

materia

Diseño e Construcción de Obras Lineais

unidade didáctica 4

Drenaxe

Alberte Castro Ponte
Rodrigo Carballo Sánchez

Departamento de Enxeñaría Agroforestal
Escola Politécnica Superior

titulación

Grao en Enxeñaría Agroforestal



VICERREITORÍA DE ESTUDANTES,
CULTURA E FORMACIÓN CONTINUA



unidade didáctica 4

Drenaxe

Alberte Castro Ponte
Rodrigo Carballo Sánchez
Departamento de Enxeñaría Agroforestal
Escola Politécnica Superior



© Universidade de Santiago de Compostela, 2013



Esta obra atópase baixo unha licenza Creative Commons BY-NC-SA 3.0. Calquera forma de reprodución, distribución, comunicación pública ou transformación desta obra non incluída na licenza Creative Commons BY-NC-SA 3.0 só pode ser realizada coa autorización expresa dos titulares, salvo excepción prevista pola lei. Pode acceder Vde. ao texto completo da licenza nesta ligazón: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/legalcode.g>

Deseño
Unidixital
Servizo de Edición Dixital
da Universidade de Santiago de Compostela

Edita
Vicerreitoría de Estudantes,
Cultura e Formación Continua
da Universidade de Santiago de Compostela
Servizo de Publicacións
da Universidade de Santiago de Compostela

Imprime
Unidixital
Dep. Legal: C39 - 2013
ISBN 978-84-9887-975-9

ADVERTENCIA LEGAL: reservados todos os dereitos. Queda prohibida a duplicación, total ou parcial desta obra, en calquera forma ou por calquera medio (elec-trónico, mecánico, gravación, fotocopia ou outros) sen consentimento expreso por escrito dos editores.

MATERIA: Deseño e Construción de Obras Lineais
TITULACIÓN: Grao en Enxeñaría Civil
PROGRAMA XERAL DO CURSO
Localización da presente unidade didáctica

MÓDULO I: Enxeñaría de estradas

Unidade 1. Enxeñaría do tráfico

Introdución
Elementos da circulación
Variables características do tráfico por estrada
Estudos de tráfico
Capacidade e niveis de servizo en circulación continua

Unidade 2. Trazado de estradas

Introdución
Parámetros básicos: velocidade e visibilidade
A traxectoria dos vehículos. Interacción roda - pavimento
Trazado en planta
Trazado en alzado
Sección transversal

Unidade 3. Explanacións

Introdución
Estudos xeolóxicos e xeotécnicos
Compactación
Capacidade de soporte
Construción de explanacións
Formación das explanadas. Estabilización

Unidade 4. Drenaxe

Introdución
Drenaxe superficial
Drenaxe subterránea

Unidade 5. Firmes e conservación de vías

Descrición e funcións dos firmes
Características funcionais e estruturais
Constitución do firme e funcións das súas capas
Materiais empregados na formación de firmes
Tipoloxías de firmes
Factores de deseño
Conservación de vías

MÓDULO II: Enxeñaría de ferrocarrís

Unidade 6. O Ferrocarril

Unidade 7. Estrutura da vía

Unidade 8. Deseño xeométrico da vía

Unidade 9. Mecánica da vía

Unidade 10. Conservación e reparación da vía

ÍNDICE

Presentación	7
Obxectivos	8
Os principios metodolóxicos	8
Actividades propostas	8
Os contidos básicos	9
1. Introdución	9
2. Drenaxe superficial	9
2.1. Conceptos xerais	9
2.2. Estudos necesarios	9
2.3. Estudos hidrolóxicos	10
2.4. Estudos hidráulicos	20
2.5. Drenaxe lonxitudinal	27
2.6. Drenaxe transversal	38
3. Drenaxe subterránea	45
3.1. Conceptos xerais	46
3.2. Elementos dun sistema de drenaxe subterránea	47
3.3. Drenaxe dos firmes	47
3.4. Drenaxe das explanacións	48
Avaliación da unidade didáctica	50
Índice de figuras	51
Índice de táboas	52
Bibliografía	53

PRESENTACIÓN

Esta unidade didáctica forma parte do primeiro módulo da programación da materia “Deseño e Construción de Obras Lineais” do segundo curso do Grao en Enxeñaría Civil, que se dedica a sentar as bases da enxeñaría de estradas.

No primeiro tema do módulo (UD1) preséntanse os conceptos básicos da enxeñaría do tráfico necesarios para poder abordar o deseño xeométrico, a construción e a conservación dunha estrada.

A continuación, no segundo tema (UD2), estúdanse os conceptos fundamentais, as bases teóricas e os aspectos normativos do deseño xeométrico ou trazado dunha estrada.

Co seguinte tema (UD3) comeza a parte do módulo dedicada ao deseño e construción da infraestrutura dunha estrada. Neste caso preséntanse os aspectos máis importantes relacionados coas explicacións ou obras de terras.

Na presente unidade didáctica (UD4) explícanse os fundamentos do deseño dos sistemas de drenaxe dunha infraestrutura viaria. Preséntanse, en primeiro lugar, os conceptos relativos á drenaxe superficial: estudos hidrolóxicos, estudos hidráulicos, descrición e deseño dos diferentes elementos de drenaxe, etc. e posteriormente, abórdanse brevemente os conceptos básicos relativos á drenaxe subterránea.

O módulo péchase cun tema no que se estuda a problemática do deseño, construción e conservación dos firmes (UD5), que constitúen a superestrutura dunha estrada.

No segundo módulo da materia estúdase o deseño, construción e conservación doutra tipoloxía de obra lineal, os ferrocarrís. Estas dúas tipoloxías, estradas e ferrocarrís, teñen moitas cousas en común, polo que unha gran cantidade dos contidos traballados no primeiro módulo serán de gran utilidade, senón directamente mediante certas adaptacións, na segunda parte da materia.

Esta unidade didáctica impártese nun total de cinco horas de clase, repartidas en clases expositivas (3 horas) e seminarios (2 horas). Para o correcto seguimento da mesma recoméndase que os alumnos teñan coñecementos básicos de Hidroloxía e Hidráulica de canles. En todo caso os conceptos relativos a estas disciplinas atópanse explicados con bastante profundidade na propia unidade.

Ademais de aos alumnos de 2º curso do Grao en Enxeñaría Civil, os contidos presentados poden serlle de utilidade a outros docentes ou profesionais do sector que desenvolvan a súa actividade no ámbito do deseño, construción ou conservación destas tipoloxías de infraestrutura do transporte.

OS OBXECTIVOS

-Coñece-los conceptos teóricos fundamentais e os parámetros básicos de deseño dos diferentes elementos que constitúen os sistemas de drenaxe superficial e subterránea.

-Coñecer e comprende-la normativa de drenaxe vixente, e saber aplicala a casos prácticos de deseño de infraestruturas viarias.

OS PRINCIPIOS METODOLÓXICOS

-Os principios teóricos e os contidos fundamentais expóranse nas clases expositivas. Para iso, o profesor empregará os medios audiovisuais da aula para a realización de presentacións.

-O alumno elaborará ao finalizar cada sesión presencial un resumo dos contidos traballados, no que se recollan as súas reflexións sobre a temática abordada.

-Os seminarios interactivos dedicaranse a resolución de exercicios e problemas breves relacionados co deseño de diversas tipoloxías de obras de drenaxe, co obxectivo de aplica-los coñecementos adquiridos durante as clases expositivas.

-Durante os seminarios, os alumnos traballarán en grupos reducidos, baixo a supervisión do profesor, sendo fundamental unha participación activa por parte de todos os membros do grupo.

-Ao finaliza-la sesión, cada grupo entregará os seus exercicios resoltos ao profesor para a súa corrección. Unha vez corrixidos, devolveranse os exercicios aos grupos para que poidan entregar, se é necesario, unha versión definitiva dos mesmos, incorporando as correccións e suxestións realizadas polo profesor.

ACTIVIDADES PROPOSTAS

Como ampliación e aplicación dos contidos teóricos e prácticos traballados nas sesións expositivas e nos seminarios interactivos, propónse a realización das seguintes actividades:

- estudo e elaboración mediante traballo en grupos reducidos dun anexo básico de hidroxía e drenaxe correspondente a un caso real de deseño dunha estrada. Esta actividade levarase a cabo en coordinación coa materia Hidráulica II. Cada grupo entregará un documento provisional ao profesor para a súa corrección; que unha vez corrixido, será devolto aos grupos para que poidan entregar, se é necesario, unha versión definitiva do documento, incorporando as correccións e suxestións realizadas polo profesor.

OS CONTIDOS BÁSICOS

1. Introducción

Toda obra lineal, sexa unha estrada ou unha liña de ferrocarril, ten que estar dotada do seu correspondente sistema de drenaxe para garanti-lo seu correcto funcionamento e a súa conservación. O seu obxectivo é minimizar os efectos negativos, tanto a nivel estrutural como funcional, que pode ter sobre a devandita obra a presenza da auga.

Os efectos negativos nunha estrada que se poden derivar dun incorrecto drenaxe son moi numerosos, podendo ser de diversos tipos: riscos para a circulación (escorregamentos, proxeccións de auga, interrupcións da circulación), danos na infraestrutura (asentos dos recheos, inestabilidade e erosións superficiais nos noiros) ou na superestrutura (progresión de fendas, erosión e separación de capas de firme), danos nas propias obras de drenaxe (erosións, socavamentos, soterramentos) ou danos materiais a terceiros por asolagamentos. Estes últimos pódense considerar catastróficos ou non catastróficos (Norma 5.2-IC) en función de se existe risco de perda de vidas humanas, graves danos persoais ou afeccións a núcleos poboados ou industriais.

Os sistemas de drenaxe deben deseñarse tendo en conta un conxunto de ideas básicas: a) é fundamental non obstaculiza-lo paso natural da auga, evitando que en ningún caso poida quedar retida pola propia infraestrutura; b) débese asegurar que a auga que está fóra da infraestrutura non poida acceder a ela; e por último, c) a auga que está na infraestrutura debe saír dela o antes posible.

En termos xerais, os sistemas de drenaxe divídense en dous tipos en función da procedencia da auga: os sistemas de drenaxe superficial e os sistemas de drenaxe subterránea. Nesta unidade didáctica preséntanse por separado os conceptos relativos a cada un destes sistemas.

2. Drenaxe superficial

2.1. Conceptos xerais

Os elementos da drenaxe superficial dunha estrada ocúpase de recolle-los fluxos de auga superficiais. Recollen as augas pluviais ou de desxeo procedentes da plataforma da estrada e das súas marxes (drenaxe lonxitudinal), canalizándoas cara a álveos naturais (zona suburbana) ou redes de sumidoiros (zona urbana). Ademais, teñen por obxectivo restituí-la continuidade dos álveos naturais interceptados pola infraestrutura (drenaxe transversal).

2.2. Estudos necesarios

Para poder levar a cabo correctamente o deseño dos diferentes elementos dun sistema de drenaxe superficial é preciso realizar diferentes estudos:

Estudos topográficos: O obxectivo é coñecer o tamaño e a forma das concas naturais interceptadas que verten cara a infraestrutura. En xeral, a súa extensión e o seu relevo pódense obter dos planos a escala 1:25000 ou 1:50000, sendo preferible consulta-la cartografía elaborada para a propia obra en zonas próximas a traza. Ademais, é preciso coñecer con suficiente precisión as seccións transversais e as pendentes dos álveos naturais interceptados pola infraestrutura, tanto na propia zona onde se vai a materializa-lo cruce, como augas arriba e augas abaixo.

Estudos hidrolóxicos: Nesta fase obtéñense os caudais máximos que teñen que desauga-los diferentes elementos de drenaxe e que se empregarán como caudais de deseño. Estes poden proceder das concas naturais ou dos recintos artificiais creados pola propia infraestrutura (plataforma e desmontes). Os caudais de deseño pódense obter a partir de datos históricos de caudais, o que é posible exclusivamente no caso de concas naturais importantes que contén con aforamentos permanentes; ou a partir de series históricas de precipitacións, mediante a aplicación de diversos métodos de cálculo.

Estudos hidráulicos: Unha vez definidos os caudais de deseño, o seguinte paso é a definición das características xeométricas e dimensións dos diferentes elementos de drenaxe. Estes deben ser capaces de evacuar o caudal de deseño considerado cumprindo unha serie de criterios funcionais (velocidades, niveis de auga, etc.).

2.3. Estudos hidrolóxicos

O obxectivo dos estudos hidrolóxicos é a obtención dos caudais máximos procedentes das concas naturais e dos recintos artificiais da infraestrutura, que deben ser evacuados polos elementos de drenaxe. Coñecer estes caudais é, polo tanto, un paso previo fundamental necesario para poder levar a cabo o seu deseño.

Xeralmente, tal e como se comentou no apartado anterior, os caudais determínanse, salvo en álveos importantes, a partir de datos de precipitacións. Calcúlanse a partir da precipitación máxima esperada para un determinado período de tempo, denominado período de retorno (T). O período de retorno é unha variable que está relacionada coa frecuencia de aparición dun suceso estocástico, neste caso a precipitación. Canto maior é o período de retorno, a precipitación máxima esperada é tamén maior. Na práctica pode ser considerado un coeficiente de seguridade na determinación dos caudais máximos.

Unha vez coñecida a precipitación máxima determínase o correspondente caudal que desaugará a conca no seu punto de menor cota mediante algún dos diversos métodos dispoñibles.

Existen varios métodos que se poden empregar en función das características da conca considerada. Nesta unidade preséntanse dous métodos de cálculo: o método racional modificado, recollido na norma española de drenaxe superficial (Norma 5.2-IC); e o método de Témez, baseado no método racional, no que se inclúen un par de correccións adicionais.

Estes métodos, válidos para concas pequenas, supoñen que a única compoñente da precipitación que intervéñ na xeración de caudal é a escorrentía superficial, o que implica a non consideración de posibles aportes de fluxos subterráneos. Ademais, consideran no cálculo unha intensidade media de precipitación actuando sobre a superficie da conca.

2.3.1 Método racional modificado

É o método proposto pola normativa española de drenaxe superficial (Norma 5.2-IC). O caudal máximo para un determinado período de retorno (T) calcúlase mediante a seguinte expresión:

$$Q = \frac{C \cdot A \cdot I}{K}$$

onde

- Q caudal desaugado pola conca
- C coeficiente medio de escorrentía
- A superficie da conca
- I intensidade media de precipitación (mm/h) correspondente ao período de retorno (T) considerado
- K coeficiente que depende das unidades de medida e inclúe un incremento do 20% para ter en conta as puntas de precipitación (Táboa 2.1)

Táboa 2.1: Valores do coeficiente K (Norma 5.2- IC)

Q en	A en		
	km ²	Ha	m ²
m ³ /s	3	300	3000000
l/s	0.003	0.3	300

2.3.1.1 Intensidade media de precipitación

O valor da intensidade media de precipitación depende de varios factores: a precipitación máxima diaria esperada para o período de retorno considerado, o clima propio da zona e a duración da chuvia. Calcúlase mediante a seguinte expresión:

$$I = I_d \cdot \left[\frac{I_1}{I_d} \right]^{\left[\frac{28^{0.1 \cdot T^{0.1}}}{28^{0.1 \cdot T} - 1} \right]}$$

onde

I	intensidade media de precipitación (mm/h)
I_d	intensidade media diaria (mm/h) correspondente ao período de retorno (T) considerado
I_1	intensidade media horaria (mm/h) correspondente ao período de retorno (T) considerado
t	duración da chuvia (h)

A intensidade media diaria (I_d) calcúlase a partir da precipitación máxima diaria (P_d) correspondente ao período de retorno considerado (T) mediante un sinxelo cálculo:

$$I_d = \frac{P_d}{24}$$

onde

I_d	intensidade media diaria (mm/h) correspondente ao período de retorno (T) considerado
P_d	precipitación máxima diaria (mm) correspondente ao período de retorno (T) considerado

A precipitación máxima diaria de deseño determínase mediante unha análise estatística dos datos históricos de precipitacións máximas diarias rexistrados en estacións meteorolóxicas próximas á obra. Se a serie histórica de datos é suficientemente longa pódense axustar os datos a leis de distribución de valores extremos tipo *Gumbel* ou *SQRT-ET_{max}* que permiten obter o valor estimado de precipitación para o período de retorno considerado. Este procedemento pódese omitir ou complementar mediante o emprego de outros estudos de precipitacións máximas publicados anteriormente, como pode ser o caso da publicación “Máximas lluvias diarias en la España peninsular” do Ministerio de Fomento.

O valor da precipitación máxima de deseño depende, por suposto, do período de retorno considerado, incrementándose a medida que aumenta este. A selección do período de retorno é polo tanto un paso crucial no cálculo do caudal máximo de deseño polas implicacións técnicas e económicas que ten no deseño dos elementos de drenaxe. A norma 5.2-IC propón uns valores mínimos dependendo da entidade da vía en cuestión e da importancia do elemento de drenaxe (Táboa 2.2). Na práctica, os períodos de retorno empregados poden ser superiores a estes valores mínimos en función das esixencias das diferentes administracións involucradas, como pode ser o caso das obras de drenaxe transversal, onde son frecuentes períodos de retorno de ata 500 anos.

Táboa 2.2: Valores mínimos do período de retorno (Norma 5.2- IC)

Tipo de elemento de drenaxe	IMD da vía afectada		
	Alta IMD > 2000	Media 2000 > IMD > 500	Baixa IMD < 500
Pasos inferiores con dificultade para desaugar por gravidade	50	25	Criterio do proxectista
Elementos de drenaxe superficial da plataforma e marxes	25	10	
Obras de drenaxe transversal	100		Comprobar que non se alteran as condicións previas para T = 10 anos

A seguinte variable a determinar para o cálculo da intensidade media (I) é a relación existente entre a intensidade media horaria e a intensidade media diaria (I_1/I_d). Este valor depende da situación da obra é obtense a partir do mapa de isoliñas recollido na norma 5.2-IC (Figura 2.1).

Xa para rematar, quedaría a selección da duración da chuvieira. Considérase un valor igual ao tempo de concentración (T_c) da conca, definido como o tempo necesario para que as precipitacións caídas nas zonas mais afastadas da conca poidan face-la súa viaxe ata o punto no que desauga. A partir deste momento, toda a superficie da conca esta achegando caudal, polo que se pode dicir que se acada unha situación de equilibrio na que se obtén o caudal máximo, valor que non se ve incrementado aínda que continúen as precipitacións. O tempo de concentración é característico da conca, sendo independente das características das precipitacións.

Para o cálculo do tempo de concentración é preciso diferenciar dous casos diferentes en función do tipo de fluxo de auga: o fluxo canalizado e o fluxo difuso. No fluxo canalizado, a maior parte do tempo de recorrido da auga prodúcese por una rede de canles definidos, caso normal en concas naturais e elementos lineais de drenaxe (cunetas, canles de derivación, etc.). Nese caso, o tempo de concentración pode estimarse mediante a seguinte expresión:

$$T_c = 0.3 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt[4]{J}} \right)^{0.76}$$

onde

- T_c tempo de concentración da conca (h)
- L lonxitude do curso principal (km)
- J pendente media do curso principal (m/m)

Esta fórmula non é aplicable no caso de fluxo difuso, cando o caudal se reparte pola superficie de xeito disperso, acadando alturas de lámina de auga e velocidades reducidas. Esta situación prodúcese na plataforma e nas marxes da infraestrutura, sendo preciso percorrer a outro tipo de estimacións para o tempo de concentración. No caso da plataforma, a norma 5.2-IC establece que se pode tomar T_c entre 5 e 10 min en función da lonxitude de percorrido da auga. Nas marxes, os valores de tempo de concentración varían entre os 6 e os 35 minutos, dependendo de varios factores: a lonxitude de percorrido da auga, a cobertura do terreo e a súa pendente media.



Figura 2.1: Mapa de isolíneas intensidade de precipitación (Norma 5.2- IC)

2.3.1.2 Coeficiente de escorrentía

O coeficiente de escorrentía (C) representa a proporción da precipitación que escorre polo terreo, sendo esta a única compoñente que se considera na estimación dos caudais. O seu valor depende da relación existente entre a precipitación máxima diaria (P_d) e o que se coñece como limiar de escorrentía (P_0). O limiar de escorrentía representa a precipitación mínima necesaria a partir da cal se produce a escorrentía superficial. Se a precipitación máxima diaria é inferior a ese valor ($P_d < P_0$), non se producirá

escorrentía ($C = 0$). Pola contra, se a precipitación máxima diaria é superior ao limiar de escorrentía ($P_d \geq P_0$), existirá unha certa escorrentía superficial, estimándose o coeficiente de escorrentía mediante a seguinte expresión:

$$C = \frac{(P_d - P_0) \cdot (P_d + 23P_0)}{(P_d + 11P_0)^2}$$

onde

- C coeficiente de escorrentía
- P_d precipitación máxima diaria (mm) correspondente ao período de retorno (T) considerado
- P_0 limiar de escorrentía (mm)

A determinación do limiar de escorrentía é complexa debido ao elevado número de variables que interveñen no proceso. O seu valor depende do tipo e uso do solo, das condicións de humidade existentes, da pendente do terreo, etc. Para facilita-la súa obtención, a norma 5.2-IC proporciona uns valores iniciais de P_0 (táboas 2.3, 2.4, 2.5) en función dos factores comentados anteriormente. Estes valores deben ser posteriormente modificados mediante un coeficiente corrector (Figura 2.2) que ten en conta as variacións existentes dependendo da zona concreta da obra.

**Táboa 2.3: Estimación inicial do limiar de escorrentía P_0 (mm) [1]
[Norma 5.2- IC]**

Uso da terra	Pendente (%)	Características hidrolóxicas	Grupo de solo			
			A	B	C	D
Barbeito	≥ 3	R	15	8	6	4
	≥ 3	N	17	11	8	6
	< 3	R/N	20	14	11	8
Cultivos en fileira	≥ 3	R	23	13	8	6
	≥ 3	N	25	16	11	8
	< 3	R/N	28	19	14	11
Cereais de inverno	≥ 3	R	29	17	10	8
	≥ 3	N	32	19	12	10
	< 3	R/N	34	21	14	12

N: cultivo segundo curvas de nivel; R: cultivo segundo liña de máxima pendente

**Táboa 2.4: Estimación inicial do limiar de escorrentía P_0 (mm) [2]
[Norma 5.2- IC]**

Uso da terra	Pendente (%)	Características hidrolóxicas	Grupo de solo			
			A	B	C	D
Rotación de cultivos pobres	≥ 3	R	26	15	9	6
	≥ 3	N	28	17	11	8
	< 3	R/N	30	19	13	10
Rotación de cultivos densos	≥ 3	R	37	20	12	9
	≥ 3	N	42	23	14	11
	< 3	R/N	47	25	16	13
Pradaría	≥ 3	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Boa	*	33	18	13
		Moi boa	*	41	22	15
	< 3	Pobre	58	25	12	7
		Media	*	35	17	10
		Boa	*	*	22	14
		Moi boa	*	*	25	16
Plantacións regulares de aproveitamento forestal	≥ 3	Pobre	62	26	15	10
		Media	*	34	19	14
		Boa	*	42	22	15
	< 3	Pobre	*	34	19	14
		Media	*	42	22	15
		Boa	*	50	25	16
Masas forestais (bosque, monte baixo, etc)		Moi clara	40	17	8	5
		Clara	60	24	14	10
		Media	*	34	22	16
		Espesa	*	47	31	23
		Moi espesa	*	65	43	33

- 1) N: cultivo segundo curvas de nivel; R: cultivo segundo liña de máxima pendente
- 2) * significa que non se debe ter en conta esa superficie para o cálculo de caudais
- 3) As zonas en bancais inclúiranse nas de pendente $< 3\%$

**Táboa 2.5: Estimación inicial do limiar de escorrentía P_0 (mm) [3]
[Norma 5.2- IC]**

Tipo de terreo	Pendente (%)	P_0 (mm)
Rocas permeables	≥ 3	3
	< 3	5
Rocas impermeables	≥ 3	2
	< 3	4
Firmes granulares sen pavimento		2
Con lastro		1.5
Pavimentos bituminosos ou de formigón		1

Como se pode apreciar nas táboas, o valor inicial de P_0 depende do grupo de solo considerado, podendo ser de catro tipos en función da súa natureza e a súa capacidade de infiltración. O grupo ao cal pertence un solo concreto determínase mediante a Figura 2.3 en función do seu contido de area, arxila e limo.



Figura 2.2: Coeficiente corrector do limiar de escorrentía (Norma 5.2- IC)

2.3.2 Método de Témez

A partir do método racional, Témez (1991) propuxo unha nova expresión de cálculo onde introducen un par de modificacións para ter en conta factores como a falta de uniformidade da precipitación e o tamaño da conca. Neste caso o caudal máximo para un determinado período de retorno (T) calcúlase mediante a seguinte expresión:

$$Q = K \cdot \frac{C \cdot A \cdot I}{3.6}$$

onde

Q	caudal desaugado pola conca (m ³ /s)
C	coeficiente medio de escorrentía
A	superficie da conca (km ²)
I	intensidade media de precipitación (mm/h) correspondente ao período de retorno (T) considerado
K	coeficiente de uniformidade

O coeficiente K introduce unha corrección para ter en conta as diferenzas de precipitación que poden darse en concas relativamente extensas. Determinábase a partir do tempo de concentración T_c da conca mediante a seguinte expresión:

$$K = 1 + \frac{1}{1 + \frac{14}{T_c^{1.25}}}$$

onde

K	coeficiente de uniformidade
T _c	tempo de concentración da conca (h)

O coeficiente de escorrentía calcúlase igual que no método presentado anteriormente. No caso da intensidade media de precipitación, o cálculo é análogo pero introdúcese outro coeficiente corrector na determinación da intensidade media diaria (I_d):

$$I_d = K_A \cdot \frac{P_d}{24}$$

onde

I _d	intensidade media diaria (mm/h) correspondente ao período de retorno (T) considerado
P _d	precipitación máxima diaria (mm) correspondente ao período de retorno (T) considerado

K_A coeficiente corrector que ten en conta a extensión da conca e a non simultaneidade da precipitación; determínase mediante a seguinte expresión:

$$K_A = 1 - \frac{\log A}{15}$$

Polo que respecta ás condicións de aplicación, o método considérase aplicable para concas de superficie menor aos 2000 km² e tempos de concentración inferiores a 6 horas.

2.4. Estudos hidráulicos

Unha vez coñecidos os caudais que deben evacuar cada un dos diferentes elementos de drenaxe, procédese ao seu deseño en termos de xeometría, dimensións e materiais.

Neste apartado faise un breve resumo dos conceptos básicos de cálculo hidráulico de canles necesarios para levar a cabo esta tarefa. As hipóteses básicas son: fluxo turbulento en lámina libre e perdas de enerxías debidas ao rozamento coas superficies da canle.

2.4.1 Fluxo uniforme

O fluxo permanente e uniforme defínese como aquel no que as variables do fluxo, é dicir a velocidade (v) e o calado (y) se manteñen constantes ao longo do tempo e ao longo da canle, respectivamente. Estas condicións de movemento prodúcense en canles rectos e longos con pendente, sección transversal e rugosidade constantes. Na práctica o fluxo uniforme non permanente non existe, deste xeito désígnase de forma xenérica ao fluxo permanente e uniforme como fluxo uniforme.

Pódese deducir de xeito sinxelo que nun tramo de canle entre dúas seccións separadas unha distancia lonxitudinal (L) sendo a distancia horizontal entre elas (Δx) onde existe un fluxo uniforme, o fondo da canle, a superficie da auga e a liña de enerxía son paralelos. Ademais, como na maioría das canles, tanto naturais como artificiais, o ángulo θ que forman o fondo da canle e a horizontal soe ser moi pequeno, $\sin \theta = \tan \theta$, ou o que é o mesmo, $\Delta x = L$, as perdas de carga por unidade de lonxitude da traxectoria do fluxo, $\Delta H/L$, pódense aproximar á pendente do fondo da canle.

Nas canles abertas a presión na superficie libre é a atmosférica, o que provoca que o movemento se caracterice pola influencia do peso, e por non existir un gradiente lonxitudinal de presións. Deste xeito, o fluxo en canles abertas clasifícase segundo o número adimensional de Froude (Fr) que representa a relación entre as forzas de inercia e as forzas gravitacionais, ou máis concretamente, as súas raíces cadradas:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gy_m}} = \frac{v}{c}$$

onde

F_r	número de Froude
v	velocidade media do fluxo (m/s)
g	aceleración da gravidade (m/s^2)
y_m	profundidade ou calado medio (m)
c	celeridade de onda, ou a velocidade coa que se transmite unha pequena perturbación con relación ao medio no que se produce (m/s)

Deste xeito, o número de Froude é a relación entre a velocidade media do fluxo e a velocidade de propagación das ondas superficiais nunha canle. En función do valor do número de Froude clasifícase o réxime de circulación do fluxo como:

- $F_r > 1$ --- Réxime rápido ou supercrítico
- $F_r = 1$ --- Réxime crítico
- $F_r < 1$ --- Réxime lento ou subcrítico

2.4.2. Seccións comúns e definicións básicas

As seccións das canles naturais son xeralmente irregulares, con todo, as canles artificiais soen proxectarse cunha sección xeométrica regular. As formas máis frecuentes son a trapezoidal, rectangular, triangular e circular. Existen unha serie de parámetros que permiten caracterizar a xeometría dunha canle (Figura 2.4):

- Sección mollada (S): sección transversal da corrente que conduce a canle.
- Perímetro mollado (P): lonxitude da liña de intersección do plano da sección transversal coa sección mollada.
- Raio hidráulico (R_h): relación entre a sección mollada e o perímetro mollado, $R_h = S/P$.
- Calado medio (y_m): relación entre a sección mollada e o ancho da superficie libre, $y_m = S/B$.
- Calado normal, (y_n): profundidade máxima dunha canle cun caudal, velocidade e sección determinadas.

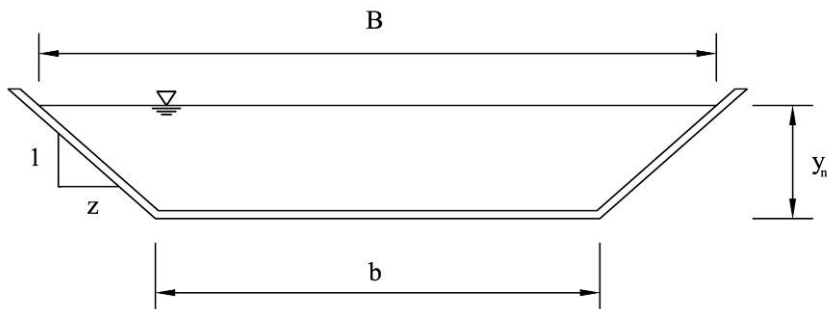


Figura 2.4. Parámetros da xeometría transversal dunha canle

2.4.3. Cálculo do calado normal e da velocidade do fluxo

A fórmula máis empregada para a resolución de problemas en fluxo uniforme é a coñecida como fórmula de Manning-Strickler, que se pode expresar como:

$$Q = V \cdot S = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot J^{1/2} \cdot S$$

onde

Q	caudal transportado (m ³ /s)
V	velocidade media do fluxo (m/s)
S	sección mollada (m ²)
1/n	coeficiente de rugosidade (inverso do número de Manning)
R _h	raio hidráulico
J	pendente do fondo da canle

Nas Táboas 2.6 e 2.7 danse algúns rangos de valores do coeficiente de rugosidade recollidos na norma 5.2-IC para diferentes tipos materiais en caso de canles artificiais e álveos naturais respectivamente.

Para a resolución da expresión anterior preséntanse distintos tipos de inconvenientes, como é que para o cálculo do calado normal dun fluxo para un determinado caudal é preciso a resolución dunha ecuación implícita dada a relación complexa entre y_n , S e R_h. Outros cálculos son máis sinxelos, como é o caso de determinar o caudal esperado para unha canle cunhas características xeométricas concretas.

Existen unha serie de relacións, diferentes segundo o tipo de seccións, que facilitan a resolución desta ecuación.

2.4.3.1. Seccións rectas

Da xeometría dunha transversal trapezoidal (Figura 2.4), pódese deducir de xeito sinxelo os valores da sección mollada e do perímetro mollado en función do calado normal:

$$S = y_n (b + z y_n)$$
$$P = b + 2 y_n \sqrt{1 + z^2}$$

onde

S	sección mollada (m ²)
P	perímetro mollado
y _m	calado normal (m)
b	ancho do fondo da canle (m)
z	noiro horizontal da pendente lateral
S	sección mollada (m ²)

Táboa 2.6: Coeficientes de rugosidade (1/n) (Norma 5.2 IC)

Natureza da superficie	1/n (m ^{1/3} /s)
Terra espida, superficie uniforme	40 – 50
Terra espida, superficie irregular	30 – 50
Terra, lixeira vexetación	25 – 30
Terra, vexetación espesa	20 – 25
Rocha, superficie uniforme	30 – 35
Rocha, superficie irregular	20 – 30
Fondo de grava, caixeiros de formigón	50 – 60
Fondo de grava, caixeiros empedrada	30 – 45
Empedrados	35 – 50
Revestimento bituminoso	65 – 75
Formigón proxectado	45 – 60
Tubo corrugado sen pavimentar	30 – 40
Tubo corrugado, pavimentado	35 – 50
Tubo de fibrocemento, sen xuntas	100
Tubo de fibrocemento, con xuntas	85
Tubo de formigón	60 – 75

Táboa 2.7: Coeficientes de rugosidade (1/n) para álveos naturais (Norma 5.2 IC)

Características do álveo natural	1/n (m ^{1/3} /s)
Trazado e álveo regulares	
Algunha vexetación nas marxes pero sen invadi-lo álveo	35 – 40
Vexetación nas marxes que penetra algo no álveo	20 – 25
Trazado sinuoso con depresións e barras no álveo	
Algunha vexetación nas marxes pero sen invadi-lo álveo	35 – 35
Vexetación nas marxes que penetra algo no álveo	15 – 20
Trazado irregular con acusada interferencia da vexetación	10 – 15

Tan só quedaría introducir estas expresións na ecuación de Manning-Strickler e obter o valor do calado normal. Unha vez coñecido este, é moi sinxelo determina-la velocidade media do fluxo (V) dividindo o caudal (Q) pola sección mollada (S)

Exemplo: A pendente lonxitudinal dunha canle cunha sección trapecial de base inferior $b=1$ m e noiro horizontal $z = 1$. A pendente da canle é do 1 por mil. As paredes están revestidas de formigón ($n=0.014$), sendo o caudal que circula de 1.98 m³/s. ¿A que profundidade circula a auga e cal é a súa velocidade media?

$$S = y_n(b + zy_n) = y_n + y_n^2$$

$$P = b + 2y_n\sqrt{1+z^2} = 1 + 2y_n\sqrt{2}$$

$$1.98 = \frac{1}{0.014} \left(\frac{y_n + y_n^2}{1 + 2y_n\sqrt{2}} \right)^{2/3} 0.001^{1/2} (y + y^2), \quad y_n = 0.820 \text{ m}$$

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{y_n + y_n^2} = 1.37 \text{ m/s}$$

No caso dunha canle cunha sección rectangular ou triangular, o procedemento sería análogo ao realizado para unha canle cunha sección trapecial. No caso dunha sección rectangular, os cálculos pódense simplificar, posto que esta é un caso particular dunha sección trapecial no que $z=0$:

$$S = by_n$$

$$P = b + 2y_n$$

Pola súa banda, unha sección triangular é un caso particular dunha sección trapecial na que $b=0$, de xeito que:

$$S = zy_n^2$$

$$P = 2y_n\sqrt{1+z^2}$$

2.4.3.2. Seccións circulares parcialmente cheas

O procedemento para a resolución de seccións circulares é en esencia o mesmo que para seccións non circulares, coa diferenza da maior dificultade asociada á determinación do raio hidráulico (R_n). Os cálculos pódense simplificar, aínda que coa perda de certa precisión, por medio do uso de gráficas como a que se mostra na Figura 2.5.

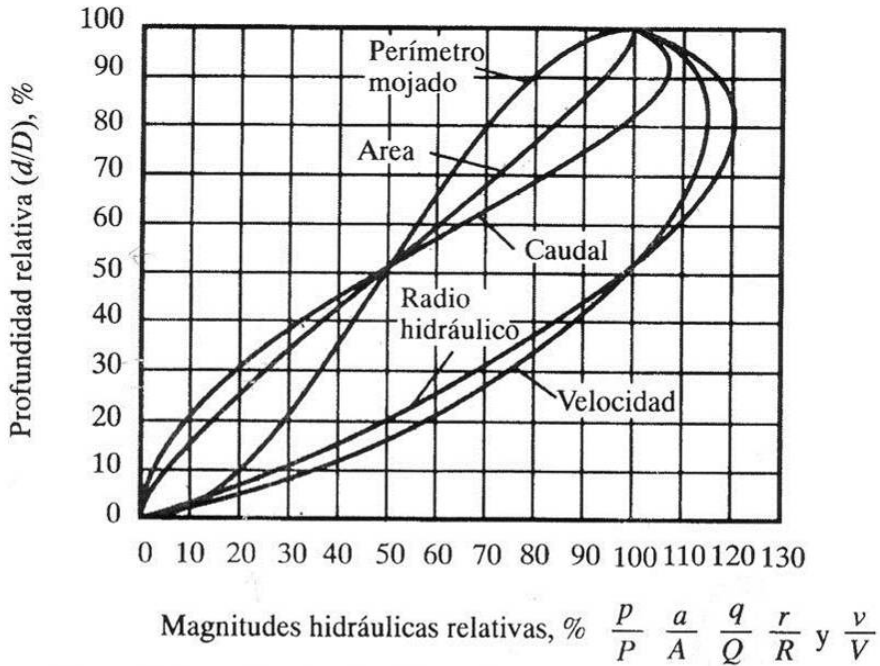


Figura 2.5. Gráfico para o cálculo hidráulico dunha canle de sección circular

Nestas gráficas preséntase unha curva para cada unha das magnitudes hidráulicas. En ordenadas represéntase a profundidade relativa (expresada en tanto por cento) respecto da altura do conduto e en abscisas represéntanse as restantes magnitudes hidráulicas relativas. O xeito máis sinxelo de proceder consiste en calcular inicialmente a velocidade ou caudal para o caso da sección chea e de seguido axustar graficamente os resultados para o caso dunha superficie parcialmente chea.

2.4.4. Velocidades admisibles

Unha vez determinado o calado e a velocidade nas canles que constitúen os diferentes elementos de drenaxe, será preciso analizar se os valores obtidos son ou non admisibles. No caso das velocidades é conveniente que o seu valor estea por encima dun valor mínimo, frecuentemente 0.5 m/s, para evitar problemas de sedimentación no elemento de drenaxe; e por debaixo dun valor máximo (Táboa 2.) para evitar problemas de erosión.

Táboa 2.8: Velocidades máximas admisibles (Norma 5.2 IC)

Natureza da superficie	Velocidade máxima (m/s)
Area fina ou limo (pouca ou ningunha arxila)	0.20 – 0.60
Area arxilosa dura, margas duras	0.60 – 0.90
Terreo parcialmente cuberto de vexetación	0.60 – 1.20
Arxila, grava, lousas brandas con cuberta vexetal	1.20 – 1.50
Herba	1.20 – 1.80
Conglomerado, lousas duras, rochas brandas	1.40 – 2.40
Cachotería, rochas duras	3.00 – 4.50
Formigón	4.50 – 6.00

2.4.4. Enerxía específica e calado crítico

A enerxía nun fluxo en canles abertos é un balance unicamente entre a altura de velocidade e a altura potencial, posto que a presión na superficie é sempre a atmosférica. Pódese definir entón a enerxía específica (h_0) para calquera sección como a altura de enerxía cando se emprega o fondo da canle como plano de referencia:

$$h_0 = y + \frac{v^2}{2g} = y + \frac{Q^2}{2gS^2}$$

Esta ecuación relaciona os valores de tres variables: enerxía específica, calado e velocidade ou caudal. Para o seu estudo o procedemento común é fixar un valor constante para unha das variables e observar como varían as outras dúas, en concreto:

- Para unha enerxía específica constante, estúdase como varía a velocidade ou caudal en función do calado.
- Para unha caudal ou velocidade constante, estúdase como varía a enerxía específica en función do calado.

Dos resultados obtidos nestas análises, obtense que para un caudal dado hai normalmente dous estados posibles para un mesmo nivel de enerxía específica, chamados estados conxugados, existindo unha enerxía específica mínima, h_{0min} , que corresponde cun número de Froude igual á unidade (réxime crítico). Defínese entón o calado crítico, y_c , como aquel calado que proporciona a mínima enerxía específica para un caudal determinado, ou, ben o máximo caudal (caudal crítico) que pode circular por unha sección considerada para un determinado nivel de enerxía específica.

Analogamente, pódese definir a pendente crítica como a pendente necesaria para que se produza fluxo uniforme cunha profundidade crítica.

Se facemos $dh_0/dy=0$, obtense que $h_0=h_{0\min}$ cando:

$$\frac{Q_c^2}{g} = \left(\frac{S^3}{B} \right)_{y=y_c}$$

No caso dunha canle cunha sección rectangular, a relación anterior simplifícase:

$$Q^2 = gb^2y_c^3$$

obténdose do mesmo xeito para este caso as relacións:

$$h_{0\min} = \frac{3}{2}y_c$$

$$v_c = \sqrt{gy_c}$$

onde v_c é a velocidade crítica ou a velocidade asociada ao calado crítico, de xeito que se $v < v_c$ ($F_r < 1$) o réxime será lento ou subcrítico e se $v > v_c$ ($F_r > 1$) será rápido ou supercrítico.

2.5. Drenaxe lonxitudinal

O sistema de drenaxe lonxitudinal está composto por elementos que recollen a escorrentía superficial da plataforma e das marxes. O adxectivo lonxitudinal débese ao feito de que o fluxo de auga nestes elementos é paralelo ao trazado da infraestrutura.

Os principais elementos do sistema de drenaxe lonxitudinal son as cunetas e as canles de derivación. Outros elementos complementarios son os sumidoiros, embornais, arquetas, colectores, baixantes, etc.

2.5.1 Elementos de drenaxe lonxitudinal

2.5.1.1. Cunetas

Unha cuneta (Figura 2.6) é unha gabia aberta no terreo en sentido lonxitudinal xunto a plataforma. En xeral, a súa pendente coincide coa pendente lonxitudinal da rasante, salvo en casos especiais nos que sexa conveniente introducir modificacións; por exemplo, incrementa-la súa pendente para mellora-la súa capacidade de evacuación.



Figura 2.6: Exemplo de cuneta triangular revestida

Existen varias tipoloxías de cuneta que se poden empregar: cunetas de seguridade, triangulares, trapeciais ou reducidas (Figura 2.7).

É moi importante que a presenza da cuneta non represente un risco para a circulación dos vehículos, circunstancia que se debe ter en conta na elección da súa tipoloxía. Cando exista espazo suficiente e sexa economicamente posible, as condicións de seguridade dos vehículos deben ser prioritarias na elección; de xeito que se algún vehículo se sae da plataforma e ten que circular pola cuneta, o poida facer dun modo seguro. Atendendo a este criterio, recoméndanse principalmente cunetas de seguridade (noiros transversais menores de 1/6, e arestas suavizadas con raios mínimos de 10 m). No caso de empregarse cunetas trapeciais ou triangulares recoméndase que as súas inclinacións transversais sexan suficientemente reducidas. As cunetas reducidas poden empregarse exclusivamente en terreo accidentado, sendo obrigatorio cubrilas ou protexelas mediante barreiras de seguridade.

En canto o seu comportamento hidráulico, as cunetas son elementos de tipo lineal que responden a expresión de Manning-Strickler. En función das velocidades acadadas (tanto máximas como mínimas) pode ser necesario o seu revestimento (Figura 2.8). Tamén se deben revestir cando se desexe evitar infiltracións ou cando a súa conservación sexa difícil ou custosa.

Cando as cunetas acadan lonxitudes elevadas ou a súa capacidade hidráulica está comprometida soen estar complementadas mediante colectores aos que se evacúa a auga mediante sumidoiros colocados cada unha distancia determinada.

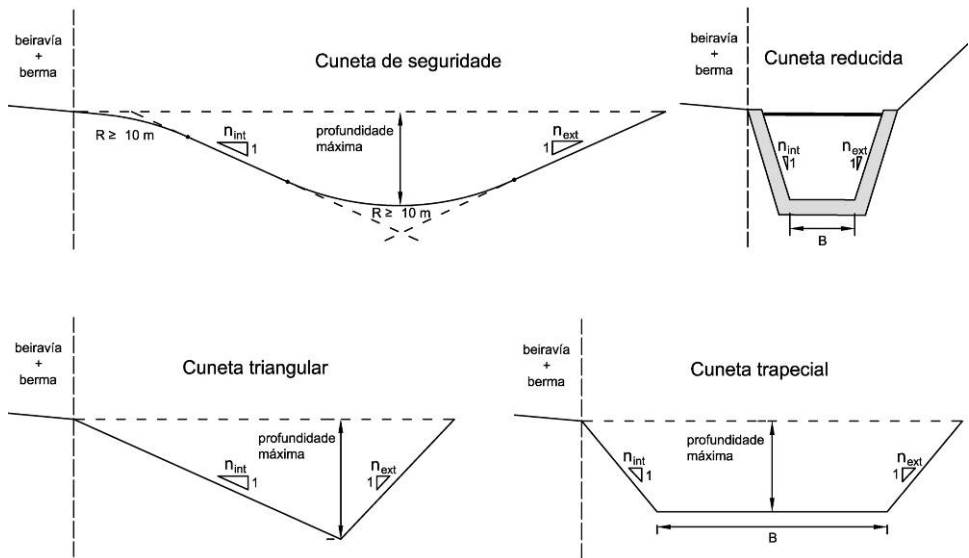


Figura 2.7: Tipoloxías de cunetas (Norma 5.2 IC)



Figura 2.8: Cuneta trapezoidal revestida

2.5.1.2. Levadas

Unha levada é un pequeno canal revestido de escasa profundidade e anchura que se sitúa en xeral no borde da plataforma (Figura 2.9). A súa pendente transversal está limitada por motivos de seguridade e tamén a súa anchura para que a auga non invada a plataforma, polo que teñen unha capacidade hidráulica limitada. Isto provoca a necesidade de evacuar frecuentemente a auga da canle de derivación cara a outros elementos de drenaxe con maior capacidade. Na Figura 2.10 preséntanse diferentes tipoloxías de canles de derivación que se poden empregar como elementos de drenaxe.



Figura 2.9: Exemplo de levada xunto á beirarrúa

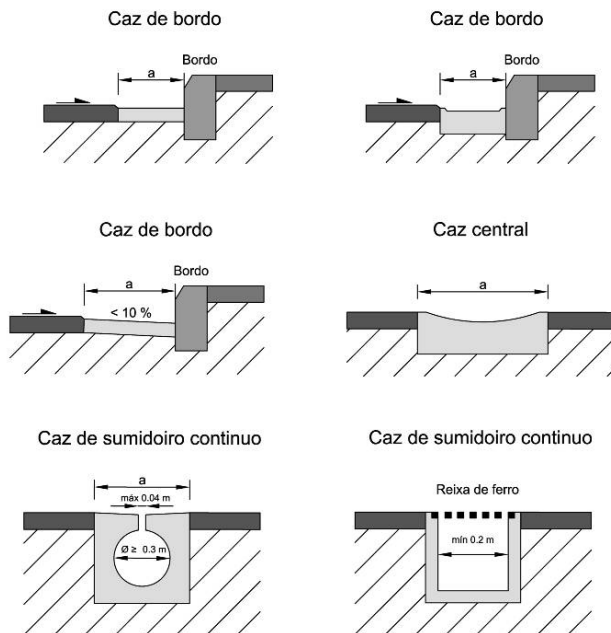


Figura 2.10: Tipoloxías de levadas (Norma 5.2 IC)

2.5.1.3. Sumidoiros e embornais

Son elementos que serven para evacua-lo caudal transportado polas canles de derivación e as cunetas cara un colector (sumidoiro) ou cara o exterior (embornal). Existen varias tipoloxías de sumidoiros: continuos ou illados (Figura 2.11), e dentro destes últimos poden ser horizontais, laterais ou mixtos (Figura 2.12). A selección da tipoloxía e o deseño dos sumidoiros debe facerse garantindo principalmente a seguridade da circulación e limitando o risco de obstrución por acumulación de lixo procedente da plataforma. O seu comportamento hidráulico queda supeditado ao cumprimento das condicións anteriores.

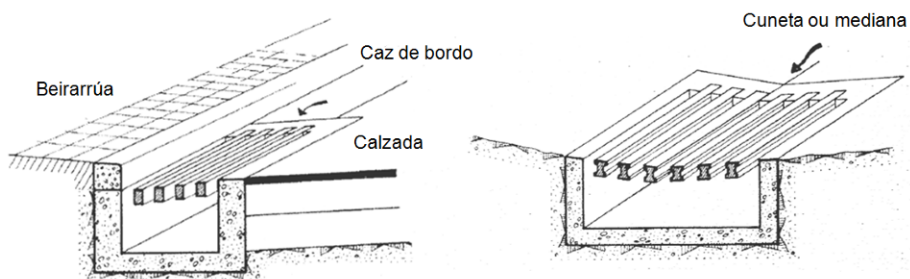


Figura 2.11: Sumidoiros illados horizontais en bordo (esquerda) e en cuneta ou mediana (dereita) [Norma 5.2-IC]



Figura 2.12: Sumidoiro mixto

2.5.1.4. Colectores

Os colectores (Figura 2.13 e 2.14) son tubos que se sitúan xeralmente debaixo das cunetas e das canles de derivación e recollen a auga que se evacúa a través dos sumidoiros. Serven para completa-los elementos de drenaxe superficial en zonas onde a súa capacidade hidráulica pode estar comprometida. O diámetro dos colectores non pode, en ningún caso, ser inferior aos 300 mm, recomendándose o emprego de diámetros mínimos de 400 mm.

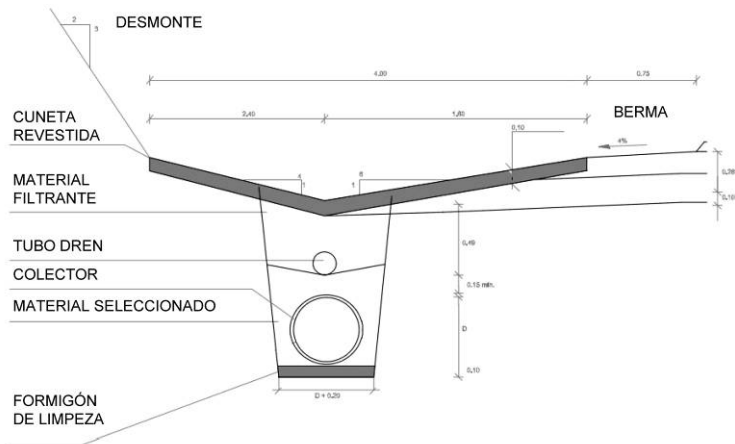


Figura 2.13: Detalle de colector baixo cuneta de pé de desmonte



Figura 2.14: Dous colectores conflúndo nun mesmo punto onde se situará unha arqueta

2.5.1.5. Arquetas

É un elemento intermedio entre os elementos de drenaxe situados en superficie e os elementos enterrados, principalmente colectores (Figura 2.15). Teñen por finalidade permitir a súa inspección e conservación (limpeza de colectores). A distancia entre arquetas non debe excederlos 50 metros, salvo no caso de contar con equipos de limpeza que permitan acadar distancias maiores.

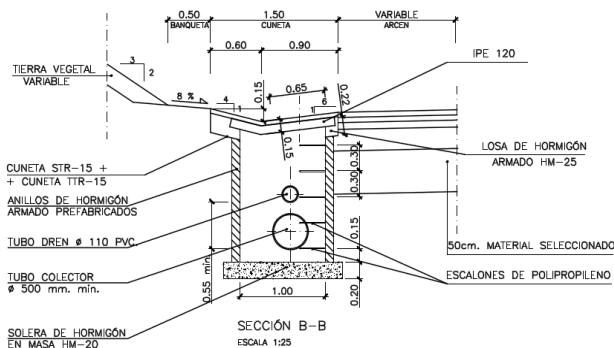


Figura 2.15: Arqueta de rexistro

2.5.1.6. Baixantes

As baixantes (Figura 2.16) son elementos cunha pendente elevada situados nos noiros dos desmontes ou terrapléns que serven para evacuar auga de elementos de drenaxe superficial cara outros situados nunha cota inferior, cara obras de drenaxe transversal ou cara o terreo natural.



Figura 2.16: Baixante situada na ladeira dun viaduto

2.5.2. Drenaxe da plataforma

A auga que recibe a plataforma debe dirixirse mediante a propia pendente transversal da estrada cara a cunetas ou canles de derivación, onde será recollida e posteriormente evacuada. A liña de máxima pendente en calquera punto da plataforma deberá ter unha inclinación mínima dun 0.5%. O recorrido da auga pola plataforma prodúcese en fluxo difuso con alturas de lámina de auga reducidas, velocidades moderadas e gran extensión. O tempo de percorrido debe reducirse ao máximo, de xeito que se evite a presenza excesiva de auga na calzada, o que podería derivar en problemas de hidroplaneo dos vehículos.

É preciso ter especial coidado nas transicións de peralte entre curvas de sentido contrario, onde existe un cambio de signo da pendente transversal e polo tanto unha sección onde o peralte é nulo. Estas transicións non deben situarse en zonas onde a inclinación lonxitudinal da rasante sexa inferior ao 0.5%, salvo que se tomen medidas de corrección axeitadas

En estradas de calzadas separadas o sistema de drenaxe da plataforma debe axeitarse ao tipo de mediana existente (Figuras 2.17 e 2.18), garantindo que non se produce ningún tipo de transvase de auga dunha calzada a outra.



Figura 2.17: Cuneta de mediana en calzadas separadas

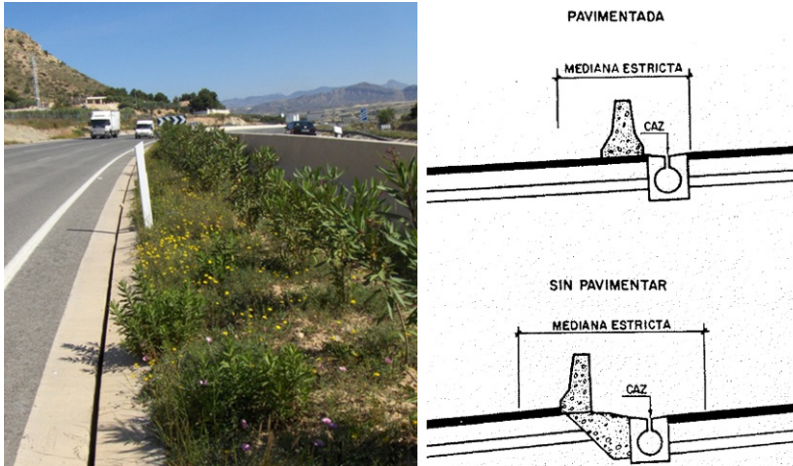


Figura 2.18: Sistemas de drenaxe en mediana estrita (Norma 5.2-IC)

2.5.3. Drenaxe das marxes

Tamén é preciso recoller e evacua-la auga procedente dos noiros dos desmontes e dos terrapléns. A escorrentía procedente dos desmontes recóllese xeralmente mediante cunetas de pé de desmonte (Figura 2.19), complementadas en certos casos por colectores. Se os noiros de desmonte poden ter problemas de erosión, o simplemente por mantemento, pode ser conveniente estudar a necesidade deixar entre o pé do desmonte e a cuneta unha berma exterior onde se poida deposita-lo material solto sen afectar á cuneta.



Figura 2.19: Cuneta de pé de desmonte

Se o terreo contiguo desauga unha escorrentía importante cara ao desmorte pode ser necesaria a construción dunha cuneta de garda (Figura 2.20) que recolla a auga antes de que poida erosionar-lo noiro do desmorte. A cuneta de garda debe estar situada entre un e dos metros da coroación do noiro. No caso de que a cuneta de garda presente puntos baixos onde se poida acumular a auga, ou a súa capacidade hidráulica estea comprometida, pode ser necesario introducir no seu percorrido baixantes que evacúen cara a cuneta de pé de desmorte.



Figura 2.20: Cuneta de garda de desmorte

No caso dos terrapléns, cando a escorrentía da plataforma sexa moderada, a altura do terraplén reducida (ata dous metros en zonas moi chuviosas e erosionables, ou ata catro metros en zonas áridas pouco erosionables) pódese proceder ao vertido directo polo noiro. En caso contrario, a escorrentía da plataforma debe recollese por medio de canles de derivación de coroación que dirixan o fluxo cara baixantes (Figura 2.21).

Outro elemento que tamén pode ser preciso é a cuneta de pé de terraplén (Figura 2.22). Constrúese cando non se pode verter directamente no terreo contiguo ao terraplén ou para recolle-la auga procedente do terreo contiguo cando este verte cara o terraplén. Tamén se empregan para conducir a auga procedente de cunetas de pé de desmorte ou de garda cara as obras de drenaxe transversal



Figura 2.21: Canle de derivación de coroación de terraplén e baixante pola que desauga



Figura 2.22: Cuneta de pé de terraplén con saída cara unha obra de drenaxe transversal

2.6. Drenaxe transversal

O sistema de drenaxe transversal consiste na construción de obras de drenaxe transversal, coñecidas como ODT (Figura 2.23 e 2.24), condutos soterrados que cruzan a infraestrutura, e que permiten restituí-la a continuidade dos álveos naturais interceptados. As ODTs aproveítanse tamén como punto de evacuación dos elementos de drenaxe lonxitudinal (cunetas, canles de derivación, etc.) que recollen a escorrentía da plataforma e das marxes. En función das súas características poden recibir diversos nomes:

- caños: sección circular de diámetro < 1 m;
- bueiros: sección non circular, luz < 1 m;
- sumidoiro: luz comprendida entre 1 e 3 m;
- pontóns: luz comprendida entre 3 e 10 m;
- pontes: luz superior a 10 m;
- viadutos: número de vanos superior a 4 m.



Figura 2.23: Obra de drenaxe transversal (ODT)

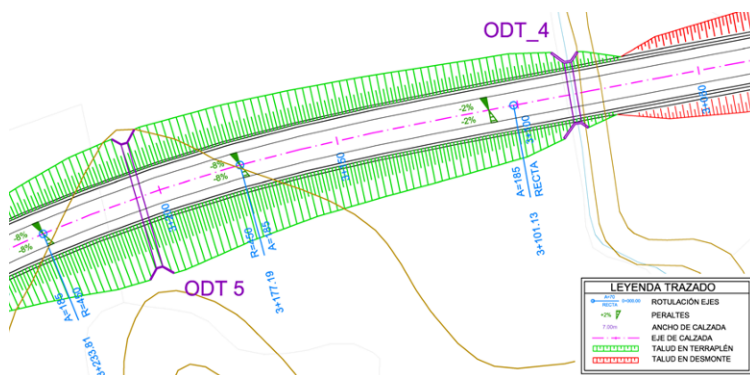


Figura 2.24: Exemplo de plano en planta coa situación de dúas ODTs

O criterio de deseño fundamental das ODTs é conseguir perturba-lo menos posible as condicións de fluxo do álveo natural. Débese preservar na medida do posible a aliñación en planta e o perfil orixinal; evitando os cambio bruscos; se iso non é posible deberanse introduci-las medidas correctoras necesarias.

Ademais, débense cumprir unha serie de criterios funcionais relacionados coa velocidade do fluxo, os niveis de auga, sobreelevacións de nivel, etc. Estas variables deben estar dentro duns valores admisibles para evita-la aparición de certos problemas non desexables, como poden ser: erosións, desbordamentos, soterramentos, etc.

2.6.1. Funcionamento hidráulico das ODTs

Para poder levar a cabo axeitadamente o proceso de deseño dunha ODT é preciso comprende-lo seu funcionamento hidráulico. En función da entidade do caudal a evacuar, das características da ODT, e das condicións augas arriba e augas abaixo, a obra pode funcionar de diferente forma (Figura 2.25), o que se traduce en diferentes condicións hidráulicas (alturas de auga, velocidades, etc.).

Os oito casos de funcionamento que se presentan (Figura 2.25) divídense en dous grandes grupos ou clases en función de se a entrada da ODT funciona en lámina libre (Clase I) ou se atopa somerxida (Clase II). A pertenza a cada unha das clases determinase en función da relación que existe entre a altura de auga que se acada na entrada da ODT (H_e), provocada pola redución de sección; e a altura do conduto (D).

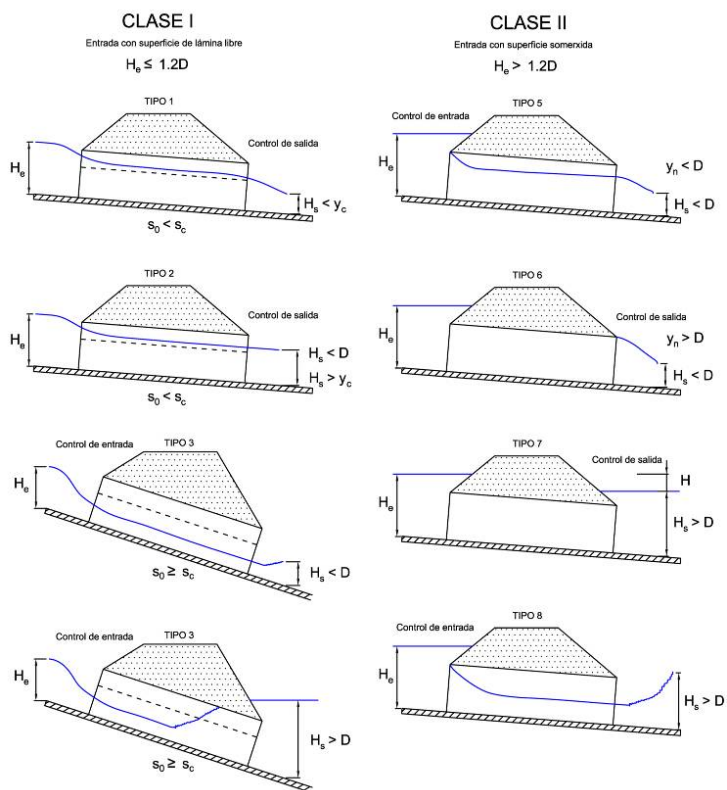


Figura 2.25: Funcionamento hidráulico das ODTs

Ademais, hai que facer referencia á sección de control da ODT. A sección de control determina o comportamento da obra e polo tanto o seu cálculo. Pode ser a sección de entrada ou a sección de saída en función de se o que manda no comportamento son as condicións augas arriba ou as condicións augas abaixo respectivamente.

2.6.2. Criterios de deseño

As ODTs deben cumprir unha serie de criterios de deseño para garanti-lo seu correcto funcionamento. En primeiro lugar, a norma 5.2-IC establece a dimensión mínima que debe te-la súa sección transversal en función da lonxitude da obra (Táboa 2.9).

Táboa 2.9: Dimensión mínima das ODTs (Norma 5.2 - IC)

Lonxitude da obra (m)	< 3	3 - 4	4 - 5	5 - 10	10 - 15	> 15
Dimensión mínima (m)	0.60	0.80	1.00	1.20	1.50	1.80

En relación coas comprobacións hidráulicas, as ODTs deben cumprir varias condicións fundamentais. A obra debe funcionar preferentemente coa súa entrada en lámina libre (Clase I), e polo tanto debe cumprila seguinte condición:

$$H_e/D(H) \leq 1.2$$

onde

H_e altura de auga na entrada da ODT
 D diámetro (condutos circulares)
 H altura (condutos rectangulares)

Os posibles danos por inundacións de zonas contiguas ao cauce provocados pola presenza da ODT teñen que estar dentro duns límites aceptables (danos non catastróficos admisibles). Se o desnivel entre ambos lados do terraplén é superior aos 8 metros, é preciso que se analice o risco de fallo do terraplén como se dunha presa se tratase.

Débese manter un resguardo mínimo entre o nivel máximo acadado pola auga e a superficie da plataforma (Táboa 2.10).

É preciso comprobar tamén que a velocidade asociada ao caudal de deseño se atopa dentro dos valores mínimos e máximos admisibles (obras de formigón: $0,5 \text{ m/s} < V < 4,5$ ou $6,0 \text{ m/s}$).

Ademais, é conveniente comproba-lo grado de ocupación da sección transversal para o caudal de deseño, co obxectivo de evita-la obstrución da obra pola chegada de corpos arrastrados polo fluxo de auga. No caso de pequenas obras de drenaxe é recomendable traballar con graos de ocupación non superiores ao 75-80%, ou deixar un resguardo mínimo equivalente ao 10% da altura do conduto.

Táboa 2.10: Resguardo mínimo (Norma 5.2- IC)

Tipo de elemento de drenaxe	IMD da vía afectada		
	Alta IMD > 2000	Media 2000 > IMD > 250	Baixa IMD < 250
Drenaxe superficial da plataforma	0		Poderán admitirse láminas de auga de ata 0.3 m por enriba do firme
Obras de drenaxe transversal	0.5	0	

2.6.3. Determinación do nivel de auga a entrada (H_e)

O cálculo do nivel de auga na entrada H_e realízase de xeito diferente en función do tipo de funcionamento hidráulico da ODT. Para facilita-la súa determinación, a norma 5.2-IC propón un procedemento simplificado que se presenta a continuación. As gráficas recollidas neste apartado son válidas para tubos circulares, na norma pódense atopar outras para seccións rectangulares.

O procedemento consiste en obter H_e a partir dunha serie de curvas características, supoñendo que a sección de control se sitúa na entrada do conduto. Unha vez obtido o seu valor realízanse unha serie de comprobacións para poder asegurar que, efectivamente, se cumpre a hipótese inicial. En caso positivo, acéptase o valor de H_e como definitivo. Pola contra, en caso negativo, vólvese a calculalo seu valor supoñendo condicións de control de saída e compáranse os dous valores, aceptando como valor definitivo o maior deles.

O primeiro paso é determina-lo caudal específico da sección, definido mediante a seguinte expresión no caso de condutos circulares:

$$q_e = \frac{Q}{\sqrt{g} \cdot D^{5/2}}$$

onde

- q_e caudal específico (adimensional)
- Q caudal de deseño (m^3/s)
- g aceleración da gravidade (m/s^2)
- D diámetro do conduto (m)

O caudal específico introdúcese como variable de entrada na Figura 2.26, onde se recollen as curvas características para condutos circulares, obténdose a relación existente entre H_e e o diámetro D do conduto.

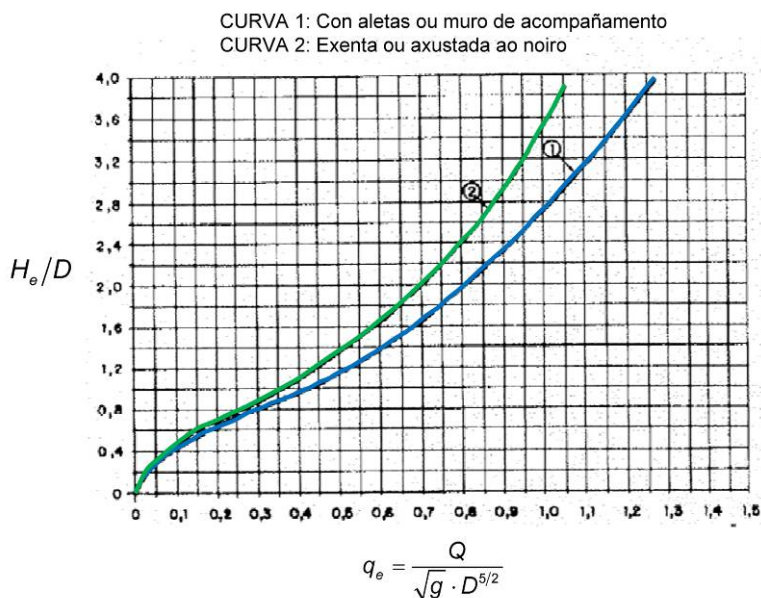


Figura 2.26: Curvas características para a determinación de H_e con control de entrada en condutos circulares (Norma 5.2-IC)

A curva característica correspondente ao control de entrada poderá considerarse definitiva, e polo tanto o valor de H_e tamén, sen necesidade de comprobala con control de saída, se se cumpren as seguintes condicións:

- 1) O conduto é recto e a súa sección e pendente constantes.
- 2) O nivel de auga á saída da ODT (H_s) é inferior tanto ao calado crítico (y_c) como á altura do conduto (D).

O calado crítico (y_c) no conduto correspondente ao caudal de deseño pódese determinar mediante expresións analíticas no caso de seccións simples (Apartado 2.3) ou acudindo a Figura 2.27.

- 3) A relación existente entre a lonxitude (L) do conduto e a súa pendente (J) é inferior a un valor límite.

No caso de condutos circulares, o valor límite de (L/J) obtense a partir da Figura 2.28.

- 4) O nivel de auga na entrada do conduto (H_e) non supera un determinado nivel máximo definido na Figura 2.29.

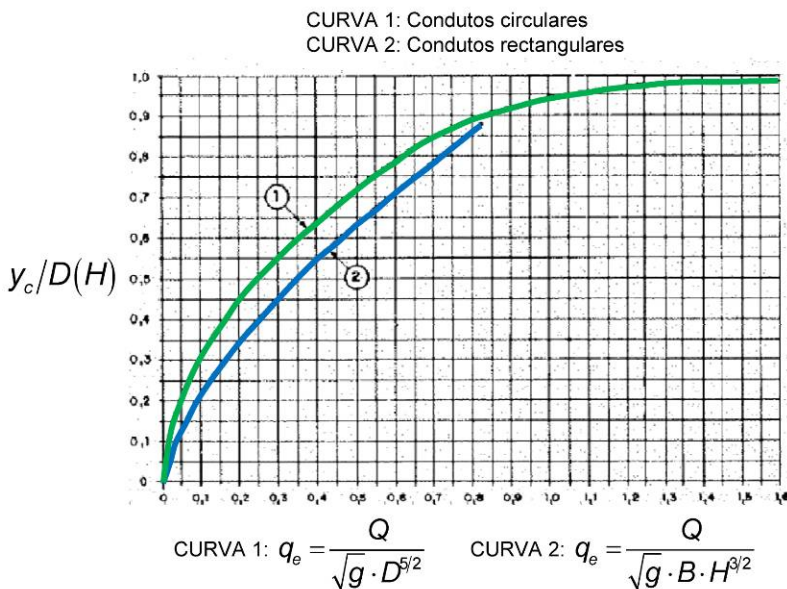


Figura 2.27: Curvas características para a determinación do calado crítico y_c en condutos circulares e rectangulares (Norma 5.2-IC)

CURVA 1: Tubo de formigón con muro de acompañamento ou aletas
 CURVA 2: Tubo metálico corrugado con embocadura exenta ou axustada ao noiro
 CURVA 3: Tubo metálico corrugado con muro de acompañamento ou aletas
 Nota: si el tubo metálico corrugado se reviste de formigón nun 25% do seu perímetro tomarase unha lonxitude igual ao 75% da real

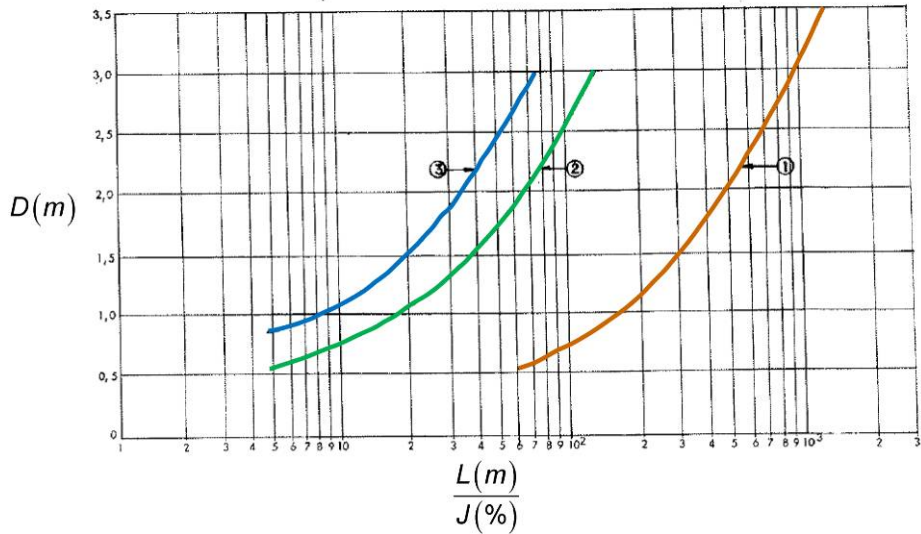


Figura 2.28: Valor límite da relación L/J para condutos circulares (Norma 5.2 - IC)

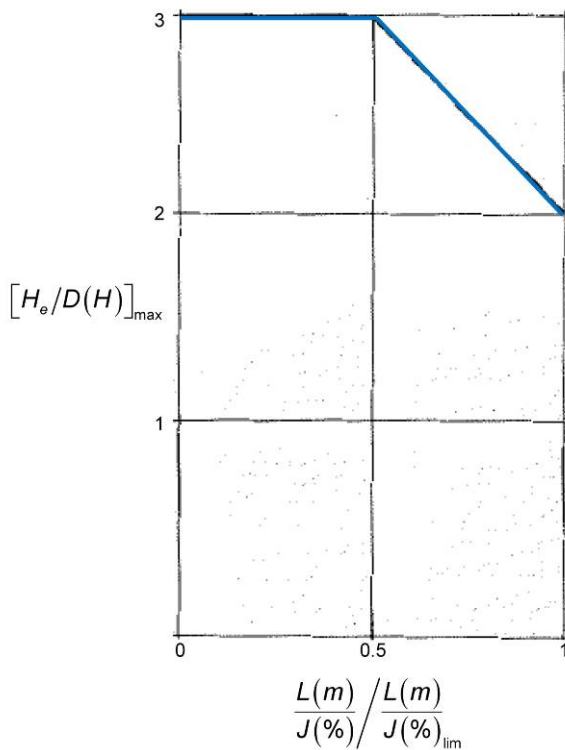


Figura 2.29: Valor máximo de H_e para condutos circulares e rectangulares (Norma 5.2 - IC)

Se algunha das condicións anteriores non se cumpre, é preciso calcula-lo valor de H_e correspondente a condicións de control de saída. O seu valor obtense mediante a seguinte expresión:

$$H_e^{sal} = \left[1 + K_e + \frac{2 \cdot g \cdot L}{R_h^{4/3} \cdot (1/n)^2} \right] \cdot \frac{V^2}{2g} - L \cdot J + \mu$$

onde

- H_e^{sal} nivel de auga na entrada para control de saída (m)
- K_e coeficiente de perda de carga na embocadura (Táboa 2.11)
- g aceleración da gravidade (m/s^2)
- L lonxitude do conduto(m)
- R_h raio hidráulico a sección chea (m)
- $(1/n)$ coeficiente de rugosidade
- V velocidade media da sección chea (m/s)
- J pendente do conduto, en tanto por un valor igual ao maior dos seguintes valores:
- μ -nivel de auga na saída do conduto (H_s)

-semisuma do calado crítico (y_c) e a altura do conduto:
 $0.5(y_c + D$ ou $H)$; se $y_c > D$ (H), tomarase como valor a
 altura do conduto

Táboa 2.11: Coeficiente de perda na embocadura K_e (Norma 5.2- IC)

Tipo de embocadura		K_e
Tubo formigón	Exento	0.6
	Con muro de acompañamento	0.4
	Con aletas	0.3
Outros condutos de formigón	Exento	0.6
	Con muro de acompañamento	0.4
	Con aletas	0.2
Tubo corrugado	Exento	0.8
	Axustado ao noiro	0.7
	Con muro de acompañamento	0.6
	Con aletas	0.3

Tal e como se mencionou anteriormente, se o valor obtido para H_e con control de saída é superior ao inicialmente calculado para control de entrada, debe tomarse como valor definitivo.

3. Drenaxe subterránea

3.1. Conceptos xerais

O apartado anterior centrouse no sistema de drenaxe superficial, que tiña por finalidade recoller e evacua-las augas superficiais, evitando os posibles efectos negativos que podería te-la súa presenza na infraestrutura. Este último apartado dedícase aos sistemas de drenaxe subterránea, que teñen un obxectivo similar pero neste caso aplicado ao control e evacuación das augas subterráneas existentes na infraestrutura e na súa contorna, fundamentalmente nas explanacións e nos firmes.

O comportamento estrutural tanto das capas do firme como da explanación dunha estrada está moi influenciado polas condicións existentes de humidade. De feito, a capacidade de soporte da explanada determínase para unha humidade concreta, polo que un incremento de esta pode alterar gravemente o seu comportamento. En relación cos firmes, cabe dicir que a presenza de auga no seu interior pode provocar múltiples

problemas: redución da cohesión, separación das súas capas, etc. En definitiva, a presenza de auga subterránea non controlada pode provocar unha considerable redución da vida útil da estrada.

As augas subterráneas poden proceder da superficie, debido a infiltracións a través de fendas no propio firme; de elementos non pavimentados ou convenientemente tratados como poden ser as medianas, ou bermas; ou do terreo natural debido á presenza de capas freáticas ou mananciais.

Débese analizar durante as fases iniciais da obras as posibles zonas da traza onde a auga subterránea podería afectar á estrada, e tomar as medidas correctoras necesarias en forma de elementos ou sistemas específicos de drenaxe subterráneo. A drenaxe subterránea é un recurso de carácter localizado que pode ser necesario en certos casos puntuais.

3.2. Elementos dun sistema de drenaxe subterránea

Os elementos principais dun sistema de drenaxe subterránea son as *capas drenantes* e as *gabias drenantes* formados por materiais granulares con permeabilidades moi superiores en relación cos materiais contiguos. Estes elementos empréganse para capta-las augas subterráneas, constituíndo, pola súa maior permeabilidade, un camiño de saída preferente para a auga. As primeiras teñen unha disposición aproximadamente horizontal e empréganse para recoller as augas subterráneas que se acumulan debaixo dos firmes e das explanacións. As segundas son elementos de carácter vertical que se empregan para recolle-las augas subterráneas procedentes de capas drenantes ou directamente das marxes da plataforma.

No interior das gabias drenantes é frecuente colocar uns tubos drenantes (*drenes*) con perforacións, que transportan o fluído por gravidade. Estes poden evacuar opcionalmente cara *colectores* a través de *arquetas* ou en ocasións directamente cara o exterior.

Pode ser necesario nalgúns casos protexe-las capas ou gabias drenantes dunha posible contaminación por finos procedentes doutro material contiguo. Nese caso empréganse *filtros* que teñen por obxectivo permiti-lo paso do fluxo de auga e evita-lo paso de outras partículas de solo. Os filtros poden ser capas granulares de granulometría especial ou *xeotéxtil*.

3.3. Drenaxe do firme

Cando se proxecta unha estrada, considérase que o pavimento tanto da súa calzada como das beiravías é impermeable, polo que non se debería producir infiltración da escorrentía superficial. No caso de que a súa impermeabilidade estivese comprometida pola existencia de xuntas abertas, fendas, etc. esta debería restituírse de acordo a normativa vixente de rehabilitación de firmes (norma 6.3-IC).

A infiltración cara as capas inferiores do firme e a explanada pode producirse a través de beiravías non pavimentadas, bermas e superficies comprendidas entre a plataforma e os noiros. Nestes casos, é conveniente

proceder a súa correcta impermeabilización mediante o emprego de solos cun espesor adecuado e alto contido de finos (recheo para impermeabilización de bermas), ou se non fose posible garanti-lo espesor mínimo, procedendo ao seu revestimento.

O caso das medianas non revestidas en estradas de calzadas separadas é similar ao anterior; ademais, deberase analiza-la necesidade de revesti-la súa cuneta en zonas con pendentes lonxitudinais pequenas onde poidan producirse acumulacións de auga.

No caso de ser necesario un sistema de drenaxe subterráneo, unha solución recomendable é unha capa drenante na parte inferior do firme que evacúa cara unha gabia drenante provista dun dren (Figura 3.1)

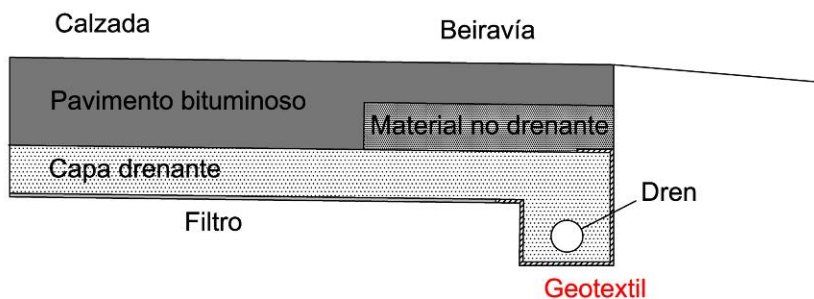


Figura 3.1: Capa drenante baixo pavimento bituminoso con gabia drenante provista de dren

3.4. Drenaxe das explanacións

No caso das explanacións, é posible que aparezan afloramentos de auga subterránea cara a infraestrutura en función das características hidroxeolóxicas locais. Polo tanto, é moi importante coñecer a zona dende ese punto de vista, sendo fundamental determina-la situación dos niveis freáticos e, se é posible, os movementos da auga subterránea.

A norma 6.1-IC “Seccións de firme” establece unha distancia mínima entre o nivel freático e a posición da explanada en función do tipo de materiais do seu macizo de apoio: 60 cm. para solos seleccionados, 80 cm. para solos adecuados, 100 cm. no caso de solos tolerables e, por último 120 cm. para solos marxinais ou inadecuados.

Para asegurar esa distancia mínima pódense adoptar diferentes medidas, proceder a elevación da rasante ou introducir elementos de drenaxe subterránea que poden ser de diverso tipo en función do caso concreto: colocación de drenes subterráneos (Figura 3.2), capas ou mantos drenantes, gabias drenantes en forma de espiña de pez, etc.

É fundamental, tanto na fase de proxecto como de construción da infraestrutura, detecta-los afloramentos de auga cara os noiros dos desmontes e as zonas inferiores dos recheos, analizando a necesidade de introducir os correspondentes sistemas de drenaxe subterránea para intercepta-los fluxos de auga.

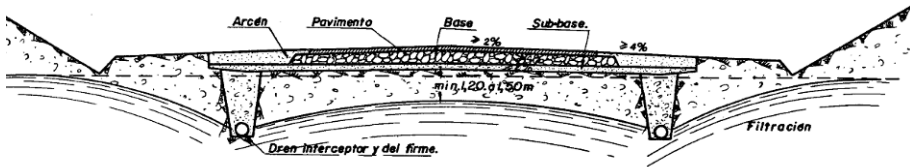


Figura 3.2: Drenes lonxitudinais para rebaixa-lo nivel freático (Norma 5.1- IC)

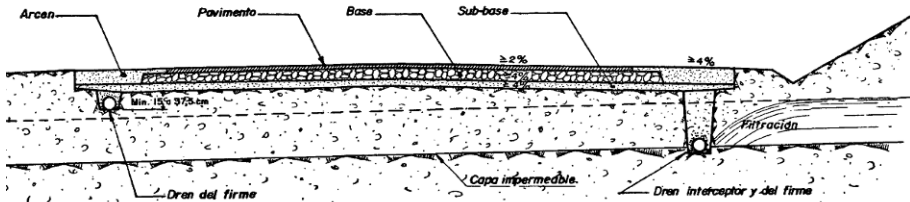


Figura 3.3: Dren lonxitudinal de interceptación (Norma 5.1- IC)

A casuística que se pode dar é moi grande e tamén as diferentes solucións. A modo de exemplo recóllese na Figura 3.4 un caso de emprego dun manto drenante debaixo dunha obra de drenaxe transversal (ODT) para controla-lo fluxo subterráneo detectado durante a súa fase de construción.



Figura 3.4: Manto drenante debaixo dunha ODT

AVALIACIÓN DA UNIDADE DIDÁCTICA

- Na avaliación da aprendizaxe dos conceptos teóricos traballados na unidade didáctica terase en conta a resposta correcta das cuestións tipo test e as cuestións curtas formuladas nas probas de avaliación da materia: probas curtas de control feitas durante o curso e exames parciais.
- Na avaliación da aprendizaxe dos conceptos prácticos terase en conta a correcta formulación e resolución dos exercicios propostos nas probas de avaliación da materia.
- Nos seminarios interactivos valoraranse, por unha banda, a correcta execución dos exercicios por parte dos grupos e, por outra, os contidos, a estrutura e a claridade expositiva das resolucións.
- Valorarase tamén a entrega por parte dos alumnos dos exercicios adicionais propostos polo profesor como traballo complementario.
- Terase en conta a atención prestada durante as clases expositivas e o seminario interactivo, e o interese amosado pola materia a través dos resumos entregados despois de cada sesión.
- Valorarase o anexo de hidroloxía e drenaxe entregado polos grupos, tanto na súa versión provisional coma definitiva. Terase en conta, por unha banda, a súa correcta definición e, por outra, a estrutura e a capacidade de comunicación escrita reflectida nos documentos.

ÍNDICE DE FIGURAS

- 2.1: Mapa de isoliñas intensidade de precipitación (Norma 5.2- IC)
- 2.2: Coeficiente corrector do limiar de escorrentía (Norma 5.2- IC)
- 2.3: Tipos de solos en función da súa natureza (Norma 5.2- IC)
- 2.4: Parámetros da xeometría transversal dunha canle
- 2.5: Gráfico para o cálculo hidráulico dunha canle de sección circular
- 2.6: Exemplo de cuneta triangular revestida
- 2.7: Tipoloxías de cunetas
- 2.8: Cuneta trapezoidal revestida
- 2.9: Exemplo de canle de derivación xunto á beirarrúa
- 2.10: Tipoloxías de canles de derivación
- 2.11: Sumidoiros illados horizontais en bordo (esquerda) e en cuneta ou mediana (dereita) [Norma 5.2-IC]
- 2.12: Sumidoiro mixto
- 2.13: Detalle de colector baixo cuneta de pé de desmonte
- 2.14: Dous colectores confluindo nun mesmo punto onde se situará unha arqueta
- 2.15: Arqueta de rexistro
- 2.16: Baixante situada no ladeira dun viaduto
- 2.17: Cuneta de mediana en calzadas separadas
- 2.18: Sistemas de drenaxe en mediana estrita (Norma 5.2-IC)
- 2.19: Cuneta de pé de desmonte
- 2.20: Cuneta de garda de desmonte
- 2.21: Canles de derivación de coroación de terraplén e baixante pola que desauga
- 2.22: Cuneta de pé de terraplén con saída cara unha obra de drenaxe transversal
- 2.23: Obra de drenaxe transversal (ODT)
- 2.24: Exemplo de plano en planta coa situación de dúas ODTs
- 2.25: Funcionamento hidráulico das ODTs
- 2.26: Curvas características para a determinación de H_e con control de entrada en condutos circulares (Norma 5.2-IC)
- 2.27: Curvas características para a determinación do calado crítico y_c en condutos circulares e rectangulares (Norma 5.2-IC)
- 2.28: Valor límite da relación L/J para condutos circulares (Norma 5.2 - IC)
- 2.29: Valor máximo de H_e para condutos circulares e rectangulares (Norma 5.2 - IC)
- 3.1: Capa drenante baixo pavimento bituminoso con gabia drenante provista de dren
- 3.2: Drenes lonxitudinais para rebaixa-lo nivel freático (Norma 5.1- IC)
- 3.3: Dren lonxitudinal de interceptación (Norma 5.1- IC)
- 3.4: Manto drenante debaixo dunha ODT

ÍNDICE DE TÁBOAS

- 2.1: Valores do coeficiente K (Norma 5.2- IC)
- 2.2: Valores mínimos do período de retorno (Norma 5.2- IC)
- 2.3: Estimación inicial do limiar de escorrentía P_0 (mm) [1]
[Norma 5.2- IC]
- 2.4: Estimación inicial do limiar de escorrentía P_0 (mm) [2]
[Norma 5.2- IC]
- 2.5: Estimación inicial do limiar de escorrentía P_0 (mm) [3]
[Norma 5.2- IC]
- 2.6: Coeficientes de rugosidade (1/n) (Norma 5.2 IC)
- 2.7: Coeficientes de rugosidade (1/n) para cauces naturais
(Norma 5.2 IC)
- 2.8: Velocidades máximas admisibles (Norma 5.2 IC)
- 2.9: Dimensión mínima das ODTs (Norma 5.2 - IC)
- 2.10: Resgardo mínimo (Norma 5.2- IC)
- 2.11: Coeficiente de perda na embocadura K_e (Norma 5.2- IC)

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CHOW, V.T. (1994): *Flujo en canales abiertos*, Bogotá: Ed. McGraw-Hill.
- [2] KRAEMER, C. *et al* (2004): *Ingeniería de carreteras. Volumen II*, Madrid: Ed. McGraw-Hill.
- [3] FRANZINE, J.B., FINNEMORE, E.J. (1999): *Mecánica de fluidos con aplicaciones en Ingeniería*, Madrid: Ed. McGraw-Hill.
- [4] MINISTERIO DE FOMENTO (1999): *Máximas lluvias diarias en la España peninsular*, Madrid: Ed. Dirección general de carreteras.
- [5] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (1965): *Norma 5.1-IC Drenaje superficial, de la Instrucción de Carreteras*, Madrid: O. M. 21 de junio de 1965 publicada no BOE nº 223 do 17 septiembre de 1965).
- [6] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO (1987): *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*, Madrid: Ed. Dirección general de carreteras.
- [7] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO (1990): *Norma 5.2-IC Drenaje superficial, de la Instrucción de Carreteras*, Madrid: O. M. 14 de maio de 1990 publicada no BOE nº 123 do 23 maio de 1990).
- [8] TÉMEZ, J.R. (1991): *Generalización y mejora del método racional*, Madrid, Dirección general de Carreteras de España. Ingeniería Civil". No 8, CEDEX-MOPT
- [9] U.S DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (2001): *Hydraulic design of highway culverts*, United States: Ed. Federal Highway Administration.
- [10] WHITE, F.M. (2004): *Mecánica de fluidos*, Madrid: Ed. McGraw-Hill.

Citas de recursos en internet

- [11] Carreteras y alguna cosa más
<http://www.carreteros.org/> [citado 20 sept 2012]
- [12] Normativa técnica - Carreteras - Ministerio de Fomento
http://www.fomento.es/mfom/lang_castellano/direcciones_generales/%20%20carreteras/normativa_tecnica/ [citado 20 sept 2012]
- [13] Recursos docentes da materia de Camiños e Aeroportos da Universidade da Coruña
ftp://ceres.udc.es/asignaturas/ITS%20Caminos/2_Ciclo/Caminos_y_Aeropuertos/ [citado 20 sept 2012]
- [14] Wikivia - La enciclopedia de la Carretera
<http://www.wikivia.org/> [citado 20 sept 2012]



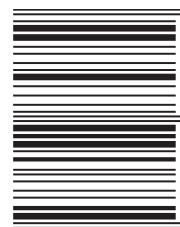
Unha colección orientada a editar materiais docentes de calidade e pensada para apoiar o traballo do profesorado e do alumnado de todas as materias e titulacións da universidade



Impreso en papel 100% reciclado e libre de cloro



SERVIZO DE NORMALIZACIÓN LINGÜÍSTICA



9 788498 879759