías limpias. La comparación de estas ecuaciones revela que la asunción del *principio de transporte* para la determinación del diámetro de tuberías de drenaje implica un factor de seguridad que se incorpora automáticamente en el cálculo. Las ecuaciones basadas en el *principio de drenaje* dan mayores capacidades de desagüe y por tanto mayores áreas susceptibles de ser drenadas con un cierto diámetro de tubería. Se necesita indudablemente adoptar un factor de seguridad para tener en cuenta en el diseño hidráulico el riesgo de un posible colmatado mineral o químico de la tubería. Por lo general, las tuberías están «sobredimensionadas» para permitir cierto colmatado parcial de origen mineral o químico y para evitar errores de alineación durante la instalación.

Si se aplica el *principio de drenaje* debe utilizarse un factor de seguridad, porque este principio se basa en un concepto físico más realista que implica un diseño más económico pero también con mayor riesgo. Para su aplicación práctica, las capacidades de desagüe, calculadas con las fórmulas basadas en el principio de drenaje, se reducen generalmente a un 60 por ciento para incluir un factor de seguridad que tenga en cuenta la posible obstrucción mineral o química de la tubería (Cavelaars, 1974). Esto significa que finalmente ambos principios dan aproximadamente la misma capacidad de desagüe (Dierickx, 1993). Para drenes colectores, la capacidad teórica se reduce por lo general solamente al 75 por ciento. Por tanto, se agrega un 15 por ciento de seguridad adicional al usar las fórmulas basadas en el principio de transporte.

Otros factores de reducción de hasta el 50 por ciento pueden ser aconsejables para tener en cuenta obstrucción, problemas de desalineación y errores del coeficiente de rugosidad de tuberías (El Afty *et al.*, 1990). El factor de reducción puede ser conservador (25 por ciento) si se instalan tuberías de plástico corrugado en suelo estable, pero puede ser mucho mayor (50 por ciento) para tubos de drenaje colocados en suelo inestable.

Un dren demasiado pequeño o parcialmente colmatado reduce la capacidad de transporte. La sección de tubería será entonces demasiado pequeña para desaguar correctamente agua freática y el agua dentro del dren fluirá a presión. Entonces puede existir agua sobre el dren y la capa freática a media distancia entre drenes estar demasiado alta. Mediante un piezómetro que determine la carga hidráulica en el dren puede observarse si el diámetro es demasiado pequeño o si existe una reducción de la capacidad de transporte, mientras que con pozos de observación puede determinarse la posición de la capa freática en una sección transversal a un dren y en la proximidad del mismo.

Capítulo 5

El problema de la obstrucción de tuberías y envolturas

OBSTRUCCIÓN MINERAL

Procesos en suelos en torno a drenes

Un gran problema frecuente en drenes subterráneos es la obstrucción mineral de tuberías y envolturas. Este proceso físico ocurre como consecuencia de cambios repentinos y drásticos en las condiciones suelo-agua alrededor de las tuberías causados por su instalación. Inmediatamente después de la instalación comienza a establecerse un nuevo equilibrio en el área próxima a la interfase entre el relleno y la superficie de la tubería de drenaje o la superficie de la envoltura. Esta área es vulnerable porque la resistencia física del suelo y su estabilidad estructural disminuyen durante el proceso de instalación y porque comienza a fluir agua freática hacia el dren con gradientes hidráulicos y densidades de flujo altas, que inducen fuerzas de arrastre considerables sobre las partículas de suelo.

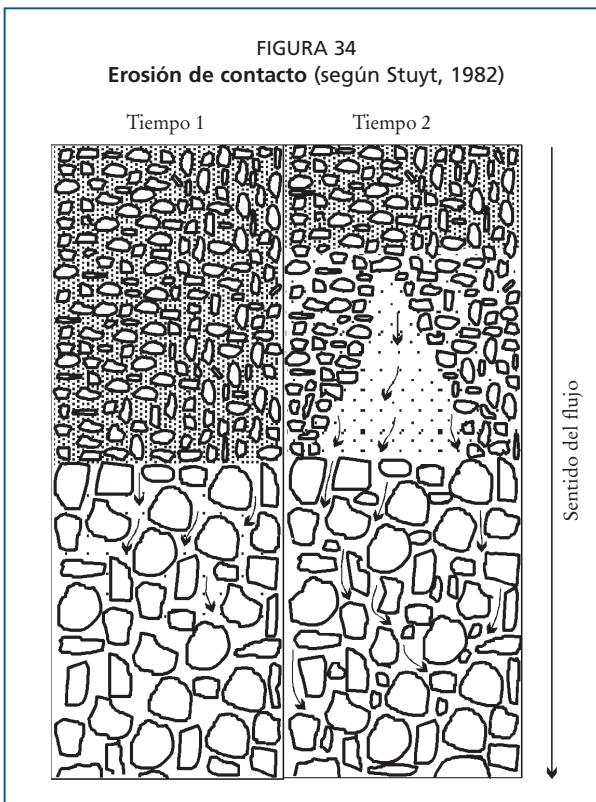
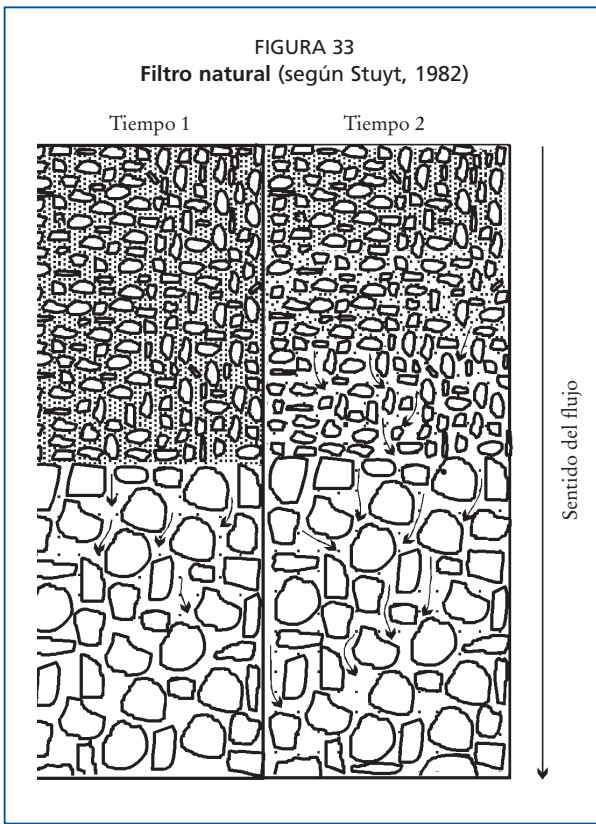
En la interfase entre suelo y envoltura (o pared de tubería) la movilización de partículas de suelo causado por agua que fluye se denomina frecuentemente erosión interna del suelo. Ziems (1969) hizo un estudio exhaustivo de este fenómeno e indicó que el movimiento de partículas de suelo en la interfase entre dos medios en la práctica puede ser causado por tres fenómenos físicos diferentes: arrastre de partículas finas de suelo (creando un *filtro natural*), erosión de contacto y disgregación del suelo. El proceso físico que da lugar a un filtro natural en el suelo ha sido tratado por varios autores (Stuyt, 1982, 1992a; Cavelaars *et al.*, 1994). Otro fenómeno que afecta negativamente la entrada de agua en drenes es la formación de lo que se denomina «torta filtrante».

A continuación se describen brevemente los fenómenos que se han mencionado anteriormente:

Filtro natural. Si solamente se desplazan partículas finas de suelo, la fracción más gruesa permanece haciendo de puente sobre los orificios del dren o sobre la envoltura. En la Figura 33 se muestra la formación de un filtro natural, p. ej. en el relleno situado sobre una envoltura granular. La fuerza de arrastre del agua que fluye hacia un dren causa movimiento de pequeñas partículas de suelo hacia la envoltura y a través de la misma, mientras que las de mayor tamaño son retenidas (Tiempo 1). Después de cierto tiempo se forma un filtro natural muy permeable en el suelo adyacente a la envoltura (Tiempo 2) cuya conductividad hidráulica aumenta. Si partículas más gruesas también se desplazan, en vez de formarse un filtro natural en el suelo se origina un movimiento excesivo de partículas que disminuye localmente la resistencia física del suelo. A su vez, este proceso promueve erosión de contacto.

Erosión de contacto significa que partículas de casi todo tamaño son arrastradas localmente, dando lugar a una modificación del armazón del suelo del que dependen las tensiones efectivas dentro del mismo. En la Figura 34 se aprecia el efecto de la erosión de contacto. En este caso, la fuerza de arrastre del agua que fluye hacia un dren ocasiona que partículas de suelo de todo tamaño se muevan hacia la envoltura y a través de la misma (Tiempo 1). Después de cierto tiempo se forman macroporos en la interfase entre envoltura y suelo (Tiempo 2).

Torta filtrante. Esta torta es una capa densa de partículas de suelo que se forma si partículas finas del mismo en suspensión se acumulan en o cerca de la interfase entre suelo y envoltura. Frecuentemente, la mayor parte de esta capa se localiza en el suelo



y no en la envoltura (Stuyt, 1992a). La Figura 35 muestra la formación de una torta filtrante en la que partículas finas de suelo se desplazan hacia la envoltura pero no penetran en ella (Tiempo 1). Muchas partículas se acumulan en el suelo cerca de la interfase entre suelo y envoltura (Tiempo 2). Esto ocurre cuando los orificios de la envoltura son demasiado pequeños y actúan como un filtro para las pequeñas partículas de suelo que se mueven con el agua. A menudo, la conductividad hidráulica de las tortas filtrantes es considerablemente inferior a la del suelo original, porque las partículas finas de suelo obstruyen los poros del suelo en la interfase suelo-envoltura.

Disgregación del suelo. Si la fuerza de arrastre del agua supera las fuerzas de cohesión y la tensión entre partículas, el suelo se disgrega y se puede compactar, según se muestra en la Figura 36. Puede observarse que después de la instalación de un dren la cohesión del suelo impide que las partículas de suelo se desplacen hacia la envoltura y entren en ella (Tiempo 1). En una etapa posterior, los agregados de suelo se disgregan y pasan partículas a través de la envoltura hacia el dren (Tiempo 2). En la interfase suelo-envoltura puede formarse algún puente secundario que impida la entrada posterior de partículas en la envoltura.

La disgregación del suelo implica la pérdida local de su estructura, dispersión de sus agregados y movimiento de partículas de todo tamaño en la interfase entre suelo y envoltura. Este fenómeno ocurre con más frecuencia en suelos pesados y cohesivos con altos gradientes hidráulicos. La fuerza de arrastre del agua y la carga de suelo a la profundidad de drenes también pueden originar que suelo saturado cerca de un dren fluya en forma de lodo a través de la envoltura y entre en las perforaciones de la tubería (Van der Louw, 1986; Stuyt, 1992a).

Hasta hace poco tiempo la *erosión de contacto* se consideraba perjudicial para un buen funcionamiento de drenes subterráneos (Stuyt, 1982). Sin embargo, observaciones posteriores indicaron que un cierto grado de erosión de contacto es

favorable ya que promueve la formación de una red de macroporos alrededor del dren. Esta red cumple una función importante en la entrada de agua en el dren.

Stuyt (1992a) intentó conocer rigurosamente los *procesos físicos de la obstrucción mineral*. Utilizó un escáner CT para obtener imágenes digitales tridimensionales de muestras de suelo sin alterar conteniendo secciones de 300 mm de largo de tuberías de drenaje con envoltura con su suelo circundante. Se extrajeron 45 secciones de drenes que habían estado en operación durante cinco años, en tres campos experimentales localizados en varias áreas de los Países Bajos, donde los suelos a la profundidad de drenes constan de arenas muy finas, es decir, suelos problemáticos con poca estabilidad estructural. Cada secuencia-CT es un mapa tridimensional geoméricamente preciso de las variaciones internas de densidad en el interior de envolturas de dren y de suelos circundantes. En las imágenes tridimensionales pudieron distinguirse dos grandes tipos de poros de suelo: *poros* asociados a la *textura* dentro de agregados y *macroporos* (huecos, grietas) que separan esos agregados. En el 40 por ciento de los casos, la macroporosidad media en la zanja fue menor que en el suelo circundante, en el que se encontraron dos tipos de características estructurales: capas horizontales y macroporos orientados verticalmente (Figura 37).

En la Figura 37 solo se aprecian áreas relativamente permeables en el suelo alrededor del dren. No hay relación entre la permeabilidad del suelo y la intensidad del sombreado gris, que se debe a técnicas de procesamiento de imágenes para facilitar la interpretación visual de la imagen que es muy compleja. Mediante estas técnicas de procesamiento de imágenes se eliminaron parte de los bordes de plexiglás del contenedor de muestras y del soporte de las mismas en el escáner CT.

Notodas las áreas permeables representadas en la Figura 37 están físicamente conectadas al dren y por tanto transmitiéndole agua. Usando una técnica de análisis de imágenes tridimensionales, pudieron detectarse las áreas que están conectadas al dren (los denominados *macroporos activos*). En la

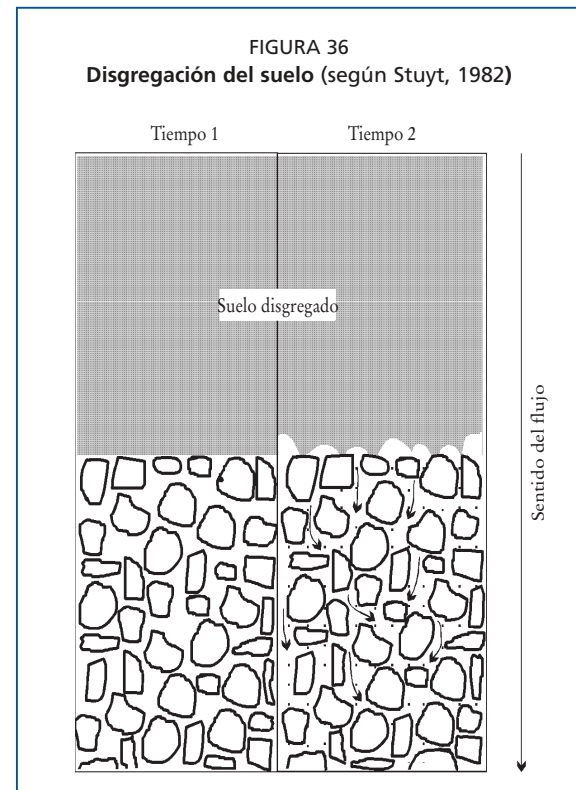
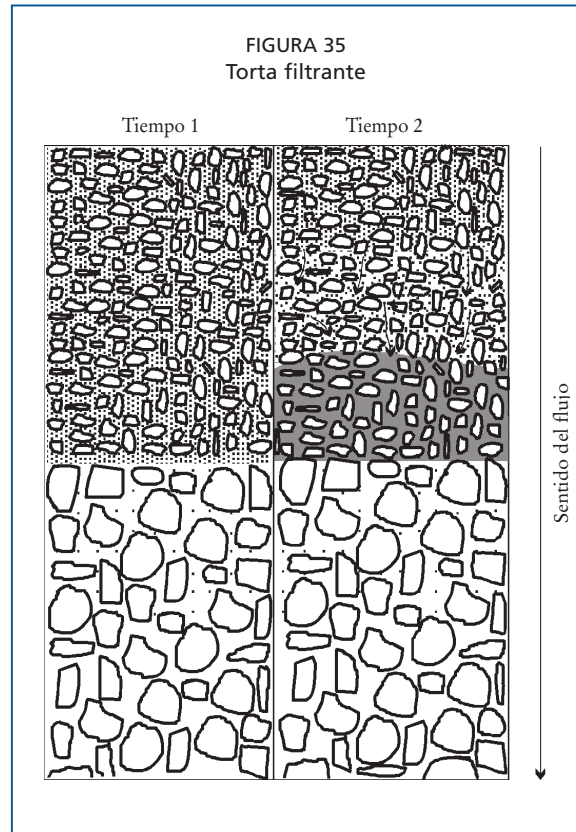


FIGURA 37
Ejemplo de un subsuelo estratificado (izquierda) y de un subsuelo con macroporos orientados verticalmente formados en antiguos canales de raíces (derecha)
(según Stuyt, 1992b)

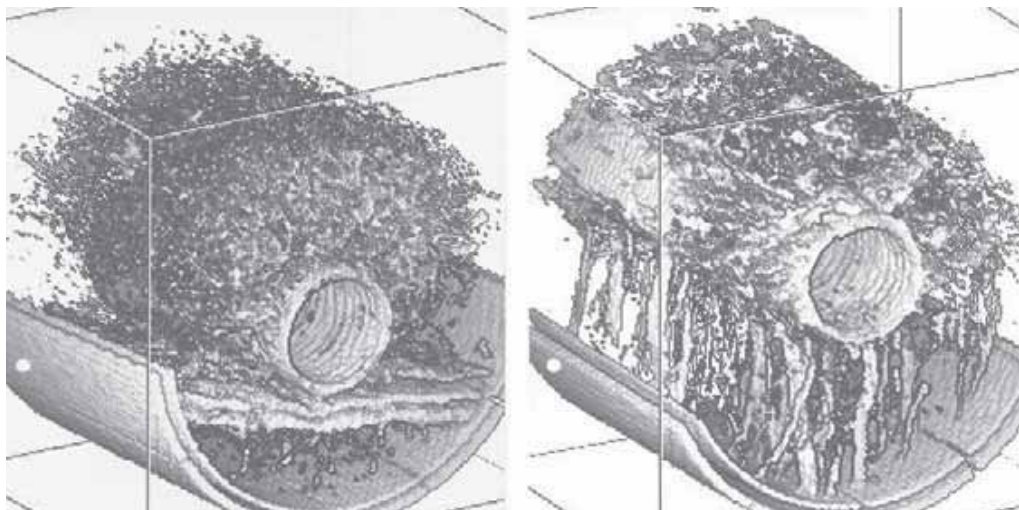


FIGURA 38
Imágenes que muestran envolturas de dren y macroporos activos (según Stuyt, 1992b)

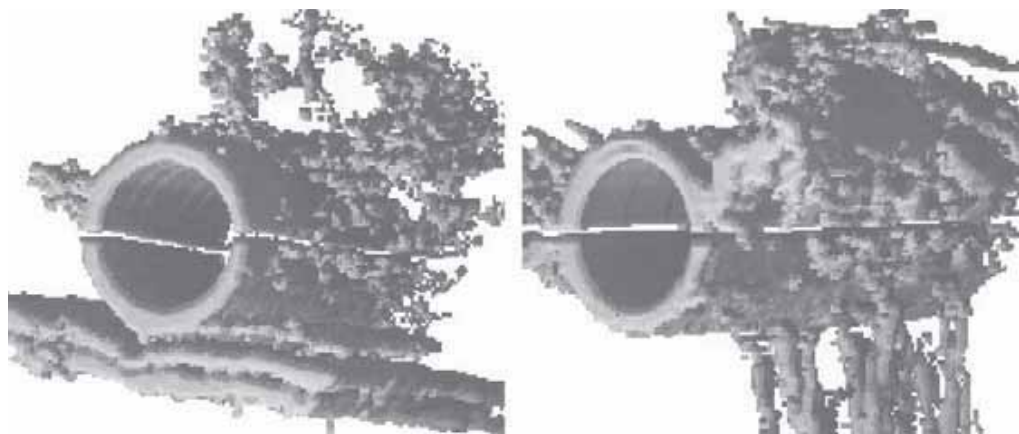


Figura 38 se representan estos macroporos activos en muestras que son las mismas de la Figura 37. Puede observarse claramente que solamente una pequeña parte de las áreas permeables detectadas transmite activamente agua al dren. Estos macroporos activos se desarrollan parcialmente mediante procesos de erosión de contacto que deben tener lugar durante el asentamiento del suelo después de la instalación.

Se aprecian ciertas bandas sutiles por debajo del dren que indican capas de suelo relativamente permeables y el suelo de la zanja del dren que contiene algunos macroporos geoméricamente complejos (Figura 38, izquierda). El acceso de agua al dren (a la derecha) tiene lugar a través de una serie de macroporos paralelos orientados verticalmente.

La heterogeneidad de obstrucciones minerales de envolturas voluminosas, tal como se ha detectado en muestras de campo, se ilustra en la Figura 39 en forma de imágenes-CT transformadas que muestran las envolturas como superficies planas. Las áreas que no están seriamente obstruidas son de color gris. Las áreas de envoltura obstruida no se ven y aparecen de color blanco.

En contraposición a suposiciones teóricas, el efecto de una envoltura sobre el tipo de flujo de agua hacia un dren es pequeño, como es su efecto sobre la resistencia radial y de entrada. El estudio de todos los tipos de flujo de agua hacia drenes ha revelado que no es evidente que las especificaciones de envolturas tengan un efecto significativo sobre la geometría de esos tipos de flujo. Probablemente, las variaciones de la resistencia al flujo cerca de un dren subterráneo dependan estrechamente de las características estructurales del suelo, es decir, de su macroporosidad y de la disposición geométrica de la red de macroporos cerca del dren. El denominado tamaño efectivo de abertura (O_{90}) parece ser el único parámetro importante para el diseño de una envoltura. A diferencia de otras especificaciones de envolturas, el valor O_{90} tuvo un efecto significativo en el grado de obstrucción mineral de tuberías de drenaje (Stuyt, 1992a).

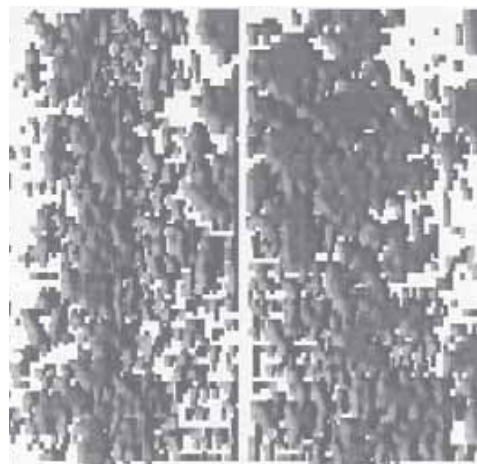
Las envolturas actúan principalmente como elementos de «retención» de suelo o como barreras permeables que sostienen físicamente el suelo próximo a los drenes. Dada la importancia de las propiedades físicas de los suelos en el proceso de obstrucción mineral, aplicar buenas prácticas de instalación tendrá un efecto favorable sobre la vida útil de drenes con envoltura. Por otro lado, envolturas aun bien diseñadas no pueden paliar propiedades físicas desfavorables de los suelos circundantes ni tampoco compensar una mala instalación. Por tanto, la instalación en húmedo debe evitarse siempre que sea posible.

Obstrucción de tuberías

El colmatado de tuberías de drenaje no depende solamente de las características intrínsecas del suelo. Otros factores, como las condiciones y la calidad de instalación y un mantenimiento inadecuado de los drenes, p. ej. si se inyecta agua a alta presión, pueden causar sedimentación en drenes.

Los sedimentos minerales en drenes se deben a partículas de suelo que pasan a través de la envoltura (si la hubiera) y de los orificios de las tuberías. Generalmente, son llevadas en suspensión partículas finas ($<20 \mu\text{m}$) originándose un flujo turbio. Sin embargo, la arena sedimenta y si es abundante obstruye la tubería. En terrenos llanos, con pendientes de dren de aproximadamente 0,2 por ciento (0,2 m por cada 100 m), aún arenas muy finas (tamaño medio de las partículas $50 \mu\text{m}$) sedimentarán cerca del punto de entrada en la tubería. Solamente es posible cierta auto-limpieza de drenes en caso de pendientes mucho mayores.

FIGURA 39
Ilustración de la heterogeneidad de los tipos de obstrucción mineral detectados en el interior de envolturas voluminosas (según Stuyt, 1992b)



OBSTRUCCIÓN QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

En drenes subterráneos se conocen cuatro tipos de sedimentos que están relacionados con actividad bacteriana: de ocre, manganeso, sulfurosos y de sulfuro de hierro. Los sedimentos voluminosos gelatinosos de hierro oxidado, denominado ocre, son los más comunes y problemáticos. Otros depósitos conocidos son de cal y yeso, que existen principalmente en drenes subterráneos de regadíos debido a la composición química del suelo y a la calidad del agua de riego.

Ocre de hierro

Generalmente, los lodos gelatinosos formados por deposición de ocre son de color bronce, amarillo o rojo. El ocre es filamentosos (a causa de filamentos bacterianos), hidratado (más de 90 por ciento de agua) y su materia seca tiene un alto contenido de hierro (2-65 por ciento de peso seco). Frecuentemente contiene una matriz orgánica (2-50 por ciento de peso seco) (Ford, 1979, 1982a).

Hay dos tipos principales de problemas de ocre:

1. *El ocre como problema temporal, denominado autóctono (origen local)*. El ocre temporal como factor de obstrucción puede desaparecer en un período de tres a cinco años. Por lo general se forma rápidamente y a menudo puede detectarse en salidas de dren poco tiempo después de su instalación. Si los drenes se mantienen en buenas condiciones la concentración de Fe^{2+} que llega a los mismos disminuirá gradualmente.
2. *El ocre como problema permanente, denominado alógeno (origen externo)*. El ocre permanente es el más peligroso ya que es un factor de obstrucción continuo durante toda la vida útil del sistema de drenaje, independientemente del tratamiento. El ocre permanente se da en suelos que contienen grandes cantidades de hierro residual y energía natural. El hierro reducido soluble se origina en áreas circundantes, de aquí su nombre, y es transportado por filtraciones de agua hacia el área drenada. Hay lugares afectados por ocre en los que se origina hierro soluble a 4 o 6 km del área drenada. Por tanto, al estimar el potencial de formación de ocre permanente es importante considerar las características topográficas del terreno. En general, no deberían drenarse con tuberías aquellas áreas consideradas de riesgo potencial de ocre permanente, sin considerar modificaciones en el diseño de los sistemas y sin tomar precauciones para su mantenimiento continuo.

Puede encontrarse ocre en el suelo próximo a una envoltura de dren, en la propia envoltura, en las perforaciones de tubería y dentro de una tubería de drenaje. La mayor obstrucción en tuberías corrugadas puede encontrarse cerrando perforaciones y acumulada en el valle de las corrugaciones. La mayor acumulación de ocre dentro de tuberías parece darse en el tercio inferior de la longitud del dren, aunque generalmente este tramo no es la zona de máxima formación de ocre. A menudo, puede detectarse ocre como una masa gelatinosa voluminosa en salidas de dren o en pozos de registro. Sin embargo, también puede existir en drenes y no ser visible en la salida.

Formación de ocre

Para formarse ocre se necesita hierro *ferroso* reducido (Fe^{2+}) como materia prima que fluye hacia drenes. La concentración mínima de Fe^{2+} ferroso que es necesaria para el crecimiento de la bacteria férrica *Leptothrix* es 0,12 mg/l (0,12 ppm) (Ford, 1980).

Debe estar más bien en solución en el agua freática que en partículas de suelo. Principalmente se encuentra como hidróxido de hierro [$Fe(OH)_2$] o como sulfuro de hierro (FeS_2) que precipita cuando se oxida al contacto con aire, por ej. cerca o dentro de drenes subterráneos (Smedema y Rycroft, 1983). Muchos suelos contienen cantidades sustanciales de hierro, pero las condiciones necesarias para que se presenten problemas de ocre varían considerablemente.

Se necesitan bacterias para convertir *hierro férrico* (Fe^{3+}) insoluble que está en partículas de suelo, a una forma soluble (Fe^{2+}) que pueda ser transportada hacia drenes por flujo de agua freática. Solamente puede existir *hierro ferroso* (Fe^{2+}) en agua freática si el oxígeno del suelo ha sido agotado, p. ej. después que un suelo se ha inundado durante un tiempo considerable o cuando los microorganismos han consumido todo el oxígeno disponible. Cuando se cumplen estas condiciones, bacterias reductoras de hierro reducen Fe^{3+} insoluble. Esta acción biológica de las bacterias requiere gran cantidad de energía y por ello deben existir fuentes de energía. La mayor fuente de energía es el material orgánico, como restos vegetales y raíces de plantas, y ciertos ácidos como málico, cítrico, tánico o láctico. Por tanto, cuanto más alto sea el contenido de materia orgánica del suelo más rápida y más extensa será la conversión bacteriana de Fe^{3+} a Fe^{2+} .

Fe^{2+} soluble que fluye en agua freática entra en un ambiente diferente a medida que se aproxima a un dren y pasa a través de su envoltura. Si existe oxígeno en esta zona, ciertas bacterias filamentosas y con forma de bastón precipitan algo de Fe^{2+} como Fe^{3+} insoluble y lo incorporan en forma de ocre. Para que ocurra una obstrucción importante deben existir bacterias que precipiten hierro, aún cuando las otras condiciones que son necesarias para la precipitación química del hierro sean adecuadas. *El hierro por si solo no tiene propiedades adherentes importantes*. La reacción dentro de drenes es una combinación de precipitación bacteriana e incorporación de hierro químicamente precipitado en lodos pegajosos de las masas bacterianas presentes en la matriz de ocre.

Hay un tipo de ocre que se forma solamente con *pH* bajo en suelos con *pirita* (suelos con sulfatos ácidos). Estos suelos se encuentran en muchas zonas costeras, en vertederos mineros y en ciertos esquistos. Se forman piritas a partir de hierro y ácido sulfhídrico en sedimentos marinos inundados. Si se drenan estos suelos primeramente se oxidan piritas a Fe^{2+} y sulfatos, que cambian a ácido sulfúrico descendiendo el *pH* del suelo por debajo de 3,5. Las bacterias en forma de bastón *Thiobacillus ferrooxidans*, que pueden actuar solamente en un medio ácido, convierten entonces hierro soluble en ocre.

En Egipto, Irak y Pakistán no se han encontrado problemas importantes de ocre debido a la alcalinidad de los suelos. En suelos alcalinos, no puede existir Fe^{2+} disuelto en agua freática. En Israel se han encontrado serios problemas de ocre al drenar ciertas áreas pantanosas. Los sistemas de drenaje se diseñaron de tal manera que se mantuvieron condiciones anaeróbicas colocando un codo a la salida de los drenes para mantenerlos bajo agua. Estos sistemas han funcionado con éxito durante varios años (Henkin, 1987). El mismo procedimiento se aplicó en los Países Bajos en la década de 1960 pero con poco éxito (Huinink, 1991).

Predicción de problemas de ocre

Las siguientes observaciones *in situ* pueden indicar problemas potenciales de ocre en el interior de drenes (Ford, 1979):

1. Los tipos de suelos que parecen tener mayor potencial de formación de ocre son aquellos con arenas finas y limosas, suelos orgánicos, suelos con capas orgánicas y perfiles de suelos minerales con materia orgánica mezclada.
2. Terrenos utilizados para la evacuación de efluentes de agua residual por lo general disponen de energía suficiente para reacciones de reducción. Estos suelos tienen riesgo potencial de formación de ocre si están sujetos a inundaciones prolongadas.
3. Algunas características topográficas indican posibles problemas de ocre. Si existe tierra más alta adyacente al área drenable, el potencial de formación de ocre permanente puede ser un problema debido a una filtración permanente. Los valles situados al pie de escarpes son lugares típicos de formación de ocre permanente.
4. Llanuras de inundación de ríos y barrancos son lugares propensos, especialmente si presentan una mezcla de arena y materia orgánica.

5. Depresiones que contienen residuos orgánicos son lugares propensos para formación de ocre.
6. La presencia de arcillas de color azulado o cenagosas, con materia orgánica descomponible entre 0,6 y 1,2 m de profundidad, sugiere áreas con riesgo de ocre permanente.
7. Películas oleosas que flotan en la superficie del agua de canales pueden indicar ocre y pueden contener filamentos bacterianos formadores de ocre.
8. Ocre gelatinoso precipitado en los taludes de zanja, en sus soleras o en ambos es un indicador importante de problemas potenciales de ocre.
9. La cantidad de Fe^{2+} en agua freática es por lo general mayor en suelos con capas orgánicas y pH menor de 6.
10. Empíricamente se sabe que los suelos con menores posibilidades de presentar problemas de ocre son los arcillo limosos, franco arcillosos y arcillosos.
11. En zonas áridas no suele haber problema de ocre.

Estimación del riesgo de ocre

Antes de instalar drenes es posible estimar el máximo riesgo de formación de ocre y también si determinados tipos o perfiles de suelo pueden considerarse susceptibles de formar ocre (Ford, 1982b). Analizar el contenido total de hierro de los *suelos* no es válido, ya que los resultados no indican hierro soluble Fe^{2+} o las complejas interacciones entre el pH y el tipo de suelo. El contenido de Fe^{2+} del *agua freática* que fluye hacia un dren sí es un indicador valioso del riesgo de obstrucción por ocre. La forma más sencilla de determinar el contenido de Fe^{2+} de agua freática es introduciendo tiras de papel indicador en una muestra de agua y por colorimetría evaluar la concentración de hierro ferroso. Existen distintos códigos de color para clasificar las siguientes concentraciones: 2, 5, 10, 25, 50 y 100 mg Fe^{2+}/l .

Ford (1982a) elaboró un método complejo pero eficaz para evaluar en perfiles de suelo el riesgo de obstrucción por ocre antes de instalar drenes. Este método, que es independiente del pH y del tipo de suelos, ha sido elaborado y comprobado ampliamente en numerosas zonas de Estados Unidos de América (Ford, 1982a). Mediante este método es posible determinar si una capa de suelo puede liberar más o menos cantidad de Fe^{2+} una vez saturada de agua y si el Fe^{3+} que está adherido a partículas de suelo puede reducirse fácilmente a Fe^{2+} soluble.

Scholten y Ven (1987) compararon las tasas potenciales de ocre determinadas por el método de Ford y mediante el método de tiras de papel indicador, y encontraron una estrecha correlación entre los contenidos de hierro ferroso determinados por ambos métodos. Sin embargo, el contenido indicado por tiras de papel es consistentemente más alto que el indicado por el método de Ford (relación 3 a 4). Aún así, el método sencillo de tiras es suficiente para mediciones rutinarias. Scholten y Ven (1987) elaboraron un cuadro

CUADRO 8
Riesgo de formación de ocre según el método de Ford y el de tiras de papel indicador

Potencial de ocre	Hierro ferroso (Fe^{2+}) en agua freática (mg/l)	
	Método de Ford	Tiras de papel indicador
Muy alto	>10	>25
Alto	5-10	10-25
Moderado	2-5	5-10
Pequeño	0,5-2	1-5
Insignificante	<0,5	<1

para evaluar el riesgo de ocre (Cuadro 8), a pesar del número insuficiente de determinaciones obtenidas en sus investigaciones. Los valores de este cuadro concuerdan razonablemente con las cifras propuestas por Ford (1982a).

Cómo minimizar la obstrucción de drenes con ocre

No se conoce ningún método económico para a largo plazo controlar eficazmente la obstrucción de drenes por ocre. Como las opciones son limitadas hay que «convivir con el problema». Las siguientes recomendaciones pueden ser útiles (Ford, 1982a, 1982b).

1. *Precipitación de hierro en el suelo promoviendo oxidación.* No puede disolverse hierro en agua freática hasta que se reduce, por lo que son aceptables todas las medidas que disminuyan la creación de condiciones anaerobias. Como airear un suelo impide su reducción, en ciertas zonas puede ser útil disminuir el espaciamiento entre drenes y la profundidad de drenaje.
2. *Tamaño de las perforaciones de las tuberías de drenaje.* Cuanto mayor sean las perforaciones mayor será el período en que se mantenga el caudal de drenaje antes de empezar a disminuir sustancialmente. Es fundamental que el corte de perforación sea limpio, ya que el ocre se adhiere a los bordes de plástico irregulares de los orificios. Perforaciones de tamaño pequeño limitan la eficacia de la limpieza con agua a presión de drenes instalados con envolturas sintéticas.
3. *Envolturas de dren.* El mejor material envolvente es grava clasificada pero puede obstruirse si el riesgo de formación de ocre es alto. Los PLM de estructura gruesa, compatibles con el suelo, también pueden reducir el riesgo de obstrucción por ocre. Envolturas sintéticas relativamente finas, como geotextiles, tienen mayor riesgo. Estudios realizados en áreas drenadas seleccionadas muestran que la obstrucción con ocre de drenes cubiertos con materiales sintéticos ocurre primeramente en las aberturas y valles de las corrugaciones de tubería, y el ocre puede acumularse en cantidad suficiente para que el sistema de drenaje no funcione. Estos materiales se obstruyen con relativa facilidad con depósitos de ocre porque las bacterias que precipitan hierro se desarrollan fácilmente en los huecos de los tejidos. De todas las envolturas sintéticas, las de poliéster tejido son las menos vulnerables a obstruirse con ocre.
4. *Materiales envolventes orgánicos.* En Florida, Estados Unidos de América, envolturas hechas de serrín de pino, roble o ciprés demoraron durante largos períodos la formación de ocre en las aberturas de entrada de agua en el dren. El serrín crea un ambiente anaerobio, parece ser tóxico para bacterias que forman ocre y puede contener compuestos hidroxílicos aromáticos que inmovilizan hierro. Debe evitarse usar turba y otros materiales envolventes orgánicos, ya que por lo general aumentan los problemas de ocre y favorecen la obstrucción.
5. *Salidas sumergidas.* Si el agua freática tiene alto riesgo de ocre, la sumersión de drenes impide que el Fe^{2+} soluble se oxide a Fe^{3+} insoluble que causa obstrucción (Rozendaal y Scholten, 1980). Ésta es una recomendación antigua que ha sido aplicada con cierto éxito cuando todo el dren está permanentemente bajo agua. La línea de dren debe estar completamente bajo agua durante todo el año. Para ello puede ser necesario instalar drenes sin apenas pendiente o horizontales.

Eliminación del ocre de drenes

Apenas se dispone de datos sobre inyección de agua a presión en drenes cubiertos con envolturas sintéticas. En los Países Bajos, inyectar agua a media presión a drenes obturados con ocre ha dado por lo general resultados insatisfactorios. La capacidad de desagüe de drenes inyectados no mejoró significativamente o mejoró solamente durante un breve período. El agua inyectada debe pasar a través de las perforaciones de la tubería y ser desviada por la envoltura para limpiar los valles de las corrugaciones. En suelos estructuralmente inestables, la presión en boquilla no debe exceder 20 bar, de lo contrario el suelo próximo a los drenes puede desestabilizarse y fluir hacia el dren (véase el Capítulo 7, Apartado *Mantenimiento de tuberías de drenaje*). Cuanto mayor sean las perforaciones de una tubería mejor se limpiarán los valles de las corrugaciones y la envoltura. La limpieza mediante agua a presión es insatisfactoria si se demora hasta que el ocre haya envejecido y se vuelva cristalino, pegajoso o ambas cosas. También se puede limpiar con éxito en seco, sin agregar agua adicional, mediante una varilla dotada de un rascador en el extremo, siempre que:

- La operación se lleve a cabo cuando el ocre es aún lodo, antes de que tenga la oportunidad de endurecerse durante un período seco prolongado (verano).
- La limpieza con varilla se haga mientras el dren lleve agua (período húmedo); de esta manera, el ocre aún en forma de lodo se suelta fácilmente y es arrastrado por el caudal de drenaje (Cavelaars, comunicación personal).

Si se sospechan problemas de ocre se recomienda inyectar agua en los drenes durante el primer año antes que se obstruyan, ya que la deposición de ocre es por lo general más grave poco tiempo después de instalar los drenes. Estos deben desaguar en zanjas abiertas y no en colectores de tubería, ya que en el primer caso el acceso a los drenes facilita enormemente la inyección de agua. Para la limpieza con agua a presión, los sistemas en espina de pescado o con diseños similares deben tener accesos para la inyección.

Depósitos de yeso y cal

Mientras que el ocre es un problema relevante en regiones templado-húmedas, que ha sido investigado exhaustivamente a gran escala durante décadas, no ha sido investigada sistemáticamente la precipitación en tuberías de drenaje y envolturas de sales ligeramente solubles, como son carbonato de calcio (CaCO_3) y sulfato de calcio como yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Hay un amplio campo de investigación sistemática sobre la precipitación de cal y yeso en drenes de tubería, que debería incluir un inventario de la extensión del problema y las condiciones bajo las cuales tiene lugar dicha precipitación. La deposición de calcio y yeso es muy probablemente un proceso químico. Verosímelmente se forman depósitos duros y cristalinos con relativa lentitud de modo que los efectos adversos aparecen solamente tras un largo tiempo.

El problema puede presentarse en suelos yesosos y en suelos con alto contenido de carbonato de calcio, que son comunes en zonas áridas y semiáridas, o como resultado de sales aportadas con el agua de riego. Sin embargo, también pueden presentarse problemas en áreas sin riego en función del contenido de Ca^{2+} disuelto en agua freática, como en un caso de Bélgica donde CaCO_3 ha cementado grava alrededor de una tubería de un sistema de drenaje de un camino transformándola en una masa compacta e impermeable. También se han encontrado en Francia otros casos de formación de depósitos calcáreos en y alrededor de drenes instalados en suelos por los que fluye agua freática rica en Ca^{2+} disuelto (CEMAGREF, 1983). Cavelaars *et al.*, (1994) encontraron yeso en drenes excavados en zonas áridas. Sin embargo, no se encontró deposición de cal en sistemas de drenaje horizontales a pesar del riesgo de precipitación de cal *-incrustación-* en paredes de pozos de captación de aguas subterráneas.

Pueden precipitar cal y yeso si la concentración de compuestos de calcio (carbonatos, bicarbonatos o sulfatos) excede su solubilidad. Muchas aguas, especialmente en regiones áridas, están parcialmente o casi saturadas de bicarbonato de calcio [$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$], que según sea su concentración precipita en el suelo como CaCO_3 . Precipitarán esa sal y CaSO_4 al concentrarse la solución del suelo, si por efecto de la absorción de agua por las plantas se excede la solubilidad del relativamente insoluble CaCO_3 y del CaSO_4 que es más soluble.

Este proceso químico no explica la precipitación de CaCO_3 en la envoltura de un dren y en sus perforaciones, que puede deberse a la conversión de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ debida a la pérdida de dióxido de carbono (CO_2). El riesgo de precipitación en pozos puede explicarse por la disminución de la presión del agua subterránea a la entrada de las aberturas del pozo o de su envoltura.

No es posible prevenir completamente la deposición de CaCO_3 y CaSO_4 en un sistema de drenaje horizontal, pero pueden tomarse algunas medidas para reducir el riesgo de precipitación de esas sales de calcio. Mantener los sistemas de drenaje bajo agua reducirá el riesgo de formación de solutos más concentrados cerca de un sistema de drenaje y la liberación de CO_2 del agua freática.

Depósitos de manganeso

El manganeso disuelto en agua freática, bajo condiciones adecuadas de reducción, puede formar mediante un proceso bacteriano un depósito negro gelatinoso que dé lugar a obstrucción.

Precipitado sulfuroso

El lodo sulfuroso es un depósito fibroso de color variable de amarillo a blanco formado por oxidación de sulfuro de hidrógeno (H_2S) resultado de la reducción de sulfatos disueltos en agua freática. Las bacterias sulfurosas oxidan el H_2S a H_2O y a azufre elemental S. Glóbulos de azufre elemental y masas de lodo blancuzcas y pegajosas se depositan en los filamentos de estas bacterias y forman un precipitado de azufre en las salidas de dren (Martínez Beltrán, 1978; Ford, 1980).

Estos lodos sulfurosos no han sido un problema grave en la mayor parte de sistemas de drenaje de tierras agrícolas, pero se encuentran a menudo en suelos con turba y también pueden encontrarse en zonas que se riegan subterráneamente mediante tuberías de drenaje si el agua subterránea usada para el riego contiene H_2S .

Sulfuro de hierro

Puede encontrarse sulfuro de hierro (FeS_2) bajo condiciones de reducción química, p. ej. cuando se instalan drenes en perfiles de suelo mezclados (orgánicos y minerales), en llanuras de ríos o torrentes, o cuando se utiliza la capa superior del suelo o restos orgánicos para cubrir drenes durante su instalación. Es un precipitado negro gelatinoso formado por reacción entre Fe^{2+} y H_2S . Generalmente no se adhiere a partículas de suelos arenosos ligeros pero llega a ser un agente obstructor si está presente en cantidades que puedan cegar los poros del suelo. En general, el sulfuro de hierro no debería ser un problema serio en la mayor parte de los sistemas de drenaje si no se tapan los drenes con capa vegetal de suelo o con restos de materia orgánica.

PENETRACIÓN DE RAÍCES EN TUBERÍAS DE DRENAJE

Apenas hay datos de campo relacionados con *penetración de raíces* ya que en tierras cultivables rara vez se dan casos con cultivos extensivos. Estas raíces pueden impedir temporalmente desaguar un dren y favorecer ligeramente la sedimentación de la tubería pero mueren después de recolectarse. Mayores problemas causan raíces en drenes instalados bajo plantas perennes como árboles o arbustos, p. ej. en cortavientos que bordean ciertos huertos. Estas raíces pueden colmar todo el dren en una longitud considerable, reteniendo materiales en suspensión y obstruyendo gravemente el caudal de drenaje. Puede resolverse este problema instalando tubos sin perforar en lugares donde puedan existir este tipo de raíces (véase el Capítulo 2, Apartado *Tubos rígidos*).

En países áridos se instalan drenes a profundidades de 1,5 a 2 m e incluso más profundos, por ello la proliferación de raíces dentro de drenes es menos probable si se compara con drenes instalados a menor profundidad.

Apenas existe información cuantitativa sobre proliferación de raíces dentro de drenes.

- En *Bélgica*, durante un período seco, coles de raíces profundas causaron problemas en un sistema de drenaje somero instalado para controlar una capa de agua colgada.
- En *Egipto*, árboles de *Eucalyptus* han causado problemas (Cavelaars *et al.*, 1994).
- En *Israel*, raíces de ciertos tipos arbóreos de *Tamarix* tienden a obstruir drenes. Las raíces de *Tamarix* y de otros árboles no pueden eliminarse, especialmente si se utilizan envolturas de grava (Henkin, 1987).
- En *Pakistán*, en el proyecto Mardan Scarp, como medida de precaución se eliminaron todos los árboles en una distancia de 35 m de los drenes.

- En *España*, raíces muy finas de un arbusto salino (*Suaeda fruticosa*), que crece en taludes de colector en zanja abierta, llegaron a entrar en drenes laterales causando serias obstrucciones. Este problema puede solucionarse instalando tubos sin perforar de un mínimo de 3 m de longitud en las salidas de laterales a zanjas (Martínez Beltrán, 1987).
- En *Surinam*, cierta planta asiática llamada «kudzú» causó problemas importantes de proliferación de raíces en el interior de drenes (Van der Molen, 1972).
- En *Perú*, se conocen casos en que raíces de caña de azúcar penetran en tuberías colocadas a una profundidad de 1,5 m (Cavelaars, 1987).
- En los *Países Bajos*, el problema de raíces en tierras agrícolas está ligado al tipo de cultivo, a la clase de envoltura y a la zona drenada. Penetraron fácilmente raíces en drenes con envolturas orgánicas (una mezcla de fibras de turba y coco), envolturas laminares de fibra de vidrio, envolturas de poliéster o poliamida tejidos («calcetín») y de PLM con gránulos de poliestireno. Sin embargo, envolturas sintéticas de poco espesor proporcionaron una buena protección. La penetración de raíces fue generalmente menor a medida que el espesor de envoltura era mayor (Stuyt, 1992a). Árboles frutales como manzanos y perales no causan muchos problemas pero es sabido que el chopo (*Populus canadensis*) es perjudicial.

Capítulo 6

Directrices para predecir la necesidad de una envoltura

Pueden entrar partículas de suelo en un dren desde todos lados debido a la fuerza de arrastre del agua que fluye hacia el dren. El colmatado de tuberías de drenaje puede deberse a entrada de partículas de suelo disgregado, a dispersión de suelo cohesivo a nivel del dren o a transporte descendente de material disperso o en suspensión a través de poros del suelo, grietas y espacios vacíos. Este proceso nunca puede impedirse completamente pero puede controlarse instalando un material envolvente alrededor de la tubería de drenaje. La necesidad de materiales envolventes alrededor de tuberías de drenaje dependerá de las propiedades químicas y físicas del suelo, de la composición química del agua a ser drenada y de las condiciones bajo las cuales se han instalado las tuberías. Sin embargo, determinar si un suelo presenta o no problemas no es fácil, ya que esto no puede deducirse fácilmente de las propiedades del suelo y de dichas condiciones. La heterogeneidad del suelo y la complicada naturaleza de las interacciones físicas entre agua y suelo cerca de los orificios de un dren, hacen que la predicción de la necesidad de materiales envolventes de dren sea muy difícil.

Se han hecho intentos para definir e identificar suelos propensos a causar obstrucción mineral de tuberías de drenaje. Aunque se han identificado muchos tipos de suelo que pueden ser más susceptibles a sedimentación que otros, no se han determinado todavía criterios válidos para saber si ciertos drenes requieren o no una envoltura. Con el estado actual de conocimiento es virtualmente imposible determinar criterios universales y parámetros fijos para predecir la tendencia de un dren a la obstrucción mineral para un suelo dado y de la consecuente necesidad de una envoltura. De cualquier manera, la experiencia, obtenida durante cuatro décadas de investigaciones y práctica, permite extraer algunas conclusiones. Estos son los criterios existentes, generalmente basados en experiencia local y que son válidos solamente para las zonas donde se han determinado. Por tanto, no pueden ser transferidos directamente a otras zonas sin previa verificación de su aplicabilidad.

Ensayos con permeámetro sobre muestras de suelo tomadas a la profundidad de diseño del dren pueden proporcionar información sobre la necesidad de envolturas de dren, ofreciendo evidencia de la estabilidad estructural de un suelo y del riesgo de entrada de partículas de suelo en tuberías de drenaje. Se ha realizado investigación con permeámetro en Estados Unidos de América (Willardson y Walker, 1979; Samani y Willardson, 1981), Países Bajos (Stuyt, 1992a), Bélgica (Dierickx y Yüncüoglu, 1982), Francia (Lennoz-Gratin y Zaïdi, 1987) y actualmente se están llevando a cabo en Egipto, la India y Pakistán. Se llevan a cabo ensayos con permeámetro con gradientes hidráulicos crecientes, sobre muestras de suelos y materiales envolventes potencialmente adecuados. Si el suelo resiste gradientes altos no es necesaria una envoltura de dren. Una aplicación es la evaluación del gradiente de fallo hidráulico de un suelo (p. ej. Samani y Willardson, 1981). De la comparación de resultados de permeámetro con los de drenes de campo, Lennoz-Gratin *et al.* (1992) consideran el ensayo de flujo con permeámetro un método apropiado para predecir la obstrucción mineral de tuberías de drenaje. Sin embargo, los resultados de Stuyt (1992b) indican que la relación entre datos de laboratorio y de campo es más bien ambigua.

Además de experimentos de laboratorio, algunas observaciones sencillas de campo pueden indicar la necesidad de instalar envolturas en futuros proyectos de drenaje. Los sondeos hechos para determinar la conductividad hidráulica del suelo pueden proporcionar información útil al respecto. Si estos sondeos se desmoronan rápidamente debiendo usarse un filtro, la instalación de una envoltura es vital para proteger futuros drenes de obstrucción mineral. En un perfil de suelo donde tuberías de drenaje no requieren normalmente una envoltura, la presencia ocasional de capas de suelo o de lentejones de material de suelo suelto a la profundidad de drenaje, puede ser una razón para proteger todos los drenes como medida de seguridad a pesar de los altos costos.

En los apartados siguientes se describen las principales propiedades del suelo relacionadas con el riesgo de entrada de partículas de suelo en tuberías de drenaje y la necesidad de protegerlas del riesgo de colmatarse. Además, se considera la influencia de la calidad del agua sobre la composición química del suelo. Finalmente, se han definido algunos criterios para predecir la necesidad de envolturas de dren.

PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Textura del suelo

Un suelo consiste de un armazón de partículas minerales con vacíos o poros que contienen aire y agua. Puede también existir materia orgánica, especialmente en las capas de suelo más superficiales. Las partículas minerales del suelo varían considerablemente en forma, tamaño, composición mineralógica y características químicas de su superficie. La distribución del tamaño de partícula de un suelo, a menudo denominada *textura del suelo*, es un indicador importante de su estabilidad y puede determinarse mediante análisis mecánico del suelo. Las partículas de suelo se clasifican normalmente como arcilla (< 2 μm), limo (2-50 μm) y arena (50-2000 μm). Los porcentajes en peso seco de arena, limo y arcilla pueden representarse en un gráfico triangular (Figura 40). Trazando estos porcentajes en una línea paralela a la base *opuesta* al ángulo indicado (que representa 100 por ciento de arena, limo o arcilla) puede determinarse la clase de textura mediante intersección de las tres líneas dentro del triángulo. La Figura 40 muestra que un suelo con una fracción de arcilla del 11 por ciento, una fracción de limo del 27 por ciento y una de arena del 62 por ciento, puede clasificarse como franco arenoso.

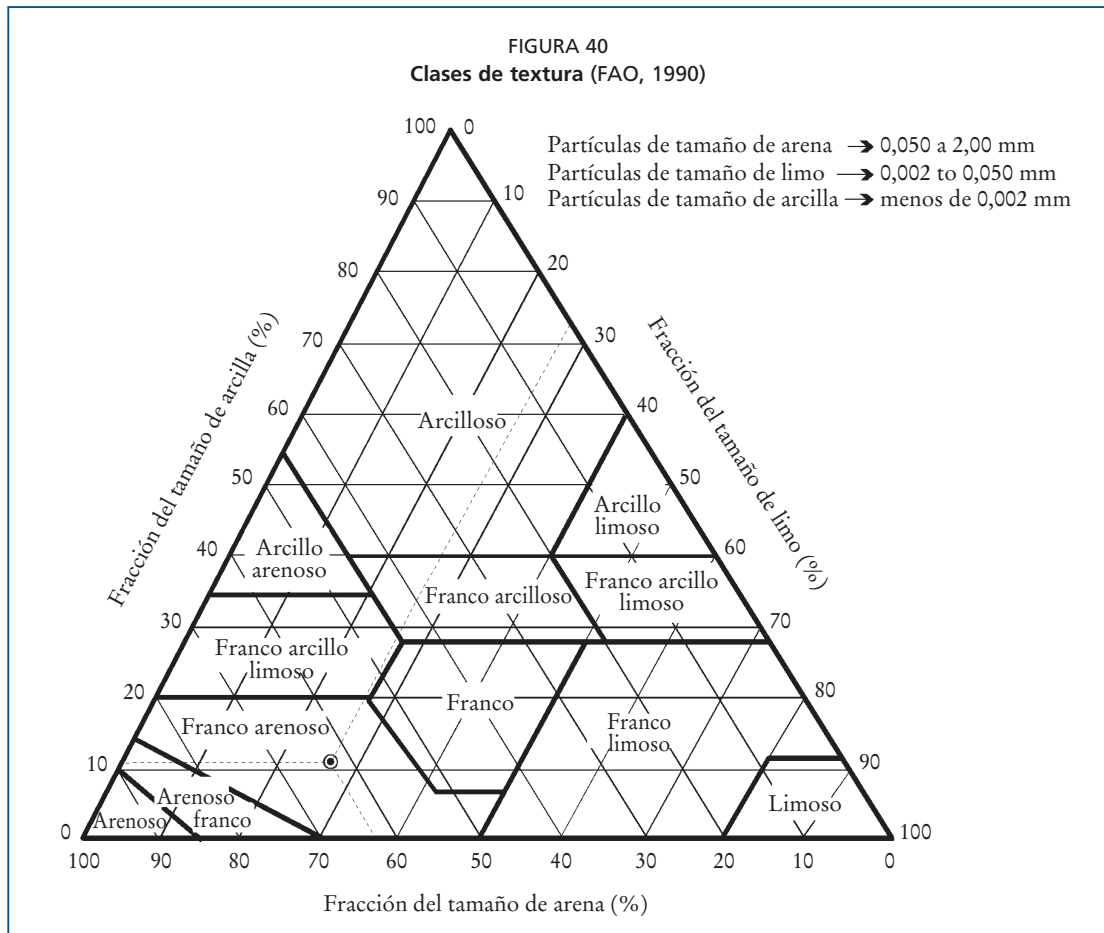
La curva de distribución acumulativa del tamaño de partícula (Figura 41) da información sobre el porcentaje acumulativo de partículas de suelo (en peso seco) que es menor que un cierto diámetro. Por ejemplo, d_{10} y d_{50} son los diámetros de partícula en los que respectivamente el 10 y el 50 por ciento de las partículas del suelo (en peso seco) tienen un diámetro menor. Un suelo uniforme tiene una curva de distribución de partículas «empinada» (curva «a» de la Figura 41), mientras que la curva de un suelo bien graduado es menos pronunciada (curva «b» de la Figura 41). La última tiene un d_{10} de 1,7 y un d_{50} de 105 μm .

El coeficiente de uniformidad (C_u) de un suelo es una medida de la anchura de banda de los tamaños de las partículas de suelo que contiene. Este coeficiente, que viene dado por la inclinación o pendiente de la curva de distribución del tamaño de partícula, está dado por:

$$C_u = d_{60}/d_{10} \quad (42)$$

Cuanto mayor es el valor C_u menos uniforme o mejor graduado será el suelo. Un suelo uniforme, con todas las partículas del mismo tamaño, tiene un $C_u = 1$.

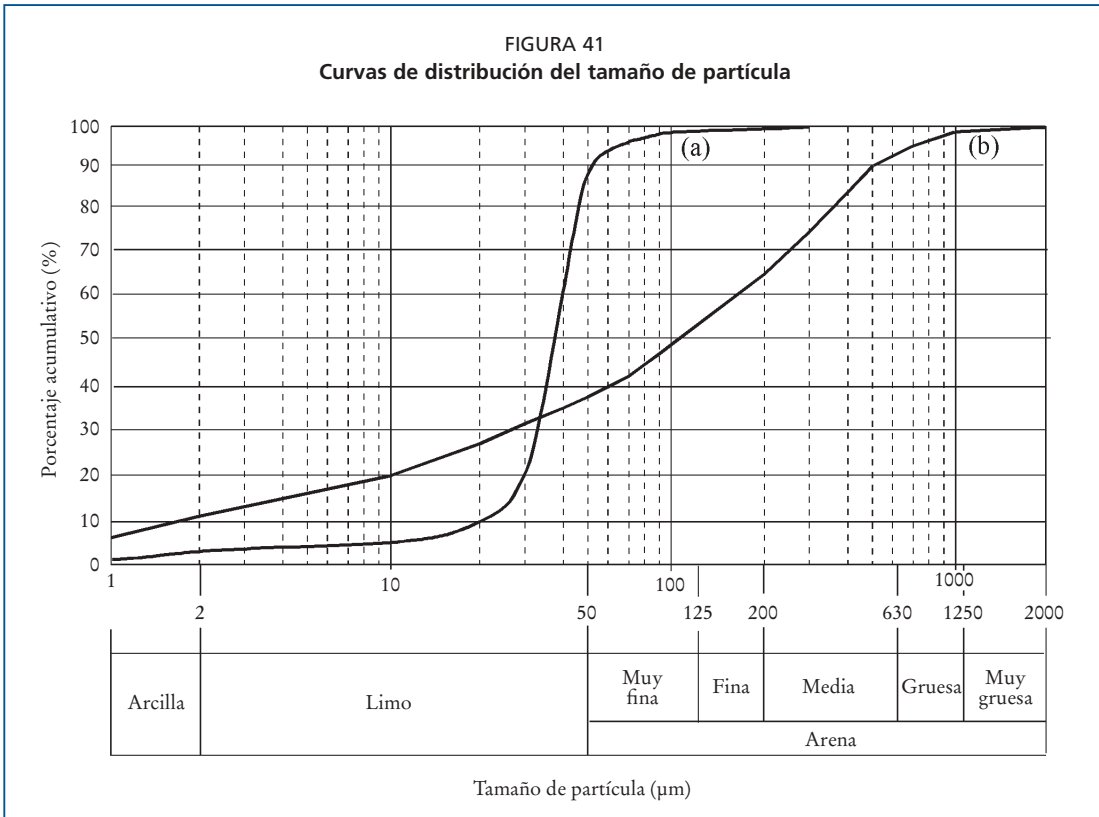
La distribución del tamaño de partícula y la clasificación de textura del suelo pueden dar una primera indicación de la necesidad de una envoltura de dren. Para suelos sueltos como arenas, el coeficiente C_u se usa frecuentemente para predecir la necesidad de envolturas de dren. Si el suelo es cohesivo, el porcentaje de arcilla es un indicador más significativo.



Criterios basados en el contenido de arcilla del suelo han sido útiles en varias regiones para determinar si se requieren envolturas de dren. En Québec, Canadá, las tuberías de drenaje no necesitan envoltura en suelos que tienen un contenido de arcilla de al menos el 20 por ciento (CPVQ, 1989), mientras en los Países Bajos el contenido de arcilla debería ser al menos del 25 por ciento (Van Zeijts, 1992). En Egipto y la India, el contenido de arcilla debería ser del 30 por ciento o mayor (Abdel-Dayem, 1987; Personal del Proyecto Rajad, 1995). No obstante, algunos de estos suelos aún presentaron problemas de obstrucción mineral. Esto es causado por el hecho de que la estabilidad del suelo no solo depende de la composición física sino también de su composición química (Apartado *Propiedades químicas del suelo*).

Drenes en suelos arenosos finos sin cohesión normalmente requieren una envoltura. Sin embargo, en Québec, Canadá (CPVQ, 1989), no se recomienda envoltura si el ancho de las perforaciones de la pared de tubería es menor de $2d_{85}$ (diámetro de partícula para el cual el 85 por ciento de las partículas de suelo, en peso seco, tiene un diámetro menor). En lugar de 2, también se han aceptado otros valores de este factor oscilando entre 0,5 y 10. Intentos para adaptar el ancho de la perforación a un diámetro del tamaño de partícula característico del suelo circundante han fracasado a causa de la variabilidad de ambos. Por tanto, en suelos arenosos sin cohesión deberían recomendarse envolturas de dren en toda circunstancia.

Aunque la textura por sí sola es insuficiente como parámetro para decidir sobre el uso de envoltura, se acepta generalmente que suelos con d_{50} entre 50 y 150 μm son mecánicamente bastante inestables y como tales propensos a erosión (Dierickx y Leyman, 1991) y por tanto requerirán una envoltura.



Dado el hecho que suelos con una gran anchura de banda del tamaño de partícula no presentan serios problemas de sedimentación, Olbertz y Press (1965) propusieron el coeficiente C_u como parámetro de *probabilidad de erosión*:

- $1 < C_u < 5$: muy uniforme y muy propenso a erosión.
- $5 \leq C_u \leq 15$: moderadamente uniforme y propenso a erosión.
- $C_u > 15$: sin riesgo de erosión.

También es importante la relación porcentual arcilla/limo. De acuerdo a Dieleman y Trafford (FAO, 1976), el riesgo de obstrucción mineral de tuberías decrece rápidamente cuando esta relación excede de 0,5, si el tamaño de partículas de limo varía entre 2 y 20 μm .

En cualquier caso, suelos con una cantidad importante de limo y una pequeña cantidad de arcilla presentan un gran riesgo de obstrucción mineral de drenes. El rango de distribución del tamaño de partícula de estos suelos se presenta en la Figura 42. Cualquier suelo, con una distribución acumulativa del tamaño de partícula incluida completamente o en su mayor parte en el área sombreada, es probable que presente problemas de obstrucción de dren (Stuyt, 1982; Veldhuijzen van Zanten, 1986). La razón es que estos suelos tienen partículas que son generalmente demasiado grandes para ser cohesivas, pero no lo suficiente para evitar que sean arrastradas hacia aberturas de un dren no protegido por una envoltura.

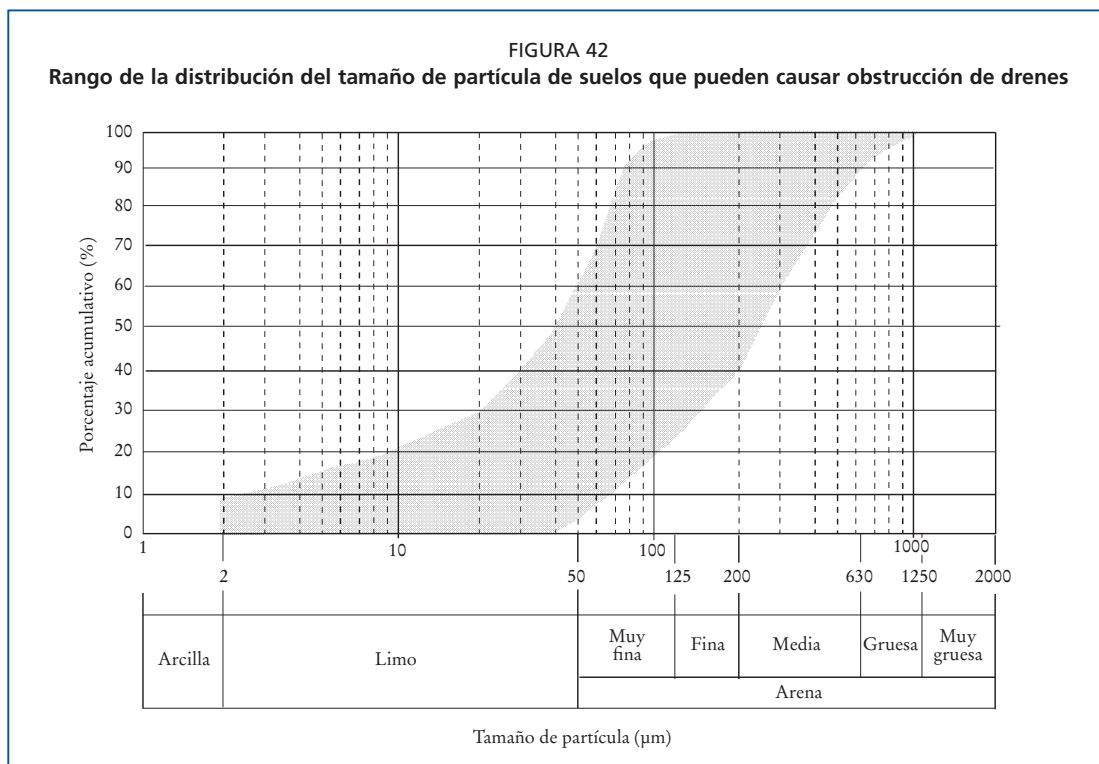
Estabilidad estructural

En los Países Bajos, datos de campo indican que los suelos pueden diferir ampliamente en relación a la tasa de oclusión mineral aún cuando tengan una textura similar (Stuyt, 1992a). Con el tiempo, se ha comprendido que la estructura de un suelo es al menos tan importante como su textura. Sin embargo, apenas es posible interpretar la estructura del suelo en términos de riesgo de obstrucción y mucho menos tasas de oclusión.

La estructura del suelo se refiere a la forma en que sus partículas están unidas en compuestos o agregados naturales más o menos porosos y depende de la textura del suelo, de la presencia de sustancias orgánicas u otras cementantes y de las relaciones entre varios cationes que están presentes en el suelo. Los agregados de suelo pueden clasificarse según la fuerza de las uniones entre las partículas de suelo. Dichas uniones pueden ser sueltas, débiles, moderadas y fuertes. La estructura de suelo con partículas sueltas está típicamente asociada a suelos arenosos, aunque los limos más finos también pueden tener este tipo de estructura. Estos suelos no tienen estructura y virtualmente no tienen cohesión. Los suelos arcillosos por lo general son cohesivos y pueden ser masivos o desarrollar estructura en bloques o prismática. Sin embargo, en algunos casos, pierden su cohesión y se dispersan (Apartado *Propiedades químicas del suelo*). La estructura del suelo gobierna, entre otras cosas, el flujo de agua hacia tuberías de drenaje.

La firmeza de las uniones entre partículas de suelo se llama cohesión. La consistencia del suelo se refiere al comportamiento de un suelo con diferentes contenidos de humedad y depende en gran medida de la cohesión. Dos límites bien conocidos de consistencia son el *límite líquido* y el *límite plástico*, que forman las llamadas constantes de Atterberg. La diferencia entre estos dos límites da el índice de plasticidad (I_p), que es un indicador de la firmeza de las uniones entre partículas de suelo.

La estabilidad estructural de agregados de suelo está relacionada con las fuerzas de atracción entre sus constituyentes y determina su resistencia a fuerzas mecánicas y físico-químicas destructivas. En cierta medida, la estabilidad estructural de los agregados de suelo está determinada por la cantidad de partículas de arcilla. La estabilidad de agregados es una característica importante del suelo cuando debe evaluarse el riesgo de obstrucción mineral de tuberías de drenaje, ya que es sabido que tuberías de drenaje instaladas en suelos estructurados estables no requieren materiales envolventes. A pesar de la disponibilidad de varios métodos para determinar la estabilidad de los agregados, p. ej. cernido en húmedo, no existe un procedimiento directo y conciso para clasificar la estabilidad estructural de agregados de suelo en cifras significativas. La razón para



ello es que la estabilidad de agregados no es una propiedad intrínseca del suelo sino que depende de varias condiciones, tales como el contenido de humedad y sus propiedades químicas. La disgregación de los agregados de suelo al humedecerse es bien conocida, pero si el suelo permanece en estado plástico a la profundidad de drenaje resistirá dicha disgregación. Por ello, la estabilidad estructural de un suelo no es un indicador muy fiable para formular directrices para evaluar la necesidad de envoltura para impedir la oclusión mineral de drenes.

El índice I_p mencionado anteriormente se usa para predecir la propensión de un suelo a la obstrucción mineral de una tubería de drenaje. Según Dieleman y Trafford (FAO, 1976):

- $I_p < 6$: alta tendencia a sedimentación.
- $6 \leq I_p \leq 12$: tendencia limitada a sedimentación.
- $I_p > 12$: sin tendencia a sedimentación.

Hay distintas modificaciones a este enfoque, algunas veces en combinación con otros criterios (p. ej. Lagacé, 1983).

Contenido de humedad

Cuando se instala un sistema de drenaje subterráneo bajo humedad generalizada se afecta la estructura del suelo desfavorablemente. Colocar drenes en condiciones húmedas puede destruir la estructura del suelo casi completamente y aumentar el riesgo de obstrucción mineral de las tuberías. Por ello, no deberían instalarse drenes en condiciones de exceso de humedad. Lamentablemente, la interrupción de obras durante períodos cortos húmedos con frecuencia se ignora por razones financieras. Además, a veces deben instalarse drenes en lugares donde la capa freática está permanentemente por encima del nivel de drenaje previsto.

No es nueva la advertencia de no instalar drenes, en lo posible, durante períodos de excesiva humedad o cuando la capa freática es somera. Cavelaars (1966) fue uno de los primeros en mencionar que el funcionamiento de un dren, en condiciones de campo, está determinado en gran medida por la condición del suelo alrededor del dren antes que por el tipo de dren o material envolvente. Su conclusión más importante fue que la instalación de drenes en condiciones húmedas podría tener un efecto muy perjudicial sobre su funcionamiento, especialmente en suelos con baja estabilidad estructural.

PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

La estabilidad estructural de un suelo es afectada por su contenido total de sales y sodio. Además, la cal (CaCO_3) y los sesquióxidos (óxidos de Al y Fe) son agentes cementantes de arenas y limos. Precipita cal alrededor de los puntos de contacto entre partículas de suelo. La capacidad de unión de los óxidos de Fe está mal definida pero la de los de Al es probablemente efectiva. Aparte de esos depósitos inorgánicos, los organismos del suelo y sus subproductos orgánicos también pueden mantener unidas las partículas de suelo.

La composición química de un suelo también es bastante importante debido al potencial obstructivo de tuberías de drenaje, de envolturas o de ambas, por hierro, cal y sulfatos (Capítulo 5, Apartado *Obstrucción química y bioquímica*). Aunque envolturas de dren no pueden impedir la obstrucción química, este fenómeno debe considerarse debidamente en todo proceso de selección de envoltura.

La evaluación del riesgo de obstrucción mineral de tuberías de drenaje, como resultado de la composición química del suelo, necesita conocer la capacidad de intercambio de cationes y la salinidad y sodicidad del suelo.

Capacidad de intercambio de cationes

Las partículas de arcilla y humus tienen propiedades adsorbentes siendo las de arcilla coloides tan pequeños que dominan los efectos superficiales. La dispersión, dilatación, contracción, floculación, cohesión y plasticidad de los suelos son fenómenos en los que intervienen coloides del suelo. Las partículas de arcilla tienen una carga negativa y por tanto adsorben cationes como Na^+ , K^+ , H^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} .

La materia orgánica tiene una influencia estabilizadora sobre las propiedades físicas y químicas de suelos, a pesar de su cantidad que generalmente es pequeña. Promueve el desarrollo y estabilidad de estructura de suelo. Los componentes más finos de materia orgánica son convertidos en humus como resultado de su descomposición por microorganismos. Al igual que las arcillas, el humus también es un material coloidal. Su capacidad para retener iones excede la capacidad de la arcilla, pero ésta, por lo general, está presente en mayores cantidades. Por ello, la contribución de la arcilla a las propiedades químicas del suelo generalmente excede la del humus, excepto en suelos muy arenosos.

Si los coloides del suelo contienen una alta proporción de Ca^{2+} y de otros iones divalentes, se forman uniones firmes entre las partículas minerales dando lugar a una estructura de suelo estable. En suelos ricos en iones Na^+ (*suelos sódicos*) las uniones son inestables, lo cual ocasiona una estructura de suelo débil.

La cantidad total de cationes que puede adsorber un suelo depende de los coloides del suelo -arcilla y humus- cargados negativamente. Esta cantidad se denomina *capacidad de intercambio de cationes (CIC)* y se expresa corrientemente en meq/100g de suelo seco.

Salinidad del suelo

Los suelos pueden contener sales ligeramente solubles como cal y yeso, y sales altamente solubles como cloruro y sulfato de sodio. Estas sales pueden estar contenidas en el material parental del suelo (salinización primaria) o ser transportadas en forma soluble en agua y depositadas una vez que el suelo se seca (salinización secundaria). Las mayores fuentes de salinización secundaria son sales agregadas con el agua de riego y mediante ascenso capilar de agua freática, especialmente si la capa freática se recarga por filtración. Las sales contenidas en el agua de lluvia son despreciables en comparación con el contenido de sales del agua de riego y del agua freática.

Los aniones predominantes en suelos salinos son Cl^- y SO_4^{2-} , algo de HCO_3^- a valores de *pH* entre 6 y 8 y CO_3^{2-} a valores de *pH* superiores a 8,5. Los cationes predominantes son Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} .

El total de sólidos disueltos (*TSD*) puede determinarse a partir de la conductividad eléctrica (*CE*), ya que los valores de *CE* y *TSD* tienen una relación lineal (Richards, 1954):

$$TSD = 640 CE \quad (43)$$

donde *TSD* = total de sólidos disueltos (mg/l).

CE = conductividad eléctrica (dS/m).

La conductividad eléctrica del extracto de suelo se determina generalmente en una pasta de suelo saturado con agua hasta el límite líquido. Esta conductividad (*CE_e*) es relativamente fácil de medir. En la mayor parte de los suelos la *CE* de la solución de suelo a capacidad de campo (*CE_s*), algún tiempo después de lluvia o riego, es aproximadamente el doble que la *CE_e*.

Sodicidad del suelo

La cantidad relativa de iones Na^+ adsorbidos comparada con el total de cationes que el suelo puede adsorber se denomina porcentaje de sodio intercambiable (*PSI*):

$$PSI (\%) = (Na^+_{ads} / CIC) \times 100 \quad (44)$$

donde Na^+_{ads} es la cantidad de iones Na^+ adsorbidos (meq/100 g de suelo seco) y el PSI expresa la sodicidad y por tanto la tendencia del suelo a dispersarse.

Puede obtenerse información sobre las propiedades químicas del complejo de adsorción del suelo a partir de la solución de suelo, dado que existe un equilibrio entre los cationes adsorbidos y los disueltos. Por ello, otra medida de la sodicidad es la *relación de adsorción de sodio (RAS)*, deducida de la concentración de sodio, calcio y magnesio en la solución de suelo.

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^+ + Mg^{++}}{2}}} \quad (45)$$

donde la concentración de cationes se expresa en meq/l.

La RAS puede determinarse más fácilmente que el PSI , que sin embargo puede calcularse fácilmente a partir de la RAS ya que ambos están relacionados (Richards, 1954):

$$PSI (\%) = \frac{100(-0,0126 + 0,01475RAS)}{1 + (-0,0126 + 0,01475RAS)} \quad (46)$$

Los valores de RAS y PSI son casi iguales en el rango 2-30, por lo que $RAS = PSI$ constituye una aproximación práctica, pero fuera de ese intervalo debe usarse la ecuación (46).

Generalmente, valores altos de PSI o RAS indican condiciones físicas del suelo malas y un alto pH . Un método de campo sencillo es medir el pH con fenolftaleína como indicador, que se vuelve rosa ($pH > 8,5$) si el suelo tiene probablemente un alto PSI .

Los problemas de dispersión son generalmente más acentuados cuando los valores de PSI o RAS son mayores. El material disperso puede ser transportado por agua freática y entrar en tuberías de drenaje. En general, en climas áridos estos problemas no se encuentran en suelos con valores de PSI por debajo del 15 por ciento. En la India, el contenido de arcilla de los suelos para los cuales no se necesitan envolturas alrededor de drenes se aumenta de un 30 a un 40 por ciento en suelos con RAS mayores de 13 (Personal del Proyecto Rajad, 1995).

Dado que la concentración de la solución de suelo influye en la dispersión, el PSI de un suelo no puede usarse como único indicador de estabilidad del suelo. Suelos que tienen un PSI mayor del 15 por ciento no se dispersarán mientras la concentración de sales en el suelo se mantenga alta. Cuando esta alta concentración de sales en la solución de suelo decrece, p. ej. debido al lavado causado por agua de lluvia o de riego, pueden aparecer problemas de dispersión (Smedema y Rycroft, 1983).

La propensión de los suelos a dispersarse también depende del tipo de mineral de arcilla (tipo de arcilla expansiva o no). Las arcillas expansivas son más susceptibles a problemas de dispersión que las arcillas que no se expanden. Pero los vertisoles (suelos arcillosos que se expanden y se cierran fuertemente) en Gezira, Sudán, y en otros lugares, son ejemplos de suelos que no presentan problemas de dispersión a pesar de los valores de PSI que varían entre 20 y 25 por ciento (Smedema y Rycroft, 1983).

En zonas húmedas, donde predomina el lavado por agua de lluvia, los problemas de estructura del suelo pueden aparecer a valores de PSI tan bajos como el 5 por ciento, mientras que en suelos lavados por agua de riego generalmente toleran un 10 por ciento de PSI (Cuadro 9).

CALIDAD DEL AGUA

La composición química de un suelo depende en gran parte de la calidad del agua de riego, de la cantidad de lluvia y de la composición química del agua freática. Esta última

puede recargarse por agua de riego, lluvia o filtración causando el ascenso de la capa de agua en medida suficiente para influir sobre el suelo.

Agua de riego

La estabilidad de la estructura del suelo en la capa arable y en la zona radicular depende a largo plazo de las sales agregadas con el agua de riego. A largo plazo, la *CE* y la *RAS* de la solución de suelo a capacidad de campo (*CE_s* y *RAS_s*) dependen de la *CE* y de la *RAS* del agua (*CE_{iw}* y *RAS_{iw}*) con la que se ha regado el suelo:

$$CE_s = n CE_{iw} \tag{47}$$

$$y \quad RAS_s = \sqrt{n} RAS_{iw} \tag{48}$$

donde *n* es el factor de concentración del agua de riego en el suelo, que depende de la fracción de lavado (*FL*), que es la fracción del agua de riego drenada.

Para fracciones de lavado altas (*FL*≈0,3) el valor de *n* es aproximadamente 2. Si la *CE* y la *RAS* están expresados en términos de pasta saturada *CE_e*≈*CE_{iw}* y *RAS_e*≈*RAS_{iw}* (FAO, 1985). Para fracciones de lavado medias (*FL* variando entre 0,15 y 0,20) *CE* ≈1,5*CE_{iw}* y *RAS_e*≈1,22 *RAS_{iw}*.

El efecto de la calidad del agua de riego sobre la estabilidad estructural de un suelo puede diagnosticarse en base a sus valores de *CE_{iw}* y *RAS_{iw}*. Ayers y Westcot prepararon directrices para evaluar el impacto de la composición química del agua de riego sobre la tasa de infiltración de agua en el suelo (FAO, 1985). Estas directrices, que se resumen en el Cuadro 9, pueden usarse para evaluar el efecto de la calidad del agua de riego sobre la estabilidad de un suelo en la capa arable y en la zona radicular.

El riego con agua de baja salinidad disminuirá la estabilidad de un suelo si la concentración de sales de la solución de suelo es substancial. El agua de lluvia diluye la solución de suelo y puede causar una dispersión mayor que la mayor parte de las aguas de riego.

Agua freática

Frecuentemente, los problemas de salinidad y dispersión de arcillas en agricultura de regadío están asociados con una capa de agua incontrolada, uno o dos metros por debajo de la superficie del terreno. Si el agua freática está muy cercana a la superficie sube por capilaridad en períodos secos y saliniza la superficie del suelo; si además contiene sales, cierta masa de sales se va acumulando progresivamente en la zona radicular. La combinación de agua freática somera con sales aparece especialmente en lugares donde existe una filtración ascendente. Salvo que el exceso de agua freática sea evacuado por un sistema de drenaje adecuado, su nivel debe mantenerse por debajo de una profundidad crítica, por debajo de la cual la ascensión capilar puede ser despreciable: aproximadamente 1 m en arenas (a causa de la pequeña ascensión

CUADRO 9
Problemas con la tasa de infiltración de agua en el suelo relacionada con la *RAS_{iw}* y la *CE_{iw}* del agua de riego (según Ayers y Westcot FAO, 1985)

<i>RAS_{iw}</i>	<i>CE_{iw}</i> (dS/m)		
	Sin problemas	Problemas moderados	Problemas importantes
0 – 3	> 0,7	0,7 – 0,2	< 0,2
3 – 6	> 1,2	1,2 – 0,3	< 0,3
6 – 12	> 1,9	1,9 – 0,5	< 0,5
12 – 20	> 2,9	2,9 – 1,3	< 1,3
20 – 40	> 5,0	5,0 – 2,9	< 2,9

capilar), cerca de 2 m en la mayoría de suelos arcillosos (donde la velocidad de flujo es factor limitante) y 3 metros o más en suelos franco limosos (con alta ascensión capilar y suficiente velocidad de flujo).

Si un sistema de drenaje subterráneo controla una capa de agua freática, tanto la CE como la RAS del agua freática (CE_{gw} y RAS_{gw}) pueden tener un profundo efecto en la estabilidad estructural del suelo a nivel de dren. Esto ocurre porque la CE y la RAS de la solución de suelo serán similares a la CE_{gw} y a la RAS_{gw} si el suelo a nivel de dren está permanentemente saturado. Sin embargo, la CE y la RAS de la solución de suelo pueden ser sustancialmente más altas si el suelo a nivel de dren no está saturado y se acumulan sales debido a ascensión capilar.

Por tanto, el control efectivo de la salinidad debe incluir no solamente drenaje adecuado para controlar y estabilizar la capa de agua e impedir la acumulación de sales en las capas someras del suelo, sino también un movimiento neto descendente de agua para impedir salinización por elevación capilar.

CRITERIOS DE PREDICCIÓN

Los criterios de predicción definidos en los apartados anteriores se resumen a continuación. Estas reglas son meramente directrices o recomendaciones que no garantizan un 100 por cien de certeza.

- Si a la profundidad de un dren se pueden hacer sondeos de barrena utilizando solamente un filtro, porque sus paredes se desmoronan rápidamente, la instalación de una envoltura es vital para proteger futuros drenes de obstrucción mineral.
- En suelos arenosos sin cohesión deben recomendarse envolturas de dren en toda circunstancia.
- Es probable que drenes sin envoltura tengan problemas de obstrucción en cualquier suelo cuya distribución acumulativa del tamaño de partícula coincida completamente o en su mayor parte con el área sombreada de la Figura 42.
- En zonas templadas, por lo general no requieren envolturas tuberías de drenaje en suelos con un contenido de arcilla de al menos un 20-30 por ciento, siempre que no se instalen drenes en condiciones de humedad generalizada.
- Suelos con un índice de plasticidad de al menos 12 no tienen tendencia a sedimentarse.
- En áreas regadas, tuberías de drenaje instaladas en suelos con un contenido de arcilla superior al 40 por ciento no necesitan una envoltura, independientemente de la RAS de la solución de suelo.
- La necesidad de una envoltura en suelos con un contenido de arcilla comprendido entre el 20 y el 40 por ciento depende del PSI , que es aproximadamente igual a la RAS de la solución de suelo (o algo más alto). Esta RAS depende en gran parte de la calidad del agua de riego y a veces de la composición del agua freática (esta última en caso de elevación capilar dominante). Por lo general, no se necesita envoltura en todos los casos en los que la RAS_{iw} y la CE_{iw} parecen excluir problemas de estabilidad del suelo, según las directrices especificadas en el Cuadro 9. Se recomienda una envoltura en casos donde la RAS_{iw} y la CE_{iw} del agua de riego, del agua freática, o de ambas, causen verosíblemente problemas de estabilidad del suelo.
- Si hay un movimiento neto ascensional de agua freática salina habrá problemas de salinidad y dispersión de arcillas. Mantener un movimiento neto de agua descendente es la medida clave para evitar estos problemas en suelos con o sin sistemas de drenaje.

Capítulo 7

Directrices para instalar y mantener materiales de drenaje

INSTALACIÓN DE MATERIALES DE DRENAJE SUBTERRÁNEO

Procedimientos de instalación

Maquinaria de drenaje

El éxito de un sistema de drenaje no sólo depende de su diseño y de las propiedades del suelo y de la envoltura sino también de la humedad del suelo durante la instalación, del relleno de zanja y de la calidad general de la obra.

La *instalación manual* de drenes y la *instalación con máquinas retroexcavadoras* son opciones válidas para pequeños proyectos de drenaje. Las retroexcavadoras hacen zanjas más anchas que las máquinas de drenaje generalmente usadas en grandes proyectos. También se usan en excavaciones anchas y profundas para grandes colectores. Las máquinas de drenaje hacen zanjas estrechas en las que se colocan los drenes (método con zanja) o colocan directamente el dren en el terreno (método sin zanja). Las *máquinas zanjadoras* son de ruedas o de cadena y son apropiadas para un amplio abanico de profundidades y anchuras de trabajo. Las *máquinas sin apertura de zanja* pueden tener o bien un rejón vertical o dos cuchillas en V. Sin embargo, el método de instalación sin zanja presenta algunas limitaciones prácticas respecto a tipos y tamaños de dren, uso de grava y profundidad de instalación. Por ello, el drenaje sin zanja no se ha difundido ampliamente en zonas bajo riego (Zijlstra, 1987).

La instalación de drenes manualmente o con excavadoras clásicas requiere una serie de operaciones sucesivas: excavación de la zanja, instalación de la tubería, aplicación del material envolvente y relleno de la zanja. Estas operaciones se hacen simultáneamente con máquinas zanjadoras. A veces, el relleno se hace con un tractor dotado de un arado aporcador, pero también puede hacerse con un apero anexo a la máquina de drenaje cuando retrocede para iniciar la excavación de una nueva zanja (Ochs y Bishay, 1992).

Las máquinas de drenaje actuales están equipadas con control de pendiente mediante láser, lo cual ha contribuido significativamente a la eficiencia y precisión de la instalación de drenes subterráneos. Sin embargo, la velocidad de excavación máxima debe ajustarse a la velocidad del sistema hidráulico que se usa para la regulación automática de profundidad, de lo contrario la precisión de la instalación será inadecuada. Aunque puede tolerarse cierta desviación de la pendiente diseñada no debería exceder el radio de la tubería. Desviaciones mayores generan burbujas de aire en lugares altos y sedimentación en bajos, obstruyendo el movimiento de agua en el dren. Similarmente, no pueden aceptarse tramos de dren en contrapendiente.

Recubrimiento del dren

Como el riesgo de sedimentación es mayor durante la instalación y el período inmediatamente subsiguiente, mientras que el relleno aún no se ha asentado y estabilizado, por lo general se cubren los drenes con una capa de suelo superficial friable para crear un entorno de suelo estable y altamente permeable y para mantener la alineación. Para ello, las máquinas zanjadoras están equipadas con un rascador en forma de ancla para aportar encima del dren una capa de suelo superficial o suelo

de otra capa adecuada de los lados de la zanja, cuyo espesor debe ser al menos de 100 a 250 mm, dependiendo del diámetro del dren. También puede usarse material envolvente granular, como grava, para obtener un entorno de dren altamente permeable y para impedir desplazamientos horizontales y verticales una vez instalada la tubería. Cualquier material envolvente a utilizar debe colocarse alrededor de la tubería antes que se proceda a su recubrimiento.

La cobertura inicial de un dren con suelo superficial no es recomendable cuando se usan envolturas orgánicas, porque suelo con materia orgánica e intensa actividad microbiológica aumenta el riesgo de descomposición microbiológica de estas envolturas. En estos casos debe usarse suelo de otra capa apropiada con poca materia orgánica. El relleno posterior de la zanja debe hacerse tan pronto como sea posible y como máximo al final de cada día si existe riesgo de entrada de agua superficial en la zanja.

Condiciones del suelo

Como la cohesión del suelo depende esencialmente de su contenido de agua, la instalación de un sistema de drenaje debe hacerse preferentemente en condiciones de suelo no saturado, con la capa de agua por debajo de la profundidad de instalación y nunca en períodos de humedad generalizada. Además, el relleno debe asentarse antes de lluvias fuertes o de riego. Sin embargo, en algunos casos estas condiciones no son o no pueden ser cumplidas y si bien la instalación de drenes en condiciones húmedas no es recomendable, no siempre es posible operar en circunstancias ideales o favorables.

Cuando se drenan *suelos sin cohesión* en condiciones de saturación debe colocarse inmediatamente alrededor del dren una envoltura y el dren debe cubrirse con material de relleno antes que fluya arena líquida a la zanja. El desplome de la pared de la zanja, que ocurre a menudo en suelos sin o con poca cohesión, puede dañar, desplazar el dren o ambas cosas. En todo caso, el dren y la envoltura deben estar colocados antes de salir la caja de excavación. Posiblemente se pueda usar una caja más larga para proteger un mayor tramo de zanja. El dren debe cubrirse inmediatamente, ya que el relleno simultáneo e instantáneo ayuda a impedir desplomes de la pared de la zanja. Sin embargo, la zanja se puede derrumbar tan pronto como la caja de excavación haya pasado. Por tanto, debe colocarse un canal en el extremo de la caja de excavación para conducir el suelo desplomado a la parte superior del dren con objeto de evitar daños por caída de piedras y terrones.

Las máquinas zanjadoras deben mantenerse constantemente en movimiento en suelos sin cohesión, porque si no probablemente entre en la caja de excavación arena fluida y cause problemas de sedimentación, así como de alineamiento y pendiente de los drenes (Ochs y Bishay, 1992). Muchos problemas, encontrados con zanjadoras o con retroexcavadoras en suelos sin cohesión saturados, pueden evitarse mediante la instalación de drenes sin apertura de zanja.

El drenaje de *suelos bien estructurados* físicamente estables bajo humedad generalizada puede destruir la estructura del suelo durante la excavación y crear un relleno de zanja menos permeable (Stuyt, 1992a). Además, estas condiciones también promueven la obstrucción mineral de tubería y envoltura. En cualquier caso, el uso de una envoltura no puede compensar condiciones de suelo «adversamente afectadas». Debe hacerse todo lo posible para mantener la estructura de suelo existente y proteger el dren de derrumbes de suelo. Puede ajustarse la velocidad de avance de la máquina para reducir la destrucción de estructura del suelo. La observación del suelo excavado puede dar una indicación de la velocidad adecuada de la máquina, que debe moverse lo suficientemente rápida para mantener la estructura del suelo y no convertir el suelo excavado en lodo (Stuyt y Willardson, 1999).

El deterioro estructural de un suelo originalmente estable y bien estructurado puede evitarse con la instalación sin apertura de zanja. El funcionamiento de drenes instalados con esta técnica depende en gran parte de los cambios en la estructura del

suelo originados por el paso del rejón (Zijlstra, 1987). Esto depende del suelo, de las circunstancias (no húmedo) y de la profundidad (no mayor de aproximadamente 1,5 m). El drenaje de suelos arcillosos en condiciones húmedas resultará inevitablemente en sellado del área donde la máquina tiene contacto físico con el suelo y reducción de su conductividad hidráulica. Debe evitarse instalar drenes en suelos cohesivos en condiciones húmedas, independientemente de la máquina de drenaje disponible.

En suelo saturado, las condiciones de instalación de los drenes laterales de un sistema de drenaje compuesto pueden mejorar, si el tiempo transcurrido entre la instalación de colectores «permeables» y la instalación de laterales es suficientemente largo. Esto se debe a que gran parte del agua freática local tiene la oportunidad de drenar antes que sean instalados los laterales. En casos más complicados, donde la construcción de colectores es difícil a causa de la presencia de arenas movedizas, puede ser útil instalar un dren temporal a mayor profundidad, que es sin duda más barato que bombear en pozos.

Relleno

El relleno y terminación de zanjas deben asegurar un mínimo de subsidencia del terreno y excluir el riesgo de formación de cavidades en el suelo. Este fenómeno puede ocurrir como resultado de erosión interna del relleno de la zanja causada por agua que fluye de la superficie del suelo directamente a los drenes a través del material suelto de relleno (Van Zeijts y Zijlstra, 1990). Esto es fundamental en regadíos, donde el agua de riego puede fluir libremente a través de la zanja o de las fisuras hechas por el rejón hacia la tubería de drenaje, lo que reduciría considerablemente la eficiencia de riego. Además, la formación de oquedades en el suelo puede originar que material del mismo sea transportado por el flujo de agua hacia el dren, creando hoyos en la superficie del terreno, obstrucción mineral de drenes y envolturas si las hubiera o ambas cosas. Por tanto, es esencial el relleno adecuado de la zanja o de las fisuras de rejón. Es más fácil rellenar y compactar fisuras de cuchillas en V que zanjas. Las fisuras creadas por rejonos verticales causan la mayor parte de los problemas (Van Zeijts y Naarding, 1990).

Drenes recién instalados no deben someterse a grandes cargas ni a encharcamientos importantes hasta que se haya consolidado el suelo en la zanja. El material suelto de relleno se asentará naturalmente con el tiempo. Como el relleno se hace por lo general con un tractor equipado con un apero aporcador, pasar una rueda del tractor sobre la zanja rellena, colmar ésta nuevamente y volverla a pasar otra vez acelerará el proceso, pero debe tenerse cuidado de evitar romper la tubería. Este procedimiento asegura que sólo la parte superior del relleno de la zanja se compacta y que la parte más profunda del relleno mantiene buena permeabilidad y una resistencia de entrada pequeña. En el caso de instalación de drenes sin apertura de zanja con un rejón vertical, es igualmente importante la compactación de la parte superior del suelo alterado. Un procedimiento común es hacer pasar una cadena de la máquina de drenaje sobre la línea de dren, cuando la máquina retrocede hacia la salida de un dren para iniciar la instalación del siguiente lateral. Siguiendo este procedimiento en suelo seco, el grado de compactación puede ser insuficiente. Sin embargo, la aplicación de agua de riego a material sin consolidar en zanjas para asentar el relleno es una práctica que debe hacerse con mucha precaución.

Si va a regarse una parcela por inundación antes de que se consolide el relleno de la zanja, debe evitarse la entrada directa de agua superficial incontrolada en la zanja, levantando temporalmente caballones a ambos lados de la zanja (Stuyt y Willardson, 1999).

Directrices para tuberías de drenaje

Las máquinas zanjadoras pueden instalar tubos de cerámica, hormigón o plástico. Los *tubos de cerámica y hormigón* se colocan manualmente en un canal que los baja por la caja que protege la zanja donde automáticamente se colocan en posición correcta sobre la solera de la zanja. Los tubos deben instalarse en la zanja de modo que se obtenga una

unión perfecta entre drenes. En el caso de drenes de tamaños grandes, un operario de pie o sentado sobre la caja controla su correcta colocación. La separación máxima entre drenes no debe superar 3 mm, excepto en suelos arenosos o suelos con una capa arenosa a la profundidad del dren donde no debe ser mayor de $2d_{85}$. No son recomendables tubos de cerámica y hormigón sin grava o sin envolturas sintéticas adecuadas en suelos con arena fina suelta (CPVQ, 1989).

Los *drenes de plástico* normalmente se descargan mediante una tubería conductora montada justamente detrás de la máquina (zanjadora de ruedas) o sobre su mecanismo excavador (zanjadora de cadena). Se fabrican máquinas de rejón para instalar solamente drenes corrugados de diámetros no demasiado grandes, que no deben colocarse con un radio de curvatura menor a cinco veces el diámetro de la tubería, especialmente si ésta dispone de envoltura.

La calidad de las tuberías de drenaje es de primordial importancia para su instalación mecánica. No deben usarse tuberías de drenaje con fisuras, grietas u otros defectos visibles, ni tuberías malformadas o material envolvente desgarrado que no aseguren una buena instalación y funcionamiento. Además, todos los drenes y colectores deben cerrarse en el extremo superior para evitar la entrada de suelo (véase Capítulo 2, Apartado *Taponos terminales*). Pueden ocurrir fallos durante la instalación de drenes corrugados debido a tuberías aplastadas o rotas, tramos de tubería retorcidos, uniones separadas y tuberías desconectadas (Van Zeijts y Zijlstra, 1990). En estos casos, se impide el desagüe y se producen estancamientos, aunque el agua puede buscar finalmente su camino a través del suelo hacia un tramo del dren situado aguas abajo que funcione bien y hacia drenes vecinos. Sin embargo, aguas arriba del bloqueo puede haber agua encima del dren ocasionando una capa freática más alta.

Por lo general se transportan rollos de tuberías de diámetro pequeño en un carrete tanto en máquinas zanjadoras como de rejón y se desenrollan a medida que la instalación procede, pero las de mayor diámetro se colocan generalmente de antemano sobre la parcela y después se conducen a través de la máquina zanjadora.

Si las tuberías se estiran excesivamente pueden romperse o soltarse conexiones. Durante el desenrollado de la tubería la rotura puede pasar fácilmente desapercibida, pero la falta de un tramo de dren causará humedad en la zona afectada. Por ello, las máquinas de rejón deben dotarse de guías para facilitar la entrada suave de tubería en el tubo alimentador. El uso de una envoltura de grava puede acarrear una elongación indeseable de una tubería de drenaje si la grava no fluye suavemente hacia abajo por el tubo de suministro.

Cuando se limpian drenes de PVC corrugado inyectando agua (Apartado *Mantenimiento de tuberías de drenaje*) se observa a veces que los drenes no fueron colocados en línea recta sino ligeramente desviados. Este fenómeno se atribuye a la tensión en el material de la tubería generada en el desenrollado durante la instalación (Van Zeijts, 1987) y puede favorecer la aparición de bolsas de aire perjudiciales dentro del dren.

No deben instalarse tuberías de PVC a temperaturas por debajo de 3°C dada su fragilidad a bajas temperaturas. También deben evitarse temperaturas de almacenamiento que excedan de 40°C para tuberías de PE y de 80°C para las de PVC, así como su instalación por encima de 40°C, con objeto de impedir deformaciones de la tubería como resultado de la tensión longitudinal y de la carga. La exposición a los rayos ultravioletas de radiación solar también afecta la resistencia de tuberías de plástico corrugado (Desmond y Schwab, 1986; Dierickx, 1998a). Por ello, las tuberías almacenadas deben protegerse de la exposición a la luz solar directa si no se instalan en el plazo de una semana (climas tropicales) o de un mes (climas templados) después de la entrega (véase Capítulo 2, Apartado *Tuberías de drenaje de plástico*).

Directrices para envolturas

La envoltura debe rodear completamente la tubería de drenaje independientemente del material envolvente y del método de instalación que se usen, excepto cuando un dren se coloca sobre una capa impermeable. Una envoltura colocada meramente encima del dren no es suficiente, ya que también ocurre obstrucción mineral desde abajo si entra agua en el dren por todas partes. Las envolturas voluminosas pueden extenderse a mano en la solera de la zanja antes de la colocación de la tubería, pero solamente es posible hacerlo en suelos estables donde las paredes de zanja no se derrumban. Si se colocan a mano drenes y una capa de envoltura voluminosa debe envolver el dren, lo primero es colocar la envoltura sobre la solera de la zanja y nivelarla. A continuación, se instala el dren y se cubre con más envoltura voluminosa hasta la altura necesaria. Esto también es válido para la instalación mecánica de drenes con envoltura voluminosa. Las envolturas en tiras se entregan en rollos y deben colocarse por debajo y por encima del dren. El material colocado en la solera no tiene por qué ser el mismo que el colocado encima. Sin embargo, son preferibles drenes forrados previamente dado que protegen los drenes por todos lados y ofrecen una mayor seguridad que envolturas voluminosas o de tiras. No obstante, solamente funcionarán bien unas buenas envolturas fiables si se instalan correctamente en condiciones atmosféricas y con características físicas del suelo ambas favorables. La presencia de lodo en la solera de una zanja causará el fracaso inmediato y total del material envolvente y por tanto del dren.

El uso generalizado de envolturas de *grava* ha disminuido constantemente a pesar de todos los esfuerzos para mecanizar y perfeccionar su instalación, p. ej. introduciendo una tolva para grava al final de la caja de excavación. Esta tolva reduce la tensión de la tubería pero los problemas de alimentación de grava no están todavía completamente resueltos (Vlotman *et al.*, 2000). Teóricamente, también es posible usar grava con rejón vertical y con cuchillas en V, pero el riesgo de bloqueo de la grava en el tubo de abastecimiento de las máquinas hace que la técnica sin zanja sea menos adecuada para la colocación de grava, que es sin duda una operación difícil que lleva considerable mano de obra. La experiencia práctica muestra deficiencias que causan intrusión de suelo y sedimentación en la tubería. Los mayores problemas son (Dierickx, 1993):

- Segregación durante el transporte e instalación.
- Problemas de circulación en el tubo de abastecimiento.
- Distribución desigual alrededor de la tubería de drenaje.
- Incorporación accidental de suelo en la base del montón de grava.

También puede usarse *arena* gruesa bien cernida como envoltura de un dren, pero su resistencia al corte, especialmente si no está completamente seca, dificulta la instalación mecánica aún incluso más que la grava.

Pueden instalarse adecuadamente *envolturas orgánicas y sintéticas* revistiendo tuberías de drenaje corrugadas tanto con zanjadoras como con máquinas que no abren zanja. Sin embargo, pueden dañarse durante el transporte o por una rápida instalación mecánica, sobre todo cuando se usan materiales de inferior calidad o cuando la tubería no está cuidadosamente forrada. Las envolturas revestidas previamente cubren toda la circunferencia del dren, para evitar puntos localizados de entrada de partículas de suelo. Además, no deben dañarse durante el manejo e instalación. Por tanto, la capa de material suelto antes del revestido debe tener suficiente grosor y uniformidad como sea posible para evitar espacios abiertos.

Los *geotextiles* que se usan para recubrir tuberías de drenaje por lo general se suministran en rollos. Las láminas deben ser lo suficientemente anchas para facilitar un solapamiento adecuado, de modo que las tuberías queden completamente cubiertas sin uniones abiertas. Si se cosen los bordes longitudinales de una lámina de geotextil, ésta debe ser lo suficientemente ancha como para facilitar esta operación. Si una funda de geotextil se coloca manualmente sobre un dren colocado sobre la parcela, tanto el geotextil como la costura, si existe, deben ser lo suficientemente fuertes para resistir

este manejo sin daños. Los geotextiles por lo general tienen una resistencia mecánica suficiente para resistir cargas mecánicas durante la instalación.

La instalación mecánica requiere materiales de drenaje adecuados para asegurar una instalación precisa y un funcionamiento adecuado del drenaje. Por tanto, se necesitan materiales de alta calidad cuyas propiedades deben verificarse antes de su instalación de acuerdo con especificaciones estándar bien definidas. Por ello, son de gran importancia normas de calidad de tuberías de drenaje y envolturas de dren (Capítulo 9). Ni PLM ni geotextiles revestidos previamente presentan problemas particulares durante su instalación, ya sea con zanjadoras o con máquinas que no abren zanja. Su peso ligero los hace adecuados en suelos blandos donde el uso de grava crea problemas a causa de su peso.

MANTENIMIENTO DE TUBERÍAS DE DRENAJE

Limpieza con agua a presión

Mantener es obvio si hay serias obstrucciones y si se hace regularmente puede prolongar la vida útil del sistema y mejorar su funcionamiento. En caso de pequeñas obstrucciones en tuberías (como las de ocre fresco) puede ser suficiente un *desatascado en seco* mediante una serie de varillas acopladas, con un rascador en el extremo, que se introducen en un dren y después se sacan. Los materiales desprendidos son arrastrados si esta operación se realiza durante un período de desagüe considerable. En caso de obstrucciones más serias debe usarse *agua a presión*, que es una técnica utilizada para eliminar, mediante impacto de chorros de agua, obstrucciones y precipitados (p. ej. partículas de suelo y depósitos microbiológicos, incluyendo ocre de hierro) de tuberías de drenaje. En particular, las funciones de limpiar con agua a presión son:

- Deshacer taponos dentro de la tubería de drenaje.
- Eliminar depósitos de la pared interna de un dren.
- Limpiar perforaciones obstruidas.
- Remover pequeñas raíces sueltas de cultivos y malezas.
- Aportar suficiente agua para transportar hacia la salida de dren los elementos sueltos, incluyendo partículas de arena y arcilla.

Idealmente, el agua que fluye de un dren evacua la mayor parte de los agentes obstruccioneros. Pueden desplazarse partículas mayores de aproximadamente 75 μm , pero generalmente son demasiado pesadas para salir del dren (Busser y Scholten, 1979). No está claro en qué medida pueden limpiarse eficientemente perforaciones de tubería sin dañarse, pero se asume que la limpieza con agua tiene un efecto mínimo sobre envolturas obstruidas.

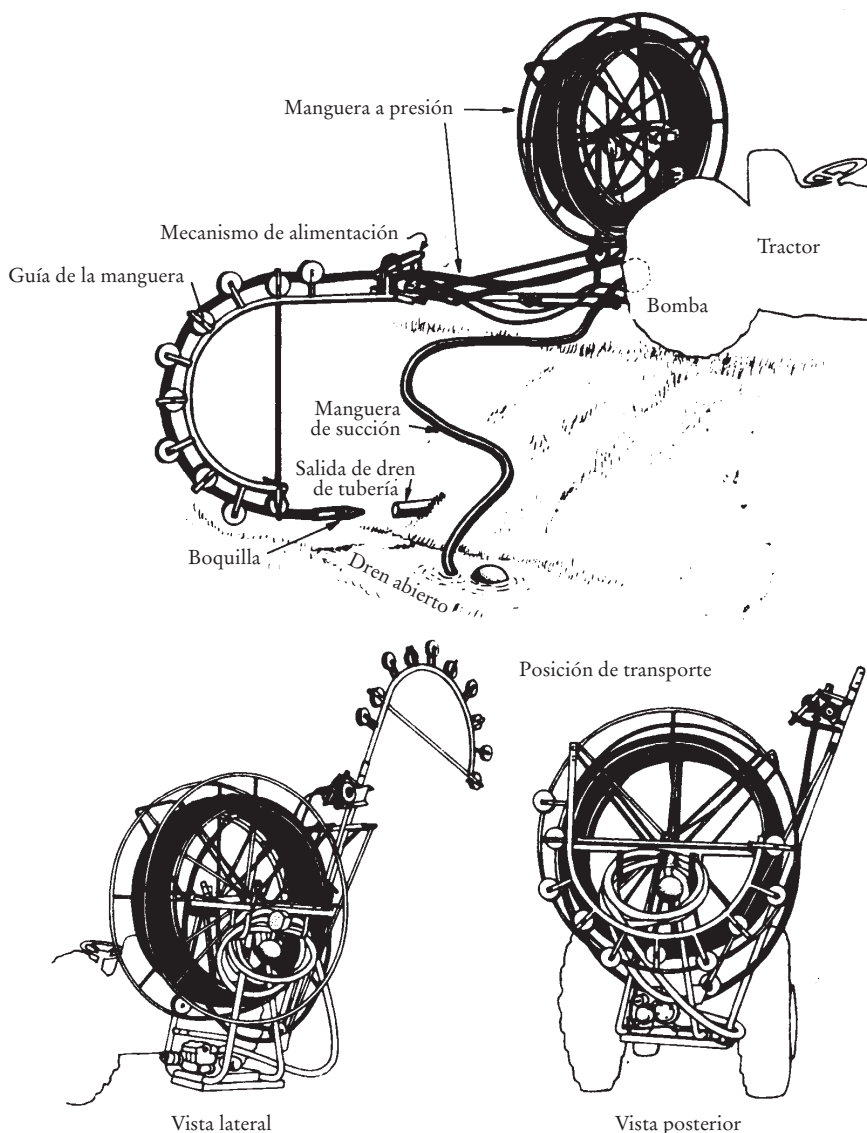
Un equipo típico de inyección, que opera desde la toma de fuerza de un tractor agrícola, consiste de una bomba, una entrada de succión para la bomba y un carrete con una manguera de presión de 200-400 m de largo dotada con una boquilla, como se muestra en la Figura 43. La boquilla se introduce en un dren de tubería en su extremo de aguas abajo y la manguera a presión se dirige a la salida del dren con la ayuda de una guía ajustable. El acceso a las salidas de drenes laterales es sencillo si éstos desaguan en colectores abiertos. Al contrario de estos sistemas de drenaje singulares, comunes en zonas templadas húmedas, los sistemas de drenaje en países semiáridos a menudo tienen un trazado compuesto, con laterales que desaguan en colectores de tubería en vez de en colectores abiertos. Si las uniones entre laterales y colectores están situadas en pozos de registro, éstos pueden usarse para recibir una manguera, siempre que el diámetro del pozo sea al menos de 0,3 m. En algunos países, como Egipto, los laterales son accesibles en su extremo de aguas arriba (Figura 14).

La inyección requiere como media 1-2 m^3 de agua por cada 100 m de dren. El agua puede bombearse desde una zanja de drenaje, un canal de riego o suministrarse desde un aljibe. El agua salina crea un ambiente duro y corrosivo para las máquinas de inyección de agua. Si fuera necesario usar agua salina la máquina debe ser de piezas de

alta calidad resistentes a sales, pero el uso de agua salada debe evitarse porque perjudica la estructura del suelo alrededor del dren y es dañina para la máquina.

La boquilla debe introducirse en la tubería tan rápido como sea posible durante el proceso de inyección. La pulsación de la bomba de pistón favorece el movimiento de avance de la boquilla. Una vez que ésta ha llegado al extremo aguas arriba del dren, la manguera se retira bobinándola a un ritmo constante de aproximadamente 0,3 m/s mientras continúa el bombeo (Van Zeijts y Bons, 1993). La acción limpiadora depende de la fuerza de inyección, del ángulo de ataque de los chorros de agua, de la duración del trabajo, de la temperatura del agua y del uso de sustancias químicas (Heeres *et al.*, 1985). La fuerza limpiadora es proporcional al caudal multiplicado por la raíz cuadrada de la presión del agua en la boquilla (Lechler, 1980). Restricciones ambientales así como el coste generalmente impiden el uso de compuestos químicos con la inyección de agua a presión.

FIGURA 43
Limpieza con inyección de agua con un equipo de presión media (según Bons y Van Zeijts, 1991)



Se debe encontrar un equilibrio, preferiblemente en el lugar de trabajo, entre la presión y la velocidad del agua que sale de la boquilla. La relación óptima es probable que dependa del diámetro interno de los drenes, sin embargo, no existen datos que apoyen esta suposición. En muchos equipos comerciales de inyección de agua puede ajustarse la relación entre caudal y presión: los caudales se ajustan cambiando la velocidad de bombeo y la presión del agua seleccionando una boquilla apropiada (número, tamaño y orientación de orificios).

La inyección de agua aumentará temporalmente la presión del agua en una tubería de drenaje y también en el suelo circundante, afectando posiblemente la estabilidad del suelo alrededor del dren. El aumento de la presión del agua causa una reducción de las fuerzas cohesivas entre partículas de suelo, que puede llevar a condiciones de inestabilidad instantáneas y de riesgo, especialmente en suelos escasamente cohesivos. Una vez que ha pasado la boquilla, el material de suelo disperso puede fluir dentro de la tubería y además la conductividad hidráulica del suelo puede afectarse adversamente. Independientemente del caudal de la boquilla, las sustancias removidas se evacuan más fácilmente desde drenes de diámetro pequeño que de grande, debido a las mayores velocidades del agua en las tuberías de menor diámetro.

Se fabrican tres categorías de equipos de inyección en lo que se refiere a la presión del agua:

- Equipo de alta presión : > 100 bar en la bomba.
- Equipo de presión media : 20-35 bar en la bomba.
- Equipo de baja presión : < 20 bar en la bomba.

Los equipos de alta presión no son recomendables porque la experiencia empírica ha puesto en evidencia que este tipo de máquina desestabiliza el suelo alrededor del dren y destruye su estructura.

La presión de agua en la boquilla es aproximadamente el 50 por ciento de la presión en la bomba. En el Cuadro 10 se presentan datos hidráulicos de boquilla, presión en bomba y caudales, proporcionados por un fabricante de equipo de inyección comercial para una manguera flexible de un diámetro interno de 20 mm y una longitud de 300 m (Bons y Van Zeijts, 1991). La línea destacada presenta las cifras recomendadas (presiones y caudales).

El caudal máximo de agua que puede emplearse depende de la sección transversal del dren. Se ha encontrado empíricamente que un caudal de aproximadamente 70 l/min es satisfactorio para diámetros de tubería de 50 a 70 mm. Estos caudales se obtienen ciertamente con equipos de presión media que son muy populares. Mayores caudales pueden forzar el paso de demasiada agua a través de las perforaciones de tubería, lo cual es peligroso para la envoltura y para la estructura del suelo circundante.

CUADRO 10

Relación entre presión en bomba, presión en boquilla y caudal, para una manguera flexible de 20 mm de diámetro interno y 300 m de longitud (según Bons y Van Zeijts, 1991)

Presión en bomba (bar)	Boquilla con orificios de 2 mm		Boquilla con orificios de 1,5 mm	
	Presión en boquilla (bar)	Caudal (l/min)	Presión en boquilla (bar)	Caudal (l/min)
20	3,2	47	6,0	50
25	4,5	65	8,5	56
30	5,5	70	10,0	61
35	6,7	76	12,5	67
40	8,0	82	14,5	71
45	9,5	87	16,5	76
50	10,0	90	18,5	80

Los efectos coste/beneficio de mantener regularmente drenes por medio de inyección de agua son difíciles de cuantificar, pero algunas cifras pueden ser informativas. En los Países Bajos, el coste de limpieza con inyección de agua a presión media se estima en aproximadamente 0,15 \$ EE.UU. por m de dren, que equivale al 12 por ciento del coste de instalación de 1,25 \$ por m. Con una longitud típica de drenes de 800 m por hectárea y una frecuencia de limpieza de una vez cada tres años, el coste anual es de 40 \$ por hectárea. La media anual del rendimiento bruto de tierras arables es aproximadamente de 2500 \$ por hectárea. Por tanto, el coste de mantenimiento calculado es menos del 2 por ciento del rendimiento bruto anual.

Experiencia empírica con agua a presión en el noroeste de Europa

El desatascado con varilla y la inyección de agua en drenes son útiles para eliminar sustancias ocráceas pero generalmente no eliminan raíces de los drenes, con la excepción de las muy finas y sueltas (de cultivos y algunas malezas). Antes de inyectar agua deben observarse algunos drenes internamente, p. ej. con una videocámara en miniatura, para comprobar el tipo de obstrucción y para evaluar la eficiencia de inyección. Puede ser útil inyectar preventivamente agua en caso de sustancias ocráceas, para impedir la obturación total de las perforaciones de tubería. Cuando precipita el ocre es una sustancia blanda pero con el tiempo llega a ser densa y pegajosa y difícil de remover (Cestre y Houot, 1984). Generalmente, la inyección no puede reabrir perforaciones de tubería obstruidas con sustancias ocráceas incrustadas. Por ello, los depósitos de ocre deben eliminarse antes que se sequen, mediante limpieza frecuente con inyección a presión media (Von Scheffer, 1982). En base a la experiencia recientemente adquirida en los Países Bajos, esta recomendación se ha atenuado algo actualmente, en el sentido de que la limpieza por inyección se recomienda solamente si los depósitos de ocre impiden claramente el funcionamiento adecuado de un dren. Esta recomendación también es válida para otros tipos de depósitos microbiológicos dentro de drenes.

Las siguientes condiciones pueden favorecer el riesgo de sedimentación en un dren cuando se inyecta agua:

- El uso de equipos de alta presión.
- La inyección de agua inmediatamente después de la instalación de drenes (cuando el suelo todavía no se ha asentado ni estabilizado).
- Tuberías dañadas, envolturas descompuestas o ambas cosas.
- Suelos no cohesivos o poco cohesivos.
- Movimiento lento o bloqueo (temporal) de la boquilla.

En los Países Bajos, alrededor de 600 000 hectáreas de tierras agrícolas tienen sistemas de drenaje subterráneo, pero no hay datos precisos sobre el área limpiada periódicamente. En 1998, el número de equipos de inyección en operación se estimó en varios miles, lo que significa que un área considerable se mantenía regularmente. El equipo de media presión (35 bar en la bomba y de 10 a 15 bar en la boquilla, resaltado en el Cuadro 10) es con mucho el más usado.

Hace tiempo se reseñó que la limpieza con agua a presión en un área piloto había tenido un efecto favorable en el funcionamiento de drenes, que tenían riesgo de una excesiva obstrucción bioquímica debida a intensa filtración ascendente de agua subterránea ferrosa (Ven, 1986). A medida que los drenes fueron inyectados periódicamente, el sistema de drenaje cumplió los criterios de diseño en términos de descenso del nivel freático y de caudal, pero las parcelas se anegaron cuando se suspendió la limpieza. Van Hoorn y Bouma (1981) investigaron el efecto de la inyección de agua en drenes instalados en suelos arcillosos que habían estado sumergidos regularmente y obstruidos por partículas minerales y sustancias bioquímicas, siendo este efecto bastante favorable. Sin embargo, en otra área piloto en los Países Bajos con condiciones similares, Huinink (1991) comprobó que el funcionamiento de los drenes no pudo restablecerse, a pesar de llevarse a cabo un proyecto de inyección exhaustivo.

Experiencias en el noroeste de Europa con equipos de alta presión han sido desfavorables y con equipos de presión intermedia ocasionalmente ocurre una sedimentación substancial en tuberías (Brinkhorst *et al.*, 1983). La experiencia práctica de agricultores y contratistas indicaba que la inyección con altas presiones favorecía la sedimentación y que la limpieza siguiente tenía que hacerse antes que cuando se usaba presión media o baja. Por ello, alrededor de 1980 progresivamente se abandonó el uso de equipos de alta presión.

En la década de 1990, la frecuencia de limpieza con inyección de agua recomendada a los agricultores variaba de uno a cinco años. En esta década, los agricultores tuvieron gradualmente menos confianza en inyectar agua a drenes. Un intenso seguimiento del funcionamiento de drenes en varias áreas piloto reveló que los efectos beneficiosos supuestos no eran tan obvios como se había creído durante largo tiempo (Huinink, 1991) y si se identificaba alguna mejora en el funcionamiento de drenes por lo general duraba poco. Este hecho ha inducido algún rechazo a la limpieza preventiva de drenes con inyección de agua.

Hoy en día los expertos de drenaje aconsejan a los agricultores no inyectar agua como una forma de mantenimiento preventivo, salvo cuando haya un riesgo substancial de obstrucción con ocre. Por otro lado, la limpieza con agua es útil si el funcionamiento de los drenes se ha deteriorado considerablemente, según observaciones de los agricultores. Sin embargo, drenes previamente revestidos con envolturas adecuadas y de larga duración no necesitan prácticamente mantenimiento (Dierickx, 1993). Una observación similar fue hecha en Estados Unidos de América 20 años antes (Winger, 1973).

A causa de estos hechos, el número de fabricantes holandeses de equipos de alta y media presión se redujo de seis en 1991 a dos en 1998, pero en varias localidades se fabrica equipo relativamente simple de baja presión.

Directrices para inyectar agua

En resumen, en Alemania, Dinamarca y Países Bajos se desarrollaron empíricamente las siguientes directrices para inyectar agua en varios tipos de tuberías de drenaje con diámetros de 40 a 90 mm:

1. Preferiblemente, la inyección de agua debe hacerse cuando la capa freática está en o por encima del nivel de dren, porque el sedimento húmedo es más fácil de remover y porque el suelo húmedo limitará la entrada indeseable del agua inyectada en envolturas y suelos.
2. Se han obtenido resultados satisfactorios con las siguientes normas y especificaciones de maquinaria:
 - Una bomba de presión media (35 bar en la bomba y de 12 a 15 bar en la boquilla).
 - Una boquilla estándar con un agujero hacia adelante y 12 hacia atrás.
 - Un caudal de 50 a 70 l/min.
 - Una velocidad de avance (penetración) de 0,5 m/s.
 - Una velocidad de retroceso de 0,3 m/s.
3. Cuando se obstruye el movimiento de la boquilla, la bomba deberá pararse inmediatamente para impedir daños físicos localizados del dren, envoltura y estructura del suelo.
4. Drenes abandonados que contienen arcilla endurecida y depósitos de limo deben inyectarse con una boquilla especial con menos orificios pero de diámetro mayor (p. ej. uno hacia adelante y cuatro hacia atrás). El alto impacto del agua inyectada abrirá grietas en los sedimentos rompiéndolos en trozos y facilitando su remoción.
5. Los sedimentos de arenas finas deben ser eliminados con una boquilla con menor ángulo de inyección, p. ej. 30°. La arena húmeda puede desprenderse relativamente con facilidad, pero es más difícil de sacar de la tubería que depósitos de partículas más finas como limos y arcillas. Para mantener en movimiento la arena se necesitan grandes cantidades de agua.
6. Drenes muy obstruidos deben limpiarse por etapas con un intervalo de varias semanas. Estos intervalos son necesarios para permitir que el suelo alrededor de los drenes se estabilice tras la inyección.
7. Si el grado de obstrucción mineral de drenes es tan alto que se considere la instalación de nuevos drenes, es posible hacer un último intento drástico para restaurarlos. En estos casos, el dren debe inyectarse insertando y retirando la boquilla repetidamente, avanzando cada vez unos pocos metros mientras se considera el uso de altas presiones. A fin de evitar el riesgo de desestabilizar el suelo circundante, la velocidad de inserción de la boquilla en el dren deberá ser máxima con un caudal bajo, mientras que la velocidad de retroceso y la intensidad de bombeo deberán ser tales que la arena se mantenga delante del chorro de agua. Es fundamental establecer y mantener una velocidad substancial del agua en el dren.

Capítulo 8

Investigación sobre materiales de drenaje

El primer resultado de investigación sobre materiales de drenaje surgió de estudios hechos con modelos analógicos de tanque de arena (Wesseling y Homma, 1967; Segeren y Zuidema, 1969). La investigación con estos modelos ha contribuido a identificar parámetros relevantes. Estudios teóricos (Widmoser, 1968; Nieuwenhuis y Wesseling, 1979) e investigaciones con modelo electrolítico (Dierickx, 1980) sobre las características de tuberías y envolturas han dado como resultado su cuantificación y ha aumentado el conocimiento en este campo. De investigaciones con permeámetro se obtuvo información práctica importante sobre la necesidad de envolturas de drenaje, especialmente sobre la retención de partículas de suelo en envolturas (Samani y Willardson, 1981; Dierickx y Yüncüoğlu, 1982; Stuyt, 1982; Lennox-Gratin, 1987).

El material descrito en este capítulo trata casi exclusivamente de envolturas de drenaje, porque son una parte esencial de muchos sistemas de drenaje subterráneo y si fallan el conjunto del sistema no funciona. Los problemas relativos al uso de tuberías de drenaje son reducidos y bien comprendidos, mientras que los problemas frecuentes y el abanico amplio de elección de materiales hacen que la investigación sobre envolturas de drenaje sea importante.

Hay dos categorías de investigaciones sobre el funcionamiento de envolturas de drenaje que no se distinguen siempre claramente y que son las siguientes:

- Investigaciones en «caja negra» para evaluar la adecuación de envolturas específicas en vez de entender los factores que determinan su aplicabilidad.
- Investigaciones hechas intencionalmente para tratar de *revelar los factores* y definir los parámetros asociados que determinan la aplicabilidad de materiales envolventes en términos generales.

La primera categoría puede ser denominada *evaluación de envolturas* y la segunda *investigación básica sobre envolturas*.

Generalmente, el ensayo de envolturas de drenaje se lleva a cabo en dos etapas sucesivas, primero en el laboratorio y posteriormente en el campo. Así, las envolturas promisorias -basadas en datos de ensayo de laboratorio- son sometidas a pruebas de funcionamiento en campo. A continuación, se presentan directrices redactadas para proyectos de investigación de campo y laboratorio. Asimismo, se describen los componentes de estas directrices y una serie de recomendaciones prácticas sobre *qué hacer* y *qué no*, relacionados con el establecimiento y seguimiento de experimentos de laboratorio y áreas piloto.

Para investigar la adecuación de materiales envolventes para una aplicación específica deben considerarse qué preguntas pueden responderse y cuáles no, antes de iniciar un proyecto de investigación, tanto de laboratorio como de campo.

CARACTERÍSTICAS DEL SUELO Y PARÁMETROS DE ENVOLTURA RELEVANTES

La investigación de laboratorio y campo sobre materiales de drenaje requiere que las especificaciones de la envoltura y las características relevantes del suelo sean bien conocidas. El funcionamiento de una envoltura está en gran parte determinado por propiedades físicas y químicas del suelo. Por tanto, los ensayos con permeámetro deben

llevarse a cabo con suelo del campo experimental donde se instalarán los drenes, tomado a la profundidad de drenes o con suelo que se usará para recubrirlos. Cuando se lleve a cabo investigación con permeámetro es importante conocer y controlar las condiciones del suelo (contenido de humedad, densidad aparente, etc.) en el permeámetro, de modo que se pueda predecir el funcionamiento en el campo en relación con las condiciones de instalación. Para evaluar materiales envolventes de drenaje a partir de investigación de campo, debe especificarse claramente el suelo en el cual serán instalados así como el material envolvente utilizado. Por ello, tanto en investigación de laboratorio como de campo, deben determinarse las propiedades físicas y químicas del suelo y las especificaciones de la envoltura que a continuación se describen.

Las principales características del *suelo* (véase el Capítulo 6, Apartado *Propiedades físicas del suelo*) son las siguientes:

- Distribución del tamaño de partícula (textura del suelo).
- Índice de plasticidad, que requiere la determinación de los límites líquido y plástico.
- Densidad del suelo (solamente para investigación con permeámetro).
- Salinidad y contenido de sodio, calcio y hierro, tanto del suelo como del agua de riego.

Para *envolturas sintéticas* (véase el Capítulo 3, Apartado *Especificaciones para envolturas enrolladas previamente*) son importantes los siguientes parámetros:

- Espesor.
- Tamaño característico de abertura (preferiblemente O_{90}) o curva de distribución del tamaño de todos los poros, que proporciona información más específica.
- Resistencia a penetración de agua (ocasionalmente).

Los parámetros relevantes de *envolturas granulares* (véase el Capítulo 3, Apartado *Especificaciones para envolturas de grava*) son los siguientes:

- Distribución del tamaño de partícula.
- Componentes químicos.

EVALUACIÓN DE LABORATORIO SOBRE LA APLICABILIDAD DE ENVOLTURA

El ensayo de campo de gran número de materiales envolventes requiere mucho tiempo y es caro. Por ello, cierto tipo de modelos analógicos pueden eliminar combinaciones envoltura-suelo que son claramente inaceptables. Los modelos analógicos, es decir, tanques de arena y permeámetros de flujo, han sido ampliamente usados con este propósito. Stuyt (1992a) presentó una revisión del desarrollo de modelos analógicos de envolturas utilizadas en los Países Bajos.

Modelos de tanque de arena

En la década de 1960 los modelos de tanque de arena eran bastante populares en los Países Bajos y se usaban especialmente para investigar las resistencias de entrada de varios tipos de tuberías: tubos de cerámica y tuberías de plástico liso y corrugado. No se habían establecido todavía normas para tuberías corrugadas y los experimentos se enfocaron a tipos de perforación y a algunos materiales envolventes. Más tarde se utilizaron exhaustivamente tanques de arena para probar envolturas.

Los modelos de tanque de arena han llevado a resultados útiles:

- Todas las investigaciones llevadas a cabo en modelos con tanque de arena confirman el efecto favorable de las envolturas de dren (Watts y Luthin, 1963; Feichtinger, 1966), incluso de las envolturas laminares.
- La resistencia de entrada decrece con el aumento del espesor de envoltura (Wesseling y Homma, 1967; Segeren y Zuidema, 1969).
- Estudios con tanques de arena revelaron que el número, forma y tamaño de las perforaciones afectan la resistencia de entrada en menor grado que el material envolvente.

- Luthin y Haig (1972) probaron que una cobertura de grava adecuada actúa como un dren completamente permeable, haciendo que la separación entre tubos de cerámica o de hormigón no tenga virtualmente importancia.
- Investigaciones sobre el funcionamiento hidráulico de sistemas de drenaje con coberturas parciales indicaron que no existe gran diferencia con coberturas totales (Segeren y Zuidema, 1969; Saulmon, 1971; Dennis y Trafford, 1975). Aún así, en muchos casos son más seguras las coberturas completas para impedir un excesivo colmatado de la tubería.

A pesar de su utilidad, un estudio preciso con modelos de tanque de arena es muy difícil (Wesseling y Homma, 1967). Solamente se pueden comparar materiales de drenaje cuando las investigaciones se llevan a cabo bajo circunstancias estrictamente similares. Wesseling y Van Someren (FAO, 1972) definieron las desventajas de los modelos de tanque de arena como sigue:

- Los materiales de drenaje se ensayan durante un tiempo más bien corto. Sin embargo, Wesseling y Homma (1967) encontraron que la resistencia de entrada de drenes subterráneos aumentaba con el tiempo.
- Los resultados están estrechamente relacionados con la forma en que el modelo analógico se rellena con material de suelo. Para obtener datos consistentes debe usarse arena muy homogénea. Esto dificulta la obtención de información sobre las propiedades del material, que se espera que en la práctica estará en uso largo tiempo en condiciones de campo que pueden ser muy distintas de las del laboratorio.

Los modelos convencionales de tanque de arena eran bastante grandes, p. ej. de 1,5 (*L*) x 1,0 (*W*) x 1,0 (*H*) m y se rellenaban con arena sin cohesión o con tipos de suelo sin cohesión originarios del área a ser drenada o similares en textura al suelo de dicha área. Para llenar estos modelos era necesaria una gran cantidad de arena. Además, el relleno debía hacerse tan homogéneamente como fuera posible, lo que requería bastante mano de obra. Por ello, la mayoría de los suelos utilizados experimentalmente contenían solamente un pequeño porcentaje de partículas de arcilla y limo y materia orgánica, y eran a menudo diferentes de la mayor parte de los tipos de suelo que se encontraban en el campo. Si la envoltura funcionaba aceptablemente en un ensayo, se recomendaba su uso en el campo. En muchos experimentos con tanque de arena el objetivo era cuantificar la resistencia de entrada, aunque en realidad lo que se medía era una «resistencia al flujo de aproximación». Además, se medía la compactación de la arena y la envoltura era aceptada para utilizarse en la práctica si no se observaba una entrada sustancial de partículas minerales.

Los experimentos de laboratorio en tanque de arena hechos en las décadas de 1960 y 1970 no dieron indicaciones directas sobre el funcionamiento de líneas de dren porque:

1. Las envolturas fueron examinadas sin intentar comprender y analizar los procesos físicos involucrados.
2. Solamente se podían usar suelos arenosos.
3. No se consideraron parámetros de envoltura como el tamaño de poros característico.
4. No se investigó sistemáticamente la relevancia de parámetros de envoltura presumiblemente importantes para su funcionamiento.
5. No se consideraron circunstancias de instalación ni condiciones del suelo (contenido de humedad y densidad aparente), por lo que la reproducibilidad de los ensayos fue baja.
6. No pudieron simularse algunos fenómenos dependientes del tiempo y que ocurren a largo plazo, como los cambios estacionales y el grado de obstrucción mineral y química a largo plazo (p. ej. un año o más).

El punto 5 se refiere a las condiciones de humedad en las que se instalaron las tuberías en los tanques de arena. Cavelaars (1966) encontró que la «resistencia al

flujo de aproximación» medida y la conductividad hidráulica eran bastante sensibles al contenido de humedad de las muestras de suelo con que se llenaron los tanques. Ciertamente, en muchos experimentos con tanque de arena se encontró con el tiempo una disminución sustancial de la conductividad cerca del dren. De acuerdo a Willet (1962), Van der Meer y Willet (1964) y Koenigs (1964), esta disminución es causada por el bloqueo local de los poros del suelo por partículas finas que han sido dispersadas al formarse lodo en un suelo con alto contenido de humedad. Ciertos suelos con alto contenido de partículas menores de 50 μm muestran un riesgo alto de formación de lodo bajo condiciones de campo húmedas. Se observaron disminuciones de conductividad hidráulica hasta un factor de 20, lo cual pareció ser de gran importancia para determinar el funcionamiento de drenes en el campo.

Drenes instalados en otros suelos no arenosos (p. ej. suelos limosos y francos) también pueden necesitar envolturas. Las propiedades físicas de estos suelos no pueden simularse fácilmente con modelos analógicos. En estos casos, son indispensables permeámetros de flujo paralelo y experimentos de campo para examinar la aplicabilidad de envolturas.

Durante la Primera Reunión de Trabajo Internacional de Drenaje, llevada a cabo en Wageningen, Países Bajos, en 1979, Knops y Dierickx (1979) concluyeron que había una gran necesidad de adquirir más conocimiento acerca del uso más eficiente y efectivo de tejidos de fibra sintética como envolturas de dren. Esta necesidad urgía porque entonces la disponibilidad de materiales envolventes sintéticos aumentaba rápidamente. Se necesitaba entonces una investigación más básica que la hecha hasta entonces para evaluar las interacciones entre suelos y envolturas de dren. Esta investigación se llevó a cabo para profundizar la percepción del riesgo de erosión interna que tiene un suelo y de los procesos que influyen en el movimiento de partículas de suelo, y fue necesaria para obtener la información necesaria para elaborar un método de garantía para predecir la necesidad de una envoltura en cualquier tipo de suelo bajo cualquier condición del mismo. El permeámetro de flujo paralelo demostró ser un medio adecuado para este tipo de investigación.

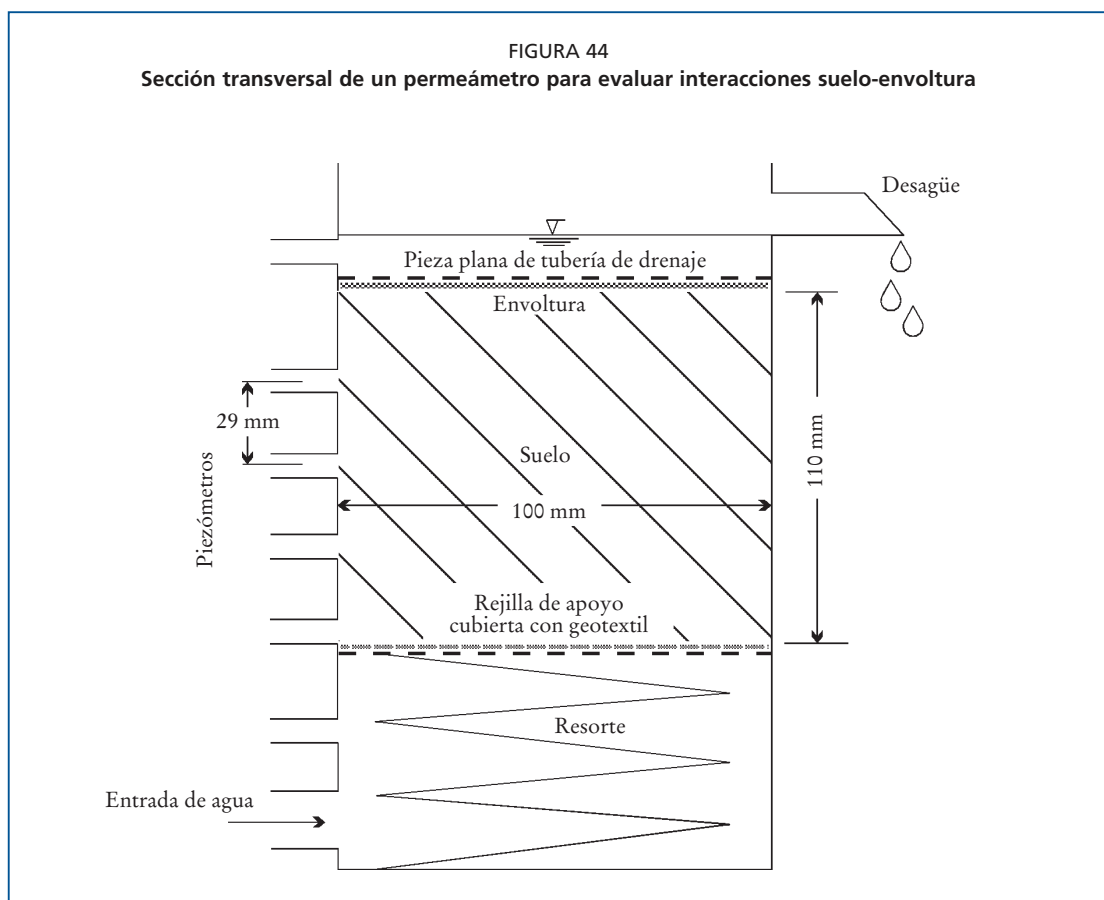
Permeámetros de flujo paralelo

La investigación con permeámetro simula el flujo hacia una tubería de drenaje, revestida o no, mediante un flujo unidimensional hacia una pieza plana de tubería de drenaje, un material envolvente o una combinación de ambos. En la Figura 44 se muestra un ejemplo de un permeámetro con flujo ascendente para ensayar el funcionamiento de materiales de drenaje. Consta de un cilindro de plexiglás de 100 mm de diámetro interno y una longitud de al menos 150 mm, que contiene una muestra de suelo de 50 a 100 mm de altura. Como apoyo externo se coloca encima de la muestra de suelo una pieza plana de tubería de drenaje con envoltura entre ambos en su caso. Un resorte con un apoyo (malla y geotextil o disco perforado) mantiene un buen contacto, aún cuando pequeñas cantidades de suelo se desprendan. Las cargas hidráulicas en el sistema se controlan con piezómetros conectados a un tablero con manómetros. Obviamente, los ensayos deben hacerse dentro de un rango de gradientes representativo de los gradientes hidráulicos que se pueden crear cerca de los drenes en el campo. Las pruebas de laboratorio deben hacerse progresivamente a mayores gradientes hasta que el material envolvente falla, o hasta que se alcanza el gradiente más alto posible. De esta manera puede medirse el posible gradiente de fallo de la combinación suelo-envoltura. El fallo puede deberse a obstrucción mineral de la envoltura, movimiento excesivo de suelo a través del material envolvente o a pérdida de estructura del suelo, resultando en una disminución sustancial de la conductividad hidráulica. La conclusión sobre el funcionamiento de la combinación suelo-envoltura debe basarse no en una única prueba, sino en cierto número de replicaciones en las que la preparación del suelo y el llenado del permeámetro deben hacerse de acuerdo a ciertas reglas. Los agregados de suelo deben pasar a través de un cedazo para formar fracciones de agregados, después

de lo cual las muestras de suelo se reconstituyen nuevamente con cantidades conocidas de cada fracción. El llenado del permeámetro con cierto suelo debe hacerse de la misma forma, con la misma cantidad de suelo y con el mismo contenido de humedad, con objeto de obtener la misma densidad aparente en cada replicación.

El «US Army Corps of Engineers» (1977) usó un permeámetro de flujo paralelo para evaluar la compatibilidad suelo-geotextil. Esta prueba llegó a conocerse como «prueba de relación de gradiente» y fue aceptada como procedimiento de ensayo estándar para evaluar el potencial de obstrucción mineral de una combinación suelo-geotextil (ASTM D5101-96, 1996). Willardson y Walker (1979) también diseñaron un permeámetro de flujo paralelo que fue usado por Samani y Willardson (1981) para desarrollar el concepto de gradiente de fallo hidráulico, i_f (véase el Capítulo 4, Apartado *Gradiente de fallo hidráulico*). Dierickx y Yüncüoglu (1982) utilizaron un permeámetro de flujo paralelo en Bélgica para obtener más información sobre el funcionamiento de materiales envolventes en suelos estructuralmente inestables. También se utilizó para comprender mejor el mecanismo de movimiento de partículas en y cerca de la interfase suelo-envoltura. En los Países Bajos, Stuyt (1982) llevó a cabo una investigación con permeámetro para simular el proceso físico del paso de partículas y obstrucción de envoltura con un suelo sin estructura. Stuyt y Oosten (1986) describieron una investigación con permeámetro en muestras de suelos muy poco cohesivos, tanto alteradas como sin alterar. La investigación con permeámetro en Francia (Lennoz-Gratin, 1987) dio lugar a un método de ensayo estándar (NFU 51-161, 1990) para diagnosticar los riesgos de obstrucción mineral en sistemas de drenaje subterráneos (Lennoz-Gratin, 1992). Muchos ingenieros e investigadores en

FIGURA 44
Sección transversal de un permeámetro para evaluar interacciones suelo-envoltura



todo el mundo han utilizado permeámetros de flujo paralelo para obtener respuestas a la interacción entre geotextil y suelo (Qureshi *et al.*, 1990; Fischer *et al.*, 1994; Chin *et al.*, 1994; Shi *et al.*, 1994). Permeámetros de flujo vertical se utilizan en Egipto (Dierickx, 1988), Pakistán (Dierickx, 1991) y la India (Dierickx, 1998c) para evaluar la aplicabilidad de envolturas sintéticas y el funcionamiento de materiales fabricados localmente o importados, en varios tipos de suelo y en diferentes condiciones de los mismos. En Egipto y Pakistán, la investigación con permeámetro ha contribuido a la introducción de envolturas sintéticas y al uso con éxito de materiales envolventes de dren locales en campos experimentales.

Los modelos con permeámetro de flujo paralelo han superado algunas de las desventajas de los modelos de tanque de arena y son más adecuados para estudiar la interacción física entre envolturas y suelos por múltiples razones:

- Solamente son necesarias pequeñas cantidades de suelo.
- Pueden usarse suelos con o sin cohesión.
- El llenado con suelo puede controlarse adecuadamente, por lo que la capacidad de repetición de ensayos es alta.
- Pueden mantenerse adecuadamente condiciones de suelo en términos de contenido de humedad y densidad.
- Pueden simularse procesos físicos en el suelo.
- El gradiente hidráulico medio puede cambiarse y mantenerse con bastante facilidad.

El ensayo con permeámetro de flujo paralelo ha demostrado su validez para evaluar los siguientes fenómenos:

- La necesidad de envolturas de drenaje (Dierickx y Yüncüoğlu, 1982; Lennoz-Gratin *et al.*, 1992).
- Diferencias funcionales entre varias envolturas (Stuyt, 1982; Stuyt y Oosten, 1986; Lennoz-Gratin, 1987; Rollin *et al.* 1987; Stuyt y Willardson, 1999).
- El efecto de las condiciones del suelo sobre el funcionamiento del drenaje (Dierickx y Yüncüoğlu, 1982; Kabina y Dierickx, 1986; Stuyt y Oosten, 1986; Stuyt y Willardson, 1999).
- Criterios de retención de envolturas con respecto a partículas de suelo y agregados (Dierickx, 1987; Dierickx y Van der Sluys, 1990; Qureshi *et al.*, 1990).
- Las propiedades para retener suelo de la grava (Vlotman *et al.*, 1992b) y de materiales envolventes orgánicos y sintéticos (Kabina y Dierickx, 1986; Stuyt y Oosten, 1986).
- La interacción de una combinación geotextil-suelo (Stuyt, 1982; Stuyt y Oosten, 1986; Dierickx, 1986b; Dierickx *et al.*, 1987; Lennoz-Gratin, 1987; Rollin *et al.*, 1987; Qureshi *et al.*, 1990; Chin *et al.*, 1994; Shi *et al.*, 1994).
- La heterogeneidad de los tipos de flujo cerca de drenes por medio de trazadores tintados (Stuyt y Oosten, 1986).
- La composición de la textura de micro-muestras de suelo, tanto del propio suelo como de material de suelo retenido en la envoltura y del que pasa la envoltura y la tubería de drenaje (Stuyt y Oosten 1986, Stuyt, 1992a).

Mediante estos ensayos con modelo análogo puede relacionarse la necesidad de envolturas de dren a las características del suelo (Samani y Willardson, 1981). Se han evaluado criterios de retención simples y útiles para envolturas PLM y geotextiles usados como envolturas de dren (Dierickx, 1993). Se han redefinido criterios de diseño para envolturas de grava, basados en elaborados ensayos llevados a cabo por Vlotman *et al.* (1992a).

Directrices para investigación con permeámetro

Pueden realizarse ensayos con permeámetro para evaluar una combinación suelo-envoltura-tubería, pero sus resultados dependerán fundamentalmente de la forma en que se prepara la muestra de suelo. Para llevar a cabo una investigación con permeámetro debe considerarse una serie de directrices esenciales.

1. Preparación del suelo

No deben llenarse permeámetros con terrones de suelo seco ya que cuando se humedecen tienden a romperse y el suelo se vuelve casi impermeable. Una vez que los terrones de suelo secados al aire pasan por un cedazo de agujeros cuadrados de 5 mm, deben llevarse al contenido de humedad deseado (generalmente capacidad de campo), aspergiendo agua con una pistola de pintar y pasándolos nuevamente por cedazos (p. ej. tamices de agujeros cuadrados de 4,76, 3,36 y 2,00 mm) para hacer fracciones de agregados. Las muestras de suelo pueden prepararse usando, p. ej. 40 por ciento de agregados entre 0 y 2,00 mm, 40 por ciento entre 2,00 y 3,36 mm y 20 por ciento entre 3,36 y 4,76 mm. Sin embargo, el cernido de agregados y la preparación de muestras de suelo dependen del tipo de suelo. No es posible dar reglas generales sobre contenido de humedad, fracciones de agregados y porcentaje de cada fracción para los distintos tipos de suelo. Agregados demasiado pequeños de arcillas expansivas pueden dar lugar a un suelo impermeable cuando se satura. Por tanto, puede ser necesaria alguna investigación preliminar sobre tamaño de agregado, estabilidad y expansión para varios contenidos de humedad.

2. Simulación de condiciones susceptibles a fallo

El suelo en el permeámetro no deberá compactarse en exceso ya que un suelo denso no presenta problemas y no corresponde a condiciones de campo, donde es más común un suelo suelto y excavado, especialmente en zanjas rellenas. La condición del suelo, contenido de humedad y gradiente hidráulico deben simularse tanto como sea posible, de acuerdo con las condiciones que más probablemente ocurran en el campo. Ésta no es una tarea fácil.

3. Medida después que se ha obtenido equilibrio

Una vez llenado el permeámetro convenientemente, el suelo se satura y se elimina el aire del permeámetro. La prueba no puede iniciarse hasta que se alcanza equilibrio, lo cual generalmente lleva algunas horas según el tipo de suelo. Al mismo tiempo, deben comprobarse alteraciones visibles en la columna de suelo a través de la pared de plexiglás de los permeámetros y eliminarse aquellos ensayos que presenten quedades.

4. Dirección de flujo ascendente o descendente

Es preferible flujo ascendente de agua, ya que la fuerza de arrastre del flujo de agua contrarresta las fuerzas gravitacionales y cohesivas -si existen- y promueve una situación inestable tan pronto como esas fuerzas opuestas se anulan. El flujo descendente tiende a estabilizar mecánicamente el suelo, porque la fuerza del flujo actúa en el mismo sentido que la gravitacional.

5. Aplicación de un gradiente hidráulico creciente

El gradiente hidráulico cerca de tuberías de drenaje está sujeto a variación. Cualquier secuencia dinámica de gradientes hidráulicos puede simularse con permeámetros. El paso de partículas de suelo a través de envolturas ocurre tan pronto como se alcanza un nivel crítico. Un incremento gradual del gradiente hidráulico es una buena norma.

6. Evaluación de la erosión del suelo

El gradiente hidráulico en el suelo cerca de la tubería de drenaje determina si el suelo se erosionará. El riesgo de un suelo a erosión puede examinarse incrementando gradualmente el gradiente hidráulico. Los intentos para estimar las *cantidades* de sedimento en el campo a partir de ensayos con permeámetro son inútiles, dado que las condiciones hidráulicas y otras pueden ser bastante diferentes.

7. Relación entre datos de laboratorio y de campo

Puede ocurrir obstrucción mineral de drenes de parcela revestidos con envolturas que

se encontraron adecuadas en experimentos previos con permeámetro. En estos casos la envoltura no debe rechazarse inmediatamente. Primero debe hacerse un estudio cuidadoso de campo sobre otras posibles causas, por ejemplo, tuberías o envolturas dañadas, entrada de suelo durante la conexión con un colector o con un pozo de registro, conexiones defectuosas, formación de ocre, etc.

8. Interpretación de resultados obtenidos con permeámetros

Los resultados de ensayos idénticos en condiciones ideales y bien mantenidas deberían ser similares. Por ello, los ensayos de flujo con permeámetro deben hacerse con un mínimo de tres replicaciones, en las cuales el tamaño de agregados, contenido de humedad y densidad del suelo tienen que ser iguales. Si los resultados de las pruebas se desvían sustancialmente, deben hacerse ensayos adicionales con tres replicaciones de nuevo. Será posible obtener una conclusión fiable cuando todos los resultados adicionales correspondan con los resultados de dos de las primeras series, de lo contrario se deberán repetir las pruebas. La envoltura debe considerarse poco fiable si de nuevo los resultados son ampliamente dispersos mientras que las condiciones de ensayo son similares.

EVALUACIÓN DE CAMPO DE LA APLICABILIDAD DE ENVOLTURA

Investigación de campo

Ninguna simulación analógica puede reproducir completamente los procesos físicos que ocurren en el campo. Necesitan mayores estudios en el campo fenómenos como el funcionamiento a largo plazo de envolturas sujetas a cambios estacionales, obstrucción química y microbiológica, y los procesos peculiares de intrusión de suelo y de raíces.

Las combinaciones de drenes y envolturas, que se dictaminen favorablemente en un ensayo de laboratorio, deben instalarse bajo condiciones de campo para investigar los efectos a largo plazo mencionados anteriormente. Pueden ser probados de nuevo para evaluar su funcionamiento en suelos relevantes y bajo distintas condiciones de instalación.

No siempre pueden obtenerse conclusiones sobre el funcionamiento de envolturas de dren a partir de investigaciones de campo, debido a la gran variabilidad de resultados a causa de:

- Variabilidad de las propiedades físicas del suelo.
- Efectos inciertos de instalación (calidad de la obra y humedad generalizada).
- Obstrucción mineral debida a daños en tuberías, en envolturas o en ambas y conexiones defectuosas.
- Intrusión de suelo durante la conexión con colectores o pozos de registro.
- Formación de ocre.

Se debe prestar particular atención a otros problemas de los materiales de drenaje que puedan afectar los resultados de investigaciones de campo, siendo los problemas más frecuentemente encontrados:

- Tubos de salida sueltos, dañados o ambas cosas (solamente en sistemas con colectores abiertos).
- Drenes interrumpidos debido a una calidad de tubería deficiente (tubería rota) o conexiones de tubería sueltas.
- Aire (o metano) encerrado dentro de un dren que se ha instalado con una pendiente irregular.
- Propiedades del suelo de riesgo, como suelos con filtración ocrácea o con sulfatos ácidos, limos de baja permeabilidad y suelos arcillosos «inmaduros» con filtraciones muy altas.

Evaluar el funcionamiento de sistemas de drenaje en tierras drenadas está fuera del ámbito de esta publicación, aunque el estudio del funcionamiento de materiales de drenaje es un componente importante de las evaluaciones. En este caso, las restricciones descritas

anteriormente son más acentuadas, por lo que la selección de las parcelas a ser evaluadas debe hacerse tras un cuidadoso estudio de reconocimiento del área del proyecto.

Directrices para investigación de campo

Un buen proyecto de investigación de campo requiere algunas directrices básicas, como son las siguientes:

1. Selección de parcelas experimentales

Las parcelas experimentales deben seleccionarse cuidadosamente para reducir la influencia de diferentes tipos de suelos en la medida en que esto sea posible y práctico. La gran variabilidad de textura, estructura y condición (p. ej. contenido de humedad y densidad aparente) del suelo a lo largo de las líneas de drenaje hace muy difícil evaluar el funcionamiento de una envoltura en el campo, porque se evalúa el funcionamiento de todo el sistema de drenaje, incluyendo el efecto del suelo cerca del dren. Por ello, es recomendable tratar de seleccionar una ubicación donde se sepa que la heterogeneidad del suelo es pequeña.

Es necesario conocer los componentes zonales del flujo de agua subterránea y conocer o verificar si existe percolación profunda o filtración apreciables en cualquier zona donde se piense instalar un campo experimental nuevo. También pueden existir componentes laterales de flujo de agua subterránea que puedan interferir en el sistema de drenaje subterráneo. Mientras la intensidad de esos flujos sea limitada, su interferencia con los resultados será también pequeña. El riesgo de heterogeneidad del suelo, en combinación con percolación y filtración, compromete seriamente la validez de los datos registrados.

2. Parámetros a medir

Con frecuencia es difícil controlar el efecto de un solo factor sobre el resultado compuesto de un proceso físico complejo. Si el impacto de un factor excede notablemente al efecto acumulativo de otros factores, es muy probable que la investigación de campo tenga éxito, ya que el problema fundamental puede investigarse más fácilmente.

Para determinar resistencias al flujo de aproximación y para correlacionarlas con tipos de envoltura, el caudal del dren se mide conjuntamente con la pérdida de carga de aproximación y con la pérdida de carga total (Figura 23):

- La *pérdida de carga del flujo de aproximación* se mide como la diferencia vertical entre el nivel del agua en un piezómetro situado a una distancia de 40 cm del dren y el nivel en un piezómetro colocado en la tubería de drenaje.
- La *pérdida total de carga* se mide como la diferencia vertical entre el nivel del agua en un pozo de observación a mitad de distancia entre dos drenes y en un piezómetro en la tubería de drenaje.

Para determinar la variación de la resistencia al flujo de aproximación se miden frecuentemente caudales de drenes y niveles de agua en piezómetros (Ecuación 6 del Capítulo 4, Apartado *Resistencia al flujo de aproximación y entrada*). Es necesario hacerlo diariamente para determinar cambios de las condiciones del suelo y del flujo de agua cerca de un dren inmediatamente después de su instalación. Son necesarias observaciones diarias durante el período de máximo desagüe si predomina flujo en régimen variable. La frecuencia de las medidas puede ser menor durante el período de recesión y si los caudales de drenaje se pueden considerar casi de régimen permanente.

Además, debe excavar para verificar el grado de obstrucción del dren y el de la posible descomposición microbiológica de envolturas orgánicas (Scholten, 1988). A veces es útil determinar textura y propiedades químicas del suelo en varias ubicaciones, para explicar diferencias en el funcionamiento de sistemas de drenaje. Dieleman y Trafford (FAO, 1976) han descrito procedimientos para ensayar líneas de drenes y procesar los datos obtenidos.

3. Diseño y construcción de un campo experimental

Deben mantenerse constantes todos los parámetros de campo que no estén asociados con los materiales de drenaje pero que puedan afectar al funcionamiento del sistema, como son espaciamiento y profundidad de drenes, ya que interfieren en los resultados.

El *uso de repeticiones* de los componentes en estudio (especialmente drenes laterales) es fundamental cuando se comparan varios materiales envolventes, dada la heterogeneidad implícita del suelo y los efectos aleatorios inducidos por la instalación de tuberías de drenaje. En principio, hay dos opciones en relación con el diseño de un ensayo de campo:

- *Laterales revestidos con materiales envolventes idénticos, en grupos contiguos de al menos tres drenes.* Este diseño tiene la ventaja de que la interferencia de los laterales revestidos con otros materiales es muy pequeña, por lo que los datos sobre funcionamiento de los drenes serán más fiables. Esto es particularmente cierto para los laterales situados cerca del centro del grupo. Este trazado es el más apropiado a pesar que el riesgo de heterogeneidad del suelo afecte a los datos.
- *Cada envoltura se coloca junto a otros tipos diferentes.* En este diseño, la interferencia entre drenes adyacentes causará interferencias en los datos, por lo que éstos pueden no ser muy fiables y difíciles de interpretar. Sin embargo, este trazado tiene la ventaja que minimiza el efecto de la heterogeneidad de las propiedades del suelo.

Para minimizar el riesgo de interferencias sustanciales en los resultados es recomendable:

- Que un contratista bien cualificado instale los drenes.
- Usar materiales de drenaje que sean uniformes a lo largo del dren lateral.

4. Obtención de datos

La obtención de datos no debe comenzar antes que el suelo alrededor de los drenes se haya asentado. Deben seguirse instrucciones estrictas en la obtención porque datos erróneos dan lugar a interpretación incorrecta no manifiesta. La frecuencia de mediciones debe adaptarse a la variabilidad de los parámetros en el tiempo, p. ej. profundidad de la capa freática, cargas hidráulicas y caudal. La mayor frecuencia de obtención de datos debe ser durante y después de tormentas y aplicaciones de riego. Para obtener información sobre heterogeneidad del suelo es recomendable instalar un número adicional de piezómetros a lo largo de al menos un dren. Pueden encontrarse recomendaciones válidas sobre cómo medir niveles de agua freática y cómo instalar piezómetros, p. ej. en Dieleman y Trafford (FAO, 1976).

5. Procesamiento y análisis de datos

El procedimiento para analizar datos debe enfatizar tendencias a largo plazo, porque pequeñas diferencias de funcionamiento entre drenes no son relevantes, ya que probablemente se deben a heterogeneidad del perfil del suelo. Deben analizarse cuidadosamente grandes diferencias antes de deducir conclusiones sobre el funcionamiento de envolturas. Muchos autores, como Wesseling (1967), Kessler (1970), Huinink (1991) y Ochs y Bishay (1992), han dado sugerencias sobre la forma de analizar el funcionamiento de drenes.

Es una práctica habitual en experimentos de campo evaluar el funcionamiento de materiales de drenaje según Dieleman y Trafford (FAO, 1976). En el procedimiento que ellos proponen, el caudal se mide conjuntamente con la pérdida total de carga y con la pérdida de carga a 0,40 m de distancia del centro del dren, que consideran más allá del límite de la zanja. Definen la diferencia vertical entre la última carga y la del centro de la tubería de drenaje como «pérdida de carga de entrada» y los datos obtenidos se utilizan para calcular la resistencia de entrada y para expresar la pérdida de carga de entrada como fracción de la pérdida de carga total. La resistencia de entrada que resulta de

estas mediciones es en realidad una «resistencia al flujo de aproximación» y la pérdida de carga asociada es la correspondiente «pérdida de carga del flujo de aproximación» (véase el Capítulo 4, Apartado *Resistencias al flujo de aproximación y entrada*).

Las principales razones por las que la resistencia de entrada definida por Dieleman y Trafford (FAO, 1976) difiere de la resistencia de entrada teórica son las siguientes:

- La pérdida de carga para el flujo de aproximación (h_{ap}) y la pérdida de carga para el flujo de entrada (h_e) son diferentes (véase el Capítulo 4, Apartado *Resistencias al flujo de aproximación y entrada*).
- El piezómetro para medir la pérdida de carga de entrada no está colocado en la interfase suelo/dren sino a cierta distancia.
- El tipo de flujo alrededor del dren no es completamente radial, ni siquiera cuando existe agua encima del dren.
- El agua entra en el dren solamente a través de un sector de su circunferencia.

La resistencia al flujo de aproximación (W_{ap}) obtenida a partir de ensayos de campo debería ser constante. Sin embargo, hay tantos factores asociados que es un parámetro bastante difícil de evaluar. Los factores que afectan a la resistencia al flujo de aproximación son los siguientes:

- Heterogeneidad del suelo y variabilidad espacial de la conductividad hidráulica.
- Variabilidad espacial del flujo de entrada al dren, incluso con suministro de agua uniforme.
- Heterogénea aportación de agua debida a aplicaciones de riego locales.
- Variabilidad de la pérdida de carga a lo largo de los drenes.

Dieleman y Trafford (FAO, 1976) establecieron clases para la «fracción de la pérdida de carga del flujo de aproximación» (Cuadro 11) y para la «resistencia al flujo de aproximación» o la «pérdida de carga del flujo de aproximación» (Cuadro 12).

Es necesario tener en cuenta que las clases de ambos cuadros son válidas para las condiciones para las que se han preparado (profundidad de drenes de 1,8 m; espaciamiento entre drenes de 50 m; profundidad de la capa de agua a 1,0 m uno o dos días después del riego y un caudal específico de 4 mm/d a esa profundidad de la capa freática). Los valores obtenidos para otras condiciones deben valorarse de otra forma (Dierickx, 1996b). Por tanto, no tiene sentido cualquier intento de comparar resistencias al flujo de aproximación deducidas de distintos ensayos de campo, salvo cuando todas las condiciones de los campos experimentales sean las mismas y estén bien documentadas.

Además, para proyectos de investigación de campo también pueden considerarse las siguientes recomendaciones (Ritzema, 1997):

- Tomar suficientes medidas para cubrir las necesidades de oficina y de otros recursos (personal, laboratorio y ordenadores).

CUADRO 11
Clasificación de acuerdo a la «fracción de la pérdida de carga del flujo de aproximación» (según Dieleman y Trafford, FAO, 1976)

Fracción de la pérdida de carga del flujo de aproximación h_{ap}/h_t	Funcionamiento de la línea de drenes
Menor de 0,2	Bueno
0,2 – 0,4	Moderado
0,4 – 0,6	Malo
Mayor de 0,6	Muy malo

CUADRO 12
Clasificación de acuerdo con la «resistencia al flujo de aproximación» o la «pérdida de carga del flujo de aproximación» (según Dieleman y Trafford, FAO, 1976)

Resistencia al flujo de aproximación W_{ap} (d/m)	Pérdida de carga del flujo de aproximación h_{ap} (m)	Funcionamiento de la línea de drenes
Menor de 0,75	Menor de 0,15	Bueno
0,75 – 1,50	0,15 – 0,30	Moderado
1,50 – 2,25	0,30 – 0,45	Malo
Mayor de 2,25	Mayor de 0,45	Muy malo

- Asegurar la posibilidad de acceso sin restricciones al área piloto en todo momento.
- Establecer acuerdos con los agricultores para su intervención activa en el proyecto.
- Mantener regularmente la red de seguimiento en un proyecto aparte.
- Proporcionar medios para almacenar datos de acuerdo con bases de datos y programas informáticos disponibles usados localmente.
- Procesar e interpretar los datos continuamente y de forma inmediata para detectar inconsistencias en datos, ensayos o en ambas cosas.
- Utilizar técnicas de presentación de datos (como gráficos y cuadros resumen) para una precisa interpretación de resultados.
- Formular propuestas para un seguimiento del proyecto, reformulación de objetivos, posiblemente decidir terminar los estudios o ajustar el programa de investigación en un proyecto subsiguiente.

RECOMENDACIONES PARA FUTURA INVESTIGACIÓN

Los estudios teóricos y la investigación de laboratorio y campo han contribuido a un incremento gradual del conocimiento sobre materiales de drenaje y su funcionamiento. Sin embargo, debido a la complejidad de las propiedades físicas del suelo algunos problemas no han sido aún resueltos adecuadamente, aunque estos problemas están apenas relacionados con los materiales de drenaje sino más bien con el tipo de suelo, su condición en el momento de la instalación y la precisión de la misma. Esto implica que el funcionamiento resultante de una línea de drenaje es en cierto modo impredecible, en mayor grado en «nuevas» áreas donde faltan o hay pocas investigaciones sistemáticas. En estas zonas hay un amplio espacio para investigaciones de «tipo reconocimiento». La mejor orientación es buscar campos con drenes que no funcionan o lo hacen mal, seguido por investigaciones sobre las causas y mecanismos de fallo.

La experiencia obtenida en los Países Bajos en la década de 1960 puede ser ilustrativa. Entonces distintas agencias llevaron a cabo un gran número de pruebas de campo con objeto de ensayar y comparar diferentes materiales para drenaje, con énfasis en la resistencia de entrada. A tenor de las expectativas de los investigadores los resultados fueron a menudo decepcionantes o absolutamente frustrantes. Generalmente, los datos medidos mostraban una amplia variación y apenas reflejaban una diferencia significativa entre los materiales de drenaje investigados. Los datos representados a menudo ofrecían diagramas dispersos que parecían, según las palabras de un investigador, «un cielo despejado de noche». Sin embargo, en los ensayos apenas se encontraron drenes funcionando realmente mal ni tampoco fallos absolutos, por lo que la conclusión pudo haber sido que no había razones para preocuparse en absoluto por las resistencias de entrada o, consecuentemente, sobre los materiales. Por otro lado, aparecían fallos en sistemas de drenaje en lugares dispersos pero no pudo establecerse una relación clara con los materiales. En proyectos a gran escala, un porcentaje bajo de fallos dieron lugar a un montón de quejas que frecuentemente llegaban a la «mesa del director».

Se consiguió un gran discernimiento a partir de una campaña de reconocimiento, especialmente llevada a cabo para identificar campos con drenes funcionando mal o (preferiblemente) sin funcionar. Cavelaars (1967) analizó los resultados de investigaciones realizadas en 64 parcelas. La búsqueda de fallos fue dificultosa porque los responsables de la instalación de drenes (contratistas, agencias supervisoras o ambos) no estaban dispuestos a reconocer errores en su trabajo. Las etapas subsiguientes consistieron en investigaciones de diagnóstico de campo mencionadas anteriormente para encontrar, tan exactamente como fuera posible, el método de instalación de drenes y las condiciones bajo las cuales se había hecho.

Tuberías de drenaje

Flujo de entrada a drenes

El cálculo de la capacidad de desagüe de tuberías de drenaje requiere conocer sus coeficientes de rugosidad, que se han determinado experimentalmente para todo tipo de tuberías de drenaje, tanto sin perforar como perforadas, y para flujo a capacidad plena o parcial. La capacidad de desagüe puede calcularse según dos principios: el de transporte y el de drenaje. El principio de drenaje, con una entrada de agua constante por unidad de longitud de dren y un caudal que aumenta gradualmente, corresponde más exactamente a las condiciones de campo que el principio de transporte, que asume que la tubería tiene un caudal constante a lo largo de toda su longitud (véase el Capítulo 4, Apartado *Capacidad de desagüe de tuberías de drenaje*).

Aún así es probable que la realidad sea diferente al concepto teórico de un flujo de entrada constante por unidad de longitud del dren, a causa de la heterogeneidad del flujo y de la obstrucción mineral. Las principales vías de movimiento de agua en el suelo son: vacíos entre agregados, macroporos hechos por lombrices y raíces de plantas, y capas de suelo de poco espesor horizontales y relativamente permeables (Stuyt, 1992a, 1992c). La precisión de la pendiente de drenes laterales también puede afectar la uniformidad de entrada de agua. Por ello, el concepto de un flujo de entrada constante por unidad de longitud de dren necesita más investigación. Es un tema importante porque este concepto no se usa solamente para el diseño de materiales de drenaje sino también para evaluar su funcionamiento en el campo.

Factor de seguridad para el diseño

La sedimentación e irregularidades de alineación en tuberías de drenaje pueden reducir su capacidad de desagüe hasta un 50 por ciento (El Atfy *et al.*, 1990). Las propiedades hidráulicas de tuberías de drenaje son bien conocidas, pero la precisión de la colocación y el futuro colmatado de la tubería necesitan la introducción de un coeficiente de reducción o un factor de seguridad. La cuestión es hasta qué punto se justifica ese factor de seguridad, considerando las técnicas modernas de instalación y el uso de materiales de drenaje fiables bien diseñados.

Envolturas de dren

Entrada de suelo en drenes

Los análisis con rayos X en muestras de dren revestido, hechos por Stuyt (1992a, 1992b, 1992c), mostraron que con frecuencia son bastante heterogéneos, tanto los tipos de flujo de agua cerca de los drenes en suelos con arena fina muy poco cohesivos, como la obstrucción mineral de envolturas. Estos hallazgos enfatizan la discrepancia entre teoría y práctica en relación con el análisis del flujo de agua cerca de drenes y de entrada a ellos. La consecuencia es que presumiblemente sea bastante difícil medir con precisión en un área piloto la pérdida de carga de entrada cerca de drenes. Las envolturas de dren pueden afectar el funcionamiento de un sistema de drenaje, pero con frecuencia predomina el efecto de las propiedades del suelo sobre la aceptación de agua por los drenes. Esta conclusión del trabajo de investigación de campo de Stuyt (1992a, 1992b, 1992c), junto con otra información existente a partir de investigación de laboratorio y experimentos de campo, limita sin duda la necesidad de posteriores investigaciones sobre envolturas de drenaje. Los criterios de diseño propuestos pueden aplicarse con éxito, siempre que tanto la obstrucción química como la microbiológica (especialmente la formación de ocre) sean improbables.

La entrada de suelo, reconocida por Stuyt (1992a) como formaciones con «forma de hongo» cerca de perforaciones, también fue mencionada por Van der Molen en un dren experimental en el Wieringermeerpolder, Países Bajos (comunicación personal) y en otros lugares por Dierickx (1986a) y Van der Louw (1986). Tanto Dierickx como Van

der Louw usaron un endoscopio de dren mientras que Stuyt usó una cámara de video en miniatura. Van der Louw y Stuyt asumieron que la formación con «forma de hongo» es el resultado de suelo que está siendo comprimido a través de envolturas de dren y de perforaciones de tubería. Van der Louw encontró este tipo de formaciones frescas dentro de drenes solamente una semana después de limpiarlos mediante inyección de agua y eran supuestamente debidas a compresión de suelo líquido por sobrecarga. Aún así, la acumulación de partículas de una en una durante un período substancial (al menos de meses) puede ser otra explicación válida para este fenómeno. Este tipo de entrada de suelo y su influencia sobre la aceptación de agua en el sistema de drenaje necesitan más investigación.

Obstrucción química y bioquímica

En caso de obstrucción, tanto química como bioquímica, puede necesitarse más investigación sobre la interacción entre envoltura, suelo y agente obstructivo. Esta investigación no puede hacerse en un laboratorio. Para investigar y cuantificar estos fenómenos de obstrucción se necesita un equipo sofisticado y caro. Sin embargo, los procesos asociados con esta clase de obstrucción, continuarán independientemente si se instala una envoltura o no. En estos casos pueden considerarse algunas medidas para el diseño. Si se necesita una envoltura es recomendable una sintética de estructura gruesa (es decir, con un espesor mayor de 5 mm). El mantenimiento regular de las líneas de dren es con frecuencia necesario aunque no siempre. Por ello, sería útil cuantificar la conveniencia de estas medidas y especialmente la adecuación de envolturas sintéticas de estructura gruesa en comparación con otros tipos.

Obstrucción por sustancias relacionadas al calcio

La formación de ocre es un fenómeno que ocurre con frecuencia y que ha recibido mucha consideración. Sin embargo, es menos conocida la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3) o yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en envolturas. Por ello, hay un amplio campo para investigación sistemática sobre deposiciones de cal y yeso en drenes de tubería, que podría incluir un inventario de la extensión del problema y las condiciones bajo las que probablemente se desarrolla.

Ensayo de laboratorio de PLM y geotextiles de fabricación local

En muchos países donde se usan convencionalmente envolturas de grava, se duda seriamente en aplicar a las envolturas convencionales alternativas sintéticas, debido fundamentalmente a falta de experiencia, especialmente en lo que se refiere a geotextiles importados. En muchos casos se dispone localmente de productos similares, que si fueran competitivos deberían considerarse seriamente como envolturas. Pueden ser apropiados para su uso como envoltura: fibras de desecho de fabricación de alfombras, urdimbres de alfombra tanto originales como modificadas y otros geotextiles producidos localmente. La investigación aplicada con permeámetros debería considerarse seriamente si no existe experiencia con esta clase de materiales. Este tipo de evaluación no contribuye al conocimiento básico de la interacción entre suelo y envoltura pero puede ser útil para:

- Superar la resistencia y dudas contra el uso de esos nuevos materiales propuestos.
- Evaluar la adecuación de estos materiales.
- Evaluar su funcionamiento en comparación con envolturas convencionales o importadas.
- Hacer una preselección de productos potencialmente adecuados para su posterior evaluación en el campo.

Propiedades del suelo

Aplicabilidad del gradiente de fallo hidráulico

En muchos casos la necesidad de envolturas no es aún predecible con precisión. Todavía no es posible establecer directrices inequívocas sobre la necesidad de envolturas, con la excepción de algunos suelos problemáticos específicos. Diferencias en el funcionamiento de varios materiales envolventes que tienen distintos parámetros no son fáciles de evaluar y solamente se distinguen algunas tendencias. También pueden llevarse a cabo ensayos con permeámetro para estimar la necesidad de envolturas de dren para un suelo específico, si las características del suelo no dan una respuesta decisiva. En este aspecto, el concepto del gradiente de fallo hidráulico (i_f) (véase el Capítulo 4, Apartado *Gradiente de fallo hidráulico*) introducido por Samani y Willardson (1981) necesita consideración adicional. Se podría obtener más experiencia con el i_f de un suelo, factor que fue propuesto para predecir la necesidad de una envoltura de dren.

Estabilidad de agregados

Se han propuesto varios métodos para determinar la estabilidad de agregados y se han aplicado con resultados variables. Es necesario desarrollar una técnica estándar para ser utilizada en drenaje. El efecto de la sodicidad de los suelos circundantes a drenes parece ser un aspecto interesante que necesita más investigación.

Capítulo 9

Normas para tuberías y envolturas

Las normas para tuberías de drenaje especifican las propiedades necesarias de los materiales (cerámica, hormigón y plásticos) con los que se confeccionan las tuberías y las especificaciones de estas materias primas, p. ej. en términos de su composición química y aditivos así como las resistencias de tuberías estándar. Para drenes de plástico, las normas generalmente especifican si se permite el uso de materias primas recicladas y en qué condiciones. Las dimensiones físicas también se especifican, p. ej. diámetros interno y externo, y tamaño y localización de perforaciones.

Las propiedades mecánicas de tuberías de drenaje se refieren al transporte, instalación y funcionamiento sin fallos. Requisitos importantes para tubos de cerámica y hormigón son la resistencia a la rotura y para plásticos la resistencia a impacto, fragilidad y rigidez de las tuberías a corto y largo plazo. Las tuberías flexibles solamente pueden deformarse ligeramente por efecto de la sobrecarga del suelo si están debidamente instaladas.

El uso de antioxidantes y de inhibidores ultravioletas en plásticos debe restringirse a cantidades que no cambien las propiedades mecánicas de las tuberías. Algunas especificaciones, como las normas ASTM, limitan a dos años el período de almacenamiento al aire libre pero otras normas no dan límite.

En proyectos de drenaje a gran escala, es de interés para ingenieros, contratistas y supervisores ensayar tuberías y envolturas para comprobar si los materiales de drenaje cumplen con las especificaciones establecidas en las licitaciones. En particular, este es el caso en países donde los materiales de drenaje no se suministran con certificados oficiales que garanticen el cumplimiento de ciertas normas.

Las normas existentes para materiales de drenaje procedentes de países con una larga historia de drenaje son útiles en países que virtualmente carecen de experiencia de drenaje y pueden usarse como referencia para preparar una norma nacional que se adapte a circunstancias específicas locales. Sin embargo, el número de parámetros ensayados debería limitarse para mantener el coste de ensayo dentro de límites razonables.

No siempre es necesario utilizar un equipo de ensayo sofisticado y en su lugar pueden usarse herramientas sencillas. Ocasionalmente pueden aplicarse reglas prácticas simples, como golpear un tubo de cerámica con un objeto metálico: un tubo de buena calidad debe dar un «sonido» claro. Otro procedimiento simple es tratar de aplastar un tubo de PVC corrugado de 50 mm de diámetro con una carga de peso conocido. La prueba de fragilidad en frío puede hacerse golpeando con un martillo después de haber tenido una sección de tubería en un frigorífico durante 12 horas.

El control de calidad continuo durante el proceso de fabricación es indispensable para mantener fuera del mercado tuberías de calidad inferior y materiales envolventes poco fiables. Muchos países donde se llevan a cabo importantes proyectos de drenaje subterráneo tienen sus propias normas nacionales o especificaciones para materiales de drenaje, que han sido preparadas por comités de normalización formados por especialistas de institutos públicos de investigación y de compañías privadas. Se han preparado normas para tubos de cerámica y hormigón y posteriormente para tuberías de plástico liso y corrugado. El uso de materiales envolventes de dren dio lugar a la elaboración simultánea de normas para envolturas.

En lugar de publicar una lista incompleta de las numerosas normas nacionales existentes con sus varios aspectos, se citan solamente como referencia las normas

de la «American Society of Testing Materials» (ASTM), algunas normas de Canadá, el borrador de norma de la Organización Internacional de Normalización (ISO) y el borrador de norma-EN del Comité Europeo de Normalización (CEN). Aunque los borradores de ISO y de la norma-EN no tienen fuerza legal, son el resultado de discusiones entre expertos de muchos países y organizaciones.

Para más detalles se hace referencia a las mismas normas o al Anexo que contiene el borrador de norma-EN sobre sistemas de tuberías de plástico corrugado, que aún no ha sido publicada y por tanto no está fácilmente disponible. Como este Anexo contiene los fundamentos y los conceptos sobre los que se basó la norma-EN no se ha incluido en él la norma-ISO.

PARÁMETROS DE ENSAYO PARA TUBERÍAS DE DRENAJE

El diámetro interno y externo con sus tolerancias se especifican para tuberías de drenaje y además generalmente se incluyen en las normas los siguientes parámetros:

Tubos de cerámica y hormigón

- Ovalado y curvatura.
- Verticalidad de los planos terminales.
- Resistencia a la alteración y deterioro en el suelo.
- Resistencia a ciclos de congelación y deshielo.
- Densidad.
- Absorción de agua.
- Resistencia a rotura.

Tubos de hormigón

Además de los anteriores:

- Resistencia a sulfatos.
- Resistencia a ácidos.

Tuberías de plástico

- Rigidez y resistencia a elongación.
- Resistencia a impacto y fragilidad.
- Flexibilidad y posibilidad de enrollado.
- Perforaciones y propiedades hidráulicas.
- Instrucciones de manejo e instalación.

La sustitución de tubos de cerámica y hormigón por tuberías de plástico corrugado restó importancia a las normas para tubos de cerámica y hormigón, aunque todavía son útiles en países donde todavía se instalan este tipo de tubos incluyendo drenes colectores de gran diámetro.

PARÁMETROS DE ENSAYO PARA ENVOLTURAS

Los requisitos para materiales envolventes de dren incluyen los siguientes parámetros:

Materiales granulares

- Granulometría o distribución del tamaño de partícula.
- Permeabilidad.
- Composición química.

PLM y geotextiles

- Apariencia.
- Espesor y masa por unidad de superficie.
- Tamaño de poro.

Geotextiles

Además de lo anterior:

- Permeabilidad.
- Capacidad de humectación.

NORMAS DE AMÉRICA DEL NORTE

Las especificaciones para tubos de cerámica en Estados Unidos de América incluyen tres clases: *estándar*, *calidad extra* y *alta prestación* y para tubos de hormigón se ha agregado una cuarta clase: *prestación especial*. Los tubos de calidad estándar son satisfactorios para drenes de tamaños y profundidades de instalación medios. Existe una serie de normas-ASTM para tubos de cerámica y hormigón. La última versión de las normas relevantes se presenta en el Cuadro 13.

Poco tiempo después de instalarse por primera vez tuberías de plástico corrugado en Estados Unidos de América, se vio la necesidad de contar con normas y la ASTM adoptó la primera norma en 1974 para tuberías y conexiones de PE corrugado (véase ASTM F405-97). En 1976, se agregó una norma para tuberías de gran diámetro (véase ASTM F667-97) y en 1983 se adoptó una norma para tuberías de PVC (ASTM F800-83), pero el trabajo de normalización para tuberías de PVC se interrumpió en 1992. Desde 1972 se han elaborado más de 30 normas ASTM para tuberías de plástico corrugado. En el Cuadro 14 se presenta una lista parcial de normas ASTM y de otras de Canadá y Estados Unidos de América.

CUADRO 13

Normas-ASTM para tubos de drenaje de cerámica y hormigón

Material y tipo	Norma
Dren de cerámica y dren perforado	ASTM C4-99 ¹
Dren de cerámica, perforado	ASTM C498-95
Tubo de cerámica, vitrificado, perforado	ASTM C700-99
Dren de hormigón	ASTM C412M-99
Tubo de hormigón, perforado	ASTM C444-95
Tubo de hormigón para riego o drenaje	ASTM C118M-99
Caño reforzado, desagüe de tormenta y tubería de saneamiento	ASTM C76-99
Tubería de saneamiento de hormigón, desagüe de tormenta y tubería para caño	ASTM C14M-99

¹ Los últimos dos dígitos indican el año de publicación de la última versión mientras que M indica que la norma está expresada en unidades SI (métricas)

CUADRO 14

Normas de Estados Unidos de América y Canadá para tuberías de plástico corrugado

Material y tipo	Diámetro interno nominal (mm)	Norma
Tuberías de plástico, drenaje	75-300	CGSB ¹ 41-GP-29Ma (1983)
Tuberías y conexiones de plástico	100-300	BNQ ² 3624-115 (1985)
Tuberías y conexiones de polietileno	75-150	ASTM F405-97
Tuberías de polietileno	200-300	ASTM F667-97
Tuberías de polietileno	100-200	USBR ³ (1974)
Tuberías de polietileno y de cloruro de polivinilo	250-300	USBR ³ (1981)
Tuberías y conexiones de cloruro de polivinilo	100-200	ASTM ⁴ F800-83
Tuberías de cloruro de polivinilo	100-200	USBR ³ (1976)
Tuberías de cloruro de polivinilo	75-300	SCS ⁵ 606 (1980)

¹ Canadian General Standard Board

² Bureau de Normalisation du Quebec

³ US Bureau of Reclamation (1993)

⁴ Revisión interrumpida en 1992

⁵ USDA Soil Conservation actualmente, actualmente: National Resource Conservation Services (NRCS, 1998)

NORMAS EUROPEAS

La Organización Internacional de Normalización (ISO) comenzó en 1973 a preparar una norma internacional «Especificación para tuberías y conexiones de cloruro de polivinilo sin plastificar (PVC-U) para drenaje subterráneo», cuyo borrador se publicó en 1985 (Schultz, 1990), pero el trabajo se interrumpió sin que hasta el momento se haya preparado la versión final.

En la Unión Europea se han establecido especificaciones técnicas, en principio dentro del Comité Europeo de Normalización (CEN). Debido a la creación de este Comité, tuvo que suspenderse todo trabajo nacional de normalización de los países participantes en temas que incluía la normalización europea, con lo que casi finalizó el trabajo de normalización de los estados miembros. Todos los países europeos y de la Asociación Europea de Libre Comercio (EFTA) pueden ahora participar en la coordinación y armonización de normas. Pueden participar representantes de ISO como observadores en las reuniones del CEN/TC. Siempre que es posible las decisiones se toman por consenso. Las normas europeas son obligatorias para todos los proyectos de licitación pública en la Unión Europea.

El Grupo de Trabajo 18 (WG 18) para drenaje de tierras, creado dentro del Comité Técnico 155 (TC 155) del CEN, fue encargado en 1990 de «Sistemas de tuberías de plástico y sistemas de conducciones». El CEN/TC155/WG18 (1994) preparó un primer borrador de norma europea (EN) «Sistemas de tuberías de plástico para drenaje de tierras agrícolas (PVC-U)»¹. Aunque el borrador ya ha pasado la etapa de información del CEN, no ha progresado desde entonces y está interrumpido como el trabajo de normalización de ISO sobre tuberías corrugadas. A pesar de ello, el borrador de norma contiene información útil que incluye requisitos funcionales generales para *tuberías, conexiones y envolturas*, así como una práctica de instalación recomendada.

En 1989 se estableció el CEN/TC189 con objeto de convenir procedimientos de ensayo comunes, métodos de identificación y técnicas de evaluación para *geotextiles*. El TC189 está trabajando en una serie de procedimientos de ensayo relevantes para geotextiles y productos relacionados con ellos, que serán comunes para todos los países participantes. La presentación en todos los países de valores índice se basará en los mismos métodos de ensayo, pero los requisitos serán responsabilidad de cada país. En la práctica, casi todos los geotextiles serán producidos y vendidos de acuerdo con normas-EN. En el Cuadro 15 se dan normas-EN relevantes para geotextiles usados como envolturas de drenaje.

El borrador de norma-EN para tuberías de PVC corrugado para drenaje de tierras también trata de envolturas de drenaje e incluye geotextiles y PLM. Esta parte del borrador de norma considera la clase de materiales envolventes de drenaje que se usan en la Unión Europea. Además, informa sobre el proceso de ensayo (equipo, procedimiento de medida, precisión, etc.). Las especificaciones están basadas en consenso y no corresponden necesariamente a las de ningún país en particular, aunque puede ser obvia la influencia de países con más experiencia.

¹ Cloruro de polivinilo sin plastificar

CUADRO 15

Norma europea (EN) para geotextiles y productos relacionados con ellos que pueden ser útiles cuando se usan como envolturas en drenaje agrícola

Título	Norma	Emitida
Identificación in situ	EN ISO 10320 ¹	1999
Muestreo y preparación de una muestra de ensayo	EN 963	1995
Determinación de espesor-capas simples	EN 964-1	1995
Masa por unidad de superficie	EN 965	1995
Geotextiles: vocabulario	PrEN 30318 ²	1998
Ensayo de tracción para uniones/junturas por el método de gran anchura	EN ISO 10321	1996
Método de simulación de daño de abrasión (bloque deslizante)	EN ISO 13427	1998
Ensayo de punzadura estática	EN ISO 12236	1996
Ensayo de tracción de gran anchura	EN ISO 10319	1996
Permeabilidad al agua	EN ISO 11058	1999
Tamaño de abertura	EN ISO 12956	1999
Capacidad de flujo de agua en el plano	EN ISO 12958	1999
Resistencia a penetración de agua	prEN 13562	1999
Permeabilidad al agua bajo carga	CEN/TC189/WI26 ³	1999
Resistencia a alteración	ENV 12224 ⁴	1996
Resistencia a degradación microbiológica	ENV 12225	1996
Ensayos generales para evaluación después de ensayar durabilidad	ENV 12226	1996
Resistencia a hidrólisis	ENV 12447	1997
Resistencia a líquidos	ENV ISO 12960 ¹	1998

¹ EN ISO o ENV ISO es tanto una norma EN (o una ENV) como una norma ISO

² prEN es un borrador de norma aún no finalizado

³ El ítem de trabajo 26 de CEN/TC 189 está en estudio

⁴ ENV es una norma previa, establecida como una norma prospectiva para aplicación provisional (período de validez de 2 años)

Referencias

- Abdel-Dayem, M.S. 1987. Development of land drainage in Egypt. En: Proc. Symp. 25th International Course on Land Drainage. Twenty-Five Years of Drainage Experience. J. Vos (ed.). *Publ. 42*, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 195-204.
- Abdel-Dayem, M.S., Ritzema, H.P., El-Atfy, H.E. y Amer, M.H. 1989. Pilot areas and drainage technology. En: *Land Drainage in Egypt*. M.H. Amer y N.A. de Ridder (eds.). DRI, El Cairo, pp. 103-161.
- Ami, S. R. 1987. *Drainage Pipe Testing Manual*. Canadian International Development Agency (CIDA), Hull, Quebec, Canadá.
- Antheunisse, J. 1979. Observations on the decomposition of coconut fibres. *J. Gen. Appl. Microbiol.* **25**: 273-277.
- Antheunisse, J. 1980. The breakdown of coconut fibres by *Trametes Versicolor* and *Stereum Rugosum*. *J. Gen. Appl. Microbiol.* **26**: 167-170.
- Antheunisse, J. 1981. Decay of coconut fibres by soil microorganisms. *J. Gen. Appl. Microbiol.* **27**: 435-442.
- Antheunisse, J. 1983. Biological and chemical inhibition of ligno-cellulose decay by white rot basidiomycetes. *J. Gen. Appl. Microbiol.* **29**: 257-269.
- Antheunisse, J. 1984. Biological and chemical inhibition of coir decomposition under imitated field conditions. *J. Gen. Appl. Microbiol.* **30**: 245-248.
- ASTM C4-99. 1999. *Standard Specification for Clay Drain Tile and Perforated Clay Drain Tile*. ASTM, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.
- ASTM C14M-99. 1999. *Standard Specification for Concrete Sewer, Storm Drain, and Culvert Pipe*. ASTM, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.
- ASTM C76-99. 1999. *Standard Specification for Reinforced Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe*. ASTM, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.
- ASTM C118M-99. 1999. *Standard Specification for Concrete Pipe for Irrigation or Drainage*. ASTM, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.
- ASTM C412M-99. 1999. *Standard Specification for Concrete Drain Tile*. ASTM, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.
- ASTM C444M-95. 1995. *Standard Specification for Perforated Concrete Pipe*. ASTM, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.
- ASTM C498-95. 1995. *Specification for Perforated Clay Drain Tile*. ASTM, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.
- ASTM C700-99. 1999. *Specification for Vitrified Clay Pipe, Extra Strength, Standard Strength, and Perforated*. ASTM, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.
- ASTM D5101-96. 1996. *Standard Test Method for Measuring the Soil-geotextile System Clogging Potential by the Gradient Ratio*. ASTM, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.
- ASTM F405-97. 1997. (Substituye a ASTM 405-74, 1974). *Standard Specification for Corrugated Polyethylene (PE) Tubing and Fittings*. ASTM, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.
- ASTM F667-97. 1997. (Substituye a ASTM F667-76, 1976). *Standard Specification for Large Diameter Corrugated Polyethylene Pipe and Fittings*. ASTM, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.
- ASTM F800-83. 1983. *Specification for Corrugated Polyvinyl Chloride (PVC) Tubing and Fittings*. ASTM, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.
- Ayers, R.S. y Westcot, D.W. 1985. Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper 29 (Rev. 1)*. Roma.

- Bertram, G.E.** 1940. An experimental investigation of protective filters. *Harvard Soil Mechanics Series 7*. Pierce Hall Harvard University.
- Blom, E.** 1987. Omhullingsmaterialen voor drainbuizen: veldonderzoek naar inspoeling en vertering [Envelope materials for drain pipes: field investigation into pipe sedimentation and envelope decomposition]. *Report of the Government Service of Land and Water Use*, Goes, Países Bajos.
- BNQ 3624-115.** 1985. *Tubes annelés et raccords de thermoplastique pour drainage des sol* [Corrugated Thermoplastic Pipes and Fittings for Land Drainage]. Bureau de Normalisation de Québec. Ministère de l'Industrie et du Commerce, Canadá.
- Bons, A. y Van Zeijts, T.E.J.** 1991. Jet flushing, a method for cleaning subsurface drainage systems. *Information Paper 28*, Government Service for Land and Water Use, Utrecht, Países Bajos.
- Boumans, J.H.** 1963. Over instroming en aanstroming bij draineerbuizen zonder en met afdekking [On flow into and towards drainpipes with and without cover sheet]. *Cultuurtechnisch Tijdschrift*, 2: 218-229.
- Boumans, J.H.** 1988. Stromingsformules voor drainage ribbelbuis (Flow formulae for corrugated drainpipes). *Tijdschrift voor Cultuurtechniek* 1: 41-46.
- Brinkhorst, W., van der Linde K. y Scholten, J.** 1983. Ervaringen met het doorspuiten van drains in het Lauwersmeergebied [Experiences with jetting of pipe drains in the Lauwersmeer area]. *Report 6 abw*, R.I.J.P., Lelystad, Países Bajos.
- Busser, J.W. y Scholten, J.** 1979. Drainage maintenance in The Netherlands. En: Proc. Internat. Drain. Workshop. J. Wesseling (ed.). *Publ. 25*, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 424-438.
- Cavelaars, J.C.** 1966. *Hydrological Aspects of the Application of Plastic Drain Pipes and Filter Materials*. Koninklijke Nederlandsche Heidemaatschappij, Arnhem, Países Bajos.
- Cavelaars, J.C.** 1967. Problems of water entry into plastic and other drain tubes. Proc. Agr. Eng. Symp. *A.E.S. Paper 5/E/46*, Nat. Coll. of Agr. Eng., Silsoe, Reino Unido.
- Cavelaars, J.C.** 1970. *Toestromingsweerstand bij buisdrainage* [Approach Flow Resistance near Drainpipes]. Kon. Ned. Heidem., Afdeling Onderzoek, Arnhem, Países Bajos.
- Cavelaars, J.** 1974. Subsurface field drainage systems. En: Drainage Principles and Applications. Design and Management of Drainage Systems. *Publ. 16*, Vol. IV, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 1-65.
- Cavelaars, J.C.** 1979. Composing a drainage pipe line out of sections with different diameters. En: Proc. Internat. Drain. Workshop. J. Wesseling (ed.), *Publ. 25*, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 402-423.
- Cavelaars, J.C.** 1987. Comment made during discussion in session 4 in ILRI Symposium. En: Proc. Symp. 25th Internat. Course on Land Drainage. Twenty-Five Years of Drainage Experience. J. Vos (ed.). *Publ. 42*, ILRI, Wageningen, Países Bajos.
- Cavelaars, J.C., Vlotman, W.F. y Spoor, G.** 1994. Subsurface drainage systems. En: Drainage Principles and Applications. H.P. Ritzema (ed.). *Publ. 16*, 2nd ed. (completamente revisada), ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 827-929.
- CEMAGREF.** 1983. Le colmatage des drains agricoles: Etat des connaissances en France en 1983 [Clogging of Agricultural Drains: Current Knowledge in France in 1983]. *Information Techniques 51-5*, CEMAGREF, Groupement d'Antony, Francia.
- CEN/TC155/WG18.** 1994. *Plastics Piping Systems for Agricultural Land Drainage (PVC-U)*. CEN, Bruselas.
- CEN/TC189/WI26.** 1999. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Determination of Water Permeability Characteristics Normal to the Plane, with Load*. CEN, Bruselas.
- Cestre, T. y Houot, S.** 1984. Nettoyage sous pression de deux réseaux de drainage agricole. Efficacité d'un matériel sur différents types de colmatage [Jetting of Drains at Two Sites. Efficiency for Different Types of Clogging]. *Bulletin 313*, CEMAGREF, Groupement d'Antony, Francia.
- CGSB 41-GP-29Ma.** 1983. *Corrugated Plastic Drainage Tubing*. Canadian General Standard Board, Department of Supply and Services, Ottawa, Ontario, Canadá.

- Chapman, D.** 1956. Ditches dykes and deep-drainage. *Young Farmer's Club Booklet 29*. Evans Brothers LTD, Londres.
- Childs, E.C. y Youngs, E.G.** 1958. The nature of the drain channel as a factor in the design of a land-drainage system. *Journ. Soil Sci.* **9**, **2**: 316-331.
- Chin, Y.M., Nikraz, H.R. y Press, M.** 1994. Laboratory filtration performance of nonwoven geotextiles. En: *Proc. 5th Internat. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*. G.P. Karunaratne, S.H. Chew & K.S. Wong (eds.). Singapore, Vol. 2: 635-638.
- CPVQ.** 1989. Drainage souterrain [Subsurface drainage]. *Agdex 555*. Cahier des normes. Conseil des Productions Végétales du Québec - Vegetal Production Board of Quebec. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation du Québec, Canadá.
- De la Torre, A.A.** 1987. Drainage and land reclamation in Peru. En: *Proc. Symp. 25th Internat. Course on Land Drainage. Twenty-Five Years of Drainage Experience*. J. Vos (ed.). *Publ. 42*, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 268-277.
- Dennis, C.W. y Trafford, B.D.** 1975. The effect of permeable surrounds on the performance of clay field drainage pipes. *J. of Hydrol.* **24**: 239-249.
- Desmond, E.D. y Schwab, G.O.** 1986. Ultraviolet degradation of corrugated plastic tubing. *Transactions of the ASAE* **29**, **2**: 467-472.
- Dieleman, P.J. y Trafford, B.D.** 1976. Drainage testing. *FAO Irrigation and Drainage Paper 28*. Roma.
- Dierickx, W.** 1980. Electrolytic analogue study of the effect of openings and surrounds of various permeabilities on the performance of field drainage pipes. *Report 77*, Comm. of the Nat. Inst. for Agr. Eng., Merelbeke, Bélgica.
- Dierickx, W.** 1986a. Soil invasion into drain pipes. En: *Agricultural Water Management, Proc. Symp. on Agric. Water Management*. A.L.M. Van Wijk y J. Wesseling (eds.). A.A. Balkema, Rotterdam, Países Bajos, pp 151-161.
- Dierickx, W.** 1986b. Field experience and laboratory research on drainage envelopes. En: *Proc. of Internat. Seminar on Land Drainage*. J. Saavalainen y P. Vakkilainen (eds.). Helsinki University of Technology, Finlandia, pp. 51-60.
- Dierickx, W.** 1987. Choice of subsurface drainage materials. *ASAE-paper 87-2589, 1987*. Winter Meeting of the ASAE. Chicago, IL, Estados Unidos de América.
- Dierickx, W.** 1988. *Drainage Envelope Research*. Pilot Areas and Drainage Technology Project. Drainage Research Institute, El-Kanater, El Cairo.
- Dierickx, W.** 1990. *Onderzoek naar een slibvang voor de jachthaven Van Antwerpen* [Research on a Sediment Trap for the Yacht-basin of Antwerp]. Internal Report. Research Station for Agricultural Engineering, Merelbeke, Bélgica.
- Dierickx, W.** 1991. Laboratory and field research on subsurface drainage envelopes in Pakistan. *Report 90/08*. International Waterlogging and Salinity Research Institute (IWASRI), Lahore, Pakistán.
- Dierickx, W.** 1992a. *Research on Synthetic Envelopes for Subsurface Drainage in Egypt*. Pilot Areas and Drainage Technology Project. Drainage Research Institute, El-Kanater, El Cairo.
- Dierickx, W.** 1992b. Use of drainage materials-research on developments in selecting drainage materials. En: *Proc. 5th Internat. Drainage Workshop*. W.F. Vlotman (ed.). Lahore, Pakistán, Vol. I, pp. 95-115.
- Dierickx, W.** 1993. Research and developments in selecting subsurface drainage materials. *Irrigation and Drainage Systems* **6**: 291-310.
- Dierickx, W.** 1994. *Data Analysis of Laboratory and Field Research on Synthetic Envelopes for Pipe Drainage*. IWASRI, Lahore, Pakistán.
- Dierickx, W.** 1996a. Determination of water penetration resistance of geotextiles. En: *Proc. Symposium on Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites*. S.K. Bhatia y L.D. Suits (eds.), *ASTM STP 1281*, pp. 65-74.
- Dierickx, W.** 1996b. Field research on drainage envelope materials. *Internal Report 96/5*, IWASRI, Lahore, Pakistán.

- Dierickx, W. 1998a. Changes in specific properties of PVC drains under various storage conditions. *Agric. Water Manage.* 37, 2: 109-119.
- Dierickx, W. 1998b. Unpublished research results on weathering of loose polypropylene fibre wrappings for drain pipes. Research Station for Agricultural Engineering, Merelbeke, Bélgica.
- Dierickx, W. 1998c. *Training Course on Drainage Envelope Research*. CSSRI, Karnal, India. ILRI, Wageningen, Países Bajos.
- Dierickx, W. 1999. Non-ideal drains. En: *Agricultural Drainage*. R.W. Skaggs y J. Van Schilfhaarde (eds.). *Agron. Monogr.* 38. ASA, CSSA, y SSSA, Madison, WI, Estados Unidos de América, pp. 297-330.
- Dierickx, W. y Leyman, N. 1991. *Drainage van landbouwgronden: theorie, criteria, materialen* [Drainage of Agricultural Soils: Theory, Criteria, Materials]. Ministerie Van de Vlaamse Gemeenschap, Bestuur Landinrichting en -beheer, Vlaamse Landmaatschappij, Bélgica.
- Dierickx, W. y Van der Sluys, L. 1990. Research into the Functional Hydraulic Properties of Geotextiles. En: *Proc. 4th Internat. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*. G. den Hoedt (ed.). A.A. Balkema, Rotterdam. La Haya, Países Bajos. Vol. 1, pp. 285-288.
- Dierickx, W. y Yüncüoglu, H. 1982. Factors affecting the performance of drainage envelope materials in structural unstable soils. *Agric. Water Manage.* 5: 215-225.
- Dierickx, W., Bhutta, M.N., Shafiq-ur-Rehman y Rafiq, W. 1995. Laboratory evaluation of synthetic drain envelopes. *Publication 145*, IWASRI, Lahore, Pakistán.
- Dierickx, W., Lennoz-Gratin, C. y Stuyt, L.C.P.M. 1987. Joint European research into land drainage envelopes. En: *Drainage design and management. Proc. of the 5th Nat. Drainage Symp.* ASAE, St. Joseph, MI, Estados Unidos de América, pp. 406-415.
- DRI, 1997. Practical experiences with trenchless drainage (V-plow) in Egypt. *Technical Report 92*. DRI, Cairo/ILRI, Wageningen, Países Bajos/Euroconsult, Arnhem, Países Bajos.
- Eggelsmann, R. 1978. *Subsurface Drainage Instructions*. Paul Parey, Hamburg, Alemania.
- Eggelsmann, R. 1982. Two decades of experience with drainage filters in the Federal Republic of Germany. En: *Advances in Drainage. Proceedings 4th Nat. Drainage Symp.* ASAE, St. Joseph, MI, Estados Unidos de América, pp. 115-120.
- El Atfy, H., Wahid El Din, O., El Gamaal, H. y Ritzema, H.P. 1990. Hydraulic performance of subsurface collector drains in Egypt. En: *Symp. on Land Drainage for Salinity Control in Arid and Semi-Arid Regions*, El Cairo, Vol. 3, pp. 393-405.
- EN 963. 1995. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Sampling and Preparation of Test Specimens*. CEN, Bruselas.
- EN 964-1. 1995. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Determination of Thickness at Specified Pressures-Part 1: Single layers*. CEN, Bruselas.
- EN 965. 1995. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Determination of Mass per Unit Area*. CEN, Bruselas.
- EN ISO 10319. 1996. *Geotextiles - Wide-width Tensile Test*. CEN, Bruselas.
- EN ISO 10320. 1999. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Identification on Site*. CEN, Bruselas.
- EN ISO 10321. 1996. *Geotextiles-Tensile Test for Joints/seams by Wide Width Method*. CEN, Bruselas.
- EN ISO 11058. 1999. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Determination of Water Permeability Characteristics Normal to the Plane, without Load*. CEN, Bruselas.
- EN ISO 12236. 1996. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Static Puncture Test (CBR-Test)*. CEN, Bruselas.
- EN ISO 12956. 1999. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Determination of the Characteristic Opening Size*. CEN, Bruselas.
- EN ISO 12958. 1999. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Determination of Water Flow Capacity in their Plane*. CEN, Bruselas.

- EN ISO 13427. 1998. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Abrasion Damage Simulation*. CEN, Bruselas.
- ENV 12224. 1996. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Determination of Resistance to Weathering*. CEN, Bruselas.
- ENV 12225. 1996. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Method for Determining the Microbiological Resistance by a Soil Burial Test*. CEN, Bruselas.
- ENV 12226. 1996. *Geotextiles and Geotextile-related Products - General Tests for Evaluation Following Durability Testing*. CEN, Bruselas.
- ENV 12447. 1997. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Screening Test Method for Determining the Resistance to Hydrolysis*. CEN, Bruselas.
- ENV ISO 12960. 1998. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Screening Test Method for Determining the Resistance to Liquids*. CEN, Bruselas.
- Ernst, L.F. 1954. Het berekenen van stationaire grondwaterstromingen, welke in een vertikaal vlak afgebeeld kunnen worden [The computation of steady state groundwater flows, which can be projected in the vertical plane]. *Rapport IV*. Landbouwproefstation en Bodemk. Inst. T.N.O. Groningen, Países Bajos.
- FAO. 1972. Drainage materials. *FAO Irrigation and Drainage Paper 9*. Roma.
- FAO. 1976. Drainage testing. P.J. Dieleman y B.D. Trafford. *FAO Irrigation and Drainage Paper 28*. Roma.
- FAO. 1985. Water quality for agriculture. R.S. Ayers y D.W. Westcot. *FAO Irrigation and Drainage Paper 29 (Rev. 1)*. Roma.
- FAO. 1990. *Guidelines for Soil Profile Description, 3rd ed. (revisada)*. Soil Resources, Management and Conservation Service, Land and Water Development Division, Roma.
- FAO. 2007. Guidelines and computer programs for the planning and design of land drainage systems. W.H. van der Molen, J. Martínez Beltrán y W.J. Ochs. *FAO Irrigation and Drainage Paper 62*. Roma.
- FAO e ICID. 1997. Management of agricultural drainage water quality. C.A. Madramootoo, W.R. Johnston y L.S. Willardson. 1997. *Water Report 13*. Roma.
- Faure, Y. 1991. Développements récents de la recherche sur les problèmes de filtration pour géotextiles [Recent research developments on filtration problems of geotextiles]. En: *Colmatage des drains et enrobages: état des connaissances et perspectives (Clogging of Drains and Envelopes: State of Knowledge and Perspectives)*. N. Linard (ed.). CEMAGREF, Groupement d'Antony, Francia, pp. 83-97.
- Feichtinger, F. 1966. Die Wasseraufnahmefähigkeit der Dränrohre. Ein Vergleich von Ton- und Kunststoffrohrdränen [The water uptake capacity of drain pipes. A comparison between clay and plastic drain pipes]. *Österreichische Wasserwirtschaft 18, 11/12*: 247-255.
- Fischer, G.R., Holtz, R.D. y Christopher, B.R. 1994. Filtration behaviour of broadly graded, cohesionless tills. En: *Proc. 5th Internat. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*. G.P. Karunaratne, S.H. Chew y K.S. Wong (eds.). Singapore, Vol 2, pp. 659-662.
- Ford, H.W. 1979. Characteristics of slimes and ochre in drainage and irrigation systems. *Transactions ASAE 22, 5*: 1093-1096.
- Ford, H.W. 1980. The problem of dripper clogging and methods for control. *Proc. Symp. Drip Irrig. in Hort.* Skierniewice, Polonia, 1: 99-105.
- Ford, H.W. 1982a. Biological clogging of drain envelopes. En: *Proc. 2nd Internat. Drainage Workshop*, Washington, DC, pp. 215-220.
- Ford, H.W. 1982b. Estimating the potential for ochre clogging before installing drains. *Transactions ASAE 25, 6*: 1597-1600.
- Framji, K.K., Garg, B.C. y Kaushish, S.P. (eds.). 1987. *Design Practices for Covered Drains in an Agricultural Land Drainage System*. ICID, Nueva Delhi.
- Heeres, J., Kreeftenberg, H.W. y Nieboer, R.H. 1985. Het doorspuiten van drains onder hoge druk [High pressure cleaning]. *Landbouwmmechanisatie 36-12*. Wageningen, Países Bajos.

- Henkin, E.** 1987. Twenty-five years of drainage in Israel. En: Proc. Symp. 25th Internat. Course on Land Drainage. Twenty-Five Years of Drainage Experience. J. Vos (ed.). *Publ.* 42, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 205-215.
- Huinink, J.T.M.** 1991. *Drainage proefveld "Staverense Noordermeer"* [Land Drainage Pilot Area "Staverense Noordermeer"]. IKC, Ede, Países Bajos.
- Huinink, J.T.M.** 1992. Herziening keuzetabel drainage omhullingsmateriaal [Revision of Selection Criteria for Envelope Materials]. *Landinrichting* 32, 3: 31-33.
- ICID.** 1996. *Multilingual Technical Dictionary on Irrigation and Drainage*. Ed. revisada. Nueva Delhi.
- Irwin, R.W.** 1982. Hydraulic roughness of corrugated plastic tubing. En: *Proc. 2nd Internat. Drainage Workshop*. Washington, DC, pp. 52-62.
- Irwin, R.W.** 1984. Corrugated pipe flow rate from pipe geometry. *Journ. Irr. and Drainage Eng.* 2: 237-241.
- ISO 811.** 1981. *Textile Fabrics - Determination of Resistance to Water Penetration - Hydrostatic Pressure Test*. ISO, Ginebra, Suiza.
- ISO 10318.** 1990. *Geotextiles - Vocabulary*. ISO, Ginebra, Suiza.
- ISO/DIS 8771.** 1985. *Pipes and Fittings of Unplasticized Polyvinyl Chloride (PVC-U) for Sub-soil Drainage - Specification*. ISO, Ginebra, Suiza.
- IWASRI.** 1997. *Iwasri News* 4, 3: 2. IWASRI, Lahore, Pakistán.
- Jarman, C.G. y Jayasundera, D.S.** 1975. The extraction and processing of coconut fibre. *Report G94*, Tropical Products Institute, Ministry of Overseas Development, Londres.
- Juusela, T.** 1958. On methods of protecting drain pipes and on the use of gravel as a protective material. *Acta Agr. Scand.* VIII, 1: 62-87.
- Kabina, P. y Dierickx, W.** 1986. Wirksamkeit ausgewählter dränfilter aus fasern in lehm Boden [Performance of selected drain pipe fibre envelopes in a silty soil]. *Z.f. Kulturtechnik und Flurbereinigung* 27: 329-338.
- Karpoff, K.P.** 1955. The use of laboratory tests to develop design criteria for protective filters. *Amer. Soc. Test. Mater.* 55: 1183-1198.
- Kessler, J.** 1970. Data processing and analysis. En: Deriving soil hydrological constants from field drainage tests. P.J. Dieleman, 1974. *Publ.* 16, Vol. III, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 329-350.
- Knops, J.A.C. y Dierickx, W.** 1979. Drainage materials. En: Proc. Internat. Drain. Workshop. J. Wesseling (ed.). *Publ.* 25, ILRI, Wageningen, Países Bajos, p. 14-38.
- Knops, J.A.C., Zuidema, F.C., Van Someren, C.L. y Scholten, J.** 1979. Guidelines for the selection of envelope materials for subsurface drains. En: Proc. Internat. Drain. Workshop. J. Wesseling (ed.). *Publ.* 25, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 439-450.
- Koenigs, F.F.R.** 1964. Vochtgehalte bij de bewerking en doorlatendheid van zandgronden [The impact of soil water content and mechanical manipulation on the hydraulic conductivity of sandy soils]. *Tijdschrift Koninklijke Nederlandse Heidemaatschappij* 75, 12: 617-627.
- Kruse, E.G.** 1962. Design of gravel packs for wells. *Amer. Soc. Agr. Eng., Trans.* 5, 2: 197-199.
- Lagacé, R.** 1983. *Predicting Drain Silting Potential*. Ph.D.-Thesis, North Carolina State University, Dept. of Biol. and Agric. Eng., Raleigh, NC, Estados Unidos de América.
- Lechler GmbH.** 1980. Manufacturer of High Pressure Drain Jetting Equipment. P.O. Box 1709, D-7012 Fellbach, Alemania.
- Lennoz-Gratin, C.** 1987. The use of geotextiles as drain envelopes in France in connection with mineral clogging risks. *Geotextiles and Geomembranes* 5, 2: 71-89.
- Lennoz-Gratin, C.** 1992. Envelopes to prevent pipe mineral clogging of subsurface drainage systems: a review of French standards. En: *Proc. 5th Internat. Drainage Workshop*. W.F. Vlotman (ed.). Lahore, Pakistán, Vol. III, pp. 5.18-5.25.

- Lennoz-Gratin, C. y Zaïdi, K.** 1987. *Hydraulique au voisinage du drain* [Hydraulics in Drain Vicinity]. Série Hydraulique Agricole. CEMAGREF, Groupement d'Antony, France, 2: 1-139.
- Lennoz-Gratin, C., Lesaffre, B. y Penel, M.** 1992. Diagnosis of mineral clogging hazards in subsurface drainage systems. En: *Proc. 5th Internat. Drainage Workshop*. W.F. Vlotman (ed.). Lahore, Pakistán, Vol. II, pp. 1.36-1.45.
- Luthin, J.** 1978. *Drainage Engineering*. Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, NY, Estados Unidos de América.
- Luthin, J.N. y Haig, A.** 1972. Some factors affecting flow into drainpipes. *Hilgardia* 41, 10: 235-245.
- Madramootoo, C.A., Johnston, W.R. y Willardson, L.S.** 1997. Management of agricultural drainage water quality. *FAO Water Report 13*, FAO/ICID, Roma.
- Martínez Beltrán, J.** 1978. Drainage and Reclamation of Salt-affected Soils. *Publ. 24*, ILRI, Wageningen, Países Bajos.
- Martínez Beltrán, J.** 1987. Drainage in Spanish land reclamation projects. En: *Proc. Symp. 25th Internat. Course on Land Drainage. Twenty-Five Years of Drainage Experience*. J. Vos (ed.). *Publ. 42*, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 180-194.
- Meijer, H.J.** 1973. Enkele bepalingen van de factoren die gebruikt worden bij de kwaliteitseisen voor turfvezel voor drainedoeleinden [Some determinations of the factors which are used in conjunction with quality requirements for peat fibres which are applied for drainage purposes]. *Note 781*, ICW, Wageningen, Países Bajos.
- Meijer, H.J. y Knops, J.A.C.** 1977. Veldonderzoek naar de bestendigheid van cocosvezels als afdek- en omhullingsmateriaal voor drainbuizen [Field survey into the persistency of coconut fibres as cover and wrapping material for drain pipes]. *Misc. Reprints 201*, ICW, Wageningen, Países Bajos.
- Merriam-Webster.** 1993. *Collegiate Dictionary 10th ed.* Merriam-Webster Inc., Springfield, MA, Estados Unidos de América.
- Metzger, J.F., Gallichand, J., Amer, M.H. y Bricchieri-Colombi, J.S.A.** 1992. Experiences with fabric envelope selection in a large subsurface drainage project in Egypt. En: *Proc. 5th Internat. Drainage Workshop*. W.F. Vlotman (ed.). Lahore, Pakistán, Vol. III, pp. 5.77-5.87.
- Mortensen, J.R.** 1987. Comment made during discussion in sessions 1 and 4 in ILRI Symposium. En: *Proc. Symp. 25th Internat. Course on Land Drainage. Twenty-Five Years of Drainage Experience*. J. Vos (ed.). *Publ. 42*, ILRI, Wageningen, Países Bajos.
- Murillo, J.L.** 1987. Land drainage in the Atlantic region of Costa Rica. En: *Proc. Symp. 25th Internat. Course on Land Drainage. Twenty-Five Years of Drainage Experience*. J. Vos (ed.). *Publ. 42*, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 286-290.
- Nieuwenhuis, G.J.A. y Wesseling, J.** 1979. Effect of perforation and filter material on entrance resistance and effective diameter of plastic drain pipes. *Agric. Water Manage.* 2: 1-9.
- NFU 51-161.** 1990. *Drainage agricole. Produits d'enrobage: essai en perméamètre* (Agricultural Drainage. Envelope Products: Permeameter Tests). AFNOR, París.
- NRCS.** 1998. *Subsurface Drainage Standard and Specification 606*. U.S. Department of Agriculture, Natural Resource Conservation Service, Washington, DC.
- Ochs, W.J. y Bishay, G.B.** 1992. Drainage guidelines. *Technical Paper 195*. Banco Mundial, Washington, DC.
- Olbertz, M.H. y Press, H.** 1965. Landwirtschaftlichen Wasserbau [Agricultural water management]. En: *Taschenbuch der Wasserwirtschaft. Wasser und Boden, 4th ed.*. H. Press (ed.). Hamburg, Alemania, pp. 447-555.
- Oosterbaan, R.J.** 1998. *Comunicación personal*. Técnico de ILRI, Wageningen, Países Bajos.
- Personal del Proyecto Rajad.** 1995. *Analysis of Subsurface Drainage Design Criteria*. Rajasthan Agricultural Drainage Research Project (Rajad). Chambal Command Area Development, Rajasthan, India.

- Peschl, I.A.S.Z.** 1969. *Gewelforming in bunkers* [The Development of Stable Arches in Bunkers]. Ph.D. Thesis. Technical University, Eindhoven, Países Bajos.
- Pillsbury, A.F.** 1967. Observations on tile drainage performance. *Proc. ASCE* **93**, IR3: 233-241.
- prEN 13562.** 1999. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Determination of Penetration Resistance by Water (Hydrostatic Head Test)*. CEN, Bruselas.
- prEN 30318.** 1998. *Geotextiles and Geotextile-related Products - Terminology (draft)*. CEN, Bruselas.
- Qureshi, S., Kogler, R.M. y Bhatia, S.K.** 1990. Long term filtration behaviour of nonwoven geotextiles. En: *Proc. 4th Internat. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*. G. den Hoedt (ed.). A.A. Balkema, Rotterdam, Países Bajos, Vol. 1, pp. 279-283.
- Rankilor, P.R.** 1992. *UTF Geosynthetics Manual - a Technical Manual for the Design of UTF Geosynthetics into Civil and Marine Engineering Projects*. UCO Technical Fabrics NV, Lokeren, Bélgica.
- Richards, L.A.** 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. *USDA Handbook 60*, Washington, DC.
- Ritzema, H.P.** 1997. Report on the drainage research course; Indo-Dutch network programme for operational research on the control of waterlogging and salinization in irrigated agricultural lands. *Unpubl. working paper*, ILRI, Wageningen, Países Bajos.
- Rollin, A.L., Broughton, R.S. y Bolduc, G.F.** 1987. Thin synthetic envelope materials for subsurface drainage tubes. *Geotextiles and Geomembranes* **5**, 2: 99-122.
- Rozendaal, H. y Scholten, J.** 1980. Risico's voor drainage met turfamolmafdekking bij infiltratie in lichte gronden [The risk of wrapping drains with peat litter envelope material in case of subirrigation in sandy soils]. *Cult. Techn. Tijdschr.* **19**, 6: 327-334.
- Salem, H.A. y Willardson, L.S.** 1992. Evaluation of Non-Standard Synthetic Envelope Materials. En: *Proc. 5th Internat. Drainage Workshop*. W.F. Vlotman (ed.). Lahore, Pakistán, Vol. I, 219-227.
- Samani Z.A. y Willardson, L.S.** 1981. Soil Hydraulic Stability in a Subsurface Drainage System. *Trans. ASAE* **24**, 3: 666-669.
- Saulmon, R.W.** 1971. Need for envelope material above draitile. *J. Irr. and Drain. Div.*, *Proc. ASCE* **95**, IR1: 199-209.
- Scholten, J. y Ven, G.A.** 1987. Het schatten van het risico van ijzerafzetting in drains volgens de methode Ford [Assessment of the risk of iron ochre clogging of drains following the Ford method]. *Werkdocument 15 cbw*. Government Service for the IJssellake Polders, Lelystad, Países Bajos.
- Scholten, J.** 1988. Vijfentwintig jaar drainagematerialenonderzoek bij de Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders [Twenty-five years of drain envelope research by the Dutch Polder Development Authority]. *Flevobericht 291*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Países Bajos.
- Schultz, B.** (ed.). 1990. *Guidelines on the Construction of Horizontal Subsurface Drainage Systems*. Working Group on Drainage Construction, ICID, Nueva Delhi.
- Schwab, G.O. y Fouss, J.L.** 1999. Drainage materials. En: *Agricultural Drainage*. R.W. Skaggs y J. Van Schilfgaarde (eds.). *Agron. Monogr. 38*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, Estados Unidos de América, pp. 911-926.
- Segeren, W.A. y Zuidema, F.** 1969. Ontwikkelingen in de drainagetechniek [Developments in land drainage techniques]. En: *Cultuurtechnische verhandelingen*. Ministerie van Landbouw en Visserij, La Haya, pp. 325-357.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. y Talbot, J.R.** 1984a. Basic Properties of Sand and Gravel Filters. *Journ. Geotech. Eng. Amer. Soc. Civil Eng.* **110**, 6: 684-700.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. y Talbot, J.R.** 1984b. Filters for Silts and Clays. *Journ. Geotech. Engr. Amer. Soc. Civil Eng.* **110**, 6: 701-718.

- Shi, Y.C., Fannin, R.J. y Vaid, Y.P. 1994. Interpretation of gradient ratio test results. En: *Proc. 5th Internat. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*. G.P. Karunaratne, S.H. Chew y K.S. Wong (eds.). Singapore, Vol 2, pp. 673-676.
- Singh, P.K. 1987. Drainage problems in India. En: *Proc. Symp. 25th Internat. Course on Land Drainage. Twenty-Five Years of Drainage Experience*. J. Vos (ed.). Publ. 42, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 278-285.
- Smedema, L.K. y Rycroft, D.W. 1983. *Land Drainage: Planning and Design of Agricultural Drainage Systems*. Batsford, Londres.
- Smedema, L.K., Vlotman, W.F. y Rycroft, D.W. 2004. *Modern Land Drainage: Planning, Design and Management of Agricultural Drainage Systems*. A.A. Balkema Publishers, Leiden, Países Bajos.
- SCS. 1971. Drainage of agricultural land. *USDA National Engineering Handbook, Section 16*. USDA Soil Conservation Service, Washington, DC.
- SCS. 1973. *Drainage of Agricultural Lands*. A practical handbook for the planning, design, construction and maintenance of agricultural drainage systems. USDA Soil Conservation Service. Water Information Center Inc., Port Washington, NY, Estados Unidos de América.
- SCS. 1988. *Standards and Specifications for Conservation Practices. Standard on Subsurface Drains 606*. USDA Soil Conservation Service, Washington, DC.
- SCS 606. 1980. Engineering practice for subsurface drains. Specifications for corrugated polyvinyl chloride drainage tubing. *Code 606*. USDA-SCS, Washington, DC.
- Stuyt, L.C.P.M. 1982. Drainage envelope research in The Netherlands. En: *Proc. 2nd Internat. Drainage Workshop*. Washington, DC, pp. 106-123.
- Stuyt, L.C.P.M. 1992a. *The Water Acceptance of Wrapped Subsurface Drains*. Ph.D. Thesis, Agric. Univ. Wageningen/DLO-Winand Staring Centre (SC-DLO), Wageningen, Países Bajos.
- Stuyt, L.C.P.M. 1992b. Mineral clogging of wrapped subsurface drains, installed in unstable soils: a field survey. En: *Proc. 5th Internat. Drainage Workshop*. W.F. Vlotman (ed.). Lahore, Pakistán, Vol. III, pp. 5.50-5.64.
- Stuyt, L.C.P.M. 1992c. Effect of drain envelopes on the water acceptance of wrapped subsurface drains. En: *Proc. 6th Internat. Drainage Workshop*. ASAE, St Joseph, MI, Estados Unidos de América, pp. 257-263.
- Stuyt, L.C.P.M. y Oosten, A.J. 1986. A non-destructive morphological study of mineral clogging of drains. En: *Proc. of Internat. Seminar on Land Drainage*. J. Saavalainen y P. Vakkilainen (eds.). Helsinki University of Technology, Finlandia, pp. 90-111.
- Stuyt, L.C.P.M. y Willardson, L.S. 1999. Drain Envelopes. En: *Agricultural Drainage*. R.W. Skaggs y J. Van Schilfgaarde (eds.). *Agron. Monogr. 38*. ASA, CSSA, y SSSA, Madison, WI, Estados Unidos de América, pp. 927-962.
- Terzaghi, K. y Peck, R.B. 1961. *Die Bodenmechanik in der Baupraxis* [Soil Mechanics in Building Construction]. Springer, Berlin.
- Terzaghi, K. y Peck, R.B. 1965. *Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et au bâtiments* [Soil Mechanics in Public Works and in Buildings]. Dunod, París.
- U.S. Army Corps of Engineers. 1941. Investigation of filter requirements for underdrains. *Eng. Waterways Exp. Sta., Tech. Memo. 183-1*.
- U.S. Army Corps of Engineers. 1977. Civil Works Construction Guide. Specification for Plastic Filter Fabrics. *Specification N° CW-02215*. Office, Chief of Engineers. Washington, DC.
- USBR. 1974. *Standard Specifications for Polyethylene Plastic Corrugated Drainage Tubing*. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver, CO, Estados Unidos de América.
- USBR. 1976. *Tentative Standard Specifications for Polyvinyl-chloride Corrugated Drainage Tubing*. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver, CO, Estados Unidos de América.

- USBR.** 1978. *Drainage Manual*. United States Department of Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO, Estados Unidos de América.
- USBR.** 1981. *Tentative Standard Specifications for Large-diameter Polyethylene and Polyvinyl-chloride Corrugated Drainage Tubing and Foamed Smooth Wall ABS Drain Pipe*. United States Department of the Interior, Water and Power Resources Service, Engineering and Research Center, Denver, CO, Estados Unidos de América.
- USBR.** 1993. *Drainage Manual, 2nd ed.* United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver Federal Center, Denver, CO, Estados Unidos de América.
- Vander Louw, C.** 1986. Drainoscopy, een optische inspectiemethode voor drainagesystemen [Drainoscopy, an optical inspection method for subsurface drains] *Cultuurtechnisch Tijdschrift* 25, 5: 357-367.
- Van der Meer, K. y Willet, J.R.** 1964. The pedomorphological aspect of mechanical soil improvement. 8th Int. Congr. Soil Sci. *Summary in Tijdschrift Koninklijke Nederlandse Heidemaatschappij* 75, 12: 628-634.
- Van der Molen, W.H.** 1972. *Waterbeheersing* [Water Management]. Ed. Revisada. Lecture notes, Agricultural University Wageningen, Países Bajos.
- Van der Molen, W.H. y Van Someren, C.L.** 1987. Comment made during discussion in session 1 in ILRI Symposium. En: Proc. Symp. 25th Internat. Course on Land Drainage. Twenty-Five Years of Drainage Experience. J. Vos (ed.). *Publ. 42*, ILRI, Wageningen, Países Bajos.
- Van Hoorn, J.W. y Bouma, J.** 1981. Het functioneren van buisdrainage op komgrond [Performance of pipe drainage in backland]. *Cultuurtechnisch Tijdschrift* 20: 325-334.
- Van Schilfgaarde, J.** 1971. Drainage yesterday, today, and tomorrow. *Proc. ASAE Nat. Drain. Symp.* St. Joseph, MI, Estados Unidos de América.
- Van Someren, C. L.** 1972. Drainage materials. Synthesis. En: *FAO Irrigation and Drainage Paper 9*, Roma, pp. 1-30.
- Van Zeijts, T.E.J.** 1987. Quality control of subsurface drainage works in the Netherlands. *Proc. 3rd Intern. Workshop on Land Drainage*. Ohio State University, Columbus, OH, Estados Unidos de América, pp.117-124.
- Van Zeijts, T.E.J.** 1992. Recommendations of the use of envelopes, based on experience in The Netherlands. En: *Proc. 5th Internat. Drainage Workshop*. W.F. Vlotman (ed.). Lahore, Pakistán, Vol. III, pp. 5.88-5.96.
- Van Zeijts, T.E.J. y Bons, A.** 1993. Effects of jet flushing on drain performance and sustainability. *Trans. 15th International Congress on Irrigation and Drainage, La Haya*. ICID, Nueva Delhi. pp. 437-450.
- Van Zeijts, T.E.J. y Naarding, W.H.** 1990. Possibilities and limitations of trenchless pipe drain installation in irrigated areas. En: Installation of pipe drains. Current Papers on Machinery and Quality Control. *Information Paper 21*, Govt. Service for Land and Water Use, Utrecht, Países Bajos.
- Van Zeijts, T.E.J. y Zijlstra, L.** 1990. Rodding, a simple method for checking mistakes in drain installation. En: Symposium on Land Drainage for Salinity Control in Arid and Semi-Arid Regions. Drainage Research Institute, El Cairo, Vol III, pp. 84-93.
- Veldhuijzen van Zanten, R.** 1986. *Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering*. A.A. Balkema, Rotterdam, Países Bajos.
- Ven, G.A.** 1986. The effect of maintenance of tube drains. En: Agricultural Water Management. *Proc. Symp. on Agric. Water Management*. A.L.M. Van Wijk y J. Wesseling (eds.). A.A. Balkema, Rotterdam, Países Bajos, pp 203-211.
- Vlotman, W.F.** (ed.). 1990. Proceedings Workshop on Drain Envelope Testing, Design and Research. *IWASRI Publ. 49*, IWASRI/NRAP, Lahore, Pakistán.
- Vlotman, W.F., Shafiq-ur-Rehman y Bhutta, N.M.** 1992a. Drain Envelope Design under Review. *ASAE Paper No. 922649*. ASAE. St. Joseph, MI, Estados Unidos de América.

- Vlotman, W.F., Shafiq-ur-Rehman y Haider, I. 1992b. Granular envelope research in Pakistan. En: *Proc. 5th Internat. Drainage Workshop*. W.F. Vlotman (ed.). Lahore, Pakistán, Vol. III, pp. 5.38-5.49.
- Vlotman, W.F., Willardson, L.S. y Dierickx, W. 1997. Drain envelope need, selection, design, construction and maintenance. En: *Proc. 7th ICID Int. Drain. Workshop*. Penang, Malasia, Vol. 2, pp. 22.1- 22.16.
- Vlotman, W.F., Willardson, L.S. y Dierickx, W. 2000. Envelope design for subsurface drains. *Publ. 57*, ILRI, Wageningen, Países Bajos.
- Vlotman, W.F., Zuberi, F.A. y Khan, M.A. 1990. Gravel Envelope Selection, Design and Installation. En: *Proc. Workshop on Drain Envelope Testing, Design and Research*. W.F. Vlotman (ed.). IWASRI, Lahore, Pakistán, pp. 3-31.
- Von Scheffer, B. 1982. Spülung von Dränen des Dränversuchsfelder Bokern [Drain jetting in pilot area Bokern]. *Zeitschr. für Kulturtechnik und Flurbereinigung* **23**: 110-114.
- Vos, J. (ed.). 1987. Proc. Symp. 25th Internat. Course on Land Drainage. Twenty-Five Years of Drainage Experience. *Publ. 42*, ILRI, Wageningen, Países Bajos.
- Watts, D.G. y Luthin, J.N. 1963. Tests of thick fiberglass filters for subsurface drains. *Hilgardia* **35**, 3: 35-46.
- Weaver, M.M. 1964. *History of Tile Drainage*. Private publication, Waterloo, NY, Estados Unidos de América.
- Wesseling, J. 1967. Drainage experiments. *Lecture Notes 6th Internat. Course on Land Drainage*, ILRI, Wageningen, Países Bajos.
- Wesseling, J. 1987. The development of drainage in humid temperate regions. En: Proc. Symp. 25th Internat. Course on Land Drainage. Twenty-Five Years of Drainage Experience. J. Vos (ed.). *Publ. 42*, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 14-21.
- Wesseling, J. y Homma, F. 1967. Entrance resistance of plastic drain tubes. *Neth. J. Agric. Sci.* **15**: 170-182.
- Wesseling J. y Van Someren, C.L. 1972. Provisional report of the experience gained in the Netherlands. En: Drainage materials. *FAO Irrigation and Drainage Paper 9*. Roma, pp. 55-84.
- Widmoser, P. 1968. Der Einfluss von Zonen geänderter Durchlässigkeit im Bereich von Drän- und Brunnenfilterrohren. [The effect of zones with modified permeability in the vicinity of drain and well pipes] *Schweizerische Bauzeitung* **86**, 9: 135-144.
- Willardson, L.S. 1974. Envelope materials. En: Drainage for Agriculture. J. Van Schilfgaarde (ed.). *Agronomy 17*. Am. Soc. of Agronomy, Madison, WI, Estados Unidos de América, pp. 179-202.
- Willardson, L.S. 1979. Hydraulic gradients in envelope materials. Factors influencing water and particle movement into drains. *USDA-SEA. ARR-W-8*, pp. 65-70.
- Willardson, L.S. y Walker, R.E. 1979. Synthetic drain envelope-soil interactions. *Proc. Irrig. and Drain. Div. ASCE* **105**, IR4: 367-373.
- Willardson, L.S., Aquirre, X. y Watkins, R.K. 1980. Plastic drain response in soft envelope material. *Trans. ASAE*, **23**: 1402-1408.
- Willet, J.R. 1962. 'Ongerijpte' zandgronden en hun ontwatering [Drainage of 'unripened' sandy soils]. *Tijdschrift Koninklijke Nederlandse Heidemaatschappij* **73**, 12: 403-408.
- Winger, R.J. 1973. *Operation and Maintenance Standards for Irrigation Project Drainage Systems*. Irrigation Operator's Workshop, USBR, Eng. and Res. Center, Denver, CO, Estados Unidos de América.
- Woudeneh, T. 1987. The Melka Sadi Pilot Drainage Scheme. En: Proc. Symp. 25th Internat. Course on Land Drainage. Twenty-Five Years of Drainage Experience. J. Vos (ed.). *Publ. 42*, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 261-267.
- Ziems, J. 1969. *Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe* [Contribution to contact erosion of cohesionless mineral materials]. Ph.D.-Thesis, Techn. Univ. Dresden, Alemania.
- Zijlstra, G. 1987. Drainage machines. En: Proc. Symp. 25th Internat. Course on Land Drainage. Twenty-Five Years of Drainage Experience. J. Vos (ed.). *Publ. 42*, ILRI, Wageningen, Países Bajos, pp. 74-81.

Anexo

Borrador de norma europea para tuberías de drenaje de cloruro de polivinilo corrugado

INTRODUCCIÓN

Este Anexo contiene el borrador de norma europea para tuberías de drenaje de cloruro de polivinilo corrugado, como estaba en el momento en que el trabajo de normalización fue interrumpido. Consecuentemente, este documento tiene algunas deficiencias e imperfecciones.

Como puede apreciarse en el «Prólogo» del borrador de norma, ésta debería constar de siete partes, pero la versión de este Anexo contiene sólo seis. La Parte 7 sobre «Evaluación de conformidad» no está aún disponible, porque la Comisión de la Unión Europea debe indicar el tipo de evaluación de conformidad que se aplica a «Sistemas de tuberías plásticas para drenaje de tierras agrícolas (PVC-U)».

El principal inconveniente del documento existente concierne a las referencias. Frecuentemente, las referencias mencionadas no están incluidas en las referencias normativas o contienen referencias que no se aplican. Las referencias de los borradores de documentos o normas no se han actualizado desde el momento de la interrupción del trabajo y pueden no ser útiles ya. A veces, las referencias en varias partes del borrador de norma no coinciden.

Los símbolos no siempre están definidos y carecen de unidades, mientras otros símbolos están definidos pero no se usan y además no siempre son sencillos. También se encontraron otras discrepancias en el documento.

Estas deficiencias no cuestionan el valor y la importancia de este borrador de norma, pero pueden desconcertar a quienes consideren la norma más estrictamente. Algunas discrepancias e inconsistencias obvias se han corregido, incluso con el riesgo de introducir errores adicionales. Otras ambigüedades se han mantenido porque no pudo obtenerse información correcta o la que debería ser correcta con mayor probabilidad.

El borrador de norma-EN para tuberías de drenaje de cloruro de polivinilo corrugado es un documento útil a pesar de los defectos antes mencionados, que con seguridad desaparecerían si el trabajo de normalización pudiera finalizarse. El borrador de norma informa sobre requisitos para tuberías de drenaje, conexiones, materiales envolventes y sobre la práctica de instalación y puede ser útil para países con poca o ninguna experiencia sobre los materiales de drenaje disponibles actualmente. Por ello, se decidió incluir este borrador de norma en este Estudio FAO de Riego y Drenaje.

SISTEMAS DE TUBERÍA DE PLÁSTICO CORRUGADO PARA DRENAJE DE TIERRAS CLORURO DE POLIVINILO SIN PLASTIFICAR (PVC-U)

PRÓLOGO

Este borrador de norma europea se ha preparado por un mandato dado por la Comisión Europea y la Asociación Europea de Libre Comercio al CEN y cumple requisitos esenciales de directivas de la UE.

Este documento fue preparado por CEN/TC 155 «Sistemas de tuberías y conducciones plásticas»/WG18 «Sistemas de tubería para drenaje subterráneo». No es obligatorio para los miembros del CEN pues todavía no se ha aprobado.

Esta norma, para sistemas de tubería de plástico corrugado hecha de cloruro de polivinilo sin plastificar para drenaje agrícola, hortícola y de campos deportivos, es parte de una norma para sistemas de tuberías de plástico.

Las normas se basan en los resultados del trabajo llevado a cabo por ISO/TC 138 «Tuberías de plástico, conexiones y válvulas para el transporte de fluidos» que es un Comité Técnico de la Organización Internacional de Normalización (ISO).

Se apoyan en otras normas sobre métodos de ensayo a las que se hace referencia en toda la norma.

La norma se relaciona con normas sobre requisitos funcionales generales y con recomendaciones para instalación.

Esta norma, bajo el título general de «Sistemas de tuberías de plástico corrugado para drenaje de tierras, cloruro de polivinilo sin plastificar (PVC-U)», consta de la siguientes partes:

- Parte 1: General.
- Parte 2: Tuberías sin envoltura.
- Parte 3: Conexiones.
- Parte 4: Envolturas.
- Parte 5: Adecuación para la finalidad del sistema.
- Parte 6: Práctica recomendada de instalación.
- Parte 7: Evaluación de conformidad.

Esta norma europea especifica las propiedades requeridas para el sistema de tubería de cloruro de polivinilo sin plastificar y sus componentes cuando se quieren utilizar en drenaje de tierras. Incluye la práctica recomendada de instalación y el nivel necesario de certificación.

Se pretende que utilicen esta norma organismos, ingenieros proyectistas, institutos de ensayo y homologación, fabricantes y usuarios.

Esta norma es aplicable a sistemas de tubería de cloruro de polivinilo sin plastificar (PVC-U) para captar y conducir agua en exceso por gravedad. El ámbito de aplicación de estos sistemas comprende agricultura, horticultura y campos deportivos.

Las tuberías para estos sistemas cubren una serie de diámetros nominales comprendidos entre DN 50 y DN 1000. Actualmente no se fabrican tubos por encima de DN 630.

Las normas europeas incorporan como referencia disposiciones de ediciones específicas de otras publicaciones. Estas referencias normativas se citan en los apartados correspondientes del texto y las publicaciones se enumeran en la norma. Las enmiendas o las revisiones subsiguientes de cualquiera de estas publicaciones afectan a esta Norma Europea solamente cuando sean incorporadas por enmienda o revisión.

PARTE 1: GENERAL

1 ÁMBITO

La Parte 1 especifica los aspectos generales, los requisitos del material y los parámetros de ensayo para los métodos de ensayo referidos en la norma.

2 REFERENCIAS NORMATIVAS

- ISO 2507. Tuberías y conexiones termoplásticas - Temperatura de ablandamiento Vicat - Método de ensayo y especificación básica.
- ISO 1183. Tuberías y conexiones de PVC-U - Determinación y especificación de densidad.
- CEN/TC 155 N 708 Rev. Propuesta de texto en relación con el material, incluyendo materiales reprocesables y reciclables para normas individuales. 1992.07.01. 18 pp.
- CEN/TC 155 WI 137. Determinación de contenido de PVC.
- CEN/TC 155 WI 043. Determinación de temperatura de ablandamiento Vicat.

3 DEFINICIONES

Para los propósitos de esta parte se aplican las siguientes definiciones y abreviaciones:

3.1 Drenaje de tierras:

Remoción de agua superficial o subterránea del terreno.

3.2 Material virgen:

Material en forma de gránulos o polvo que no ha sido sujeto a otro uso o procesamiento aparte del necesario para su manufactura y al que no se le han agregado materiales reprocesables o reciclables.

3.3 Material reprocesable propio:

Material preparado a partir de tuberías y conexiones de PVC-U sin utilizar rechazadas, incluyendo recortes de producción de tuberías y conexiones, que serán reprocesados en una planta del fabricante habiendo sido previamente elaborados por el propio fabricante por un proceso de moldeado o extrusión, siempre que se conozca su completa formulación.

3.4 Material reprocesable externo: material que comprende alguna de las siguientes formas:

- a) Material de tuberías, conexiones o recortes de PVC-U no usados y rechazados, que será reprocesado y que fue originalmente elaborado por otro fabricante.
- b) Material procedente de la elaboración de otros productos de PVC-U no usados, distintos de tuberías y conexiones, independientemente de dónde se fabricaron, que serán reprocesados como tuberías, conexiones o ambas cosas.

3.5 Material reciclable: material que comprende alguna de las siguientes formas:

- a) Material de tuberías o conexiones de PVC-U usados, que han sido limpiados y triturados o molidos.
- b) Material de productos usados de PVC-U distintos de tuberías o conexiones, que han sido limpiados y triturados o molidos.

3.6 Diámetro nominal (DN):

Una designación numérica de diámetro que es común a todos los componentes de un sistema de tubería. Es conveniente como referencia un número redondo aproximado al diámetro de fabricación y expresado en mm. Para esta norma se basa en el diámetro externo de las tuberías corrugadas. En Escandinavia los diámetros nominales se basan en el diámetro interno.

4 MATERIALES

4.1 General

El material de tuberías y conexiones consistirá sustancialmente de material de PVC-U, al que sólo puede añadirse aquellos aditivos necesarios para facilitar la fabricación de tubería mecánicamente resistente y con superficie bien terminada, de acuerdo con esta norma.

4.2 Contenido mínimo de PVC

Al ensayarse de acuerdo con CEN/TC 155 WI 137, el contenido de PVC deberá ser al menos del 80 por ciento de la masa para tuberías y del 88 por ciento para conexiones. El contenido mínimo de PVC puede calcularse en caso de usar material virgen o reprocesado propio.

NOTA: El contenido mínimo de PVC de conexiones fabricadas a partir de tubería deberá estar de acuerdo con el contenido requerido para la tubería.

4.3 Material virgen

El uso de material virgen está permitido sin limitación.

4.4 Materiales reprocesables y reciclables

4.4.1 Materiales reprocesables propios

El uso de material reprocesable propio para la producción de tuberías y conexiones está permitido sin limitación. Si se usa material de conexiones para tuberías, deberá considerarse como material reciclable.

4.4.2 Materiales reprocesables y reciclables externos con especificaciones acordadas

Para producción de tuberías pueden agregarse materiales reprocesables y reciclables externos de tuberías y conexiones de PVC-U, que estén disponibles en cantidades y frecuencias relevantes, a material virgen o reprocesable propio, o a una mezcla de esos dos materiales y serán añadidos solamente bajo las siguientes condiciones:

- a) Se acordará una especificación del material entre el suministrador de material procesable o reciclable, el fabricante de tubería y la agencia de certificación. Deberá cumplir al menos las características indicadas en el Cuadro 1. Una vez determinados, de acuerdo con los métodos indicados en el Cuadro 1, los valores reales de estas características se ajustarán a los valores convenidos dentro de las desviaciones permitidas en el Cuadro 1. El sistema de calidad del abastecedor de material reprocesable o reciclable deberá certificarse por ISO EN 9002.
- b) Cada entrega incluirá un certificado mostrando conformidad con la especificación establecida.
- c) La cantidad máxima de material reprocesable y reciclable que es posible agregar al material virgen está especificada por el fabricante de tubería.
- d) La cantidad de material reprocesable y reciclable que se añada realmente al material virgen en cada serie de producción se registrará por el fabricante de tubería.
- e) El contenido de PVC del producto final cumplirá con los requisitos especificados en 4.2.
- f) El ensayo tipo del producto final se llevará a cabo para la cantidad máxima especificada y para cada tipo de material reprocesable o reciclable con la especificación convenida.

4.4.3 Material reprocesable y reciclable externo no cubierto por una especificación convenida

Las tuberías y conexiones de PVC-U no contendrán este tipo de material.

CUADRO 1

Especificación de características a cumplir por el acuerdo y tolerancias máximas permitidas para estos ítems

Característica	Unidad	Método de ensayo	Desviaciones máximas permitidas
Contenido de PVC*)	% en masa	WI 137	± 4 % absoluto
Valor de K *)		WI 083	± 3 unidades
Densidad*)	kg/m ³	ISO 1183	± 20
Temperatura de ablandamiento Vicat *)	°C	prEN 727	± 2 unidades
Tamaño de partícula 1)	Los requisitos deberán acordarse e indicarse en la especificación.		
Tipo de estabilizador1)*)	Los requisitos deberán acordarse e indicarse en la especificación.		
Impurezas 1)	Se acordará e indicará en la especificación un método de ensayo relevante y los requisitos, basados en la fuente de material y en el proceso de reciclaje. Tanto el método de ensayo como los requisitos serán publicados.		

1) Los requisitos relevantes dependen del proceso de reciclaje y del producto final.

) Si la fuente del material es tuberías y conexiones producidas con una marca de calidad europea o nacional, no tienen que ensayarse aquellas características del material especificadas en esa norma relevante, siempre que uno o más de los requisitos a características marcadas con «» sean satisfechos.

5 CONDICIONES DE REFERENCIA PARA ENSAYO

Las propiedades físicas y mecánicas especificadas en todas partes de esta norma serán determinadas a $23 \pm 2^\circ\text{C}$, salvo que se especifique de otra forma.

PARTE 2: TUBERÍAS SIN ENVOLTURA

1 ÁMBITO

La Parte 2 especifica las propiedades requeridas para tuberías de PVC-U.

2 REFERENCIAS NORMATIVAS

- prEN 496. 1991. Sistemas de tubería de plástico - Tuberías y conexiones de plástico - Medidas de dimensiones e inspecciones visuales de superficies.
- EN 1411. Sistemas de tubería y conducción de plástico - Tuberías termoplásticas - Determinación de la resistencia a golpes externos por el método de incrementos y disminuciones.
- CEN/TC 155 WI 124. Capacidad de extensión.
- CEN/TC 155 WI 125. Prueba de fractura por fragilidad.
- ISO 3. Números seleccionados, series de números seleccionados.
- ISO 2507. Tuberías y conexiones termoplásticas - Temperatura de ablandamiento Vicat - Método de ensayo y especificación básica.
ISO 2507-1. Parte 1 de temperatura de ablandamiento Vicat: Método general.
ISO 2507-2. Parte 2 de temperatura de ablandamiento Vicat: Condiciones especiales para tuberías de PVC-U, PVC-C y PVC-HI.
- ISO 3126. Deficiencia de redondez.
- ISO 9967. Tuberías termoplásticas - Determinación de la relación de arrastre.
- ISO 9969. Tuberías termoplásticas - Determinación de la rigidez de anillo - Método de velocidad constante.

3 DEFINICIONES

Para los objetivos de esta parte, las definiciones y abreviaciones dadas en la Parte 1 son válidas junto con las siguientes.

3.1 Diámetro nominal (DN):

Designación numérica del diámetro externo (D_o) de la tubería declarado por el fabricante. En Escandinavia el diámetro nominal se basa en el diámetro interno (D_i) como se indica en el Cuadro 3.

3.2 Diámetro externo medio:

La longitud medida de la circunferencia externa de la tubería dividida por π ($= 3,142$) y redondeado al siguiente 0,1 mm mayor.

3.3 Longitud total:

La distancia entre dos planos normales al eje de la tubería, colocados en los extremos de las tuberías, medida a lo largo del eje de la tubería.

3.4 Longitud nominal:

Designación numérica de una longitud de tubería declarada por el fabricante, que es igual a la longitud total de la tubería en metros indicada por un número entero.

3.5 Rigidez de anillo:

El valor de la resistencia inicial a la deflexión radial bajo carga externa obtenido por ensayo según ISO 9969.

CUADRO 1

Características del material de tubería

Característica	Unidad	Requisito	Parámetro de ensayo	Método de ensayo
Vicat	°C	mínimo 77	penetración 1 mm 50 ± 1 N	TC 155 WI 043 (ISO 2507)

3.6 Relación de arrastre:

Una característica física de la tubería obtenida por ensayo según ISO 9967. Es una medida de la resistencia a largo plazo a la deflexión radial bajo carga externa.

4 MATERIAL DE TUBERÍA

El material del que se hacen las tuberías debe cumplir los requisitos indicados en la Parte 1.

5 REQUISITOS GENERALES

5.1 Apariencia

Cuando se observen sin aumento las superficies interna y externa de tuberías estarán limpias y libres de estrías u otros defectos superficiales. La superficie no estará pegajosa. Los extremos de la tubería serán perpendiculares al eje de la tubería y presentarán un corte limpio.

NOTA: La tubería puede ser de cualquier color.

5.2 Longitud nominal y tamaño de rollo

Salvo que se especifique de otra forma, las tuberías de más de 20 m y hasta DN 200 se entregarán en rollos y las tuberías mayores de DN 200 se entregarán en piezas rectas.

Salvo que se especifique de otra forma, las tuberías enrolladas de más de 20 m se entregarán en longitudes múltiplo de 5 m. A fin de ajustarse a máquinas de colocación continua, los diámetros interno y externo de un rollo de tubería se acordarán entre las partes interesadas, siempre que los requisitos funcionales de esta norma sean cumplidos.

Piezas de más de 3 m de longitud se suministrarán en longitudes múltiplo de 1 m.

5.3 Longitud total

La longitud total de la tubería no será menor que la longitud nominal declarada por el fabricante.

6 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

6.1 Diámetro

NOTA: El concepto general es que los valores de los diámetros externos sean la referencia para designar el tamaño nominal. Los fabricantes cuyos diámetros nominales se basen en D_i cumplirán con el correspondiente diámetro externo declarado por el fabricante para la norma de referencia.

Esta parte no incluye requisitos para espesor de paredes de tuberías y no hay intención de incluir estos requisitos en el futuro. Esto permite la máxima libertad posible en la elección del diseño.

El método de medición cumplirá con el método dado en prEN 496.

6.1.1 Diámetro nominal

El diámetro nominal se elegirá entre los dados en el Cuadro 2.

Los tamaños de diámetro que se basan en el diámetro interno se dan en el Cuadro 3.

La inclusión de estos diámetros se reconsiderará en la primera revisión de esta norma

6.1.2 Diámetros internos mínimos

El promedio de diámetros internos medios medidos no será menor que el mínimo D_i dado en el Cuadro 4 para diámetro nominal relevante (DN) si se miden con una precisión de 0,1 mm o del 0,05 por ciento, cualquiera que sea el valor mayor. Para la medición del diámetro interno hasta 180 mm se

CUADRO 2

Diámetros nominales DN/D_o (basados en D_o)

50	60	65	80	100	125	160	200 ¹
250	280	(296)	315	355	(375)	400	450
(470)	(475)	500	560	(580)	630 ²		

1 Para cualquier producción nueva de DN superior a 200, las dimensiones R20 de la serie de Renard en el cuadro se elegirán según se especifica en ISO 3 (las dimensiones no-R20 que aparecen entre paréntesis en el Cuadro 2 no son preferibles).

2 Actualmente no se fabrican tubos mayores de DN 630. Para esta gama superior de diámetros nominales se prefieren las dimensiones DN 710, 800, 900, 1000.

CUADRO 3

Medidas de diámetro basadas en D_i

Diámetro interno medio D_i (mm)	Desviaciones permitidas (mm)	Diámetro externo correspondiente D_o (mm)
50	-0 +2	58
65	-0 +2	75
80	-0 +3	92
113	-0 +3	127
145	-0 +5	160
180	-0 +5	200

CUADRO 4

Diámetros internos mínimos (basados en D_o)

DN/D_o	$D_{i\ min}$ mm	DN/D_o	$D_{i\ min}$ mm
50	43	315	280
60	52	355	315
65	57	375	315
80	70	400	355
100	90	450	400
125	113	470	417
160	143	475	400
200	180	500	450
250	224	560	500
280	250	580	500
296	250	630	530

usará un micrómetro interno o un pistón de medir con una precisión de 0,1 mm. Para D_i por encima de 180 mm puede usarse cualquier instrumento de medida adecuado.

6.1.3 Tolerancias sobre diámetro externo medio

El diámetro externo medio de una tubería no se desviará del diámetro nominal más de las desviaciones permisibles dadas en el Cuadro 5 si se mide de acuerdo con prEN 496.

6.2 Deficiencia de redondez

6.2.1 Requisito

Si se mide de acuerdo con 6.2.3 usando piezas de ensayo que cumplan con 6.2.2, la deficiencia de redondez (O) deberá ser menor que el valor aplicable dado en el Cuadro 6, equivalente al 10 por ciento de DN , donde (de acuerdo con ISO 3126) O , en mm, está dada por la siguiente ecuación:

$$O = D_{o\ max} - D_{o\ min}$$

Donde: $D_{o\ max}$ es el diámetro externo máximo en mm.

$D_{o\ min}$ es el diámetro externo mínimo en mm.

6.2.2 Longitud de las piezas de ensayo

La longitud L , en metros, de las piezas de ensayo será como sigue:

$$L = 0,2 \pm 5\% \text{ para tuberías con } DN \leq 200.$$

$$L = 0,4 \pm 5\% \text{ para tuberías con } DN > 200.$$

CUADRO 5

Diámetros externos medios de tuberías y tolerancias especificados

Diámetro nominal DN/D_o	Desviación permisible de diámetros externos medios	
	+ mm	- mm
≥ 50 y ≤ 100	1,0	1,5
≥ 125 y ≤ 200	1,5	1,5
≥ 250 y ≤ 400	1,5	2,0
≥ 450 y ≤ 630	1,5	4,0

CUADRO 6

Especificación de la deficiencia de redondez

DN/D_o	O (mm)	DN/D_o	O (mm)
50	5,0	315	31,5
60	6,0	355	35,5
65	6,5	375	37,5
80	8,0	400	40,0
100	10,0	450	45,0
125	12,5	470	47,0
160	16,0	475	47,5
200	20,0	500	50,0
250	25,0	560	56,0
280	28,0	580	58,0
296	30,0	630	63,0

6.2.3 Método de ensayo

En cada pieza de ensayo marcar cuatro líneas generatrices con un ángulo de aproximadamente 45° entre sí y en un plano perpendicular al eje de la tubería.

Usando un calibrador deslizante según prEN 496, medir los cuatro diámetros correspondientes y anotar las cuatro medidas individuales. Calcular la diferencia entre el valor mayor y el menor y relacionar la diferencia al valor nominal especificado en 6.2.1.

6.3 Perforaciones

6.3.1. General

Las perforaciones para recibir agua tendrán forma de ranura y se harán en los valles de las corrugaciones. La inspección para verificar conformidad se hará en una longitud de tubería de $1 \pm 0,01$ m tomada al azar.

6.3.2 Distribución de perforaciones

Las perforaciones estarán dispuestas de cualquier forma que resulte en una distribución uniforme alrededor de toda la circunferencia, en no menos de cuatro filas, con al menos dos perforaciones por cada 100 mm de cada fila.

6.3.3 Anchura de perforación

6.3.3.1 Anchura de perforación nominal

La anchura nominal de perforación elegida y declarada será de entre 1,0 y 2,3 mm con incremento de 0,1 mm.

6.3.3.2 Tolerancias

La anchura media de perforación no se desviará más de 0,2 mm del ancho de perforación nominal declarado.

Ninguna perforación excederá el ancho de perforación nominal en más de + 0,4 mm.

6.3.4 Área de perforación

El área total A (véase 6.3.5.4) de perforaciones efectivas por metro de tubería no será inferior a 1200 mm^2 .

6.3.5 Método de ensayo

6.3.5.1 Muestreo

En un trozo de tubería de $1 \pm 0,01$ m de largo, determinar el número de filas con perforaciones n . Sin considerar la calidad de las perforaciones, contar en cada fila el número de perforaciones, a_1, a_2, \dots, a_n . Sumar $N = a_1 + a_2 + \dots + a_n$. Sin considerar la calidad de las perforaciones y usando un cuadro de números al azar, marcar P perforaciones en cada fila de acuerdo con el Cuadro 7.

6.3.5.2 Medida

La medición de las dimensiones de la perforación (ancho y largo) se hará con un medidor de espesor o con un episcopio.

En caso de una perforación imperfecta (véase 6.3.5.3) el área de la perforación se tomará igual a cero.

6.3.5.3 Criterios para perforaciones imperfectas

Una perforación se considerará imperfecta en cualquiera de los casos siguientes:

CUADRO 7

Número de perforaciones P para el control de perforaciones

Número de filas con perforaciones (n)	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número de perforaciones a marcar en cada fila (P)	10	8	7	6	5	5	4	4	4

- a) La perforación no cumple con 6.3.3.2 respecto a su anchura.
- b) No existe perforación.
- c) Un trozo de material está aún adherido a la tubería en la circunferencia de la perforación.

6.3.5.4 Cálculos

Agregar las áreas de la superficie de las nP perforaciones. Supongamos que sea B . Calcular el área total de las perforaciones por metro lineal usando la ecuación siguiente:

$$A = (BN) / (nP)$$

Donde N es el número de perforaciones por metro lineal.

n es el número de filas.

P es el número de perforaciones marcadas en cada fila.

De las perforaciones nP medidas, anotar el número de perforaciones imperfectas. Supongamos que sea I_p . Calcular el porcentaje total de perforaciones imperfectas (d) aplicando la ecuación siguiente:

$$d = 100 I_p / (nP)$$

6.3.6 Requisito sobre perforaciones imperfectas

La cantidad de perforaciones imperfectas (d) no excederá el 10 por ciento del número total de perforaciones medidas, es decir, I_p no excederá $(nP)/10$.

7 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Se tomará la precaución necesaria al utilizar piezas de ensayo procedentes de tuberías enrolladas.

7.1 Resistencia a impacto

Si se ensayan de acuerdo con EN 1411, corregida según el Anexo A de esta Parte, se cumplirán los siguientes requisitos según sean aplicables:

- a) Si $50 \leq DN \leq 200$, las tuberías cumplirán los cuatro requisitos siguientes:

- $(X_f + X_p) / 2 = H_{50} \geq 0,9 \text{ m}$
- $H_{50sl} \geq 0,6 \text{ m}$
- $H_{50pl} \geq 0,6 \text{ m}$
- $H_{imin} \geq 0,4 \text{ m}$

- b) si $DN > 200$, la tubería cumplirá los cuatro requisitos siguientes:

- $(X_f + X_p) / 2 = H_{50} \geq 1,2 \text{ m}$
- $H_{50sl} \geq 0,9 \text{ m}$
- $H_{50pl} \geq 0,9 \text{ m}$
- $H_{imin} \geq 0,6 \text{ m}$

Donde: X_f es la media de las alturas de caída cuando ocurre fallo.

X_p es la media de las alturas de caída cuando las piezas pasaron el ensayo.

H_{50sl} designa las líneas de junta H_{50} .

H_{50pl} designa las líneas de perforación H_{50} .

H_{imin} designa la altura mínima de caída sin fallo del ensayo.

7.2 Rigidez de anillo

7.2.1 Requisitos

La rigidez de anillo (S_o) no será inferior al valor aplicable dado en el Cuadro 8, si se ensaya de acuerdo con ISO 9969.

CUADRO 8

Valores mínimos de rigidez de anillo

Diámetro nominal DN/D_0	Rigidez mínima de anillo (kN/m ²)	
	Series normales	Series especiales (apero-V)
50	6,3	8
> 50 y ≤ 80	4	8
≥ 100 y ≤ 125	2	4
> 125 y ≤ 630	2	No series especiales

7.2.2 Marcado de serie de rigidez de anillo

Todas tuberías tendrán en la etiqueta del rollo claramente indicado su serie correspondiente, es decir, serie «normal» o «especial».

7.3. Relación de arrastre

Si se ensayan de acuerdo con ISO 9967 la relación de arrastre no será mayor de 2,7.

7.4. Extensibilidad

Esta característica no es aplicable para $DN > 200$. Si se ensayan según EN [155 WI 124], ninguna pieza probada tendrá una elongación mayor de

55 mm. El resultado se considera satisfactorio si la primera pieza ensayada tiene una elongación menor de 45 mm. Si la primera pieza probada tiene una elongación entre 45 y 55 mm, la media de las elongaciones de esta pieza ensayada y de dos pruebas más será inferior a 50 mm.

7.5 Ensayo de fractura por fragilidad (prueba de tensión rápida)

Esta característica se aplica solamente a tuberías de hasta DN 80 inclusive.

Si se ensaya de acuerdo con EN [155 WI 125], sin considerar el primer fallo que ocurra dentro de un diámetro nominal, el resultado de tres piezas probadas no incluirá más de un fallo. Si ha ocurrido un fallo, los resultados de las seis piezas de ensayo posteriores no incluirán ningún fallo.

7.6 Conformidad del acopio

Para asegurar la conformidad del material en su entrega, los fabricantes demostrarán el cumplimiento con la norma de acuerdo con la Parte 7.

8 MARCA

La marca y etiqueta de todas tuberías cumplirá con el 5° borrador de AHG 30. Además, se aplica lo siguiente:

8.1 Tubería

Cada tubería estará marcada clara e indeleblemente al menos cada 6 m. La marca incluirá la información siguiente:

- El nombre del fabricante, la marca registrada o ambos.
- El diámetro nominal.
- El material (PVC-U).
- El año de fabricación grabado.
- La marca «CE» y la marca voluntaria de certificación europea.

NOTA: Son opcionales la marca registrada, la identificación de la unidad de fabricación y la fecha de fabricación completa.

8.2 Etiquetado

Se adjuntará a la tubería una etiqueta de rollo o algo similar que incluirá la información siguiente:

- El nombre del fabricante, la marca registrada o ambos.
- La identificación del lugar de fabricación.
- El diámetro nominal.
- El material (PVC-U).
- La anchura nominal de las perforaciones, en mm.
- «L normal» o «L especial» («L» para drenaje de tierras y «normal» o «especial» en relación con las series de rigidez de anillo según 7.2).

- g) La longitud de tubería o de rollo, en m.
- h) La marca «CE» y la marca voluntaria de certificación europea.
- i) La fecha de fabricación (es decir, año, mes y día: p. ej. 92.06.05).

NOTA: Las marcas registradas y otras marcas de calidad son opcionales.

8.3 Información adicional

El fabricante de tuberías declarará una lista de fabricantes de conexiones compatibles, de marcas registradas o de ambas.

ANEXO A NORMATIVO (EN RELACIÓN CON 7.1)

Parámetros adicionales para EN 1441 sobre el método de determinación del punto medio por incrementos y disminuciones

El método de ensayo dado en EN 1411 se modificará como sigue, donde los números de cláusula dados corresponden a los de EN 1411.

5.1 Preparación

Antes de cortar la pieza a ensayar, las dos líneas de junta se marcarán con diferentes colores.

5.2 Número

- a) Pueden usarse hasta 10 piezas para cada parte del ensayo preliminar (véase 7.2).
- b) Se utilizan 32 piezas para el ensayo principal (véase 7.3).

6 ACONDICIONAMIENTO

Acondicionar las piezas a ensayar en un baño líquido durante 15 minutos o durante 60 minutos en aire a $0 \pm 1^\circ\text{C}$.

7.1 General

- a) El percutor será del tipo d90 con una masa de 1 kg.
- b) La orientación de la circunferencia de la pieza a ensayar en el bloque-V cumplirá con 7.2 y 7.3 (según la modificación de este Anexo).
- c) Fallo

Se considera un golpe como un fallo si se da alguna de las siguientes circunstancias:

- La pieza ensayada se rompe en dos o más partes.
- La pieza ensayada se fragmenta (véase el detalle A de la Figura A.1).
- La pieza ensayada muestra al menos una rotura que une ininterrumpidamente un par de perforaciones cualquiera (véase el detalle B de la Figura A.1).
- Puede verse a simple vista una rotura mayor de 5 mm sobre la línea de junta.

En la Figura A.1 se muestran ejemplos de estos casos.

7.2 Procedimiento del ensayo preliminar

Toda la cláusula 7.2 se reemplaza por el siguiente texto:

NOTA: El propósito del ensayo preliminar es obtener una indicación del valor H_{50} e identificar la primera pieza a ensayar cuyo resultado se usará en la prueba principal (véase 7.3). El ensayo preliminar incluye dos series con hasta 10 piezas a ensayar en cada serie: si se prueban de acuerdo con 7.2.3, los fallos de cada una de las primeras dos piezas ensayadas se consideran indicativos de un H_{50} menor que el valor especificado, de una excesiva dispersión de resultados o de ambas cosas.

7.2.1

Establecer la altura de caída del percutor a 0,4 m.

7.2.2

Después del acondicionamiento (véase la cláusula 6) para cada pieza a ensayar, en 10 segundos:

- En la serie uno, impactar las piezas a ensayar sobre una línea de perforaciones seleccionada al azar, determinar y registrar si la pieza ensayada falla o no y cómo falla, y anotar los valores de la altura de caída.
- En la serie dos, impactar las piezas a ensayar alternativamente sobre la línea de junta una y sobre la línea de junta dos.

7.2.3 Línea de junta

Si la primera pieza ensayada falla, probar una segunda pieza y si ésta también falla registrar entonces la tubería como no apta en la prueba de impacto.

7.2.4

Esta cláusula de apoyo de la norma no es aplicable aquí.

7.2.5 Línea de perforaciones

Si la primera pieza ensayada falla, probar una segunda pieza y si ésta también falla registrar entonces la tubería como no apta en la prueba de impacto.

7.2.6

Considerar la altura de caída, a la cual la primera pieza ensayada falla en cada serie, como la altura inicial de caída a usar en las series correspondientes de la prueba principal.

7.3 Ensayo principal

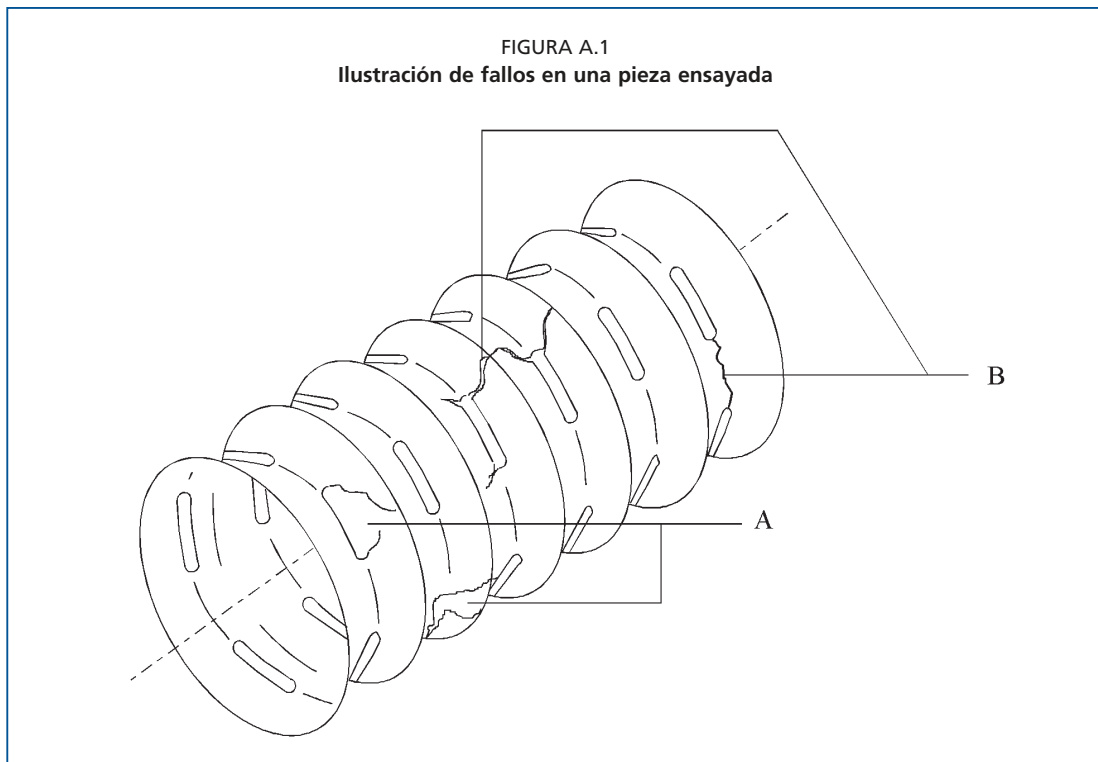
El ensayo principal también está dividido en dos series. Cada serie incluye 16 piezas de ensayo.

En la serie uno, asegurar que cada pieza a probar es golpeada por el percutor sobre una línea de perforación seleccionada al azar. En la serie dos, asegurar que las piezas a ensayar son golpeadas por el percutor alternativamente sobre la línea de junta uno y sobre la línea de junta dos.

Registrar los valores de la altura de caída para las piezas ensayadas y anotar si la pieza ensayada falló o no.

Calcular el nivel de fallo H_{50} usando la siguiente ecuación:

$$H_{50} = (X_p + X_f) / 2$$



Donde

X_f es el promedio de las alturas de caída cuando ocurrió fallo.

X_p es el promedio de las alturas de caída cuando las piezas pasaron la prueba.

Calcular dos valores de H_{50} , designados H_{50pl} y H_{50sl} como sigue:

H_{50pl} es el valor deducido de los 16 golpes sobre las líneas de las perforaciones.

H_{50sl} es el valor derivado de los 16 golpes sobre las líneas de junta.

Un golpe se considera un fallo si:

- La pieza ensayada se rompe en dos o más partes.
- La pieza ensayada se fragmenta (detalle A).
- La pieza ensayada muestra al menos una rotura que une ininterrumpidamente un par de perforaciones cualquiera (detalle B).
- Puede verse a simple vista una rotura mayor de 5 mm sobre la línea de junta.

PARTE 3: CONEXIONES

1 ÁMBITO

La Parte 3 especifica los requisitos para conexiones de PVC-U. También especifica los parámetros de ensayo para los métodos de prueba a que se refiere esta Parte de esta norma.

Pueden utilizarse conexiones de polietileno (PE) y de polipropileno (PP) con tuberías de PVC-U.

2 REFERENCIAS NORMATIVAS

- ISO 2507. Tuberías y conexiones termoplásticas - Temperatura de ablandamiento Vicat - Método de ensayo y especificaciones básicas.
 - ISO 2507-1. Temperatura de ablandamiento Vicat - Parte 1: Método general.
 - ISO 2507-2. Temperatura de ablandamiento Vicat - Parte 2: Condiciones especiales para tuberías de PVC-U, PVC-C y PVC-HI.
- ISO 4439. Tuberías y conexiones PVC-U - Determinación y especificación de densidad.
- CEN/TC 155 WI 127. Resistencia de juntas.

3 DEFINICIONES

Para los propósitos de esta norma europea, en la figura A.1 del Anexo A se ilustran los siguientes términos: acople, unión en T, unión en Y, unión de clip, reductor, tapón final y tapón cónico, tubo de salida, rejilla de bichos.

4 ESPECIFICACIÓN PARA MATERIAL DE CONEXIONES (HECHAS DE PVC-U)

El material con el que están hechas las conexiones será PVC-U y cumplirá los requisitos especificados en la Parte 1 de esta norma. Además, las conexiones hechas de PVC-U cumplirán los requisitos de el Cuadro 1.

Las conexiones fabricadas a partir de tuberías cumplirán con la temperatura de ablandamiento Vicat requerida para tuberías según la Parte 2 de esta norma, es decir 77°C.

5 REQUISITOS GENERALES

5.1 Tipos de conexiones

Los tipos de conexiones incluyen los siguientes:

- Acoples.
- Uniones (unión en T o unión en Y).
- Uniones clip.
- Reductores.
- Tapones finales y tapones cónicos.
- Tubos de salida.

5.2 Apariencia

Las superficies interna y externa de conexiones serán suaves, limpias y sin estrías, ampollas y cualquier otra irregularidad de la superficie que perjudique su

CUADRO 1

Requisitos del material para conexiones moldeadas de PVC-U

Característica	Unidad	Requisito	Parámetro de ensayo	Método de ensayo
Vicat	°C	mínimo 79	1 mm de penetración 50 ± 1 N	TC 155 WI 043 (ISO 2507)

funcionamiento. Los extremos de conexión estarán cortados limpiamente y serán perpendiculares al eje de la conexión.

NOTA: Las conexiones pueden ser de cualquier color.

6 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

6.1 Dimensiones de conexiones

6.1.1 Diámetro

El (los) diámetro(s) nominal(es) (DN) de una conexión corresponderá(n) y será(n) diseñado(s) según el (los) diámetro(s) nominal(es) de las tuberías para las que se diseñan, según la Parte 2 de esta norma.

El diámetro interior máximo (D_i) para conexiones cumplirá los valores aplicables dados en el Cuadro 2.

La diferencia entre el diámetro interno máximo de la conexión medido en mm y el diámetro nominal (diámetro externo en Escandinavia) de la tubería en la que se instala será inferior a 1,5 mm hasta DN 80 inclusive, inferior a 2,0 mm para $DN > 80$ hasta DN 125 inclusive, y 2,5 mm para $DN > 125$.

6.1.2 Espesor de pared mínimo

El espesor mínimo de pared (e) de conexión será como sigue:

- $e \geq 1,5$ mm para DN 50 hasta DN 80 inclusive.
- $e \geq 1,8$ mm para $DN > 80$ y $DN \leq 125$.
- $e \geq 2,5$ mm para DN mayor de 125.

NOTA: Ángulos

Los ángulos nominales preferidos para uniones son: 30°, 45°, 60°, 67,5°, 90°.

NOTA: Largo de inserción

Las conexiones deberán permitir la unión entre dos diferentes rollos de tuberías o entre una tubería más grande y otra más pequeña. Esto se hará de tal manera que se impida la entrada de suelo en los drenes y también para impedir que el extremo final de la tubería menor sobresalga en la tubería mayor y obstruya el flujo. Ninguna conexión deberá cubrir u obstruir las perforaciones por una longitud mayor de 300 mm para tuberías de hasta DN 125 inclusive y de 400 mm para tuberías de más de DN 125 hasta DN 630 inclusive.

7 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

7.1 Fuerza de ensamblado y empuje mediante ensayo de fuerza

No se requiere esta prueba para DN mayores de 200 mm.

Si se ensaya de acuerdo con EN [115WI 127]-1, las fuerzas, en N, cumplirán con los valores aplicables dados en el Cuadro 3.

7.2 Resistencia a separación (fuerza de tracción)

Si se ensaya de acuerdo con EN [155 WI 127]-2 y según las fuerzas indicadas en el Cuadro 4, la unión no se separará.

CUADRO 2

Requisitos para diámetros internos máximos

DN de la tubería	$D_{i\ max}$ (mm)	DN de la tubería	$D_{i\ max}$ (mm)
50	51,5	100	102,0
60	61,5	125	127,0
65	66,5	160	162,5
80	81,5	200	202,5

CUADRO 3

Requisitos para fuerza de ensamblado y empuje-mediante fuerza

<i>DN</i>	Fuerza de ensamblado	Empuje-mediante fuerza
≥ 50 y ≤ 125	≤ 200 N	≥ 300 N
> 125 y ≤ 200	≤ 300 N	≥ 400 N

CUADRO 4

Fuerza requerida para resistencia a separación

<i>DN</i>	Fuerza aplicada
≤ 65	150 N
$65 < y \leq 110$	200 N
≥ 110	300 N

8 MARCA**8.1 Conexión**

- a) Las conexiones se marcarán en forma clara y duradera de modo que la legibilidad se mantenga durante el manejo, almacenamiento e instalación de acuerdo con la Parte 6 de esta norma.

La marca puede imprimirse o grabarse en las conexiones. La marca no dañará la conexión.

La marca incluirá la información siguiente:

- El nombre del fabricante, la marca registrada o ambos.
- La dimensión (*DN(s)*) y el ángulo si es relevante.
- El material.
- La marca «CE» y la marca voluntaria de certificación europea.
- La letra «L».

8.2 Etiquetado

La etiqueta se fijará directamente sobre el embalaje sin cuerda.

La etiqueta deberá incluir la siguiente información:

- El nombre del fabricante, la marca registrada o ambos.
- La identificación del lugar de fabricación.
- La dimensión (*DN(s)*) y el ángulo si es relevante.
- El material.
- La otra marca de calidad.
- La fecha de fabricación: año y mes.
- La marca «CE» y la marca voluntaria de certificación europea.
- La letra «L».

Todas las marcas permanecerán legibles hasta la instalación de las conexiones.

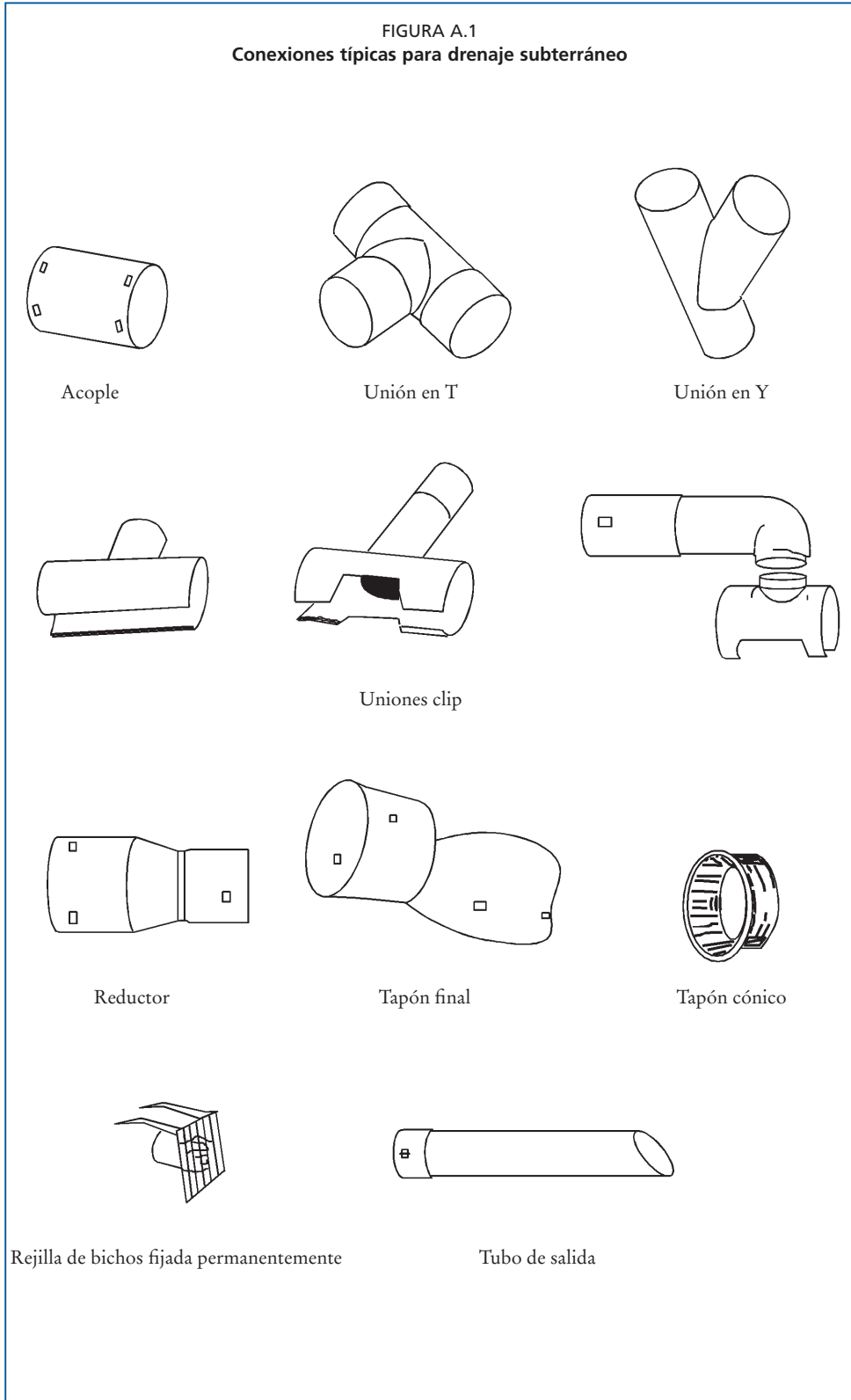
Si se prefiere, la información de la etiqueta del embalaje puede mencionarse sobre la misma conexión.

8.3 Información adicional

El fabricante de tubería declarará una lista de fabricantes de conexiones compatibles, de marcas registradas o de ambas cosas.

ANEXO A (INFORMQATIVO)

Uniones y conexiones de tubería típicas



PARTE 4: ENVOLTURAS

1 ÁMBITO

La Parte 4 especifica los requisitos aplicables a envolturas utilizadas para tuberías revestidas.

También especifica los parámetros de ensayo para los métodos de prueba a los que se refiere esta norma.

2 REFERENCIAS NORMATIVAS

- ISO 554. Ambientes estándar para acondicionar, ensayar o ambas cosas - especificaciones.
- ISO 565. Tamices para ensayo - Malla de alambre, placa de metal perforado y lámina conformada eléctricamente - Tamaños nominales de aberturas.
- ISO 9862. Geotextiles - Muestreo y preparación de muestras para ensayo.
- ISO 9863. Geotextiles - Determinación de espesor a presiones específicas.
- ISO 9864. Geotextiles - Determinación de masa por unidad de superficie.
- ISO 10318. Geotextiles - Vocabulario.
- EN ISO 10320. Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Identificación in situ.
- EN ISO 12956. Geotextiles y productos relacionados con geotextiles - Determinación del tamaño de abertura característico.

3 DEFINICIONES

Para los objetivos de esta Parte se aplican las definiciones dadas en otras Partes de esta Norma Europea conjuntamente con las siguientes:

3.1 Geotextil:

Un material textil, sintético o natural, polimérico, permeable, en forma de lámina manufacturada que puede ser tejido, no tejido o tricotado, utilizado en aplicaciones de ingeniería geotécnica y civil.

NOTA La definición de geotextil «tejido», «no tejido» o «tricotado» está incluida en ISO 10318.

NOTA: El término «geotécnico» mencionado anteriormente incluye la aplicación en drenaje de tierras.

3.2 Material suelto enrollado previamente (PLM):

Una estructura permeable que consiste de hilos, fibras, filamentos, granos, gránulos o cuentas, sueltas y orientadas al azar, que reviste una tubería de drenaje corrugada, colocada dentro de un revestimiento permeable o sujeta por una malla apropiada y que se usa en aplicaciones de drenaje.

3.3 Límite del diámetro de partícula d_m :

Diámetro de partícula de suelo en el que el m por ciento de las partículas de suelo, en peso seco, son más finas que ese tamaño de grano.

3.4 Índice de tamaño de poro O_{90} :

Tamaño de abertura perteneciente al 90 por ciento del tamaño de partícula (d_{90}), retenido por la envoltura como resultado del cernido con fracciones de arena específicas.

3.5 Índice de tamaño de poro O_{95} :

Tamaño de abertura perteneciente al 95 por ciento del tamaño de partícula (d_{95}), retenido por la envoltura como resultado del cernido con fracciones de arena específicas.

4 MUESTREO Y ACONDICIONAMIENTO

4.1 Muestreo

De cinco rollos seleccionados, cortar cinco piezas de tubería limpias y sin daños, de al menos 2,5 m de largo cada una. Evitar daños a la envoltura o que ésta se afloje.

Marcar las secciones de tubería para su identificación respecto a:

- Marca registrada/nombre del fabricante.
- Información proporcionada sobre la cinta de marca y opcionalmente sobre la etiqueta adjunta.
- Número de rollo u otra identificación.
- Fecha de muestreo.

Secar secciones húmedas a un máximo de 40°C y a una humedad relativa máxima del 50 por ciento hasta que se obtenga una masa constante.

Almacenar las secciones de tubería en un lugar sin polvo, en un ambiente seco y oscuro, a temperatura ambiente y protegidas de daños químicos y físicos, si no se ensayan en 24 horas.

4.2 Preparación de muestras

Cortar cuidadosamente un trozo de 1000 ± 5 mm de cada una de las tuberías de drenaje revestidas para determinar espesor y masa.

Cortar cuidadosamente otro trozo de 500 ± 5 mm de cada una de las tuberías de drenaje revestidas para determinar el índice de tamaño de poro.

Solamente para geotextiles, cortar cuidadosamente un trozo de 1000 ± 5 mm de cada una de las tuberías de drenaje revestidas para medir la capacidad de humectación.

Transferir la marca de identificación de cada sección de tubería a las muestras correspondientes.

Almacenar las muestras sin polvo, en un ambiente seco y oscuro, a temperatura ambiente y protegidas de daños químicos y físicos, hasta que no se lleven a cabo los ensayos.

4.3 Acondicionamiento

Acondicionar las muestras de acuerdo con ISO 554 por un período de 24 h.

5 ESPECIFICACIONES

NOTA: El material del que están hechas las envolturas no se especifica pero debe cumplir los requisitos de esta norma.

NOTA: Como los requisitos de los ensayos de geotextiles son significativamente diferentes de los de PLM, en la mayoría de casos las especificaciones deben ser específicas para cada una de estas dos categorías.

5.1 Requisitos generales

NOTA: Estos requisitos se aplican a geotextiles y PLM.

5.1.1 Apariencia

La envoltura será regular sin mostrar agujeros evidentes al inspeccionarse visualmente sin aumento.

NOTA: El material envolvente puede ser de cualquier color.

5.2 Especificaciones para geotextiles

5.2.1 Espesor

El espesor nominal no se desviará más del 10 por ciento del declarado por el fabricante, si se mide de acuerdo con ISO 9863.

5.2.2 Masa por unidad de superficie

La masa por unidad de superficie no se desviará más del 10 por ciento de la declarada por el fabricante, si se mide de acuerdo con ISO 9864.

5.2.3 Índice de tamaño de poro

El tamaño de abertura no se desviará más del 30 por ciento del declarado por el fabricante de filtros, si se mide de acuerdo con EN ISO 12956.

5.2.4 Capacidad de humectación

La carga de agua no excederá de 5 mm y el área mojada será el 100 por ciento de la superficie de las diez piezas ensayadas, si se mide de acuerdo con el Anexo A de esta Parte.

5.3 Especificaciones para PLM**5.3.1 Requisitos de espesor**

Si se mide de acuerdo con los métodos descritos en el Anexo B, los requisitos serán los siguientes:

a) *Espesor mínimo*

El requisito de espesor mínimo dependerá del material usado según se indica en el Cuadro 1.

b) *Requisito de la media de espesor medio*

La media de espesor medio de cada pieza ensayada no se desviará más del 25 por ciento de lo declarado por el fabricante.

5.3.2 Masa por unidad de superficie

Si se determinan de acuerdo con el Anexo C, las medidas individuales no se desviarán más del 25 por ciento de la masa por unidad de superficie declarada por el fabricante.

5.3.3 Índice de tamaño de poro

Todas las medidas individuales del tamaño O_{90} estarán comprendidas entre los límites dados para la clase mencionada en la marca, si se determina de acuerdo con el Anexo D.

Dependiendo del índice del tamaño de poro O_{90} se aceptan dos clases de PLM:

PLM-F (F: fino)	$300 \mu\text{m} \leq O_{90} < 600 \mu\text{m}$
PLM-S (S: estándar)	$600 \mu\text{m} \leq O_{90} \leq 1100 \mu\text{m}$

6 MARCA

La información requerida para geotextiles (véase el Cuadro 2) estará impresa si es posible sobre la envoltura, al menos en ambos extremos del rollo.

Si no es posible marcar sobre la envoltura de otros geotextiles y PLM, se marcará sobre una cinta adhesiva al menos en ambos extremos del rollo, salvo que no sea posible imprimir toda la información requerida sobre la cinta de marca, en cuyo caso puede darse la información en una etiqueta atada a la tubería o sobre el propio geotextil. Al menos la fecha de fabricación y revestimiento permanecerá sobre la tubería revestida después de la instalación.

Las marcas incluirán la información requerida en el Cuadro 2.

La marca será resistente a la intemperie y legible después de la instalación.

CUADRO 1

Espesor mínimo (e_{min}) en mm, requisito para materiales sueltos colocados previamente

Sintético		Orgánico	
Fibroso	Granular	Fibroso	Granular
3,0	8,0	4,0	8,0

CUADRO 2

Requisitos mínimos de la marca

Información	Geotextil	PLM
Nombre de la compañía de revestimiento	√	√
Materia prima del filtro	√	√
Tipo de filtro	WG: geotextil tejido KG: geotextil tricotado NG: geotextil no tejido	PLM
Espesor	opcional	√
Masa por unidad de superficie	opcional	√
Índice del tamaño de poro	opcional	F o S (véase 5.3.3)
Fecha de revestimiento	(año/mes/día)	(año/mes/día)

ANEXO A (NORMATIVO)

Determinación de la capacidad de humectación de un geotextil

A.1 Definiciones

Capacidad de humectación: capacidad de un geotextil seco de tener una pequeña resistencia inicial a la penetración de agua.

A.2 Principio

La resistencia de un geotextil al paso de agua se mide por:

- La presión hidráulica máxima (b) necesaria para atravesar el geotextil perpendicularmente a su plano.
- El porcentaje del área (s) de paso del agua a través del geotextil. Esta superficie es el área exterior humedecida.

Se somete progresivamente a una pieza de ensayo plana de geotextil a una presión hidráulica creciente.

Se registran la presión hidráulica máxima necesaria para que el agua pase completamente a través de la pieza ensayada así como la superficie humedecida.

A.3 Aparato

A.3.1 Un cilindro medidor, hecho de un material transparente, de diámetro interno de al menos 80 mm, con una placa en la base que incluye una malla rígida que pueda soportar la pieza a ensayar. Entre esta pieza y el aro adyacente del cilindro se coloca un sello de material elastómero o de silicona resistente al agua.

A.3.2 Una fuente de agua, que consta de un recipiente con agua desde el que puede aplicarse una presión hidráulica creciente. El aparato está diseñado de forma que la presión hidráulica se aplica verticalmente, tanto desde la parte superior hacia abajo o viceversa. El agua usada para el ensayo puede colorearse con una solución al 1 por 1000 de tintura fluorescente de tipo $C_{20}H_{10}Na_2O_5$.

A.3.3 Un mecanismo para medir presión, comprendiendo una de las siguientes formas (véanse las Figuras A.1 y A.2):

- a) Si el agua fluye en sentido descendente, la presión puede medirse por la carga de agua en el cilindro.
- b) Si el agua fluye en sentido ascendente, la presión puede medirse con una célula dinamométrica.

NOTA: Aparato recomendado (medidor de humectación). El abastecimiento de agua en forma descendente es de construcción simple (véase la Figura A.3) pero su diseño necesita considerar el riesgo de obstrucciones por fluoresceína. Para su limpieza periódica es necesario poder conectar y desconectar el tubo de acero inoxidable y retirar la base del recipiente y el cilindro medidor de forma conveniente (véase la Figura A.4-a y la Figura A.4-b).

A.3.4 Determinación de espesor

Los medios para determinar el espesor de una pieza bajo ensayo de hasta 0,01 mm están especificados en ISO 9863.

FIGURA A.1
Aparato con abastecimiento de agua desde la parte superior hacia abajo

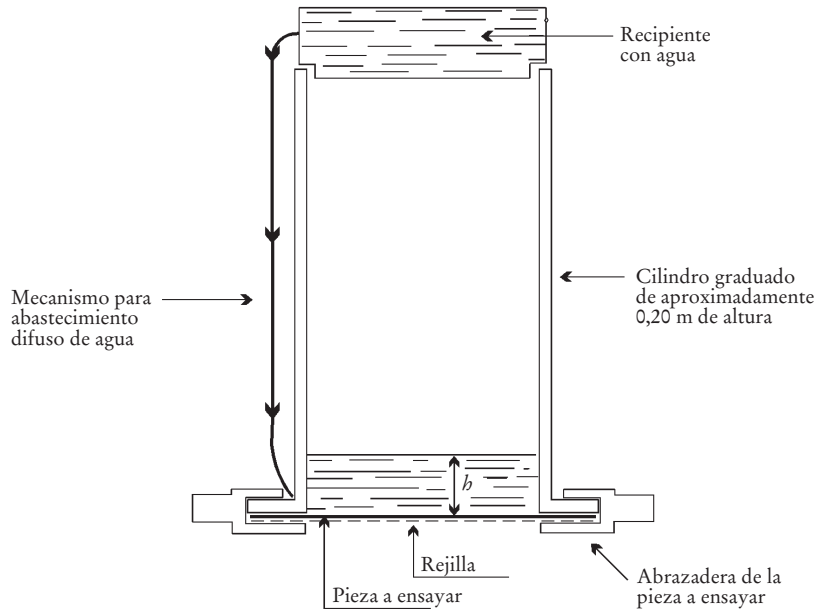


FIGURA A.2
Aparato con abastecimiento de agua desde el fondo hacia arriba

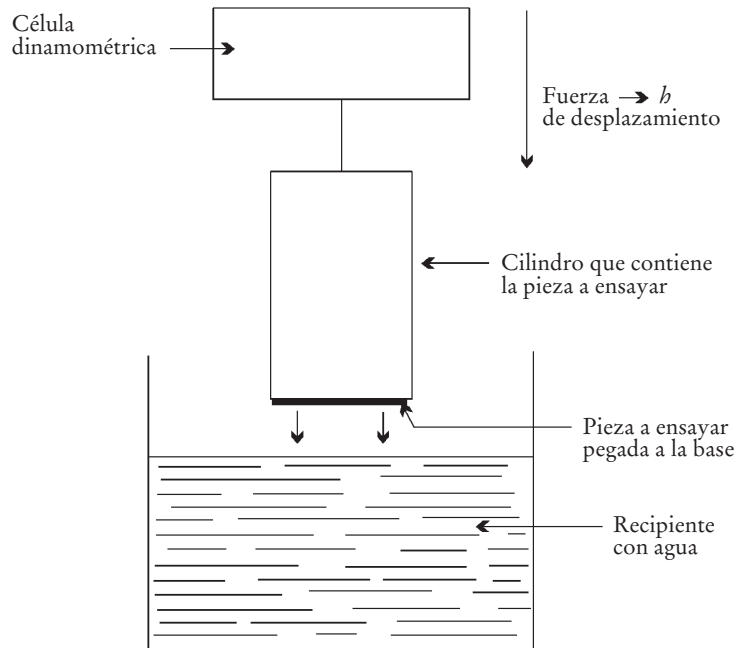


FIGURA A.3
Medidor de humectación: croquis general

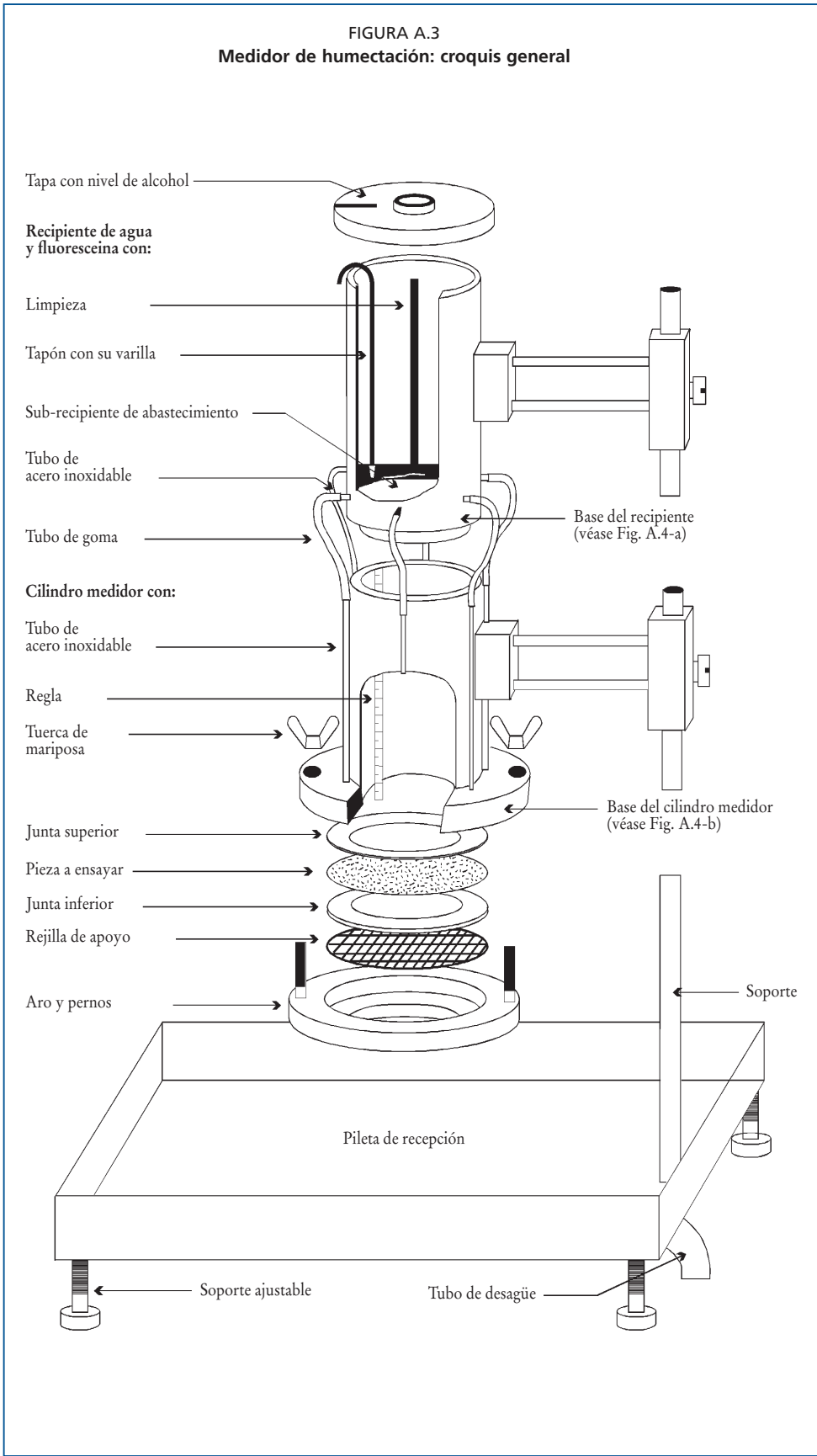


FIGURA A.4a
Base del recipiente

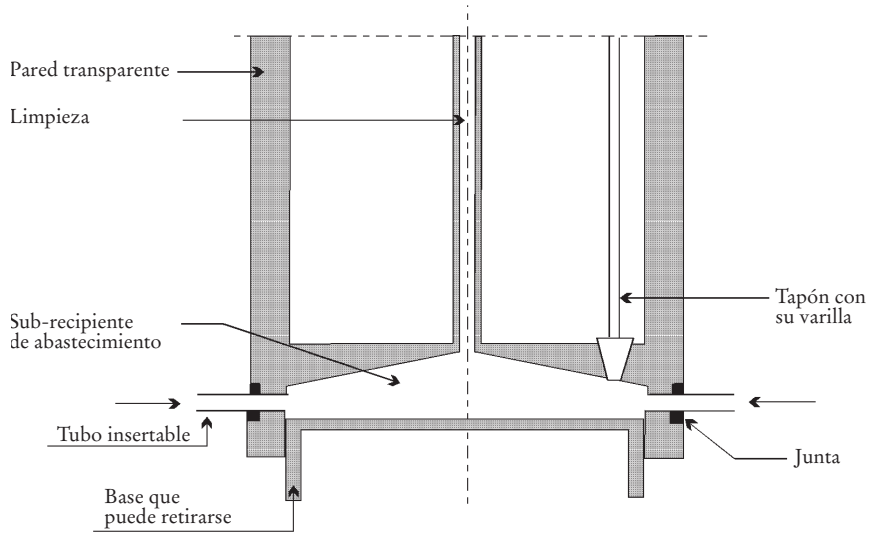
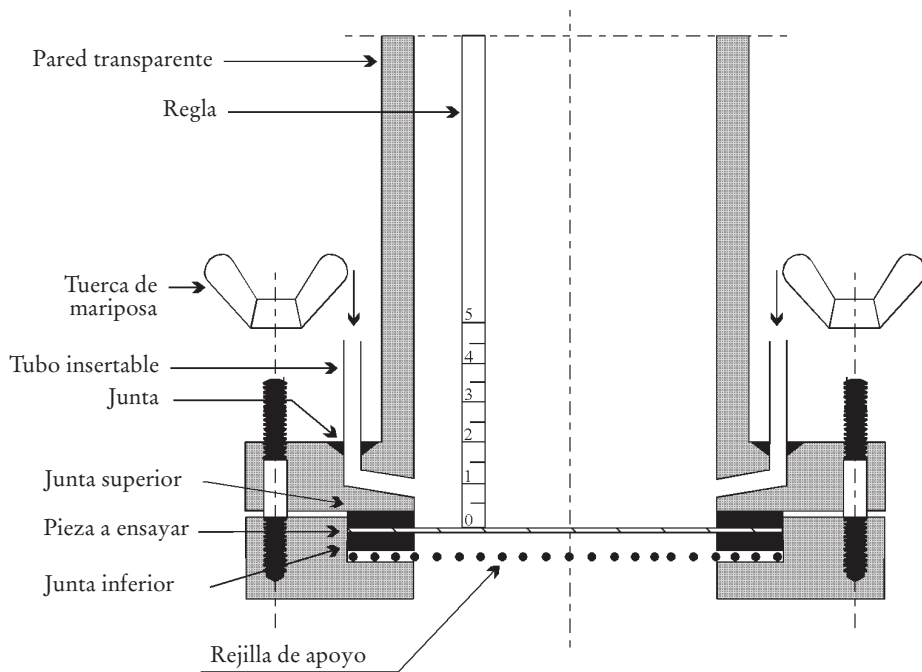


FIGURA A.4b
Base del cilindro medidor



A.3.5 Determinación de masa por unidad de superficie

Los medios para determinar la masa por unidad de superficie de una pieza a ensayar de hasta 0,01 g/m² se especifican en ISO 9864.

A.4 Pieza a ensayar

A.4.1 Preparación

La pieza de ensayo consistirá de un corte plano de una muestra del geotextil que se ajuste a la base de un cilindro (A.3.1) teniendo un diámetro interno de al menos 80 mm.

NOTA: El geotextil deberá manipularse lo menos posible y no doblarse para evitar cualquier alteración de su estructura superficial.

A.4.2 Muestreo

Se cortarán al menos diez piezas de ensayo de posiciones regularmente distribuidas a lo largo y a lo ancho de una muestra de material geotextil de al menos 1 m de largo tomada al azar.

NOTA: Se recomienda obtener piezas de ensayo adicionales para reemplazar aquellas que puedan descartarse en el caso de filtración por sus bordes durante el ensayo.

A.5 Acondicionamiento

Mantener cada pieza a ensayar durante 24 h en uno de los ambientes de ensayo descritos en ISO 554.

Mantener la pieza de ensayo en una posición horizontal sin ninguna carga.

A.6 Procedimiento

Montar y sellar la pieza de ensayo en posición en el extremo apropiado del cilindro (A.3.1). Después de verificar que el cilindro medidor está vertical, incrementar la presión hidráulica a razón de en torno a 10 mm/min. Registrar la altura máxima de agua alcanzada con una precisión de 1mm.

Observar durante la prueba el paso de agua a través de la pieza de ensayo y rechazar como insatisfactoria cualquier prueba en la que pase agua por la junta. Repetir estas pruebas utilizando una nueva pieza de ensayo.

Medir el (las) área(s) efectiva(s) de paso de agua en la superficie externa de la pieza de ensayo usando cualquier método adecuado para determinar los límites del (las) área(s) mojada(s).

NOTA: Se recomienda hacer la observación bajo la luz de una lámpara ultravioleta.

Medir, en mm², las áreas de paso de agua, con una precisión del 1%.

Cuando la carga de agua llegue a 100 mm, medir el tiempo necesario para que el agua penetre.

A.7 Resultados

Para cada pieza de ensayo registrar la presión hidráulica máxima, con una precisión de 1 mm y el porcentaje del área de paso respecto al área total de la pieza, con una precisión del 1% de variación.

Calcular la media aritmética de los valores obtenidos y el coeficiente de variación. Para las piezas de ensayo válidas usadas, es decir, excluyendo aquellas rechazadas según A.6, calcular la masa media por unidad de superficie y el espesor medio.

A.8 Informe de ensayo

El informe de la prueba incluirá como mínimo la información siguiente:

- a) El número y fecha de esta norma.
- b) La identificación del geotextil de acuerdo con EN ISO 10320.
- c) La masa por unidad de superficie de cada pieza de ensayo y la masa media por unidad de superficie de las piezas de ensayo.
- d) El espesor nominal correspondiente a la pieza de ensayo y el espesor medio de las piezas de ensayo.
- e) Detalles del aparato usado, incluyendo un esquema.
- f) El área de las piezas de ensayo expuestas.
- g) Los resultados tabulados de los datos experimentales y los cálculos.
- h) La carga de agua media debida a la resistencia a penetración de agua y el valor de la máxima carga hidráulica debida a dicha resistencia.
- i) Los tiempos medio y máximo requeridos para penetración de agua después de alcanzarse 100 mm de carga de agua.
- j) Los porcentajes medio y máximo del área humedecida de las piezas ensayadas.

ANEXO B (NORMATIVO)

Determinación del espesor de material suelto enrollado previamente (PLM)

B.1 Principio

Como espesor mínimo se toma la menor distancia entre las determinadas mediante agujas que atraviesan el material suelto colocado previamente. Para el espesor medio, se miden con una cinta métrica, a una presión especificada, el diámetro de la tubería revestida y el de la sin revestir.

B.2 Espesor mínimo

La determinación del espesor mínimo (e_{min}) de la envoltura se hará sobre cinco muestras de una longitud de 1000 mm, con un instrumento de medir como se muestra en la Figura B.1.

El instrumento de medir tendrá un rango de medida de hasta 20 mm con una precisión de lectura de 0,1 mm.

Inspeccionar visualmente las secciones de tubería para estimar el espesor mínimo.

Poner la base sobre una superficie plana y dura y ajustar el calibrador a cero.

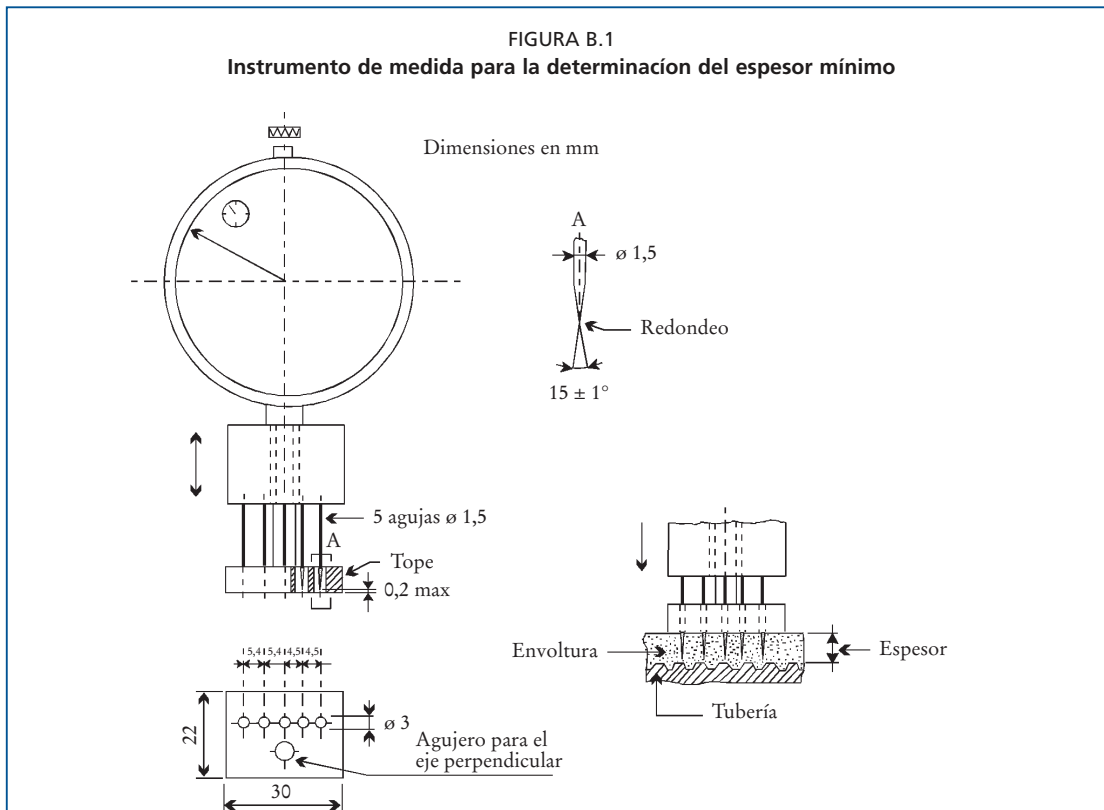
Apretar (a mano) las agujas a través de la envoltura hasta que al menos una alcance la pared de la tubería.

Leer el espesor mínimo y redondear el valor medido al 0,1 mm más próximo.

B.3 Media de espesor medio

B.3.1 Instrumento

La determinación de la media del espesor medio (e) de la envoltura en las cinco muestras con una longitud de 1000 mm, es decir, de hecho la pieza de ensayo, necesita una cinta métrica sujeta a un peso de $1,75 \pm 0,25$ N para una cinta de un ancho de 8 mm; el peso será de $2,50 \pm 0,25$ N para una cinta de 16 mm de ancho; el peso necesario para anchuras de cinta entre 8 y 16 mm se interpolará linealmente entre 1,75 N y 2,50 N.



B.3.2 Procedimiento

Con una cinta métrica con una precisión de 0,1 mm determinar cuatro veces la circunferencia externa o directamente el diámetro externo de tubería más envoltura en lugares regularmente distribuidos en la pieza de ensayo.

Retirar cuidadosamente las envolturas y colocarlas aparte para la determinación de la masa (véase el Anexo C.2).

Repetir el procedimiento para determinar la circunferencia externa o el diámetro externo de la tubería.

B.3.3 Cálculo

Calcular la media de las circunferencias externas P_o y P_m o la media del diámetro externo D_o y D_m de las cuatro medidas de la pieza en ensayo y redondear el resultado al 0,1 mm más próximo.

Calcular la media del espesor medio (e) de la pieza de ensayo usando la siguiente ecuación:

$$e = (P_o - P_m)/2 \pi = (D_o - D_m)/2$$

donde:

e es la media del espesor medio del material envolvente (mm).

P_o es la media de la circunferencia externa de tubería y envoltura (mm).

P_m es la media de la circunferencia externa de tubería (mm).

$\pi = 3,142$.

D_o es la media del diámetro externo de tubería y envoltura (mm).

D_m es la media del diámetro externo de tubería (mm).

B.4 Informe de ensayo

El informe del ensayo incluirá al menos la siguiente información:

- a) El número y fecha de esta norma.
- b) El ambiente del acondicionamiento y el tiempo de reposo.
- c) La media y el mínimo del espesor medio de cada pieza ensayada.
- d) El coeficiente de variación a la presión especificada.
- e) La desviación de la media del espesor medio de cada pieza ensayada respecto al espesor prescrito por el fabricante.
- f) Si se requiere, pueden tabularse los datos experimentales y cálculos de la media y el mínimo del espesor medio de cada muestra.

ANEXO C (NORMATIVO)

Determinación de la masa por unidad de superficie de material suelto enrollado previamente (PLM)

C.1 Principio

Un área especificada de material de revestimiento se pesa para determinar la cantidad media de material envolvente alrededor de la tubería.

C.2 Procedimiento

La masa por unidad de superficie se calcula pesando el material suelto colocado previamente en la pieza de ensayo de una longitud de 1000 mm, después de desatarlo de las cuerdas que lo sujetan en el caso de envolturas fibrosas o de su cobertura en el caso de envolturas granulares.

Una vez que se ha medido el espesor de acuerdo con el Anexo B, pesar separadamente cada envoltura extraída de cada una de las cinco piezas a ensayar con una precisión de 0,1 g.

La masa obtenida es la masa por metro lineal de tubería (m_1) y se expresa en g/m.

C.3 Cálculo de resultados

Calcular la masa por unidad de superficie correspondiente, con su media de espesor medio (e), usando la siguiente ecuación:

$$m = 1000 m_1 / [\pi (D_m + e)]$$

con $D_m = P_m/\pi$ = diámetro exterior de tubería en mm.

e = media de espesor medio en mm determinado de acuerdo con B.3.

D_m y e se dan con una precisión de 0,1 mm; m se expresa en g/m² y se calcula al 1 g/m² más próximo.

C.4 Informe de ensayo

El informe del ensayo incluirá al menos la siguiente información:

- a) El número y fecha de esta norma.
- b) El ambiente de acondicionamiento y el tiempo de reposo.
- c) Si se requiere, pueden tabularse los datos experimentales y cálculos de la masa por unidad de superficie de cada muestra.
- d) La masa por unidad de superficie de cada muestra.
- e) La desviación de la masa por unidad de superficie de cada muestra respecto a la masa prescrita por el fabricante.

ANEXO D (NORMATIVO)

Material suelto enrollado previamente: determinación del índice de tamaño de poro

D.1 Principio

De la envoltura se toma un disco como pieza a ensayar, se fija en un marco y se coloca horizontalmente en un aparato cernidor. Se vierte cierta cantidad de una fracción de arena específica sobre la pieza de ensayo. Durante un tiempo determinado se aplica a la pieza de ensayo una vibración vertical con una frecuencia y amplitud específicas.

La cantidad de arena que permanece sobre y en la pieza ensayada indica los tamaños de los poros más grandes.

D.2 Material

D.2.1 Fracciones de arena

Las fracciones de arena estarán compuestas por arena de cerner seca de acuerdo con ISO 563 usando un juego de cribas ISO seleccionadas de la serie R-20 de ISO 565 con tamaños de malla dados por los límites de fracción del Cuadro D.1.

D.3 Aparato

D.3.1 Instrumento cortante

Para obtener piezas de ensayo de la muestra se usará un instrumento cortante metálico circular con un diámetro interno de $135 \pm 0,1$ mm.

D.3.2 Instrumento para cernir

El aparato para cernir generará una vibración vertical con una amplitud de 0,75 mm y una frecuencia de 50 Hz.

D.3.3 Porta-piezas de ensayo

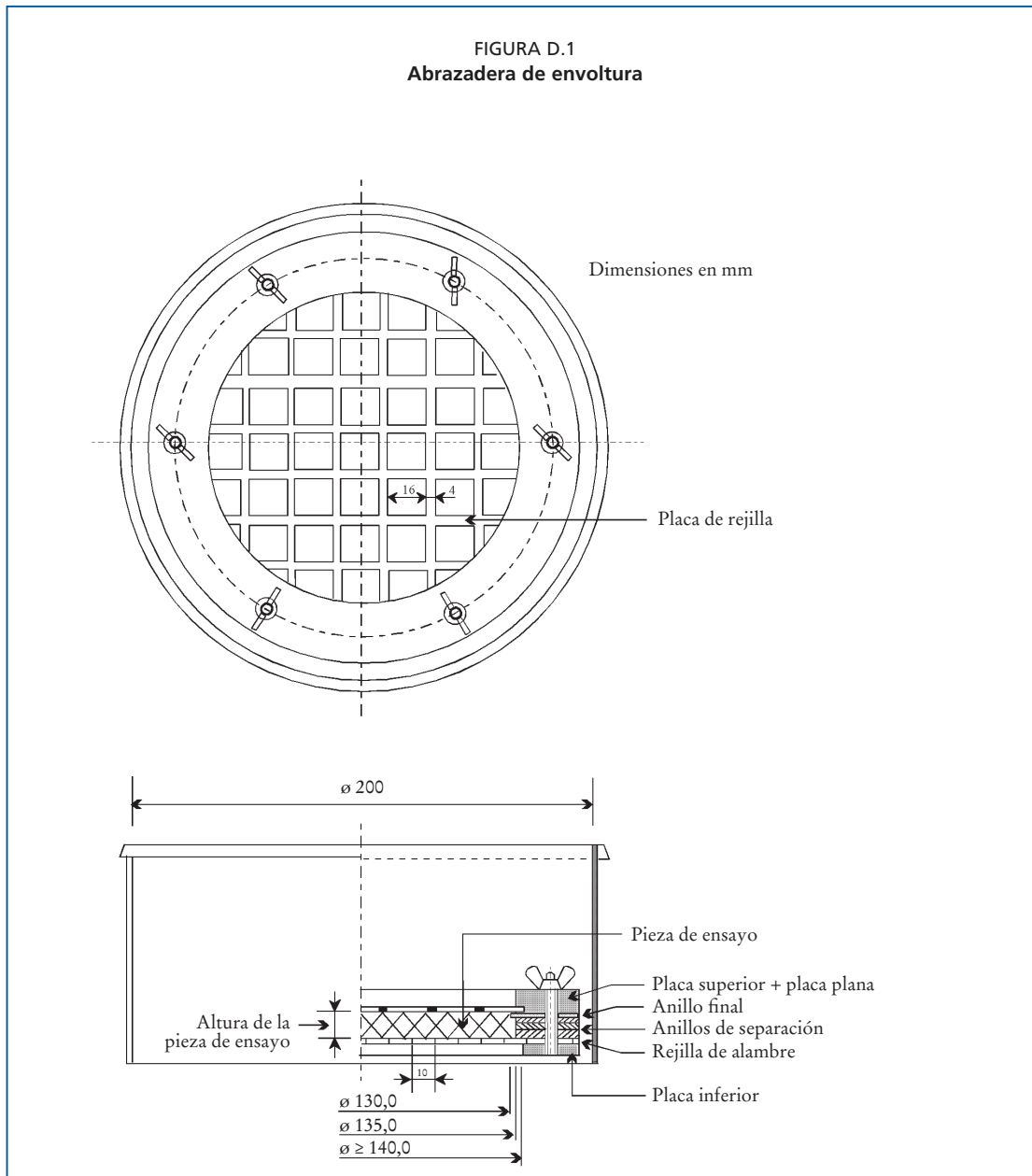
El porta-piezas de ensayo constará de los siguientes elementos (véase la Figura D.1):

- Cedazo de alambre con un tamaño de malla de 10 mm.
- Disco inferior con un diámetro interno de al menos 140 mm.
- Varios anillos separadores apilables, planos y rígidos con diámetro interno de $135 \pm 0,1$ mm, que aumentan de espesor cada 0,2 mm y un anillo final rígido con diámetro interno de $130 \pm 0,1$ mm y un grosor de 1,0 mm.
- Un disco superior con diámetro interno de $135 \pm 0,1$ mm y una altura de al menos 10 mm, con una placa de rejilla plana que porta en su base una malla de 16 mm.

CUADRO D.1

Límites de fracción y diámetro medio de partículas de las fracciones de arena

Límites de fracción (μm)		Diámetro medio de partícula (μm)
d_{min}	d_{max}	d_m
90	125	108
125	160	143
160	200	180
200	250	225
250	315	283
315	400	358
400	500	450
500	630	565
630	800	715
800	1000	900
1000	1250	1125
1250	1400	1325



D.3.4 Placa de base y pesa

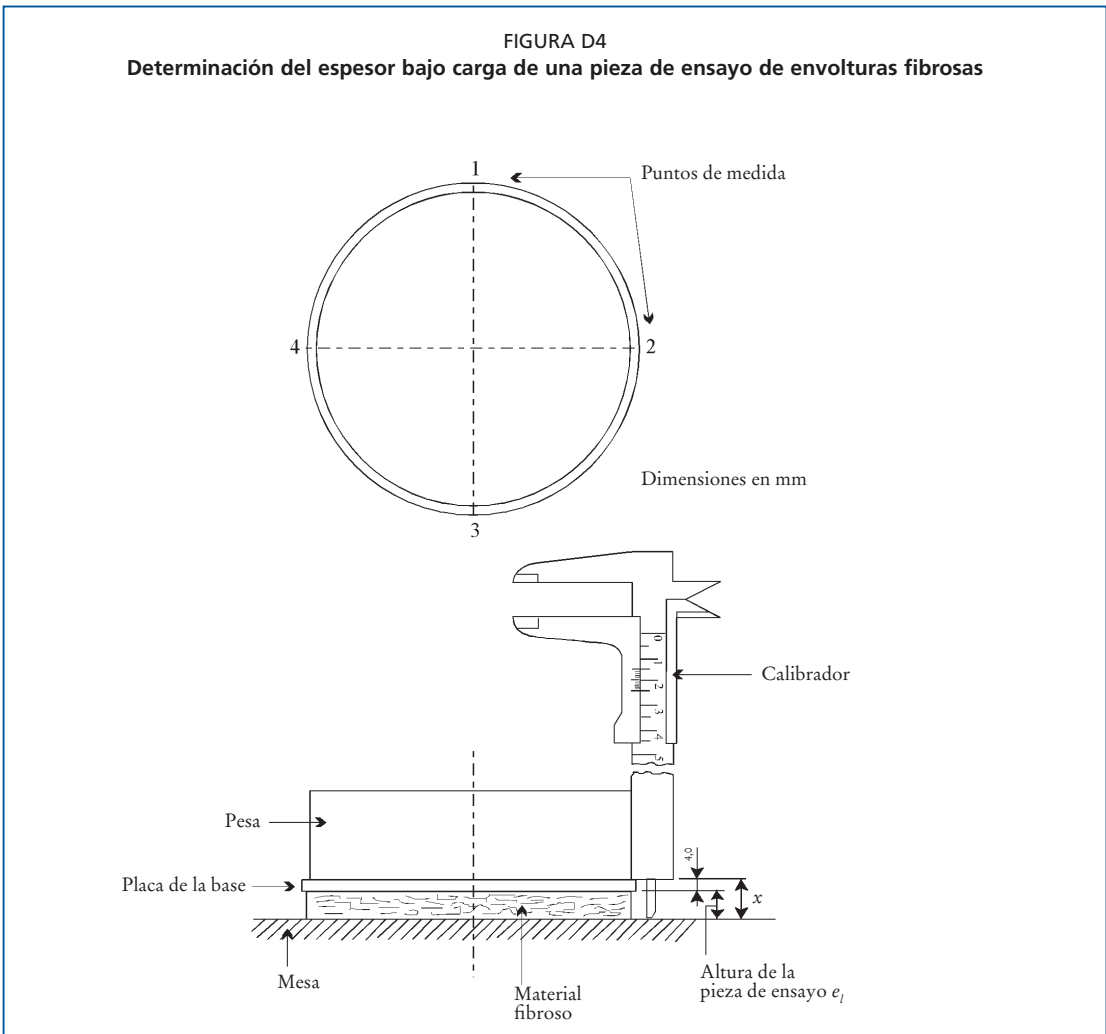
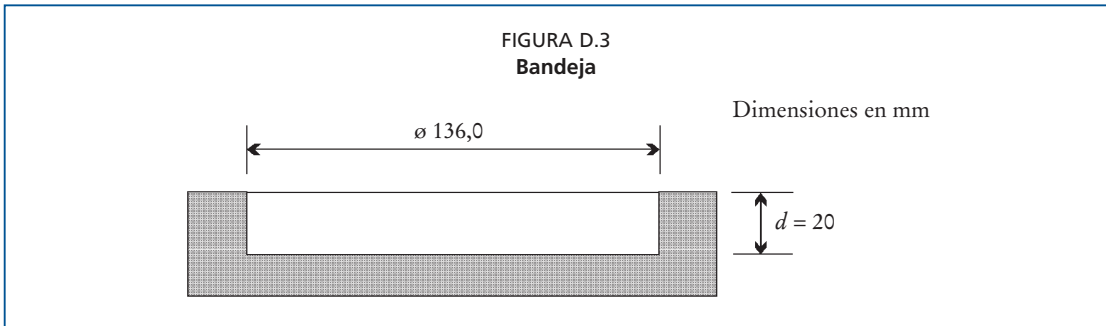
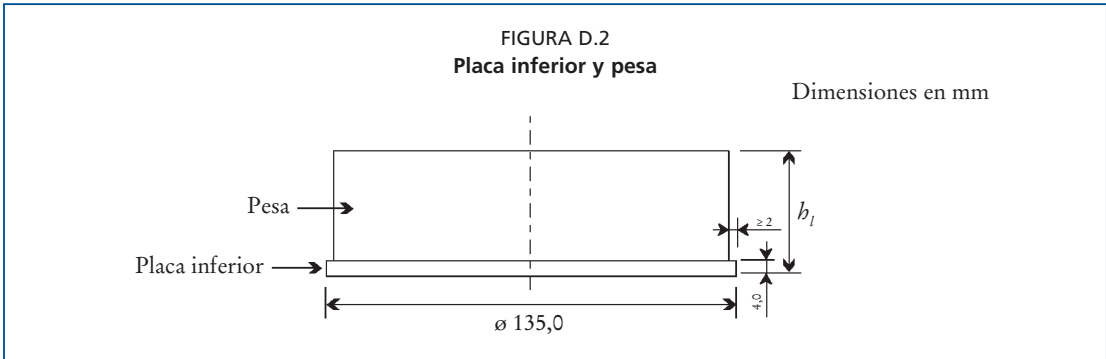
La medida del índice de tamaño de poro requiere que la pieza de ensayo permanezca bajo carga. Por tanto, es necesaria una placa de acero en la base con una masa total de $9,3 \pm 0,1$ kg y una altura total (h_1) medida con una precisión de 0,1 mm (Figura D.2). La placa inferior rígida y plana de la base tiene un diámetro externo de $135 \pm 0,1$ mm y un grosor de $4 \pm 0,1$ mm.

Las envolturas granulares necesitan además una bandeja con un diámetro de $136 \pm 0,1$ mm y una profundidad mínima (L) de 20 mm medida con una precisión de 0,1 mm (Figura D.3).

D.4 Procedimiento para envolturas fibrosas

D.4.2 Selección de anillos de separación

Separar cuidadosamente la envoltura de las muestras de 500 mm de largo comenzando por la costura. Utilizar un par de tijeras si no se puede encontrar la junta.



Con el instrumento cortante y un mazo cortar una pieza de ensayo de la envoltura separada.

Colocar la pieza de ensayo en una superficie plana y poner sobre ella la placa inferior y la pesa.

NOTA: Esta fuerza se aproxima al peso ejercido por el suelo sobre la envoltura.

Después de 600 ± 15 s determinar con un calibrador el espesor (x) con una precisión de 0,1 mm, como se muestra en la Figura D.4.

Repetir esta medición en otros tres lugares y calcular el valor medio (x_m) con una precisión de 0,1 mm.

Calcular la altura de la pieza de ensayo (e_1) restando 4,0 mm a x_m .

Seleccionar una serie de anillos de separación (incluyendo el aro final) correspondientes a la altura de la pieza de ensayo e_1 . Los anillos de separación y la muestra deben ajustar perfectamente.

Colocar la pieza de ensayo sin tensión y en forma plana sobre el porta-piezas de ensayo (véase la Figura D.1), con el lado de contacto con la tubería de drenaje hacia abajo.

Poner la placa superior en su lugar y montar el porta-piezas de ensayo sobre la bandeja de recogida del aparato de cribado.

D.4.3 Procedimiento de cernido

Elegir una fracción de arena d_m próxima al O_{90} supuesto.

Pesar 50 g de la fracción de arena seleccionada con una precisión de 0,01 g.

Asegurar que el aparato de cernido está nivelado.

Verter la arena sobre la pieza de ensayo, asegurando que durante el cribado la arena se distribuye uniformemente sobre la pieza de ensayo. Cerrar la tapa del aparato de cernido.

Activar el aparato de cribado durante 300 ± 2 s.

Quitar el porta-piezas de ensayo del aparato de cernido, asegurando que la arena sobre la parte superior y dentro de la pieza de ensayo no caiga en la bandeja de recogida.

Pesar la arena de la bandeja de recogida con una precisión de 0,01 g.

Quitar la arena acopiada sobre y dentro de la pieza de ensayo girando y sacudiendo el porta-piezas de ensayo. Se obtendrán al menos 49 g de arena.

Elegir la fracción de arena para el siguiente análisis de cernido basándose en el resultado del primer cribado.

Repetir el procedimiento de criba.

Determinar el índice de tamaño de poro de acuerdo con D.4.4.

Si fuera necesario repetir el procedimiento de cernido con una fracción de arena seleccionada que incluya el índice de tamaño de poro esperado.

Determinar de acuerdo con este procedimiento el índice de tamaño de poro de las otras cuatro piezas de ensayo.

Cada fracción de arena se usará solamente cinco veces.

D.4.4 Cálculo de resultados

Para cada pieza de ensayo, representar en un diagrama el porcentaje de cada fracción que pasó la pieza de ensayo en un eje de probabilidad y el diámetro medio de la fracción en un eje logarítmico. Ajustar y trazar manualmente una línea recta entre los puntos representados. La intersección de esta línea recta con la línea del 10 por ciento marca el tamaño de poro O_{90} o el índice de tamaño de poro, que se expresa en μm y se redondea al 5 μm más próximo.

D.5 Procedimiento para filtros granulares

D.5.1 Selección de anillos de separación

NOTA: Al contrario de las envolturas fibrosas colocadas previamente, no es posible determinar el índice de tamaño de poro de una envoltura granular. Los procedimientos para medir el espesor bajo carga y por tanto la preparación de la pieza de ensayo son diferentes.

Separar cuidadosamente el envoltorio de la muestra de una longitud de 500 mm y colocar cada cosa aparte para su uso posterior.

Recoger el material granular en un plato.

NOTA: El plato es preferentemente de vidrio.

Pesar los gránulos obtenidos de la muestra con una precisión de 0,01 g y determinar la masa (G_m) en g/m.

Determinar la masa G_1 en g usando las siguientes ecuaciones:

$$G_1 = (A_1/A) G_m = 4,56 G_m / (D_m + e)$$

Donde:

G_1 es la masa de material granular para determinar la altura de la pieza de ensayo para la prueba de cribado (g).

$A_1 = \pi 135^2/4$; superficie media de cada una de las piezas de ensayo (mm^2).

$A = \pi (D_m + e)1000$; superficie media de tubería más envoltura por metro de longitud (mm^2).

G_m es la masa de material granular por metro de longitud de tubería (g/m).

e es la media del espesor de envoltura medio de la muestra de tubería (mm) de acuerdo con B.3.

G_1 se expresa en g y se redondea al 1 g más próximo.

Recoger en la bandeja cierta cantidad de material granular igual a la masa $G_1 \pm 0,1$ g.

Esparcir uniformemente el material granular en la bandeja.

Usar el instrumento cortante para cortar un disco de envoltorio y ponerlo encima del material granular.

Colocar la placa de la base y la pesa sobre la pieza de ensayo en la bandeja. Después de 300 ± 15 s determinar la lectura del calibrador x con una precisión de 0,1 mm en cuatro lugares como se indica en la Figura D.5 y calcular la media x_m .

Calcular la altura de la pieza de ensayo bajo carga e_1 usando la siguiente ecuación:

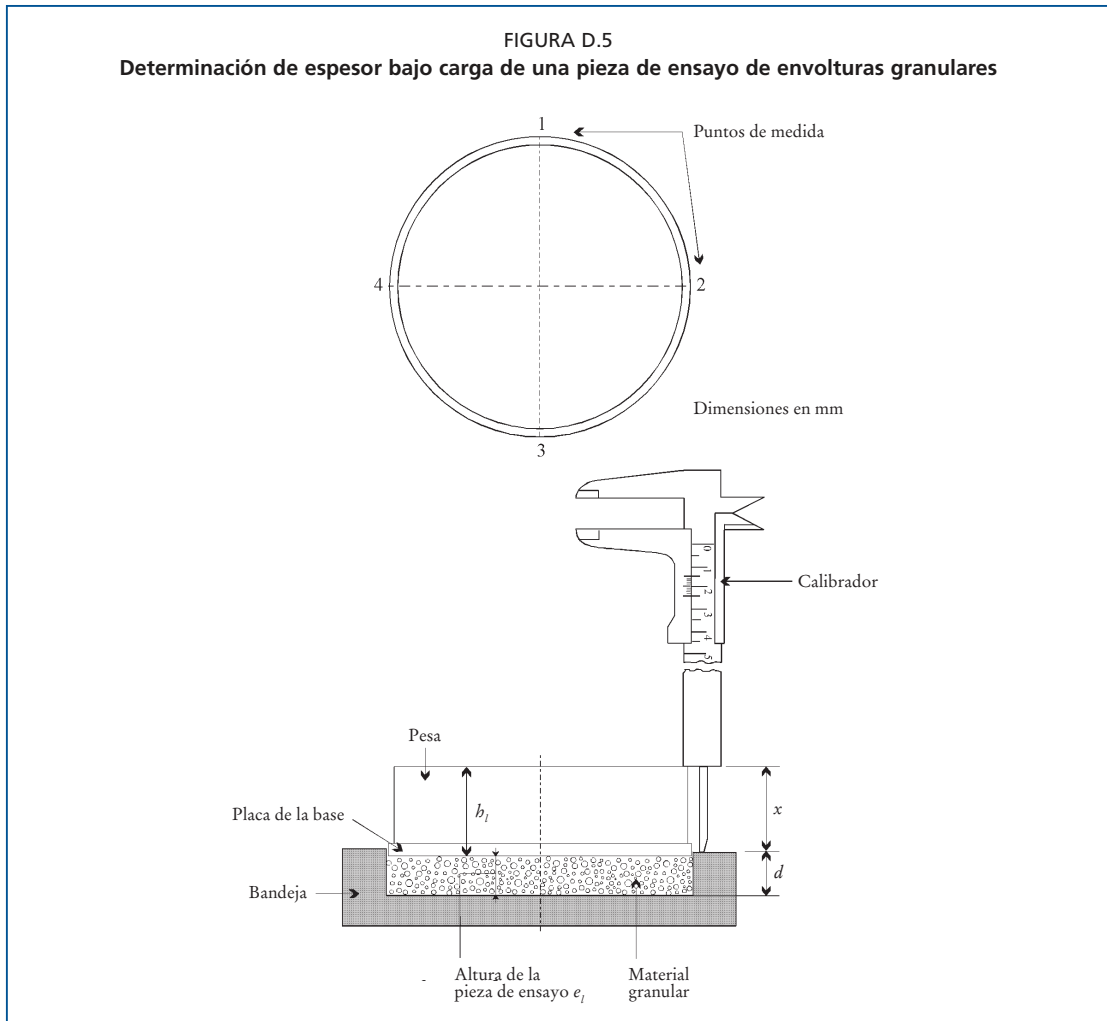
$$e_1 = d + x_m - h_1$$

siendo d la profundidad de la bandeja.

x_m la lectura media del calibrador.

h_1 la altura de la placa de la base más la pesa.

Todos los valores se expresan en mm y se determinan con una precisión de 0,1 mm.



Seleccionar una serie de anillos de separación (incluyendo el aro final) correspondientes a la altura de la pieza de ensayo e_1 .

Colocar el material granular de la bandeja en el soporte de la pieza de ensayo y distribuirlo uniformemente.

Colocar el envoltorio sobre el material granular.

Colocar el anillo superior en su lugar y poner el soporte de la pieza de ensayo sobre la bandeja de recogida del aparato de cribado.

D.5.2 Procedimiento de cernido

Se aplica el procedimiento para envolturas fibrosas dado en D.4.3.

D.5.3 Cálculo de resultados

La determinación de resultados es similar al de envolturas fibrosas según D.4.4.

D.5.4 Informe

El informe de ensayo incluirá al menos la siguiente información:

- a) El número y la fecha de esta norma.
- b) Detalles del aparato incluyendo un diagrama si fuera necesario.
- c) Los valores tabulados del material granular usado. Si es necesario pueden tabularse los datos experimentales y cálculos de la cantidad de material granular retenido.
- d) El índice de tamaño de poro (O_{90}) de cada muestra.

Bibliografía

EN ISO 12956. 1999. Geotextiles and geotextile related products - Determination of the opening size.

EN 964-1. 1994. Geotextiles and geotextile-related products - Determination of thickness at specified pressures - Part 1: Single layers.

EN 965. 1994. Geotextiles and geotextile-related products - Determination of mass per unit area.

PARTE 5: COMPATIBILIDAD PARA LA FINALIDAD DEL SISTEMA

1 ÁMBITO

La Parte 5 incluye ensayos que relacionan la compatibilidad recíproca entre conexiones y tubería. Si se venden conjuntamente, la adaptabilidad recíproca es de responsabilidad mutua entre los fabricantes de conexiones y los de tubería. Si se venden separadamente, el instalador y sus asociados deberán asegurar que cumplen con esta norma.

2 REFERENCIAS NORMATIVAS

No hay referencias normativas.

3 ENSAYO DE FUERZAS DE ACOUPLE Y PENETRACIÓN

Este ensayo no se efectuará para *DN* mayor de 200 mm.

Si se ensaya de acuerdo con el método especificado en la Figura A.1 del Anexo A, las fuerzas (en N) serán como se especifica en el Cuadro 1.

4 RESISTENCIA DE LA UNIÓN

Si el ensayo se lleva a cabo de acuerdo con la norma de apoyo EN [155 WI 127] la junta no se separará.

5 SEPARACIÓN ENTRE ACOUPLE O EXTREMO DE TUBERÍA Y TUBERÍA

La separación (*g*) entre acoples o reductores y tuberías depende del diámetro externo de las tuberías y no excederá las siguientes:

- Hasta *DN* 80 (inclusive): $g \leq 1,5$ mm.
- Desde *DN* 100 (inclusive) a *DN* 125 (inclusive): $g \leq 2,0$ mm.
- Desde *DN* 160 (inclusive) a *DN* 200 (inclusive): $g \leq 2,5$ mm.

CUADRO 1

Fuerzas máxima de acople y mínima de penetración

<i>DN</i>	Fuerza de acople	Fuerza de penetración
50-100 inclusive	≤ 200 N	≥ 300 N
125-200 inclusive	≤ 300 N	≥ 400 N

ANEXO A – ACOPLES

Método de ensayo para medida de las fuerzas de acople y penetración

A.1 General

Este ensayo determina la fuerza necesaria para introducir el extremo de la tubería hasta el tope del acople (fuerza de acople) y la fuerza requerida para empujar una corrugación de tubería más allá del tope del acople (fuerza de penetración).

A.2 Procedimiento

A.2.1 Aparato

Se necesita una máquina de ensayo de compresión con un par de placas de acero. Durante el ensayo estas placas no se deformarán de forma alguna.

A.2.2 Muestras

En el Cuadro A.1 se indica la longitud de la muestra para evitar pandeo, de acuerdo con el *DN*.

Los extremos de las muestras se cortarán perpendicularmente al eje de la tubería.

A.2.3 Ensayo

Colocar el acople y la tubería en la placa inferior como se indica en la Figura A.1. Aplicar una fuerza sobre la tubería bajando la placa superior a una velocidad de 30 mm/min.

La tubería no se pandeará durante la prueba. El ensayo se repetirá si se pandea.

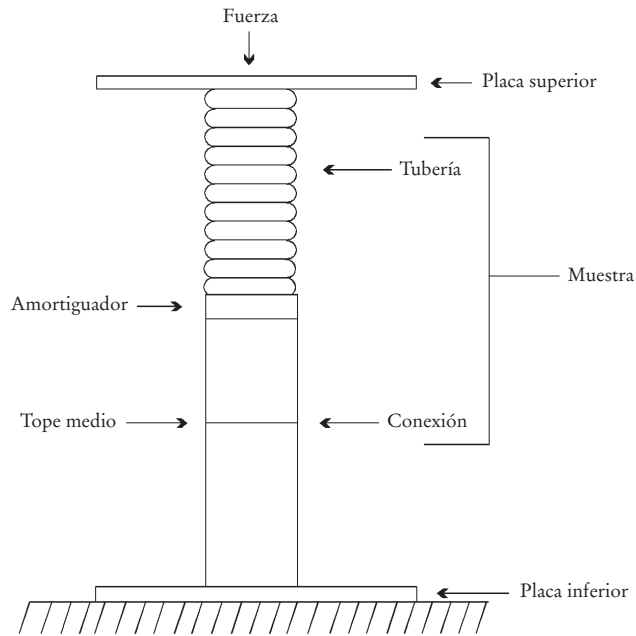
Se ensayarán los dos extremos del acople, cada uno con una muestra de tubería y un acople diferentes. En la medida de lo posible, el procedimiento tendrá en cuenta eso aún cuando la marca sobre el acople sea simétrica.

CUADRO A.1

Longitud de la muestra de tubería para evitar pandeo

<i>DN</i>	Longitud de la muestra (mm)
50	80
60	80
65	100
80	100
100	150
125	150
160	200
200	200

FIGURA A.1
Ensayo de las fuerzas de acople y penetración



PARTE 6: PRÁCTICA RECOMENDADA DE INSTALACIÓN

1 ÁMBITO

La Parte 6 describe la práctica recomendada para la instalación del sistema de tubería.

2 REFERENCIAS NORMATIVAS

➤ ISO/TR 7073. Técnicas recomendadas para la instalación de drenes y alcantarillas enterradas de cloruro de polivinilo sin plastificar (PVC-U).

3 DEFINICIONES

Las definiciones dadas en otras partes de esta norma europea se aplican para la finalidad de esta Parte conjuntamente con las siguientes:

3.1 Dren lateral:

Tubería de drenaje, receptora directa de agua en toda o en parte de su longitud a través de perforaciones en las paredes de la tubería.

3.2 Dren colector:

Una tubería que capta agua de drenes laterales y conduce el flujo conjunto a una salida. Si está perforada también puede actuar como receptor directo de agua.

3.3 Pozo de inspección:

Obra auxiliar en la unión de un lateral y un dren colector o en la unión de varios drenes colectores, usado para cambiar la pendiente, la dirección o ambas cosas y facilitar la inspección de una red de drenaje. Su diseño permite la deposición de limo y arena.

3.4 Máquina zanjadora:

Una máquina que excava una zanja, generalmente de 0,10 a 0,50 m de ancho y que coloca continuamente tubería en la solera de esa zanja, la cual debe rellenarse una vez colocada la tubería.

3.5 Máquina que no abre zanja:

Una máquina que coloca continuamente tubería de drenaje sin abrir zanja alguna o excavación abierta, por medio de un corte hecho con un rejón vertical o un apero en forma de V (p. ej. apero en V).

3.6 Material de relleno:

Material que se coloca sobre o debajo de una tubería de drenaje o recubriéndola totalmente durante su instalación.

3.7 Equipo de limpieza de drenes:

Equipo auxiliar compuesto por diferentes piezas de plástico que instalado en un dren colector se utiliza para limpiar un dren lateral con agua a presión.

3.8 Drenaje topo:

Una operación de duración limitada mediante la cual una reja vertical dotada de un proyectil cilíndrico, como instrumento de expansión opcional, se impele a través del suelo para formar un canal.

4 TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO Y MANEJO

4.1 Transporte

Los vehículos deberán tener una caja plana y limpia, sin clavos y otros salientes que pudieran dañar las tuberías revestidas o sin revestir.

Los laterales de la caja serán planos y no presentarán superficies ásperas o puntiagudas.

Cuando se transporta una carga mixta de productos (rollos, tubos rectos o ambas cosas) es importante que la carga superior no dañe la inferior. Deberá evitarse una gran flexión de los materiales.

4.2 Almacenamiento

Para impedir la deformación de la tubería es importante que durante almacenamiento a largo plazo la presión sobre el rollo situado más abajo sea la menor posible.

Generalmente, una pila de cuatro rollos es conveniente en el campo y de ocho rollos en dependencias del fabricante u otro lugar adecuado. Los rollos deben apilarse sobre una superficie plana, libre de materiales que pudieran dañar la tubería. Esto es aplicable tanto a tuberías de drenaje revestidas como sin revestir.

Tras la entrega del fabricante hasta la instalación efectiva, la duración del almacenamiento de abril a septiembre, ambos inclusive, debería ser la siguiente:

- En climas moderados -Escandinavia, Reino Unido, Irlanda, Bélgica, Países Bajos, Luxemburgo y Alemania- el período máximo a la intemperie es de tres meses.
- En climas duros -Península Ibérica, Italia, Grecia y Francia- el período máximo a la intemperie es de 1,5 meses.

En caso de que el almacenamiento supere estos períodos máximos, los rollos deberán acopiarse dentro de edificios o en pilas bajo cubierto.

Las pilas se colocarán de modo que se permita el paso de aire alrededor de tuberías y rollos, si éstos se almacenan a la intemperie en climas con temperaturas ambiente superiores a 23°C.

Las características de las envolturas de materiales sueltos enrollados previamente y de geotextiles los hacen más sensibles a los efectos de la intemperie. Las tuberías con filtro se acopiarán dentro de edificios o bajo cubierto, en casos de almacenamiento de larga duración en el exterior y a temperaturas ambiente superiores a 23°C.

4.3 Manejo (carga y descarga)

No deben arrastrarse tuberías sobre el terreno o sobre objetos duros. Independientemente de las técnicas de manejo mecánico que se usen, todo equipo que entre en contacto con tuberías no tendrá protuberancias.

Cuando se descarguen tuberías y rollos no deben arrojarse sobre el terreno sino que siempre deben descargarse cuidadosamente sobre el suelo o apilarse si tienen que almacenarse.

Cuando deban transportarse tuberías rectas una dentro de otra, las tuberías de dentro deben extraerse primero y apilarse separadamente.

Para el manejo de materiales con bajas temperaturas, según se especifica en 5.6, es necesario tomar precauciones adicionales, especialmente evitando golpes violentos a las tuberías.

5 PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN

5.1 General

Se supone que la colocación de tuberías de drenaje se hace principalmente por medios mecánicos. La conformidad de la entrega se registrará visualmente por un representante del cliente.

5.2 Examen in situ

Los levantamientos topográficos (nivel) y de suelos llevados a cabo antes del diseño deberán ser adecuados, con objeto de permitir una evaluación precisa de los problemas de drenaje y permitir un diseño del sistema completo y apropiado.

Siempre que sea posible, deberá determinarse e incorporarse al nuevo sistema la ubicación y condición de drenes existentes y obras enterradas.

Se consultará con el propietario de la tierra y las instituciones pertinentes antes de la iniciación de las obras. Siempre que sea posible, el diseño del sistema deberá evitar el cruce de tuberías o cables enterrados y descartar la necesidad de trabajar bajo cables eléctricos.

5.3 Planes de drenaje

Se prepararán planes detallados de drenaje que muestren el trazado, tipo y tamaño de tubería, uso y profundidad del material de relleno permeable y detalles sobre drenaje topo y subsolado.

5.4 Uso de maquinaria

No se usará maquinaria en un área hasta que no se haya terminado el trabajo preparatorio de demarcación inicial de la localización de drenes secundarios o cualquier otra ubicación topográfica de futuras tuberías de drenaje.

5.5 Capacidad de tránsito y condiciones del subsuelo

Las condiciones del suelo y del subsuelo deberán ser tales que permitan evitar sellado y compactación innecesarios en la superficie o cerca del dren. Pueden ser perjudiciales para la instalación del drenaje la presencia de capas freáticas altas, charcos o una capa superior de suelo húmeda.

El tránsito sobre el terreno deberá minimizarse siempre, especialmente cuando se instale drenaje con cultivos en crecimiento.

Se evitará una capa freática excesivamente alta y condiciones de suelo seco.

5.6 Condiciones atmosféricas

Normalmente no se colocará tubería y relleno permeable sobre tuberías de cloruro de polivinilo sin plastificar (PVC-U), si la temperatura del aire o de la tubería está por debajo de 0°C. Podrá instalarse tubería tomando precauciones adicionales, si las condiciones locales obligan a trabajar con baja temperatura. Pueden usarse tuberías de cloruro de polivinilo sin plastificar (PVC-U) revestidas previamente con materiales voluminosos con temperaturas de hasta -3°C.

Debe evitarse el estiramiento de tuberías de drenaje de plástico a temperaturas superiores a 30°C.

5.7 Establecimiento y control de equipo láser

Es de primordial importancia el control de la pendiente y profundidad de los drenes parcelarios. Para obtener la pendiente y profundidad correctas, ahora se utiliza frecuentemente con las máquinas de drenaje un equipo láser para el control de la pendiente. El correcto funcionamiento e instalación del equipo láser es de gran importancia. Por tanto, este equipo requerirá una revisión adecuada antes de utilizarse (véase el Anexo A).

5.8 Colocación de tubería

5.8.1 Requisitos generales

Las zanjas de dren discurrirán en línea recta a la profundidad y pendiente requeridas, salvo que existan condiciones topográficas que lo impidan.

La tubería se instalará con una profundidad mínima de 0,6 m respecto a la superficie del suelo para evitar daños debidos al tránsito sobre el terreno y preferiblemente deberá instalarse por debajo de la profundidad máxima de penetración de heladas.

Todas las líneas de drenes laterales deberán taparse en su extremo superior para evitar la entrada de suelo o animales.

Todos los drenes colectores se instalarán partiendo de su extremo inferior hasta el superior aguas arriba y deberán acondicionarse e instalarse antes que los drenes laterales.

Todas las líneas de drenes laterales se instalarán a partir de su extremo aguas abajo.

Si drenes topo tienen que atravesar drenes laterales, la profundidad de la tubería deberá ser tal que la base del dren topo esté al menos 100 mm por encima de la parte superior de la tubería. Se recomienda un ancho mínimo de zanja de 100 mm y normalmente deberá usarse un relleno permeable.

Deberán conectarse convenientemente al nuevo sistema drenes existentes que aún funcionen. Todos los demás drenes existentes se unirán a los nuevos drenes mediante una conexión adecuada o con relleno permeable.

Se utilizarán tuberías con uniones selladas o tuberías de plástico corrugado sin perforar (en todos otros aspectos de acuerdo con los requisitos de esta norma)

si se colocan en alguna de las condiciones siguientes:

- a) Atravesando cortavientos de árboles, arbustos o de ambos.
- b) A menos de 5 m de setos o árboles (distintos que en huertos).
- c) Si las pérdidas de agua del dren pudieran causar erosión o socavación y desplazamiento de la tubería.

Una posición correcta se obtiene manteniendo cierta tensión de estiramiento sobre las tuberías mientras se colocan. Por ejemplo, es útil para este fin usar un dispositivo de frenado en el carrete del rollo y también puede usarse un rodillo pesado o un mecanismo similar.

5.8.2 Tubería colocada en zanjas excavadas mecánicamente

5.8.2.1 Preparación de zanjas de dren

La zanja de dren se excavará de forma que no se impida la entrada de agua a la zanja por sellarse sus paredes.

La solera de la zanja consistirá de suelo natural y normalmente deberá conformarse mediante una herramienta para conseguir una hendidura en forma de V, cuya base tenga un radio superior al radio externo de la tubería que se coloca.

5.8.2.2 Colocación de tuberías de drenaje

Las tuberías de drenaje deberán colocarse a medida que avanza la excavación y afianzarse en su posición.

La tubería se tatará temporalmente si se suspende la instalación de tubería.

Se usará un tubo rígido como puente para proteger la tubería si tienen que instalarse drenes de tubería en condiciones muy blandas, cruzando zanjas rellenadas o en situaciones similares.

Los puentes de dren pueden ser de cualquier material rígido adecuado y se colocarán de tal forma que sus extremos se apoyen sobre suelo firme al menos 600 mm por cada lado.

Se compactará firmemente el suelo por debajo del puente de dren y todos los huecos se rellenarán. Los puentes se instalarán durante o inmediatamente después de la colocación de los drenes. Puede ser necesario fijar las tuberías al puente.

5.8.2.3 Afianzamiento de la posición de tuberías

Respecto a desviaciones de la línea de pendiente proyectada, las líneas de dren cumplirán los siguientes requisitos:

- a) La desviación del punto inferior interno de la tubería de la línea de pendiente estipulada no superará la mitad de su diámetro interno.
- b) Al mismo tiempo, la desviación en ningún momento puede ser tal que, como consecuencia de una contrapendiente, más de la mitad de la sección de tubería permanezca llena de agua después que el dren haya cesado de desaguar.

Deberá asegurarse la correcta colocación de la tubería de drenaje y conexiones antes que la zanja del dren se rellene.

El espacio entre la tubería de drenaje y la pared de la zanja se rellenará de tal forma que no afecte la posición de la tubería.

Los drenes se tatarán inmediatamente después de su colocación, siempre que haya riesgo de que un exceso de agua cause que la tubería flote.

5.8.2.4 Rellenado con material excavado

Tan pronto como sea posible después de la instalación se rellenarán las zanjas de las tuberías con material colocado de tal forma que las tuberías no sean dañadas o descolocadas. Las zanjas deberán rellenarse hasta un nivel suficiente por encima de la superficie del suelo para permitir el asentamiento del relleno. En caso de suelos arenosos la zanja se rellenará con aproximadamente 100 mm de suelo permeable sin humus sobre la tubería.

Para rellenar zanjas de dren no se usará suelo congelado o suelo que debido al excesivo contenido de agua tienda a sedimentarse o a llegar a ser delicuescente.

5.8.3 Tubería colocada mecánicamente sin apertura de zanja

Normalmente, la base del dispositivo de instalación tendrá un aparejo para formar una hendidura en forma de V, cuya base tenga un radio superior al radio externo de la tubería que se coloca.

Cuando las tuberías de drenaje se colocan con máquinas que no abren zanja, es necesario evitar sacudidas o movimientos violentos de las máquinas para evitar arrastres o en ocasiones deslizamiento de suelo.

5.8.4 Conexiones

Inmediatamente después de establecidas se protegerán de desplazamientos.

Cuando tengan que conectarse drenes laterales preferiblemente por encima de drenes colectores, para formar una conexión se usará un tubo rígido de al menos 1 m que estará nivelado y apoyado adecuadamente.

Se usarán uniones hechas ex profeso si se conectan drenes laterales a drenes colectores. En ningún caso se permitirá que el dren lateral sobrepase por dentro al dren colector.

5.8.5 Pozos de inspección

Los pozos de inspección deberán adecuarse a su función, ser duraderos y capaces de mantener sus prestaciones. No habrá ninguna desviación en la línea de dren y se construirán sobre un cimiento protegido de heladas.

Si el pozo sirve para depositar barro o arena, su solera deberá estar al menos 0,30 m por debajo de la parte inferior de la tubería.

Las entradas y salidas de drenes colectores estarán constituidas por tubos de plástico rígido.

5.8.6 Dispositivos para limpieza de drenes

Los dispositivos para limpieza de drenes se instalarán de tal forma que no haya desviaciones en la línea de dren y que éste pueda limpiarse en sentido aguas arriba. Las distintas partes estarán firmemente fijadas y bien ajustadas para asegurar los emplazamientos de limpieza de drenes. El relleno deberá disponerse en capas horizontales bien compactadas de aproximadamente 0,30 m de espesor.

5.8.7 Salidas de colectores

Dondequiera que una tubería de drenaje desagüe en un canal abierto dispondrá de una salida debidamente construida y de un tipo adecuado. Siempre que sea posible, su parte inferior deberá situarse al menos a 150 mm por encima del nivel normal de agua en la zanja.

Un mínimo de 1 m del final del dren será de tipo rígido. Cualquier extensión de la tubería de drenaje más allá del talud también será rígida y resistente a heladas. Deberán colocarse rejillas para bichos.

Los elementos de la pared de las salidas incluirán una protección del talud y placas de protección de salpicaduras y estarán bien fijados en su posición.

5.8.8 Mantenimiento

Puede conectarse al sistema de tuberías un dispositivo auxiliar, por ejemplo un elemento de inyección de agua. En este caso se cerrará el extremo final de la tubería instalando un tapón final. Si no, cuando sea posible el sistema de inyección se conectará directamente a una cámara con tapa.

5.9 Consideraciones generales

5.9.1 Seguridad

5.9.1.1 Seguridad humana

Se prestará atención especial a todas las medidas de seguridad en el emplazamiento y durante el transporte.

Se adoptarán procedimientos de trabajo y en la medida de lo posible se

utilizará el equipo de forma segura y sin riesgos para la salud del personal de obra y de otras personas que puedan tener riesgos debidos a las actividades de dicho personal.

Se debe prestar atención a la importancia de asegurar que cualquier cosa que pueda crear peligro, especialmente partes de maquinaria, esté adecuadamente protegida y que las excavaciones sean seguras y adecuadamente sostenidas. Las excavaciones temporales se cubrirán o protegerán cuando se abandone el emplazamiento con objeto de reducir el riesgo de accidentes a niños y animales.

5.9.1.2 Servicios enterrados

Se contactarán todas las partes involucradas que tengan servicios enterrados en el área que será drenada y se averiguará por escrito la naturaleza y ubicación de esos servicios. Antes que comiencen las obras se preguntará a los agricultores sobre la presencia de cualquier servicio enterrado.

En todos casos, antes de colocar drenes se localizarán y mostrarán los servicios enterrados por medio de excavaciones manuales. En el caso de oleoductos o gasoductos estará presente un inspector durante la excavación y colocación de tuberías cerca o a través de servicios enterrados. Se informará inmediatamente a la institución responsable de cualquier contacto con servicios enterrados.

5.9.2 Conservación

Cuando se realicen obras de drenaje subterráneo se tendrá en cuenta debidamente el paisaje y sus hábitats de vida silvestre. Una adecuada planificación anticipada puede asegurar que la ejecución de obras de drenaje y su futuro mantenimiento tengan un efecto mínimo sobre el medio ambiente. Además, un nuevo sistema puede frecuentemente dar una oportunidad a la creación de elementos de conservación nuevos, por ejemplo lagunas.

ANEXO A

Práctica recomendada para uso de equipo láser

A.1 El trípode del transmisor láser debe colocarse firmemente y sin influencia de vibraciones o efectos similares. En terreno blando, como turba, es deseable si es posible que el transmisor se coloque fuera del campo a drenar.

A.2 Si hubiera líneas eléctricas aéreas en la zona y si el instrumento fuera sensible a las mismas, para impedir su influencia sobre el láser éste no puede colocarse bajo dichas líneas.

A.3 Si se descubre alguna influencia de radar y si el instrumento es sensible al mismo, la obra de drenaje puede proseguir solamente mientras no se use el radar. También puede desplazarse el radar si se solicita.

A.4 Debe mantenerse una distancia máxima de 300 m al transmisor láser durante condiciones de buen tiempo. La distancia máxima deberá reducirse a 200 m durante vientos fuertes. No se llevarán a cabo obras de drenaje con vientos muy fuertes o bajo niebla. La velocidad de la máquina de drenaje se ajustará de acuerdo con las condiciones.

A.5 Para minimizar la influencia del viento durante la colocación del equipo láser se recomiendan los siguientes procedimientos:

- a) Colocar una de las patas del trípode en dirección opuesta al viento.
- b) Comprobar si los acoples y tornillos están bien fijados y si fuera necesario ajustarlos.
- c) Enrollar los cables del transmisor y receptor alrededor de una pata del trípode o alrededor del mástil de recepción.
- d) Fijar el trípode colocando un gancho alrededor de la base de cada una de sus patas y colocar sacos de arena sobre ellos, o fijar cintas de goma entre el punto medio de cada pata y un peso o clavija colocados en el terreno en el centro del trípode.
- e) Proteger la posición del láser instalando un cortavientos temporal o si se puede usar un vehículo como protección contra el viento, en cuyo caso debe vigilarse la turbulencia de detrás del cortaviento.
- f) Instalar el transmisor láser tan bajo como sea posible y ajustar consecuentemente el mástil receptor.
- g) Mantener el transmisor bajo en relación al trípode y si se necesita una posición más alta extender las patas del trípode al máximo.

A.6 Comprobar si la pendiente instalada se ajusta a la pendiente real del rayo láser y repetir esta comprobación durante la instalación de drenes.

A.7 Controlar el láser periódica y adecuadamente.

CUADERNOS TÉCNICOS DE LA FAO

ESTUDIOS FAO: RIEGO Y DRENAJE

- | | | | |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | La práctica del riego y la ordenación de aguas, 1972 (A* E* F* I*) | 35 | Mecanización del riego por aspersión, 1986 (C E F I) |
| 1 Rev. | 1. Irrigation practice and water management, 1984 (I) | 36 | Riego localizado, 1986 (Ar C E* F I) |
| 2 | Revestimiento de canales de riego, 1972 (Nueva edición 1977, disponible en E, F e I en la colección FAO: Fomento de tierras y aguas, N_1) | 37 | Arid zone hydrology, 1981 (C I) |
| 3 | Design criteria for basin irrigation systems, 1971 (I*) | 38 | Elementos para el proyecto de drenajes, 1985 (Ar C E F I) |
| 4 | Village irrigation programmes _ a new approach in water economy, 1971 (F I*) | 39 | Los lisímetros, 1986 (C E F I) |
| 5 | El riego automatizado, 1971 (E* F* I*) | 40 | Organización, operación y conservación de los proyectos de riego, 1991 (C E* F I) |
| 6 | El drenaje de los suelos pesados, 1971 (E* F I*) | 41 | Ordenación del ambiente para la lucha antivectoral en arrozales, 1986 (E F I) |
| 7 | Salinity seminar, Baghdad, 1971 (F I*) | 42 | Consultation on irrigation in Africa, 1987 (F I) |
| 8 | El agua y el medio ambiente, 1973 (E* F* I*) | 43 | Water lifting devices, 1986 (F I) |
| 9 | Los materiales para avenamientos, 1972 (E* F* I*) | 44 | Design and optimization of irrigation distribution networks, 1988 (F I) |
| 10 | La ordenación integrada de las aguas en la agricultura, 1974 (E* F* I*) | 45 | Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems, 1989 (I) |
| 11 | Planning methodology seminar, Bucharest, 1972 (F* I*) | 46 | CROPWAT - programa de ordenador para planificar y manejar el riego, 1993, (E F I) |
| 12 | Farm water management seminar, Manila, 1972 (I*) | 47 | Wastewater treatment and use in agriculture, 1992 (I) |
| 13 | Water use seminar, Damascus, 1972 (F* I*) | 48 | The use of saline waters for crop production, 1993 (I) |
| 14 | Riego por goteo, 1974 (E* F* I*) | 49 | CLIMWAT FOR CROPWAT, 1993 (I) |
| 15 | Drainage machinery, 1973 (F* I*) | 50 | Le pompage éolien, 1994 (F) |
| 16 | Saneamiento de suelos salinos, 1973 (C* E* F* I*) | 51 | Prospects for the drainage of clay soils, 1995 (I) |
| 17 | La influencia del hombre en el ciclo hidrológico, 1973 (E* F* I*) | 52 | Reforming water resources policy, 1995 (I) |
| 18 | Aguas subterráneas, seminario de Granada, 1972 (E* F I*) | 53 | Environmental impact assessment of irrigation and drainage projects, 1995 (I) |
| 19 | Mathematical models in hydrology, 1973 (I) | 54 | Cruets et apports, 1996 (F) |
| 20/1 | Water laws in Moslem countries _ Vol. 1, 1973 (F* I*) | 55 | Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos, 1997 (E I) |
| 20/2 | Water laws in Moslem countries _ Vol. 2, 1978 (F I) | 56 | Evapotranspiración del cultivo, 2006 (E I) |
| 21 | Groundwater models, 1973 (I) | 57 | Soil salinity assessment, 1999 (I) |
| 22 | Agua para agricultura _ Índice, 1973 (E/F/I*) | 58 | Transferencia de la gestión del riego, 2001 (E-F-I R) |
| 23 | Los métodos de simulación en el aprovechamiento de los recursos hídricos, 1974 (E* F I*) | 59 | Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems, 2000 (I) |
| 24 | Las necesidades de agua de los cultivos, 1975 (C* E F I) (1977, rev. (I)) | 60 Rev.1 | Materiales para sistemas de drenaje subterráneo (E I) |
| 25 | Precipitación efectiva, 1974 (C* E* F* I*) | 61 | Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas, 2002 (I) |
| 26/1 | Pequeñas obras hidráulicas _ Vol. 1, 1976 (E F* I) | 62 | Guidelines and computer programs for the planning and design of land drainage systems, 2007 (I) |
| 26/2 | Pequeñas obras hidráulicas _ Vol. 2, 1976 (E F I) | 63 | Modernizing Irrigation Management – the MASSCOTE approach. Mapping System and Services for Canal Operation Techniques, 2007 (I) |
| 27 | Estaciones agrometeorológicas, 1976 (E* F* I) | | |
| 28 | Ensayos de drenaje, 1976 (E F I) | | |
| 29 | Calidad del agua para la agricultura, 1976 (E* F* I*) | | |
| 29 Rev. | 1. La calidad del agua en la agricultura, 1987 (C** E* F I) | | |
| 30 | Self help wells, 1977 (I)* | | |
| 31 | Contaminación de las aguas subterráneas, 1981 (C* E I*) | | |
| 32 | Deterministic models in hydrology, 1979 (I)* | | |
| 33 | Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos, 1979 (C* E F I) | | |
| 34 | Corrosion and encrustation in water wells, 1980 (I) | | |

Disponibilidad: agosto de 2006

Ar	-	Arabe	Multil	-	Multilingüe
C	-	Chino	*	-	Agotado
E	-	Español	**	-	En preparación
F	-	Francés			
I	-	Inglés			
P	-	Portugués			
R	-	Ruso			

Los cuadernos técnicos de la FAO pueden obtenerse en los puntos de venta autorizados de la FAO, o directamente en la Sección de Distribución y Ventas, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Roma, Italia.

Materiales para sistemas de drenaje subterráneo

Esta publicación presenta directrices prácticas para evaluar la necesidad de envolturas y para seleccionar materiales adecuados (tuberías y envolturas) para el funcionamiento correcto y duradero de sistemas de drenaje subterráneo. Además contiene directrices para instalar y mantener adecuadamente materiales de drenaje, así como especificaciones y normas requeridas por dichos materiales, que puedan usarse en documentos de licitación para la ejecución de obras de drenaje subterráneo. Además, se incluyen directrices prácticas para la realización de investigaciones de laboratorio y campo para evaluar el funcionamiento de materiales de drenaje. El objetivo de esta publicación es proporcionar esta información práctica a ingenieros de drenaje y contratistas encargados de proyectos de drenaje.

