

Reglamento CIRSOC 804-4
Ministerio de Obras Públicas de la Nación
Secretaría de Obras Públicas

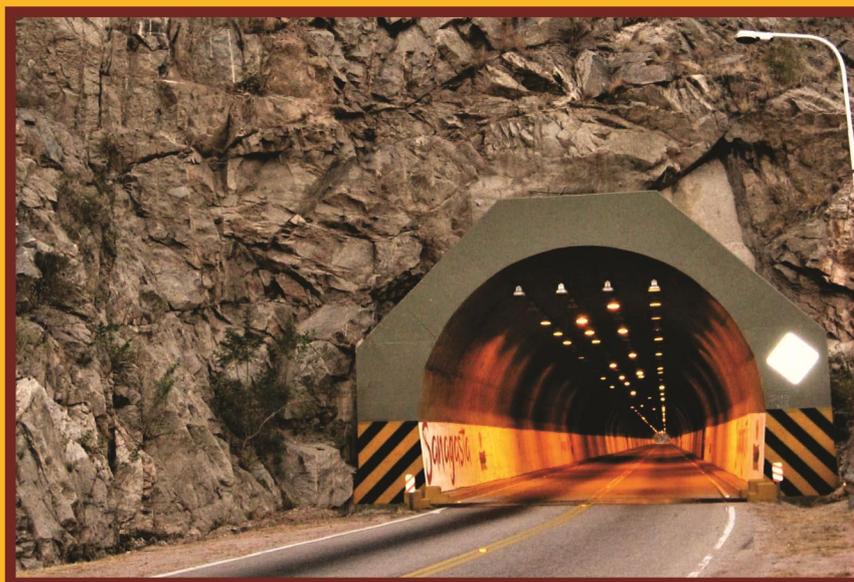
INTI

Instituto Nacional de
Tecnología Industrial



CIRSOC

Centro de Investigación de los
Reglamentos Nacionales de
Seguridad para las Obras Cíviles



REGLAMENTO ARGENTINO
PARA EL DISEÑO DE
PUENTES CARRETEROS

***Estructuras enterradas y
revestimientos para túneles***

Julio 2022



**Av. Cabildo 65 Subsuelo – Ala Savio
(C1426AAA) Buenos Aires – República Argentina
TELEFAX. (54 11) 4779-3183**

**E-mail: cirsoc@inti.gob.ar
cirsoc@fm.gob.ar**

INTERNET:

www.inti.gob.ar/areas/servicios-industriales/construcciones-e-infraestructura/cirsoc

Primer Director Técnico († 1980): Ing. Luis María Machado

Directora Técnica: Inga. Marta S. Parmigiani

Área Estructuras de Hormigón: Ing. Daniel A. Ortega

Área Administración, Finanzas y Promoción: Lic. Mónica B. Krotz

Área Diseño, Edición y Publicaciones: Sr. Néstor D. Corti

© 2022

**Editado por INTI
INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL
Av. Leandro N. Alem 1067 – 7° piso - Buenos Aires. Tel. 4515-5000**

**Queda hecho el depósito que fija la ley 11.723. Todos los derechos, reservados.
Prohibida la reproducción parcial o total sin autorización escrita del editor. Impreso
en la Argentina.**

Printed in Argentina.

ORGANISMOS PROMOTORES

Secretaría de Obras Públicas de la Nación
Secretaría de Vivienda y Hábitat de la Nación
Instituto Nacional de Tecnología Industrial
Instituto Nacional de Prevención Sísmica
Ministerio de Hacienda, Finanzas y Obras Públicas de la Provincia del Neuquén
Consejo Interprovincial de Ministros de Obras Públicas
Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires
Dirección Nacional de Vialidad
Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires
Consejo Vial Federal
Cámara Argentina de la Construcción
Consejo Profesional de Ingeniería Civil
Asociación de Fabricantes de Cemento Pórtland
Instituto Argentino de Normalización
Techint
Acindar – Grupo Arcelor Mittal

MIEMBROS ADHERENTES

Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón
Asociación Argentina de Hormigón Estructural
Asociación Argentina de Hormigón Elaborado
Asociación Argentina del Bloque de Hormigón
Asociación de Ingenieros Estructurales
Cámara Industrial de Cerámica Roja
Centro Argentino de Ingenieros
Instituto Argentino de Siderurgia
Transportadora Gas del Sur
Quasdam Ingeniería
Sociedad Argentina de Ingeniería Geotécnica
Colegio de Ingenieros de la Provincia de Buenos Aires
Cámara Argentina del Aluminio y Metales Afines
Cámara Argentina de Empresas de Fundaciones de Ingeniería Civil
Federación Argentina de la Ingeniería Civil
Consejo Profesional de Agrimensores, Ingenieros y Profesiones Afines de Salta
Asociación Argentina de Ensayos no Destructivos

Reconocimiento Especial

*El INTI-CIRSOC agradece muy especialmente a las Autoridades del American National Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) por habernos permitido adoptar de base para el desarrollo de este Reglamento, la edición 2012 del documento **AASHTO LRFD Bridge Design Specification**.*

**ASESORES QUE INTERVINIERON EN LA REDACCIÓN
DEL**

**REGLAMENTO ARGENTINO
PARA EL DISEÑO DE
PUENTES CARRETEROS**

CIRSOC 804-4

***Estructuras Enterradas
y Revestimientos
para Túneles***

***Ing. Francisco Bissio
Ing. Victorio Hernández Balat
Ing. Daniel Ortega
Ing. Gustavo Soprano***

El Equipo Redactor contó con la colaboración de los siguientes profesionales:

Ing. Victor Fariña	DIRECCIÓN NACIONAL DE VIALIDAD
Ing. Susana Faustinelli Ing. Guillermo Ferrando Ing. José Giunta Ing. Hugo Echegaray	CONSEJO VIAL FEDERAL
Ing. Diego Cernuschi	DIRECCIÓN DE VIALIDAD DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES
Ing. Máximo Fioravanti	ACADEMIA NACIONAL DE INGENIERÍA
Ing. Gabriel Troglia	COORDINADOR COMISIÓN PERMANENTE DE ESTRUCTURAS DE ACERO DE INTI-CIRSOC
Ing. Juan José Goldemberg	SOCIEDAD ARGENTINA DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA - SAIG
Ing. Javier Fazio Ing. Tomás del Carril Ing. Rogelio Percivatti Franco Ing. Martín Polimeni	ASOCIACIÓN DE INGENIEROS ESTRUCTURALES - AIE
Ing. Roberto Cudmani Ing. Juan Carlos Reimundín	COORDINADORES DEL REGLAMENTO CIRSOC 102-2005
Ing. Pedro Tommasi	UTN - CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

Agradecimiento especial

*El INTI-CIRSOC agradece muy especialmente al Ing. Jorge Luis Briozzo la donación de la foto que ilustra la tapa de este Reglamento, que pertenece al **Túnel Carretero** de 730 m de longitud y 8,40 m de ancho sobre la **Ruta Nacional 75**, atravesando las Sierras de Velasco para vincular la Capital de **La Rioja** con **Villa Sanagasta**.*

Metodología para el envío de observaciones, comentarios y sugerencias al

Proyecto de Reglamento CIRSOC 804-4

Reglamento Argentino para el Diseño de Puentes Carreteros

Diseño de Estructuras Enterradas y Revestimientos para Túneles

**en Discusión Pública Nacional
(1° de julio de 2022 – 30 de diciembre de 2022)**

*Las observaciones, comentarios y sugerencias se deberán enviar a la Sede del CIRSOC, Av. Cabildo 65, Subsuelo Ala Savio (C1426AAA) Buenos Aires, hasta el **30 de diciembre de 2022**, siguiendo la metodología que a continuación se describe:*

1. Se deberá identificar claramente el Capítulo que se analiza, como así también el artículo y párrafo que se observa.
2. Las observaciones se deberán acompañar de su fundamentación y de una redacción alternativa, con el fin de que los Coordinadores del Proyecto comprendan claramente el espíritu de las observaciones.
3. Las observaciones, comentarios y sugerencias deberán presentarse por escrito, firmadas y con aclaración de firma, y deberán enviarse por correo o entregarse en mano. Se solicita detallar Dirección, Tel, Fax, e-mail con el fin de facilitar la comunicación.
4. No se aceptarán observaciones enviadas por fax o e-mail, dado que estos medios no permiten certificar la autenticidad de la firma del autor de la observación.

Confiamos en que este Proyecto les interese y participen activamente en su Discusión Pública Nacional

Gracias

INDICE

CAPÍTULO 12. ESTRUCTURAS ENTERRADAS Y REVESTIMIENTOS PARA TÚNELES

12.1. CAMPO DE VALIDEZ	1
12.2. DEFINICIONES	1
12.3. SIMBOLOGÍA	3
12.4. PROPIEDADES DEL SUELO Y DE LOS MATERIALES	13
12.4.1. Determinación de las propiedades del suelo	13
12.4.1.1. Requisitos generales	13
12.4.1.2. Suelos de fundación	13
12.4.1.3. Suelos utilizados como relleno envolvente	13
12.4.2. Materiales	13
12.4.2.1. Tubos y estructuras con chapas estructurales contruidos de aluminio	13
12.4.2.2. Hormigón	14
12.4.2.3. Tubos de hormigón prefabricado	14
12.4.2.4. Estructuras de hormigón prefabricado	14
12.4.2.5. Tubos y estructuras con chapas estructurales contruidos de acero	14
12.4.2.6. Estructuras con corrugado profundo	14
12.4.2.7. Armaduras de acero	14
12.4.2.8. Tubos termoplásticos	14
12.5. ESTADOS LÍMITE Y FACTORES DE RESISTENCIA	15
12.5.1. Requisitos generales	15
12.5.2. Estado límite de servicio	15
12.5.3. Estado límite de resistencia	15
12.5.4. Factores de modificación de las cargas y factores de carga	16
12.5.5. Factores de resistencia	16
12.5.6. Límites de flexibilidad y rigidez constructiva	18
12.5.6.1. Tubos de metal corrugado y estructuras contruidas con chapas estructurales corrugadas	18
12.5.6.2. Tubos metálicos y arcos cerrados con nervios en espiral	18
12.5.6.3. Límites de flexibilidad y rigidez de construcción – Tubo termoplástico	19
12.5.6.4. Chapas de acero para revestimiento de túneles	19
12.6. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE DISEÑO	19
12.6.1. Cargas	19

12.6.2. Estado límite de servicio	19
12.6.2.1. Desplazamiento admisible	19
12.6.2.2. Asentamiento	19
12.6.2.2.1. Requisitos generales	19
12.6.2.2.2. Asentamiento diferencial longitudinal	20
12.6.2.2.3. Asentamiento diferencial entre la estructura y el relleno	20
12.6.2.2.4. Asentamiento de las zapatas	20
12.6.2.2.5. Cargas no equilibradas	20
12.6.2.3. Levantamiento	21
12.6.3. Seguridad contra las fallas del suelo	21
12.6.3.1. Capacidad de carga y estabilidad	21
12.6.3.2. Relleno en las esquinas de los arcos metálicos cerrados	21
12.6.4. Diseño hidráulico	21
12.6.5. Socavación	21
12.6.6. Envolvente de suelo	21
12.6.6.1. Instalaciones en zanja	21
12.6.6.2. Instalaciones bajo terraplén	22
12.6.6.3. Recubrimiento mínimo de suelo	22
12.6.7. Mínima separación entre múltiples líneas de tubos	23
12.6.8. Tratamiento de los extremos	23
12.6.8.1. Requisitos generales	23
12.6.8.2. Alcantarillas flexibles oblicuas respecto de la alineación de la carretera	23
12.6.9. Condiciones corrosivas y abrasivas	23
12.7. TUBOS, ARCOS Y ARCOS CERRADOS METÁLICOS	24
12.7.1. Requisitos generales	24
12.7.2. Seguridad contra las fallas estructurales	24
12.7.2.1. Propiedades de las secciones	24
12.7.2.2. Empuje	24
12.7.2.3. Resistencia de las paredes	25
12.7.2.4. Resistencia al pandeo	25
12.7.2.5. Resistencia de las costuras	26
12.7.2.6. Requisitos para la manipulación y la instalación	26
12.7.3. Tubos con revestimiento interior liso	26
12.7.4. Elementos rigidizadores para las estructuras construidas con chapas estructurales	26
12.7.5. Construcción e instalación	27
12.8. ESTRUCTURAS DE GRAN ANCHO CONSTRUIDAS CON CHAPAS ESTRUCTURALES	27
12.8.1. Requisitos generales	27
12.8.2. Estado límite de servicio	28
12.8.3. Seguridad contra las fallas estructurales	28
12.8.3.1. Propiedades de las secciones	28
12.8.3.1.1. Sección transversal	28
12.8.3.1.2. Control de la geometría	29
12.8.3.1.3. Requisitos mecánicos y químicos	29
12.8.3.2. Empuje	29
12.8.3.3. Área de las paredes	29
12.8.3.4. Resistencia de las costuras	29

12.8.3.5. Elementos especiales aceptables	30
12.8.3.5.1. Rigidizadores longitudinales continuos	30
12.8.3.5.2. Nervios rigidizadores	30
12.8.4. Seguridad contra las fallas estructurales – Diseño de las fundaciones	30
12.8.4.1. Límites para el asentamiento	30
12.8.4.2. Reacciones de las zapatas de las estructuras en arco	31
12.8.4.3. Diseño de las zapatas	32
12.8.5. Seguridad contra las fallas estructurales – Diseño de la envolvente de suelo	32
12.8.5.1. Requisitos generales	32
12.8.5.2. Requisitos constructivos	32
12.8.5.3. Requisitos de servicio	32
12.8.6. Seguridad contra las fallas estructurales – Diseño del tratamiento de los extremos	34
12.8.6.1. Requisitos generales	34
12.8.6.2. Tipos de extremos de camisa estándar	34
12.8.6.3. Apoyo equilibrado	36
12.8.6.4. Protección hidráulica	36
12.8.6.4.1. Requisitos generales	36
12.8.6.4.2. Protección del relleno	36
12.8.6.4.3. Muros de barrera	36
12.8.6.4.4. Subpresión hidráulica	36
12.8.6.4.5. Socavación	36
12.8.7. Losas de alivio de hormigón	37
12.8.8. Construcción e instalación	37
12.8.9. Estructuras de chapas estructurales con corrugado profundo	37
12.8.9.1. Requisitos generales	37
12.8.9.2. Ancho del relleno estructural	37
12.8.9.2.1. Estructuras con corrugado profundo, con relación entre el radio de la corona y el radio de la cartela ≤ 5	37
12.8.9.2.2. Estructuras con corrugado profundo, con relación entre el radio de la corona y el radio de la cartela > 5	38
12.8.9.3. Seguridad contra las fallas estructurales	38
12.8.9.3.1. Requisitos de la chapa estructural	38
12.8.9.3.2. Análisis estructural	38
12.8.9.4. Profundidad mínima del relleno	38
12.8.9.5. Empuje y momento combinados	39
12.8.9.6. Pandeo global	39
12.8.9.7. Conexiones	40
 12.9. ESTRUCTURAS TIPO CAJÓN CONSTRUIDAS CON CHAPAS ESTRUCTURALES	 40
12.9.1. Requisitos generales	40
12.9.2. Cargas	41
12.9.3. Estado límite de servicio	41
12.9.4. Seguridad contra las fallas estructurales	41
12.9.4.1. Requisitos generales	41
12.9.4.2. Momentos debidos a las cargas mayoradas	42
12.9.4.3. Capacidad de momento plástico	44
12.9.4.4. Factor que considera el recubrimiento de suelo sobre la corona, C_H	45

12.9.4.5. Reacciones de las zapatas	45
12.9.4.6. Losas de alivio de hormigón	46
12.9.5. Construcción e instalación	47
12.10. TUBOS DE HORMIGÓN ARMADO	48
12.10.1. Requisitos generales	48
12.10.2. Cargas	48
12.10.2.1. Instalaciones estándar	48
12.10.2.2. Peso del fluido dentro del tubo	52
12.10.2.3. Sobrecargas	53
12.10.3. Estado límite de servicio	53
12.10.4. Seguridad contra las fallas estructurales	53
12.10.4.1. Requisitos generales	53
12.10.4.2. Método de diseño directo	53
12.10.4.2.1. Cargas y distribución del empuje	53
12.10.4.2.2. Análisis de las sollicitaciones con el anillo del tubo	55
12.10.4.2.3. Factores que consideran el proceso y los materiales	55
12.10.4.2.4. Resistencia a flexión en el estado límite de resistencia	55
12.10.4.2.4a. Armadura circunferencial	55
12.10.4.2.4b. Armadura mínima	55
12.10.4.2.4c. Armadura máxima a flexión sin estribos	56
12.10.4.2.4d. Armadura para controlar la fisuración	57
12.10.4.2.4e. Mínimo recubrimiento de hormigón	59
12.10.4.2.5. Resistencia al corte sin estribos	59
12.10.4.2.6. Resistencia al corte con estribos radiales	61
12.10.4.2.7. Anclaje de los estribos	62
12.10.4.2.7a. Anclaje de los estribos para tracción radial	62
12.10.4.2.7b. Anclaje de los estribos para corte	62
12.10.4.2.7c. Longitud embebida de los estribos	62
12.10.4.3. Método de diseño indirecto	62
12.10.4.3.1. Capacidad de carga	62
12.10.4.3.2. Factor de asiento	63
12.10.4.3.2a. Factor de asiento para la carga de suelo en tubos circulares	63
12.10.4.3.2b. Factor de asiento para la carga de suelo en tubos elípticos y en arco	64
12.10.4.3.2c. Factores de asiento para la sobrecarga	65
12.10.4.4. Desarrollo del refuerzo de entramado del cuadrante	65
12.10.4.4.1. Armadura mínima de la jaula	65
12.10.4.4.2. Longitud de anclaje de las mallas soldadas de alambres	65
12.10.4.4.3. Desarrollo del refuerzo de entramado del cuadrante constituido por mallas soldadas de alambres lisos	66
12.10.4.4.4. Desarrollo del refuerzo de entramado del cuadrante constituido por barras conformadas, alambres conformados, o mallas soldadas de alambres conformados	66
12.10.5. Construcción e instalación	66
12.11. ALCANTARILLAS TIPO CAJÓN DE HORMIGÓN ARMADO COLADO IN SITU Y PREFABRICADO, Y ARCOS DE HORMIGÓN ARMADO COLADO IN SITU	67

12.11.1. Requisitos generales	67
12.11.2. Distribución de cargas y sobrecargas	67
12.11.2.1. Requisitos generales	67
12.11.2.2. Modificación de las cargas de suelo para considerar la interacción suelo-estructura	68
12.11.2.2.1. Instalaciones en zanja y bajo terraplén	68
12.11.2.2.2. Otras instalaciones	70
12.11.2.3. Distribución de las cargas concentradas a la losa inferior de una alcantarilla tipo cajón	70
12.11.2.4. Distribución de las cargas concentradas en las alcantarillas tipo cajón oblicuas	70
12.11.3. Estado límite de servicio	70
12.11.4. Seguridad contra las fallas estructurales	70
12.11.4.1. Requisitos generales	70
12.11.4.2. Momento de diseño para las alcantarillas tipo cajón	70
12.11.4.3. Armadura mínima	70
12.11.4.3.1. Estructuras hormigonadas in situ	70
12.11.4.3.2. Estructuras tipo cajón prefabricadas	71
12.11.4.4. Recubrimiento mínimo de hormigón sobre las armaduras para las estructuras tipo cajón prefabricadas	71
12.11.5. Construcción e instalación	71
12.12. TUBOS TERMOPLÁSTICOS	71
12.12.1. Requisitos generales	71
12.12.2. Estado límite de servicio	71
12.12.2.1. Requisitos generales	71
12.12.2.2. Requerimientos de deflexión	72
12.12.3. Seguridad contra las fallas estructurales	73
12.12.3.1. Requisitos generales	73
12.12.3.2. Propiedades de la sección	73
12.12.3.3. Requisitos químicos y mecánicos	73
12.12.3.4. Empuje	74
12.12.3.5. Cargas de servicio y mayoradas	74
12.12.3.6. Requisitos para la manipulación e instalación	78
12.12.3.7. Prisma de suelo	78
12.12.3.8. Presión hidrostática	79
12.12.3.9. Sobrecarga	79
12.12.3.10. Resistencia de la pared	80
12.12.3.10.1. Resistencia al empuje axial	80
12.12.3.10.1a. Requisitos generales	80
12.12.3.10.1b. Área efectiva de pandeo local	80
12.12.3.10.1c. Deformación de compresión	82
12.12.3.10.1d. Límites de deformación por empuje	82
12.12.3.10.1e. Límites de deformación por pandeo general	83
12.12.3.10.2. Límites de deformación por flexión y empuje	84
12.12.3.10.2a. Requisitos generales	84
12.12.3.10.2b. Deformación combinada	84
12.12.4. Construcción e instalación	86
12.13. CHAPAS DE ACERO UTILIZADAS COMO REVESTIMIENTO DE TÚNELES	86

12.13.1. Requisitos generales	86
12.13.2. Cargas	86
12.13.2.1. Cargas de suelo	86
12.13.2.2. Sobrecargas	87
12.13.2.3. Presión de inyección	87
12.13.3. Seguridad contra las fallas estructurales	87
12.13.3.1. Propiedades de la sección	87
12.13.3.2. Área de las paredes	88
12.13.3.3. Pandeo	88
12.13.3.4. Resistencia de las costuras	88
12.13.3.5. Rigidez constructiva	88
12.14. ESTRUCTURAS DE TRES LADOS DE HORMIGÓN ARMADO PREFABRICADO	90
12.14.1. Requisitos generales	90
12.14.2. Materiales	90
12.14.2.1. Hormigón	90
12.14.2.2. Armadura	90
12.14.3. Recubrimiento de hormigón sobre el refuerzo	90
12.14.4. Propiedades geométricas	90
12.14.5. Diseño	90
12.14.5.1. Requisitos generales	90
12.14.5.2. Distribución de los efectos de la carga concentrada en la losa superior y en los laterales	91
12.14.5.3. Distribución de las cargas concentradas en las alcantarillas oblicuas	91
12.14.5.4. Transferencia de corte en las juntas transversales entre secciones de una alcantarilla	91
12.14.5.5. Longitud del tramo	91
12.14.5.6. Factores de resistencia	91
12.14.5.7. Control de la fisuración	91
12.14.5.8. Armadura mínima	92
12.14.5.9. Control de las deflexiones en el estado límite de servicio	92
12.14.5.10. Diseño de las zapatas	92
12.14.5.11. Relleno estructural	92
12.14.5.12. Protección contra la socavación y consideraciones hidrológicas e hidráulicas	92
APÉNDICE A12. PROPIEDADES DE CHAPAS, TUBOS, Y ARCOS CERRADOS	93

CAPÍTULO 12. ESTRUCTURAS ENTERRADAS Y REVESTIMIENTOS PARA TÚNELES

12.1. CAMPO DE VALIDEZ

Este Capítulo contiene requisitos para la selección de las propiedades estructurales y las dimensiones de las estructuras enterradas, por ejemplo, alcantarillas, y chapas de acero utilizadas para soportar excavaciones de túneles en suelo.

Los sistemas de estructuras enterradas consideradas en el presente Capítulo comprenden a los tubos metálicos, los tubos metálicos construidos con chapas estructurales, las estructuras de gran ancho construidas con chapas estructurales, las estructuras de chapas corrugadas profundas, las estructuras tipo cajón construidas con chapas estructurales, los tubos de hormigón armado, los arcos, estructuras tipo cajón y elípticas de hormigón armado colado in situ y prefabricado, y los tubos termoplásticos.

El tipo de chapa considerada de revestimiento son los paneles de acero conformados en frío.

12.2. DEFINICIONES

A

Abrasión (“Abrasion”): pérdida de sección o recubrimiento de una alcantarilla provocada por la acción mecánica del agua que transporta arena, grava y partículas del tamaño de un guijarro en suspensión a grandes velocidades y con turbulencia apreciable.

Alcantarilla (“Culvert”): conducto enterrado de sección curva o rectangular que se utiliza para conducir agua, vehículos, servicios públicos o peatones.

Ancho de una zanja angosta (“Narrow trench width”): luz o ancho exterior de un tubo rígido, más **0,30 m**.

C

Chapa corrugada profunda (“Deep corrugated plate”): Chapa estructural, de acuerdo con AASHTO M 167, con una profundidad de corrugación mayor de **0,13 m**.

Corrosión (“Corrosion”): pérdida de sección o recubrimiento de una estructura enterrada provocada por procesos químicos y/o electroquímicos.

E

Envolvente de suelo (“Soil envelope”): zona de relleno de suelo controlado que se coloca alrededor de una alcantarilla; su objetivo es asegurar el comportamiento esperado con base en las consideraciones de interacción suelo-estructura.

Estructura enterrada (“Buried structure”): término genérico que se aplica a las estructuras construidas mediante métodos en zanja o bajo terraplén.

M

MEF (“FEM, Finite element method”): método de los elementos finitos.

R

Radio de lado (“Side radius”): para estructuras de chapa corrugada profunda, el radio de lado es el radio de la chapa en la sección adyacente a la sección de la corona (parte superior) de la estructura. En las estructuras tipo cajón, a esto frecuentemente se le llama radio de cartela.

Relación de proyección (“Projection ratio”): relación entre la distancia vertical desde la parte superior externa del tubo hasta el suelo o la superficie del lecho de asiento y la altura vertical exterior del tubo; se aplica solamente en el caso de tubos de hormigón armado.

S

Sistema con interacción suelo-estructura (“Soil-structure interaction system”): estructura enterrada cuyo comportamiento estructural se ve afectado por su interacción con la envolvente de suelo.

T

Túnel (“Tunnel”): abertura horizontal o prácticamente horizontal que se excava en el suelo de acuerdo con una geometría prediseñada aplicando métodos de tunelaje, exclusivo de los métodos de corte y cubierta.

12.3. SIMBOLOGÍA

A	área de las paredes (12.7.2.3), en mm ² /m.
A_{eff}	área efectiva de las paredes (12.12.2.2), en mm ² /m.
A_g	área bruta de las paredes dentro de una longitud igual a un período (12.12.3.5), en mm ² /m.
A_L	carga por eje, considerada como el 50 por ciento de todas las cargas por eje que se pueden colocar sobre la estructura simultáneamente; sumatoria de todas las cargas por eje de un grupo de ejes; carga por eje total en un eje simple o eje tándem (12.8.4.2) (12.9.4.2) (12.9.4.3), en kN.
A_s	área de armadura traccionada en una sección transversal de ancho b (C 12.10.4.2.4a) (C 12.11.3), en mm ² /m.
A_{s máx}	área máxima de armadura a flexión sin estribos (12.10.4.2.4c), en mm ² /m.
A_T	área de la parte superior de la estructura por encima de la línea de arranque (12.8.4.2), en m ² .
A_{vr}	área de estribos para resistir las fuerzas de tracción radial en una sección transversal de ancho b en cada línea de estribos con una separación circunferencial, s_v (12.10.4.2.6), en mm ² /m.
A_{vs}	área requerida de estribos para armadura de corte (12.10.4.2.6), en mm ² /m.
B	ancho de la alcantarilla (C 12.6.2.2.5), en m.
B_c	diámetro o ancho exterior de la estructura (12.6.6.3), en m.
B_c´	altura vertical exterior del tubo (12.6.6.3), en m.
B_d	ancho horizontal de la zanja en la parte superior del tubo (12.11.2.2), en m.
B_{FE}	factor de asiento para la carga de suelo (12.10.4.3.1).
B_{FLL}	factor de asiento para la sobrecarga (12.10.4.3.1).
B₁	coeficiente de control de fisuración que tiene en cuenta el efecto del recubrimiento y separación de la armadura (C 12.10.4.2.4d).

<i>b</i>	ancho de la sección (12.10.4.2.4c), en m.
<i>b_e</i>	ancho efectivo del elemento (12.12.3.10.1b), en m.
<i>C_A</i>	constante correspondiente a la geometría del tubo (12.10.4.3.2a).
<i>C_c</i>	coeficiente de carga para tubos con proyección positiva (12.10.4.3.2a).
<i>C_d</i>	coeficiente de carga para instalación en zanja (12.11.2.2).
<i>C_{dt}</i>	coeficiente de carga para instalación en túnel (12.13.2.1).
<i>C_H</i>	factor de ajuste que considera las alcantarillas metálicas tipo cajón con poca altura de recubrimiento (12.9.4.4).
<i>C_L</i>	coeficiente de distribución de la sobrecarga (12.12.2.2).
<i>C_n</i>	factor de calibración para considerar los efectos no lineales (12.12.3.10.1e).
<i>C_{ee}</i>	sobrecarga ajustada para considerar las cargas por eje, los ejes del tándem, y los ejes que tienen un número de ruedas diferente de cuatro; <i>C₁</i> <i>C₂</i> <i>A_L</i> (12.9.4.2), en kN.
<i>C_N</i>	parámetro que depende de la carga vertical y de la reacción vertical (12.10.4.3.2a).
<i>C_s</i>	rigidez constructiva para las chapas de revestimiento de túneles (12.5.6.4), en kN/m.
<i>C₁</i>	1,0 para ejes simples y $0,5+S/15 \leq 1,0$ para ejes de tándem; coeficiente de ajuste que considera el número de ejes; coeficiente relacionado con el control de la fisuración que depende del tipo de armadura utilizado (12.9.4.2) (12.9.4.3) (C 12.10.4.2.4d).
<i>C₂</i>	factor de ajuste que considera el número de ruedas de un eje de diseño tal como se especifica en la Tabla 12.9.4.2-1; coeficiente de ajuste que considera el número de ruedas por eje (12.9.4.2) (12.9.4.3).
<i>D</i>	longitud de la parte recta de la cartela, en m; diámetro del tubo, en m; capacidad de <i>D-load</i> requerida de un tubo de hormigón armado, en kN/m; diámetro al baricentro de la pared del tubo, en m; (12.9.4.1) (12.6.6.2) (12.10.4.3.1) (12.12.2.2).
<i>D-load</i>	resistencia del tubo obtenida a partir de un ensayo de carga en tres apoyos con una carga que genera una fisura de 0,25 mm (12.10.4.3), en kN/m.
<i>D_f</i>	factor de forma (12.12.3.10.2b).
<i>D_i</i>	diámetro interior del tubo (12.10.4.3.1), en m.
<i>D_L</i>	factor de arrastre por deflexión (12.12.2.2).
<i>D_o</i>	diámetro exterior del tubo (12.12.2.2), en m.

d	ancho de suelo envolvente requerido, adyacente a la estructura; distancia desde la cara comprimida hasta el baricentro de la armadura traccionada (12.8.5.3) (12.10.4.2.4a) (C 12.11.3), en m.
d'	ancho del relleno de terraplén deformado para proveer un apoyo adecuado para una instalación oblicua (C 12.6.8.2), en m.
d_1	distancia desde la estructura (12.8.5.3), en m.
E	módulo de elasticidad del plástico; modulo inicial de elasticidad (12.12.3.3) (12.12.3.6), en MPa.
E_m	módulo de elasticidad del metal (12.7.2.4), en MPa.
E_p	módulo del material del tubo a corto o largo plazo tal como se especifica en la Tabla 12.12.3.3-1 (12.12.2.2), en MPa.
$E(x)$	carga distribuida lateral no balanceada sobre la alcantarilla por debajo de la pendiente del terreno y oblicua en la pared extrema (C 12.6.2.2.5), en kN.
E_{50}	módulo de elasticidad a los 50 años (12.12.3.3), en MPa.
E_{75}	módulo de elasticidad a los 75 años (12.12.3.3), en MPa.
F	carga concentrada que actúa en la corona o clave de una alcantarilla (C 12.6.2.2.5), en kN.
F_c	factor de corrección por la curvatura (12.10.4.2.5).
F_{cr}	factor para ajustar el control de fisuración respecto del ancho máximo de fisura promedio de 0,25 mm correspondiente a $F_{cr} = 1,0$ (12.10.4.2.4d).
F_d	factor que considera el efecto de la profundidad de fisura que resulta en un aumento de la tracción diagonal, el corte, y la resistencia a medida que disminuye d (12.10.4.2.5).
F_e	factor que considera la interacción suelo-estructura para instalaciones bajo terraplén (12.10.2.1).
FF	factor de flexibilidad (12.5.6.3) (12.7.2.6), en m/kN.
F_n	coeficiente que considera el efecto del empuje sobre la resistencia de corte (12.10.4.2.5).
F_{rp}	factor que considera el efecto del proceso constructivo y los materiales locales sobre la resistencia a tracción radial del tubo (12.10.4.2.3).
F_{rt}	factor que considera el efecto del tamaño del tubo sobre la resistencia radial a tracción (12.10.4.2.4c).
F_t	factor que considera la interacción suelo-estructura para instalaciones en zanjas (12.10.2.1).

F_u	resistencia especificada mínima a tracción; tensión de fluencia del material para la duración de la carga de diseño (12.7.2.4) (12.12.3.10.1b), en MPa.
F_{vp}	factor que considera el efecto del proceso constructivo y los materiales locales sobre la resistencia al corte del tubo (12.10.4.2.3).
F_y	tensión de fluencia del metal (12.7.2.3), en MPa.
f'_c	resistencia a la compresión del hormigón (12.4.2.2), en MPa.
f_{cr}	tensión crítica de pandeo (12.7.2.4), en MPa.
f_s	tensión máxima de la armadura de acero en el estado límite de servicio (C 12.11.3), en MPa.
f_y	tensión de fluencia mínima especificada de la armadura de acero (12.10.4.2.4a), en MPa.
H	altura de la alcantarilla; altura del recubrimiento desde la parte superior de la alcantarilla tipo cajón hasta la parte superior del pavimento; altura del recubrimiento sobre la corona; altura del relleno por encima de la parte superior del tubo (C 12.6.2.2.5) (12.9.4.2) (12.9.4.4) (12.10.2.1), en m.
HAF	factor de arqueamiento horizontal (12.10.2.1).
H_D	distancia vertical desde la mitad de la profundidad del corrugado hasta el nivel superior (12.8.9.4), en m.
H_{design}	altura de diseño del recubrimiento por encima de la parte superior de la alcantarilla o por encima de la corona o clave, de los arcos o tubos (C 12.6.2.2.5), en m.
H_L	reacción de la faja del muro cabecero (C 12.6.2.2.5), en kN.
H_s, H_w	altura del nivel freático por encima de la línea central del tubo (12.12.3.4) (12.12.3.7), en m.
H_1	profundidad de la corona de la alcantarilla por debajo de la superficie del terreno; altura del recubrimiento por encima de la zapata hasta la superficie de tránsito (C 12.6.2.2.5) (12.8.4.2), en m.
H_2	altura real del recubrimiento por encima de la parte superior de la alcantarilla o de la corona de los arcos o tubos; altura del recubrimiento desde la línea de arranque de la estructura hasta la superficie de tránsito (C 12.6.2.2.5) (12.8.4.2), en m.
h	distancia vertical desde la parte superior del recubrimiento para la altura de diseño hasta el punto de aplicación de la carga horizontal; espesor de pared de la alcantarilla de sección tubular o tipo cajón; altura de la superficie del terreno por encima de la parte superior del tubo (C 12.6.2.2.5) (12.10.4.2.4a) (C 12.11.3), en m.
I	momento de inercia (12.7.2.6), en m^4/m .

<i>ID</i>	diámetro interno (12.6.6.3), en m.
<i>IM</i>	incremento por carga dinámica, tal como se especifica en la Tabla 3.6.1.1.2-1 (12.12.3.9), en %.
<i>I_p</i>	momento de inercia del perfil del tubo por unidad de longitud del tubo (12.12.2.2), en m ⁴ /m.
<i>i</i>	coeficiente que considera el efecto de la fuerza axial en el estado límite de servicio, <i>f_s</i> (12.10.4.2.4d) (C 12.11.3).
<i>j</i>	coeficiente para el brazo del momento en el estado límite de servicio, <i>f_s</i> (12.10.4.2.4d) (C 12.11.3).
<i>K</i>	relación entre el empuje lateral unitario del suelo efectivo y el empuje vertical unitario del suelo efectivo, es decir, el coeficiente del empuje de suelo activo de Rankine (12.10.4.2).
<i>K_B</i>	coeficiente de asiento (12.12.2.2).
<i>K_h</i>	empuje lateral del suelo para alcantarillas por debajo del terreno inclinado (C 12.6.2.2.5), en MPa/m.
<i>K_{h1}</i>	distribución del empuje lateral del suelo que actúa en la superficie de pendiente ascendente de la alcantarilla (C 12.6.2.2.5), en MPa/m.
<i>K_{h2}</i>	distribución del empuje lateral del suelo que actúa en la superficie de pendiente descendente de la alcantarilla (C 12.6.2.2.5), en MPa/m.
<i>K_t</i>	factor de tiempo, especificado en la Tabla 12.12.3.10.1b-1 (12.12.3.10.1b).
<i>K_{wa}</i>	factor por incertidumbre en el nivel freático (12.12.3.8).
<i>K₁</i>	coeficiente para considerar la ubicación de diseño (12.12.3.9), en m.
<i>K₂</i>	coeficiente para tener en cuenta la variación del empuje alrededor de la circunferencia (12.12.3.5).
<i>K_{yE}</i>	factor de instalación (12.12.3.5).
<i>k</i>	factor de rigidez del suelo; coeficiente de los apoyos de borde; coeficiente de pandeo de la chapa (12.7.2.4) (12.13.3.3) (12.12.3.10.1b).
<i>L</i>	distancia a lo largo de la longitud de la alcantarilla entre la junta de expansión y la línea central del muro cabecero; longitud del nervio rigidizador sobre la parte recta de la cartela; (C 12.6.2.2.5) (12.9.4.1), en m.
<i>LLDF</i>	factor de distribución de la sobrecarga, a través de los rellenos de suelo, según lo especificado en el artículo 3.6.1.2.6 (12.12.3.5).
<i>L_o</i>	longitud del área de contacto de la superficie de sobrecarga, paralela al diámetro del tubo, tal como se especifica en el artículo 3.6.1.2.5 (12.12.3.9), en m.

L_w	ancho de carril; ancho de distribución de la sobrecarga horizontal en la dirección circunferencial, a la altura de la corona (12.8.4.2) (12.12.3.5), en m.
M_{de}	momento debido a la carga permanente; sumatoria de los momentos nominales, en la corona y en la cartela, debidos a la carga permanente (12.9.4.2), en kNm/m.
M_{deu}	momento mayorado debido a la carga permanente tal como se especifica en el artículo 12.9.4.2 (12.9.4.3), en kNm.
M_{ee}	momento debido a la sobrecarga; sumatoria de los momentos nominales, en la corona y en la cartela, debidos a la sobrecarga (12.9.4.2), en kNm/m.
M_{eeu}	momento mayorado debido a la sobrecarga tal como se especifica en el artículo 12.9.4.2 (12.9.4.3), en kNm.
M_{nu}	momento mayorado que actúa en una sección transversal de ancho, b , modificado para considerar los efectos del empuje a compresión o tracción, (12.10.4.2.6), en kNm/m.
M_P	capacidad del momento plástico de la estructura corrugada profunda (12.8.9.4), en kNm/m.
M_{pc}	capacidad del momento plástico de la corona (12.9.4.3), en kNm/m.
M_{ph}	capacidad del momento plástico de la cartela (12.9.4.3), en kNm/m.
M_s	momento flexor en el estado límite de servicio, en kNm/m; momento que actúa en una sección transversal de ancho b , en el estado límite de servicio, tomado en las ecuaciones de diseño como valor absoluto, en kNm/m; módulo de suelo restringido especificado en la Tabla 12.12.3.5-1, en MPa; módulo del suelo, en MPa. (12.10.4.2.4d) (C 12.11.3) (12.12.2.2) (12.12.3.5).
M_u	momento último que actúa en una sección transversal de ancho b (12.10.4.2.4a), en kNm/m.
m	factor de presencia múltiple, especificado en la Tabla 3.6.1.1.2-1 (12.12.3.9).
N_s	empuje axial que actúa en una sección transversal de ancho b , en el estado límite de servicio, considerado positivo cuando es de compresión y negativo cuando es de tracción (12.10.4.2.4d) (C 12.11.3), en kN/m.
N_u	empuje axial que actúa en una sección transversal de ancho b , en el estado límite de resistencia (12.10.4.2.4a), en kN/m.
n	número de carriles adyacentes de tránsito (12.8.4.2).
P	carga de rueda de diseño, especificada en el artículo 3.6.2.2 (12.12.3.9), en kN.
P_{Brg}	presión admisible de aplastamiento para limitar la deformación de compresión en la pared de la zanja o del terraplén (12.8.5.3), en kN/m ² .
P_c	coeficiente de proporción del momento total, aplicado en la corona de una alcantarilla metálica tipo cajón (12.9.4.3).

P_F	presión vertical mayorada en la corona, debido a las cargas del suelo y de la sobrecarga (12.7.2.2), en kN/m ² .
P_L	presión debida a la sobrecarga (LL) y al incremento por carga dinámica (IM), en kN/m ² ; carga de servicio en la alcantarilla (12.12.2.2) (12.12.3.9).
P_s	carga de diseño en servicio (12.12.2.2), en kN/m ² .
P_{sp}	presión del prisma de suelo (12.12.2.2), en kN/m ² .
P_{st}	capacidad a compresión de AASHTO T 341 (12.12.3.10.1b), en kN/m.
P_u	carga de diseño mayorada (12.12.3.5), en kN/m ² .
P_w	presión hidrostática del agua (12.12.3.5), en kN/m ² .
P_1	empuje horizontal a una distancia d_1 de la estructura (12.8.5.3), en kN/m ² .
p	relación de proyección positiva (12.10.4.3.2a).
p'	relación de proyección negativa (12.10.4.3.2a).
q	relación entre el empuje lateral total y el empuje vertical total (12.10.4.3.2a).
R	altura de la estructura; altura de una alcantarilla tipo cajón o de una estructura de gran ancho construida con chapas estructurales; radio al baricentro de la pared del tubo (12.8.4.1) (12.9.4.1) (12.12.2.2), en m.
R_{AL}	factor de corrección de la carga por eje (12.9.4.6).
R_c	radio de esquina de la estructura, en m; factor de corrección de la resistencia del hormigón (12.8.5.3) (12.9.4.6).
R_d	relación de los factores de resistencia, especificados en el artículo 5.5.4.2, para corte y momento (12.10.4.2.4c).
R_f	factor relacionado con el espesor requerido para la losa de alivio, aplicable para las estructuras tipo cajón en las cuales el tramo es menor que 8 m (12.9.4.6).
R_H	componente horizontal de la reacción de la zapata (12.8.4.2), en kN/m.
R_h	factor de reducción del momento en la cartela; factor de corrección por la geometría del suelo de relleno (12.9.4.3) (12.12.3.10.1e).
R_n	resistencia nominal (12.5.1), en kN/m.
R_r	resistencia mayorada; resistencia mayorada al empuje (12.5.1) (12.12.3.5), en kN/m.
R_T	radio del arco superior de las estructuras de gran ancho construidas con chapas estructurales (12.8.3.2), en m.

R_v	componente vertical de la reacción de la zapata (12.8.4.2), en kN/m.
r	radio de giro; radio a la línea central de la pared del tubo de hormigón (12.7.2.4) (12.10.4.2.5), en m.
r_c	radio de la corona o clave (12.9.4.1), en m.
r_h	radio de la cartela (12.9.4.1), en m.
r_s	radio de la armadura interna (12.10.4.2.4c), en m.
r_{sd}	parámetro de la relación de asentamiento (12.10.4.3.2a).
S	diámetro o ancho del tubo, túnel o cajón; tramo entre líneas de arranque de una estructura de gran ancho construida con chapas estructurales; tramo de una alcantarilla tipo cajón (12.6.6.3) (12.8.4.1) (12.9.4.2) (12.12.3.6), en m.
S_H	factor de rigidez anular (12.12.3.5).
S_i	diámetro o ancho horizontal interno del tubo (12.10.4.2.4b), en m.
S_e	separación de la armadura circunferencial (12.10.4.2.4d), en m.
S_1, S_2	fuerzas de corte que actúan a lo largo de las líneas de apoyo de la alcantarilla (C 12.6.2.2.5), en kN.
s_v	separación de los estribos (12.10.4.2.6), en m.
T	empuje total debido a las cargas permanentes y sobrecargas que actúan sobre la estructura (12.8.5.3), en kN/m.
T_L	empuje mayorado (12.7.2.2), en kN/m.
T_s	empuje de servicio por unidad de longitud (12.12.2.2), en kN/m.
T_u	empuje mayorado por unidad de longitud (12.12.3.10.1c), en kN/m.
t	espesor requerido para la losa de alivio de hormigón; espesor del elemento (12.9.4.6) (12.12.3.10.1b), en m.
t_b	espesor básico de la losa de alivio de hormigón; recubrimiento libre de hormigón sobre la armadura (12.9.4.6) (12.10.4.2.4d), en m.
V	reacción no mayorada de la zapata (12.9.4.5), en kN/m.
VAF	factor de arqueamiento vertical (12.10.2.1).
V_c	fuerza de corte mayorada que actúa en una sección transversal de ancho b , el cual produce la falla por tracción diagonal si no hay armaduras de estribos (12.10.4.2.6), en kN/m.
V_{DL}	$[H_2(S) - A_T] \gamma_s / 2$ (12.8.4.2), en kN/m.

V_L	reacción en la faja del muro cabecero (C 12.6.2.2.5), en kN.
V_{LL}	$n(A_L)/(2,4 + 2 H_1)$ (12.8.4.2), en kN/m.
V_n	resistencia nominal al corte de la sección del tubo sin estribos radiales por unidad de longitud del tubo (12.10.2.4.5), en kN/m.
V_r	resistencia minorada al corte por unidad de longitud (12.10.4.2.5), en kN/m.
V_u	fuerza última de corte que actúa en una sección transversal de ancho b (12.10.4.2.5), en kN/m.
W_E	carga total del suelo sobre el tubo o revestimiento (12.10.2.1), en kN/m.
W_F	carga del fluido dentro del tubo (12.10.4.3.1), en kN/m.
W_L	sobrecarga total en el tubo o revestimiento (12.10.4.3.1), en kN/m.
W_0	ancho del área de contacto de la sobrecarga en la superficie del terreno paralelo al flujo en el tubo (12.12.3.5), en m.
W_T	sobrecarga y carga permanente total sobre el tubo o revestimiento (12.10.4.3.1), en kN/m.
w	peso unitario del suelo, en kN/m ³ ; ancho libre total del elemento entre elementos de apoyo, en m. (12.10.2.1) (12.12.3.10.1b).
x	parámetro que depende del área de la proyección vertical del tubo en la cual el empuje lateral activo del suelo es efectivo (12.10.4.3.2a).
α	ángulo de oblicuidad entre el eje de la carretera, o una tangente a la misma, y el muro cabecero de la alcantarilla (C 12.6.2.2.5), en grados (°).
β	ángulo de la pendiente del relleno respecto a la horizontal (C 12.6.2.2.5), en grados (°).
γ_b	peso unitario del suelo flotante (12.12.3.7), en kN/m ³ .
γ_{EV}	factor de carga para el empuje vertical debido a la carga permanente del suelo de relleno (12.12.3.5).
γ_{LL}	factor de carga para la sobrecarga (12.12.3.5).
γ_s	peso unitario del suelo de relleno; peso unitario del suelo; peso unitario del suelo húmedo (C 12.9.2) (12.9.4.2) (12.12.3.7), en kN/m ³ .
γ_w	peso unitario del agua (12.12.3.8), en kN/m ³ .
γ_{WA}	factor de carga para la presión hidrostática (12.12.3.5).
Δ_A	deflexión total admisible del tubo (12.12.2.2), en mm.
Δ_f	deflexión del tubo debida a flexión (12.12.3.10.2b), en mm.

Δ_t	deflexión total del tubo (12.12.2.2), en mm.
ε_{bck}	capacidad de deformación nominal para pandeo general (12.12.3.10.1e).
ε_f	deformación debida a flexión mayorada (12.12.3.10.2b).
ε_{sc}	deformación por compresión en servicio (12.12.2.2), en m/m.
ε_{uc}	deformación por compresión mayorada debida al empuje (12.12.3.10.1c).
ε_{yc}	deformación límite por compresión mayorada, especificada en la Tabla 12.12.3.3-1 (12.12.3.10.1b).
ε_{yt}	deformación límite en servicio a largo plazo, tal como se especifica en la Tabla 12.12.3.3-1 (12.12.3.10.2b).
η_{EV}	factor de modificación de las cargas, especificado en el artículo 1.3.2, que se aplican a las cargas verticales de suelo sobre las alcantarillas (12.12.3.5).
η_{LL}	factor de modificación de las cargas, que se aplican a las sobrecargas sobre las alcantarillas (12.12.3.5).
λ	factor de esbeltez (12.12.3.10.1b).
μ	coeficiente de fricción entre el tubo y el suelo (12.10.2.1).
ν	relación de Poisson del suelo (12.12.3.10.1e).
ρ	factor de ancho efectivo (12.12.3.10.1b).
ϕ	factor de resistencia (12.5.1).
ϕ_{bck}	factor de resistencia para pandeo (12.12.3.10.1e).
ϕ_f	factor de resistencia para flexión (12.10.4.2.4c).
ϕ_{fs}	coeficiente de fricción entre el material de relleno y los lados de la zanja (12.10.4.3.2a).
ϕ_r	factor de resistencia para tracción radial (12.10.4.2.4c).
ϕ_s	factor de resistencia para la rigidez del suelo, $\phi_s = 0,9$; factor de resistencia para la presión del suelo (12.12.3.5) (12.12.3.10.1e).
ϕ_T	factor de resistencia para efectos del empuje (12.12.3.10.1d).
Ψ	ángulo central del tubo subtendido por la supuesta distribución de la fuerza reactiva externa (12.10.4.2.1), en grados ($^\circ$).
ω	separación de las corrugaciones (12.12.3.10.1b), en m.

12.4. PROPIEDADES DEL SUELO Y DE LOS MATERIALES

12.4.1. Determinación de las propiedades del suelo

12.4.1.1. Requisitos generales

Se deberá realizar un estudio de suelos para determinar la presencia e influencia de condiciones geológicas y ambientales que pudieran afectar el comportamiento de las estructuras enterradas. Para las estructuras enterradas soportadas por zapatas y para los arcos cerrados y tubos de gran diámetro, se debe realizar un estudio de las fundaciones a fin de evaluar la capacidad de los materiales de fundación para resistir las cargas aplicadas y satisfacer los requisitos referentes al desplazamiento de la estructura.

12.4.1.2. Suelos de fundación

Para determinar la estabilidad del lecho de asiento y el asentamiento bajo la carga se deberá considerar el tipo de suelo de fundación y su comportamiento anticipado.

12.4.1.3. Suelos utilizados como relleno envolvente

Se deberán establecer el tipo, la densidad compactada y las características de resistencia del suelo envolvente adyacente a la estructura enterrada. Los suelos de relleno utilizados como envolvente deberán satisfacer los requisitos de la norma AASHTO M145 como se describe a continuación:

- Para los tubos flexibles y estructuras de hormigón estándares: A-1, A-2 o A-3 (GW, GP, SW, SP, GM, SM, SC, GC),
- Para las alcantarillas metálicas tipo cajón y las estructuras metálicas de gran ancho que tienen un recubrimiento menor que **3,6 m**: A-1, A-2-4, A-2-5, o A-3 (GW, GP, SW, SP, GM, SM, SC, GC),
- Para las estructuras metálicas de gran ancho que tienen un recubrimiento mayor o igual que **3,6 m**: A-1 o A-3 (GW, GP, SW, SP, GM, SM), y
- Para alcantarillas de chapas estructurales con corrugaciones profundas: A-1, A-2-4, A-2-5, o A-3 (ASTM D2487) (GW, GP, SW, SP, GM, SM, SC, GC) y los requisitos del fabricante de la alcantarilla.
- Para alcantarillas termoplásticas, el asiento, y los materiales de relleno: suelos A-1, A-2-4, A-2-5, o A-3. Un máximo del **50 por ciento** de los tamaños de las partículas puede pasar el tamiz N° 100 y un máximo del **20 por ciento** puede pasar el tamiz N° 200.

12.4.2. Materiales

12.4.2.1. Tubos y estructuras con chapas estructurales construidos de aluminio

El aluminio para los tubos y arcos cerrados de metal corrugado debe satisfacer los requisitos de la norma AASHTO M 196 (ASTM B745). El aluminio para los tubos

construidos con chapas estructurales, arcos cerrados, arcos abiertos, y estructuras tipo cajón deberá cumplir los requisitos de la norma AASHTO M 219 (ASTM B746).

12.4.2.2. Hormigón

El hormigón deberá satisfacer lo establecido en el artículo 5.4, excepto que f'_c pueda estar basado en ensayos de testigos.

12.4.2.3. Tubos de hormigón prefabricado

Los tubos de hormigón prefabricado deberán satisfacer los requisitos de las normas AASHTO M 170 (ASTM C76) y M 242M/M 242 (ASTM C655M y C655). Se podrán utilizar espesores de pared de diseño, diferentes de las dimensiones estándares, siempre y cuando el diseño satisfaga todos los requisitos aplicables de este Capítulo.

12.4.2.4. Estructuras de hormigón prefabricado

Las estructuras de hormigón prefabricado en forma de arco, elípticas, y tipos cajón deberán satisfacer los requisitos de las normas AASHTO M 206M/M 206 (ASTM C506M y C506), M 207M/M 207 (ASTM C507M y C507), M 259 (ASTM C789), y M 273 (ASTM C850).

12.4.2.5. Tubos y estructuras con chapas estructurales construidos de acero

El acero para los tubos y arcos cerrados de metal corrugado deberá satisfacer los requisitos de la norma AASHTO M 36 (ASTM A760). El acero para tubos construidos con chapas estructurales, arcos cerrados, arcos abiertos, y estructuras tipo cajón deberá cumplir los requisitos de la norma AASHTO M 167M/M 167 (ASTM A761/A761M).

12.4.2.6. Estructuras con corrugado profundo

El acero para chapas estructurales de corrugado profundo debe cumplir con los requisitos de la norma AASHTO M 167. La chapa estructural de corrugado profundo puede ser reforzada.

12.4.2.7. Armaduras de acero

Las armaduras deberán satisfacer los requisitos del artículo 5.4.3 y, además, se deberán ajustar a una de las siguientes normas: AASHTO M 31M/M 31 (ASTM A615/A615M), M 32M/M 32 (ASTM A82/A82M), M 55M/M 55 (ASTM A185/A185M), M 221M/M 221 (ASTM A497), o M 225M/M 225 (ASTM A496/A496M).

Para los alambres lisos y las mallas soldadas de alambres lisos, la tensión de fluencia se puede tomar igual a **450 MPa**. Para las mallas soldadas de alambres conformados, la tensión de fluencia se puede tomar igual a **480 MPa**.

12.4.2.8. Tubos termoplásticos

Los tubos plásticos pueden ser de paredes macizas, corrugadas, o perfiladas, y pueden ser fabricados de polietileno (**PE**) o cloruro de polivinilo (**PVC**).

Los tubos de PE deberán satisfacer los requisitos de las normas ASTM F714 para tubos de paredes macizas, AASHTO M 294 para tubos corrugados, y ASTM F894 para tubos de paredes perfiladas.

Los tubos de PVC deberán satisfacer los requisitos de las normas AASHTO M 278 para tubos de paredes flexibles, ASTM F679 para tubos de paredes macizas, y AASHTO M 304 para tubos de paredes perfiladas.

12.5. ESTADOS LÍMITE Y FACTORES DE RESISTENCIA

12.5.1. Requisitos generales

Las estructuras enterradas y sus fundaciones se deberán diseñar utilizando los métodos apropiados especificados en los artículos 12.7 a 12.12 de manera que puedan resistir las cargas mayoradas obtenidas aplicando las combinaciones de cargas especificadas en los artículos 12.5.2 y 12.5.3.

Para cada uno de los estados límite aplicables, la resistencia minorada, R_r , se deberá calcular de la siguiente manera:

$$R_r = \phi R_n \quad (12.5.1-1)$$

donde:

R_n = resistencia nominal

ϕ = factor de resistencia especificado en la Tabla 12.5.5-1

12.5.2. Estado límite de servicio

Las estructuras enterradas se deberán analizar para la combinación de cargas correspondiente al estado límite de Servicio I, según lo especificado en la Tabla 3.4.1-1.

- Control de las flechas en las estructuras metálicas, las chapas utilizadas como revestimiento de túneles, y los tubos termoplásticos; y
- Control del ancho de fisura en las estructuras de hormigón armado.

12.5.3. Estado límite de resistencia

Las estructuras enterradas y los revestimientos de túneles se deberán analizar para las cargas constructivas y para las combinaciones de cargas correspondientes a los estados límite de Resistencia I y II, según lo especificado en la Tabla 3.4.1-1, tal como se indica a continuación:

- Para las estructuras metálicas:
 - Área de las paredes
 - Pandeo

- Falla de las costuras
- Límite de flexibilidad para la construcción
- Flexión solamente de las estructuras tipo cajón y corrugado profundo
- Para las estructuras de hormigón:
 - flexión
 - corte
 - empuje
 - tracción radial
- Para los tubos termoplásticos:
 - área de las paredes
 - pandeo
 - límite de flexibilidad
- Para las chapas utilizadas como revestimiento de túneles:
 - área de las paredes
 - pandeo
 - resistencia de las costuras
 - rigidez constructiva

12.5.4. Factores de modificación de las cargas y factores de carga

Para las estructuras enterradas y los revestimientos de túneles se deberán aplicar los factores de modificación de las cargas tal como se especifica en el artículo 1.3, excepto que para las cargas constructivas los factores de modificación de las cargas se deberán tomar iguales a **1,0**. Para los estados límite de resistencia, las estructuras enterradas se deberán considerar como no redundantes bajo la carga del suelo de relleno y como redundantes bajo las sobrecargas e incremento por carga dinámica. La importancia operativa de una estructura se deberá determinar considerando la necesidad de que la estructura mantenga su funcionalidad y/o la seguridad de la carretera.

12.5.5. Factores de resistencia

Para las estructuras enterradas los factores de resistencia se deberán tomar como se especifica en la Tabla 12.5.5-1. Los valores de los factores de resistencia para el diseño geotécnico de las fundaciones de las estructuras enterradas se deberán tomar como se especifica en el Capítulo 10.

Tabla 12.5.5-1. Factores de resistencia para las estructuras enterradas

TIPO DE ESTRUCTURA	FACTOR DE RESISTENCIA
Tubos, arcos abiertos y arcos cerrados metálicos	
Tubos helicoidales con costura de seguridad o costura totalmente soldada: <ul style="list-style-type: none"> Mínima área de las paredes y pandeo 	1,00
Tubos anulares con costura soldada por puntos, remachada o costura abulonada: <ul style="list-style-type: none"> Mínima área de las paredes y pandeo Mínima resistencia de las costuras longitudinales Capacidad de carga sobre las fundaciones de arco cerrado 	1,00 0,67 Ver Capítulo 10
Tubos construidos con chapas estructurales: <ul style="list-style-type: none"> Mínima área de las paredes y pandeo Mínima resistencia de las costuras longitudinales Capacidad de carga sobre las fundaciones 	1,00 0,67 Ver Capítulo 10
Estructuras de gran ancho construidas con chapas estructurales y chapas para revestimiento de túneles	
<ul style="list-style-type: none"> Mínima área de las paredes Mínima resistencia de las costuras Capacidad de carga sobre las fundaciones 	0,67 0,67 Ver Capítulo 10
Estructuras tipo cajón construidas con chapas estructurales	
<ul style="list-style-type: none"> Capacidad de momento plástico Capacidad de carga sobre las fundaciones de arco cerrado 	1,00 Ver Capítulo 10
Tubos de hormigón armado	
Método de diseño directo: Instalación tipo I: <ul style="list-style-type: none"> Flexión Corte Tracción radial Otros tipos de instalaciones: <ul style="list-style-type: none"> Flexión Corte Tracción radial 	0,90 0,82 0,82 1,00 0,90 0,90
Estructuras tipo cajón de hormigón armado colado in situ	
<ul style="list-style-type: none"> Flexión Corte 	0,90 0,85
Estructuras tipo cajón de hormigón armado prefabricado	
<ul style="list-style-type: none"> Flexión Corte 	1,00 0,90
Estructuras de hormigón armado prefabricado de tres lados	
<ul style="list-style-type: none"> Flexión Corte 	0,95 0,90
Tubo termoplástico	
Tubo de PE y de PVC: <ul style="list-style-type: none"> Empuje, ϕ_r Rigidez del suelo, ϕ_s Pandeo global, ϕ_{bck} Flexión, ϕ_f 	1,00 0,90 0,70 1,00
Estructuras de chapa estructural con corrugado profundo	
<ul style="list-style-type: none"> Área mínima de pared y pandeo general, ϕ_b Rótula plástica, ϕ_h Suelo, ϕ_s 	0,70 0,90 0,90

12.5.6. Límites de flexibilidad y rigidez constructiva

12.5.6.1. Tubos de metal corrugado y estructuras construidas con chapas estructurales corrugadas

Los factores de flexibilidad, para los tubos de metal corrugado y las estructuras construidas con chapas estructurales corrugadas, no deberán exceder los valores especificados en la Tabla 12.5.6.1-1.

Tabla 12.5.6.1-1. Límite para el factor de flexibilidad

<i>Tipo de material</i>	<i>Tamaño de las corrugaciones, en mm.</i>	<i>Factor de flexibilidad, en m/kN</i>
Tubos de acero	6,35	0,25
	12,7	0,25
	25,4	0,19
Tubos de aluminio	6,35 y 12,7	0,18
	Material de espesor 1,52	0,35
	Material de espesor 1,90	0,53
	Todos los demás	0,34
Chapas de acero	150 × 50	0,11
	Tubos	0,17
	Arcos cerrados	0,17
Chapas de aluminio	230 × 64	0,14
	Tubos	0,21
	Arcos cerrados	0,21
	Arcos	0,21

12.5.6.2. Tubos metálicos y arcos cerrados con nervios en espiral

Los factores de flexibilidad para los tubos metálicos y arcos cerrados con nervios en espiral no deberán superar los valores especificados en la Tabla 12.5.6.2-1, para instalaciones bajo terraplén conforme a los requisitos de los artículos 12.6.6.2 y 12.6.6.3 y para instalaciones en zanja conforme a los requisitos de los artículos 12.6.6.1 y 12.6.6.3.

Tabla 12.5.6.2-1. Límite para el factor de flexibilidad

<i>Material</i>	<i>Condición</i>	<i>Tamaño de las corrugaciones, en mm.</i>	<i>Factor de flexibilidad, en m/kN</i>
Acero	Bajo terraplén	19 × 19 × 190	48,78 ^{1/3}
		19 × 25 × 290	31,47 ^{1/3}
	En zanja	19 × 19 × 190	59,12 ^{1/3}
		19 × 25 × 290	36,64 ^{1/3}
Aluminio	Bajo terraplén	19 × 19 × 190	76,43 ^{1/3}
		19 × 25 × 290	39,34 ^{1/3}
	En zanja	19 × 19 × 190	94,42 ^{1/3}
		19 × 25 × 290	48,33 ^{1/3}

Los valores de inercia, I , para los tubos y arcos cerrados de acero y aluminio se deberán tomar como se indica en las Tablas A12-2 y A12-5.

12.5.6.3. Límites de flexibilidad y rigidez de construcción – Tubo termoplástico

El factor de flexibilidad, FF , de los tubos termoplásticos no deberá ser mayor que **0,54 m/kN**.

12.5.6.4. Chapas de acero para revestimiento de túneles

La rigidez constructiva, C_s , en kN/m, no deberá ser menor que los siguientes valores:

- Chapas para revestimiento de dos alas: $C_s \geq 8,75$ kN/m
- Chapas para revestimiento de cuatro alas: $C_s \geq 19,44$ kN/m

12.6. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE DISEÑO

12.6.1. Cargas

Las estructuras enterradas se deberán diseñar para las solicitaciones resultantes de los empujes horizontales y verticales del suelo, la carga del pavimento, la sobrecarga, y el incremento por carga dinámica vehicular. Si las condiciones constructivas o del sitio de emplazamiento lo ameritan, se deberán evaluar la sobrecarga de suelo, las sobrecargas vivas, las cargas de fricción negativa y la presión hidrostática externa. Para las estructuras enterradas cuyo punto más bajo está ubicado por debajo del nivel freático se deberán evaluar las cargas atribuibles a la flotabilidad en agua a fin de controlar la flotación, según se indica en el artículo 3.7.2. Las cargas sísmicas se deben considerar solamente si las estructuras enterradas atraviesan fallas activas.

Para el empuje vertical del suelo, se deberá aplicar el máximo factor de carga de la Tabla 3.4.1-2.

Las cargas de rueda se deberán distribuir a través de los suelos de relleno de acuerdo con los requisitos del artículo 3.6.1.2.6.

12.6.2. Estado límite de servicio

12.6.2.1. Desplazamiento admisible

Los criterios para determinar el desplazamiento admisible de una estructura enterrada se deberán desarrollar con base en la función y el tipo de estructura, la vida de servicio anticipada, y las consecuencias que provocaría un desplazamiento inaceptable.

12.6.2.2. Asentamiento

12.6.2.2.1. Requisitos generales

El asentamiento se deberá determinar tal como se especifica en el artículo 10.6.2. Se deberán considerar los desplazamientos potenciales provocados por:

- Asentamiento diferencial longitudinal a lo largo de la longitud del tubo,
- Asentamiento diferencial entre el tubo y el relleno, y
- Asentamiento de las zapatas y carga no equilibrada de las estructuras oblicuas que se extienden a través de la pendiente del terraplén.

12.6.2.2.2. Asentamiento diferencial longitudinal

El asentamiento diferencial a lo largo de la longitud de una estructura enterrada se deberá determinar de acuerdo con el artículo 10.6.2.4. Los tubos y alcantarillas sujetos a asentamientos diferenciales longitudinales deberán estar provistos de juntas positivas, que les permitan resistir las fuerzas de desunión, que satisfagan los requisitos de las Secciones 26 y 27 de la norma AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications.

Para ciertas instalaciones se puede especificar una contra flecha a fin de asegurar el flujo hidráulico durante la totalidad de la vida de servicio de la estructura.

12.6.2.2.3. Asentamiento diferencial entre la estructura y el relleno

Si se anticipa que una estructura en arco ha de sufrir asentamientos diferenciales entre la estructura y el relleno lateral, la fundación se debe diseñar de manera que se asiente con respecto al relleno.

Los tubos con solera no deberán estar colocados sobre fundaciones que se han de asentar mucho menos que el relleno adyacente; y además se debe proporcionar un lecho de asiento uniforme de material granular ligeramente compactado.

12.6.2.2.4. Asentamiento de las zapatas

Las zapatas se deberán diseñar de manera que provean asentamientos longitudinales y transversales uniformes. El asentamiento de las zapatas deberá ser lo suficientemente grande como para proveer protección contra las potenciales fuerzas de fricción negativa generadas por el asentamiento del relleno adyacente. Si se encuentran materiales de fundación pobres, se deberá considerar excavar todo o parte del material inaceptable y reemplazarlo por un material compactado aceptable.

El diseño de las zapatas deberá satisfacer los requisitos del artículo 10.6.

Las reacciones de las zapatas de las alcantarillas metálicas tipo cajón se deben determinar tal como se especifica en el artículo 12.9.4.5.

Para el diseño de las zapatas de los arcos se deberán considerar los efectos de la profundidad de las zapatas. Las reacciones de la zapata se deberán considerar actuando en forma tangencial al arco en el punto de conexión con la zapata, y de un valor igual al empuje en el arco de la zapata.

12.6.2.2.5. Cargas no equilibradas

Las estructuras enterradas oblicuas respecto de la alineación de la carretera y que se extienden a través de un terraplén se deberán diseñar considerando la influencia de las cargas asimétricas sobre la sección de la estructura.

12.6.2.3. Levantamiento

Si las estructuras se instalan por debajo del nivel freático más elevado anticipado se deberá considerar el levantamiento.

12.6.3. Seguridad contra las fallas del suelo

12.6.3.1. Capacidad de carga y estabilidad

Las estructuras de tubos y las zapatas para estructuras enterradas se deberán analizar para determinar que no se producirán fallas por capacidad de carga y que no habrá erosión del relleno debido a los gradientes hidráulicos.

12.6.3.2. Relleno en las esquinas de los arcos metálicos cerrados

El relleno en las esquinas de los arcos metálicos cerrados se debe diseñar considerando la presión en las esquinas, la cual se deberá tomar como el empuje en el arco dividido por el radio de la esquina del arco cerrado. El suelo utilizado como envolvente alrededor de las esquinas de los arcos cerrados deberá resistir esta presión. Se puede especificar la colocación de relleno estructural seleccionado compactado de pesos unitarios mayores que las normales.

12.6.4. Diseño hidráulico

Para el criterio de diseño se deberán aplicar las consideraciones de diseño hidráulico especificadas en el artículo 2.6 de este Reglamento, y en la norma FHWA "Hydraulic Design of Highway Culverts" (1985).

12.6.5. Socavación

Las estructuras enterradas se deberán diseñar de manera que ninguna de sus partes sufra desplazamientos como resultado de la socavación.

En áreas donde la socavación constituye una consideración relevante, los muros de ala se deberán prolongar a partir de la estructura una distancia suficiente para proteger la parte estructural de la envolvente de suelo que rodea la estructura. Para las estructuras colocadas sobre depósitos erosionables, se deberá utilizar un muro de barrera o cortina contra la socavación que se extienda por debajo de la máxima profundidad de socavación anticipada o bien una solera pavimentada. Las zapatas de las estructuras se deberán colocar a una profundidad mayor o igual que **0,6 m** por debajo de la máxima profundidad de socavación anticipada.

12.6.6. Envolvente de suelo

12.6.6.1. Instalaciones en zanja

El ancho mínimo de la zanja deberá dejar suficiente espacio entre el tubo y las paredes de la zanja para asegurar que el espacio de trabajo sea adecuado para colocar y compactar el material de relleno de forma correcta y segura.

El pliego de especificaciones técnicas deberá exigir que la estabilidad de la zanja sea asegurada ya sea con base en la pendiente de sus paredes o bien entibando la zanja de

acuerdo con los requisitos de OSHA (Occupational Safety and Health Administration) u otras normas aplicables, hasta tanto se desarrolle un documento específico al respecto.

12.6.6.2. Instalaciones bajo terraplén

El ancho mínimo de la envolvente de suelo deberá ser suficiente para asegurar la restricción lateral de la estructura enterrada. El ancho combinado de la envolvente de suelo más el terraplén adyacente deberá ser capaz de soportar todas las cargas sobre la alcantarilla y deberá satisfacer los requisitos sobre desplazamiento especificados en el artículo 12.6.2.

12.6.6.3. Recubrimiento mínimo de suelo

El recubrimiento mínimo, incluyendo una subbase y base granular bien compactadas, no deberá ser menor que los valores especificados en la Tabla 12.6.6.3-1, en la cual:

S = diámetro del tubo, en m

B_c = diámetro exterior o ancho de la estructura, en m

B'_c = altura vertical exterior del tubo, en m

ID = diámetro interior, en m

Tabla 12.6.6.3-1. Recubrimiento mínimo de suelo

Tipo	Condición	Mínimo recubrimiento*
Tubos de metal corrugado		$S/8 \geq 0,30$ m
Tubos de metal con nervaduras en espiral	Conducto de acero	$S/4 \geq 0,30$ m
	Conducto de aluminio con $S \leq 1,20$ m	$S/2 \geq 0,30$ m
	Conducto de aluminio con $S > 1,20$ m	$S/2,75 \geq 0,60$ m
Tubos construidos con chapas estructurales	-	$S/8 \geq 0,30$ m
Tubos de gran ancho construidos con chapas estructurales	-	Ver Tabla 12.8.3.1.1-1
Estructuras tipo cajón construidas con chapas estructurales	-	0,43 m, como se especifica en el artículo 12.9.1
Estructuras de chapas estructurales con corrugado profundo	-	Ver artículo 12.8.9.4.
Tubos termoplásticos	Sobre áreas no pavimentadas	$ID/8 \geq 0,30$ m
	Sobre áreas pavimentadas	$ID/2 \geq 0,60$ m
* Recubrimiento mínimo tomado desde el tope del pavimento rígido o el fondo del pavimento flexible		
Tipo	Condición	Mínimo recubrimiento
Tubos de hormigón armado	Debajo de áreas no pavimentadas o en la cima de pavimentos flexibles	$B_c/8$ o $B'_c/8$, cualquiera sea el que resulte mayor, $\geq 0,30$ m
	Bajo el fondo del pavimento rígido	0,23 m

Si no se provee recubrimiento de suelo, la parte superior de las estructuras tipo cajón de hormigón armado, prefabricado u hormigonado in situ, se deberán diseñar considerando la aplicación directa de las cargas vehiculares.

Se deberán considerar los requisitos sobre recubrimiento adicional durante la construcción tal como se especifica en el Artículo 30.5.5 de la norma AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications.

12.6.7. Mínima separación entre múltiples líneas de tubos

La separación entre múltiples líneas de tubos deberá ser suficiente para permitir la correcta colocación y compactación del relleno debajo del acostillado y entre las estructuras.

El pliego de especificaciones técnicas debe exigir que la colocación y compactación del relleno se coordine de manera tal que se minimice las cargas no equilibradas entre múltiples estructuras poco separadas. Siempre que sea posible, el relleno se debe mantener nivelado sobre la serie de estructuras. Se deberán analizar los efectos de las carreteras con pendientes significativas, a través de una serie de estructuras, para determinar la estabilidad de las estructuras flexibles sujetas a cargas no equilibradas.

12.6.8. Tratamiento de los extremos

12.6.8.1. Requisitos generales

Se debe dar especial atención a la protección de las pendientes de los extremos si se producen condiciones de remanso o se anticipe la ocurrencia de erosión o fuerzas de levantamiento. Se deben considerar medidas para garantizar la seguridad del tránsito, como por ejemplo el uso de rejillas estructuralmente adecuadas que se adapten a la pendiente del terraplén, prolongar la longitud de la alcantarilla más allá del punto de riesgo, o bien utilizar un guardarriel.

12.6.8.2. Alcantarillas flexibles oblicuas respecto de la alineación de la carretera

Los extremos de las alcantarillas flexibles oblicuas respecto de la alineación de la carretera y que atraviesan el relleno del terraplén se deberán combar para asegurar que las cargas sean simétricas a ambos lados del tubo, o bien el muro cabecero se deberá diseñar de manera que soporte la totalidad de la fuerza de empuje en el extremo cortado.

12.6.9. Condiciones corrosivas y abrasivas

Se debe considerar la degradación de la resistencia estructural que pueden provocar la corrosión y la abrasión.

Si el diseño de una alcantarilla metálica o termoplástica es determinado por los factores de flexibilidad durante su instalación, los requisitos referentes a la protección contra la corrosión y/o la abrasión se pueden reducir o eliminar, siempre y cuando se demuestre que la alcantarilla degradada proveerá resistencia adecuada para las cargas que se anticipan durante la totalidad de la vida de servicio de la estructura.

12.7. TUBOS, ARCOS Y ARCOS CERRADOS METÁLICOS

12.7.1. Requisitos generales

Estos requisitos se deberán aplicar al diseño de los tubos metálicos enterrados, tanto corrugados como con nervios en espiral, y a los tubos metálicos enterrados construidos con chapas estructurales.

Los tubos y arcos cerrados metálicos corrugados pueden tener costuras remachadas, soldadas o engargoladas; sus corrugaciones pueden ser anulares o helicoidales. Los tubos, arcos y arcos cerrados construidos con chapas estructurales deberán ser abulonadas y sus corrugaciones solamente podrán ser anulares.

La relación entre la altura y el ancho de los arcos construidos con chapas estructurales no deberá ser menor que **0,3**.

Para las estructuras con radios mayores que **4,0 m** se deberán aplicar los requisitos del artículo 12.8.

12.7.2. Seguridad contra las fallas estructurales

Los tubos y los arcos cerrados metálicos corrugados y con nervio en espiral, y los tubos construidos con chapas estructurales, se deberán analizar en el estado límite de resistencia para:

- Área de pared del tubo,
- Resistencia al pandeo, y
- Resistencia de las costuras en el caso de las estructuras con costuras longitudinales.

12.7.2.1. Propiedades de las secciones

Las dimensiones y propiedades de las secciones transversales de los tubos; la mínima resistencia de las costuras; los requisitos químicos y mecánicos para los tubos y arcos cerrados de aluminio y acero corrugado; y para los tubos, arcos abiertos y arcos cerrados construidos con chapas estructurales de aluminio y acero corrugado, se pueden tomar como se especifica en el Apéndice A12.

12.7.2.2. Empuje

El empuje mayorado, T_L , por unidad de longitud de la pared se deberá tomar como:

$$T_L = P_F \left(\frac{S}{2} \right) \quad (12.7.2.2-1)$$

donde:

T_L = empuje mayorado por unidad de longitud, en kN/m.

S = tramo del tubo, en m.

P_F = presión vertical mayorada en la corona debido a la carga del suelo y sobrecarga, en kN/m^2 .

12.7.2.3. Resistencia de las paredes

La resistencia a la carga axial mayorada, R_n , en kN/m , por unidad de longitud de la pared, sin considerar el pandeo, se deberá tomar como:

$$R_n = 1000 \phi F_y A \quad (12.7.2.3-1)$$

donde:

A = área de las paredes, en m^2/m .

F_y = tensión de fluencia del metal, en MPa.

ϕ = factor de resistencia tal como se especifica en el artículo 12.5.5

12.7.2.4. Resistencia al pandeo

Se deberá analizar el pandeo para el área de las paredes, calculada mediante la Ecuación 12.7.2.3-1. Si $f_{cr} < F_y$, entonces A se debe calcular nuevamente utilizando f_{cr} en lugar de F_y .

$$\text{Si } S < \left(\frac{r}{k}\right) \sqrt{\frac{24 E_m}{F_u}}, \text{ entonces } f_{cr} = F_u - \frac{\left(\frac{F_u k S}{r}\right)^2}{48 E_m} \quad (12.7.2.4-1)$$

$$\text{Si } S > \left(\frac{r}{k}\right) \sqrt{\frac{24 E_m}{F_u}}, \text{ entonces } f_{cr} = \frac{12 E_m}{\left(\frac{k S}{r}\right)^2} \quad (12.7.2.4-2)$$

donde:

S = diámetro del tubo o ancho de la estructura de chapas, en m.

E_m = módulo de elasticidad del metal, en MPa.

F_u = resistencia a la tracción del metal, en MPa.

f_{cr} = tensión de pandeo crítico, en MPa.

r = radio de giro de las corrugaciones, en m.

k = factor de rigidez del suelo tomado igual a **0,22**.

12.7.2.5. Resistencia de las costuras

Para los tubos fabricados con costuras longitudinales, la resistencia minorada de la costura deberá ser suficiente para desarrollar el empuje mayorado en la pared del tubo, T_L .

12.7.2.6. Requisitos para la manipulación y la instalación

La flexibilidad para la manipulación deberá estar indicada mediante un factor de flexibilidad, FF , en m/kN, determinado de la siguiente manera:

$$FF = \frac{S^2}{1000 E_m I} \quad (12.7.2.6-1)$$

donde:

I = momento de inercia, en m^4/m .

E_m = módulo de elasticidad del metal, en MPa.

S = diámetro del tubo o ancho de la estructura de chapas, en m.

Los valores de los factores de flexibilidad para la manipulación y la instalación no deberán ser mayores que los valores correspondientes a los tubos y estructuras de chapas de acero y aluminio especificados en el artículo 12.5.6.

12.7.3. Tubos con revestimiento interior liso

Los tubos metálicos corrugados compuestos por un revestimiento interior liso y una camisa exterior corrugada unidos en forma integral mediante costuras helicoidales, separadas no más de **0,75 m** se pueden diseñar con base en las mismas consideraciones que un tubo metálico corrugado estándar que tiene las mismas corrugaciones que la camisa y un peso por metro mayor o igual que la sumatoria de los pesos por metro del revestimiento más la camisa con corrugaciones helicoidales.

El paso de las corrugaciones no deberá ser mayor que **75 mm**, y el espesor de la camisa no deberá ser menor que el **60 por ciento** del espesor total del tubo estándar equivalente.

12.7.4. Elementos rigidizadores para las estructuras construidas con chapas estructurales

Se puede incrementar la rigidez y la resistencia a flexión, de las estructuras construidas con chapas estructurales, agregando elementos de rigidización circunferencial en la corona. Los elementos rigidizadores deberán ser simétricos y se deberán extender desde un punto ubicado por debajo del punto correspondiente a un cuarto sobre uno de los lados de la estructura, a través de la corona, y hasta el punto correspondiente en el lado opuesto de la estructura.

12.7.5. Construcción e instalación

El pliego de condiciones deberá exigir que la construcción e instalación se realicen conforme a la Sección 26 de la norma AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, hasta tanto se desarrolle un documento específico al respecto.

12.8. ESTRUCTURAS DE GRAN ANCHO CONSTRUIDAS CON CHAPAS ESTRUCTURALES

12.8.1. Requisitos generales

Los requisitos especificados en el presente artículo y en el artículo 12.7 se deberán aplicar al diseño estructural de las estructuras enterradas de metal corrugado de gran ancho formadas por chapas estructurales.

Las siguientes geometrías, ilustradas en la Figura 12.8.1-1, se deberán considerar estructuras de gran ancho construidas con chapas estructurales:

- Tubos y estructuras en arco construidos con chapas estructurales que requieren el uso de elementos con características especiales especificados en el artículo 12.8.3.5, y
- Geometrías especiales de cualquier tamaño que tengan un radio de curvatura mayor que **4 m** en la corona o en las chapas laterales. Las alcantarillas metálicas tipo cajón no se consideran estructuras de gran ancho; estas alcantarillas se discuten en el artículo 12.9.

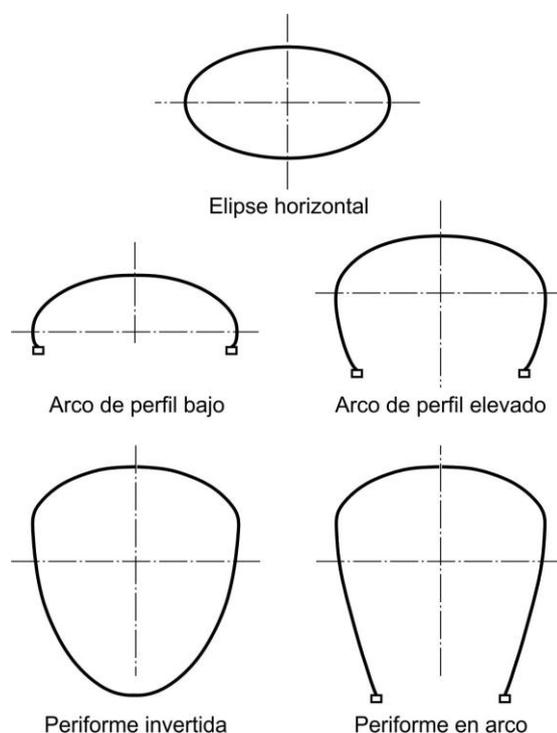


Figura 12.8.1-1. Geometrías de estructuras de gran ancho

12.8.2. Estado límite de servicio

No se requiere considerar ningún criterio para el estado límite de servicio.

12.8.3. Seguridad contra las fallas estructurales

Con la excepción de los requisitos para pandeo y flexibilidad, los requisitos del artículo 12.7 se deben aplicar excepto como se describe aquí.

Las dimensiones y propiedades de las secciones transversales de la estructura, la mínima resistencia de las costuras, los requisitos mecánicos y químicos, y las propiedades de los bulones para las secciones de gran ancho construidas con chapas estructurales se deberán tomar como se especifica en el Apéndice A12 o bien como aquí se describe.

12.8.3.1. Propiedades de las secciones

12.8.3.1.1. Sección transversal

Se deberán aplicar los requisitos del artículo 12.7, considerando las excepciones aquí especificadas.

Las estructuras no descritas aquí se deberán considerar como diseños especiales.

Se deberá aplicar la Tabla A12-3. Los requisitos mínimos para las propiedades de las secciones se deberán tomar como se especifica en la Tabla 12.8.3.1.1-1. Se pueden utilizar recubrimientos menores que los indicados en la Tabla 12.8.3.1.1-1 correspondientes al espesor mínimo de chapa para un radio dado, siempre y cuando se utilicen nervios para rigidizar la chapa. Si se utilizan nervios, el espesor de la chapa no se puede reducir por debajo del mínimo especificado para dicho radio, y el momento de inercia de la sección del nervio y la chapa no deberá ser menor que el de la chapa no rigidizada de mayor espesor correspondiente a la altura de relleno. El uso de un recubrimiento de suelo menor que los valores mínimos indicados para un radio dado requiere un diseño especial.

No se deben permitir los diseños no cubiertos en la Tabla 12.8.3.1.1-1 a menos que sean avalados por documentación aceptable para el propietario.

Tabla 12.8.3.1.1-1. Requisitos mínimos para las estructuras de gran ancho con elementos especiales aceptables

Espesor mínimo del arco superior, en m.					
Radio superior, en m	≤ 4,5	4,5 – 5,2	5,2 – 6,1	6,1 – 7,0	7,0 – 7,6
Chapas de acero corrugado 0,15 m × 0,05 m – Espesor mínimo del arco superior, en m	0,00282	0,00356	0,00432	0,00554	0,00632
Limitaciones geométricas					
Se deberán aplicar las siguientes limitaciones geométricas:					
<ul style="list-style-type: none"> • Máximo radio de la chapa – 7,6 m • Máximo ángulo central del arco superior – 80,0° • Mínima relación entre el radio del arco superior y el radio del arco lateral – 2 • Máxima relación entre el radio del arco superior y el radio del arco lateral – 5 					
Mínimo recubrimiento, en m.					
Radio superior, en m	≤ 4,5	4,5 – 5,2	5,2 – 6,1	6,1 – 7,0	7,0 – 7,6
Espesor del acero sin nervios, en m.					
0,00282	0,76	-	-	-	-
0,00356	0,76	0,90	-	-	-
0,00432	0,76	0,90	0,90	-	-
0,00478	0,76	0,90	0,90	-	-
0,00554	0,60	0,76	0,76	0,90	-
0,00632	0,60	0,60	0,76	0,90	1,20
0,00711	0,60	0,60	0,76	0,90	1,20

12.8.3.1.2. Control de la geometría

Los requisitos de los artículos 12.7.2.4 y 12.7.2.6 no se deberán aplicar para el diseño de las estructuras de gran ancho construidas con chapas estructurales.

12.8.3.1.3. Requisitos mecánicos y químicos

Se deberán aplicar las Tablas A12-3, A12-8 y A12-10.

12.8.3.2. Empuje

El empuje mayorado en la pared se deberá determinar utilizando la Ecuación 12.7.2.2-1, excepto que en esta expresión se deberá reemplazar el valor de **S** por dos veces el valor del radio del arco superior, **R_T**.

12.8.3.3. Área de las paredes

Se deberán aplicar los requisitos del artículo 12.7.2.3.

12.8.3.4. Resistencia de las costuras

Se deberán aplicar los requisitos del artículo 12.7.2.5.

12.8.3.5. Elementos especiales aceptables

12.8.3.5.1. Rigidizadores longitudinales continuos

Los rigidizadores longitudinales continuos se deberán conectar a las chapas corrugadas a cada lado del arco superior. Los rigidizadores pueden ser metálicos o de hormigón armado, ya sean simples o combinados.

12.8.3.5.2. Nervios rigidizadores

Para rigidizar las estructuras construidas con chapas se pueden utilizar nervios de refuerzo formados a partir de perfiles estructurales. Si se los utiliza, estos nervios deben:

- Tener una curvatura que se adapte a la curvatura de las chapas,
- Estar unidos a la estructura según corresponda para asegurar que trabajen de forma integral con las chapas corrugadas, y
- Estar separados el intervalo necesario para aumentar el momento de inercia de la sección y llevarlo a los valores requeridos para el diseño.

12.8.4. Seguridad contra las fallas estructurales – Diseño de las fundaciones

12.8.4.1. Límites para el asentamiento

Se deberá realizar un estudio geotécnico del predio para determinar que las condiciones del sitio satisfagan los requisitos que establecen que, tanto la estructura como la zona crítica de relleno a cada lado de la estructura, tengan un apoyo adecuado. El diseño deberá satisfacer los requisitos del artículo 12.6.2.2, debiéndose considerar los siguientes factores al establecer los criterios para el asentamiento:

- Una vez que se ha colocado el relleno sobre la corona, se deberán limitar los asentamientos del relleno con respecto a la estructura para así controlar las fuerzas de fricción negativa. Puede ser necesario realizar un análisis detallado, si el asentamiento del relleno lateral será mayor que el de la estructura.
- Los asentamientos, a lo largo del eje longitudinal del arco de la estructura, deben estar limitados para mantener la pendiente y evitar las fisuras en la base de los arcos.

Los asentamientos diferenciales calculados a través de la estructura, tomados de línea de arranque a línea de arranque, Δ , en m, deberán satisfacer la siguiente expresión:

$$\Delta \leq \frac{0,01 S^2}{R} \quad (12.8.4.1-1)$$

donde:

S = ancho de la estructura entre las líneas de arranque de la estructura de gran ancho construida con chapas estructurales, en m.

R = altura de la estructura, en m.

Pueden ser requeridos límites más restrictivos para los asentamientos si es necesario proteger los pavimentos o limitar las deflexiones diferenciales longitudinales.

12.8.4.2. Reacciones de las zapatas de las estructuras en arco

Las reacciones de las zapatas se pueden tomar de la siguiente manera:

$$R_V = V_{DL} + V_{LL} \cos \Delta \quad (12.8.4.2-1)$$

$$R_H = V_{DL} + V_{LL} \operatorname{sen} \Delta \quad (12.8.4.2-2)$$

en el cual:

$$V_{DL} = [H_2(S) - A_T] \gamma_s / 2$$

$$V_{LL} = n(A_L) / (2,4 + 2 H_1)$$

n = entero $[(2 H_1 / L_w) + 2] \leq$ número de carriles de tránsito adyacentes.

donde:

R_V = componente vertical de la reacción de la zapata, en kN/m.

R_H = componente horizontal de la reacción de la zapata, en kN/m.

Δ = ángulo de retorno de la estructura, en grados.

A_L = carga por eje, en kN, tomada como el **50 por ciento** de todas las cargas por eje que se pueden colocar sobre la estructura simultáneamente, es decir:

- **145 kN** para el eje del camión, aplicable para este análisis
- **220 kN** para el par de ejes del tándem, aplicable para este análisis
- **720 kN** para la carga ferroviaria E80

A_T = área de la parte superior de la estructura por encima de la línea de arranque, en m².

H_1 = altura de recubrimiento sobre la zapata hasta la superficie de tránsito, en m.

H_2 = altura de recubrimiento desde la línea de arranque de la estructura hasta la superficie de tránsito, en m.

L_w = ancho de carril, en m.

γ_s = peso unitario del suelo, en kN/m³.

S = ancho, en m.

La distribución de la sobrecarga a través del relleno se deberá basar en cualquier método de análisis aceptado.

12.8.4.3. Diseño de las zapatas

Las zapatas de hormigón armado se deberán diseñar de acuerdo con el artículo 10.6 y se deberán dimensionar de manera que satisfagan los requisitos sobre asentamiento establecidos en el artículo 12.8.4.1.

12.8.5. Seguridad contra las fallas estructurales – Diseño de la envolvente de suelo

12.8.5.1. Requisitos generales

El material de relleno estructural utilizado como envolvente alrededor de la estructura deberá satisfacer los requisitos del artículo 12.4.1.3 para estructuras de gran ancho. El ancho de la envolvente a cada lado de la estructura se deberá dimensionar de manera que limite los cambios de forma durante las operaciones constructivas fuera de la envolvente y que controle las deformaciones en el estado límite de servicio.

12.8.5.2. Requisitos constructivos

El relleno estructural envolvente se extiende al muro de zanja y se compacta contra éste o se extiende una distancia adecuada para proteger la forma de la estructura de las cargas de construcción. El ancho de zanja sobrante puede ser llenado con un adecuado material de relleno compactado para satisfacer los requisitos del artículo 12.8.5.3. En las instalaciones bajo terraplén, el ancho mínimo de relleno estructural se deberá tomar como **1,8 m**. Si se utilizan distintos materiales que no satisfacen los criterios granulométricos adyacentes unos a otros, se deberá utilizar un geotextil adecuado para evitar migraciones.

12.8.5.3. Requisitos de servicio

El ancho de la envolvente a cada lado de la estructura deberá ser adecuado para limitar la deformación horizontal por compresión a un **1 por ciento** del ancho de la estructura a cada lado de la misma.

La determinación de la deformación horizontal por compresión se deberá basar en la evaluación del ancho y la calidad del material de relleno estructural seleccionado, así como el terraplén in situ u otros materiales de relleno dentro de la zona, que se extiende a cada lado de la estructura una distancia igual a la altura de la estructura más la altura del recubrimiento como se indica en la Figura 12.8.5.3-1.

Las fuerzas que actúan radialmente fuera del arco de esquina de la estructura de radio pequeño, a una distancia d_1 de la estructura, se pueden tomar como:

$$P_1 = \frac{T}{R_c + d_1} \quad (12.8.5.3-1)$$

donde:

P_1 = presión horizontal de la estructura a una distancia d_1 , en kN/m².

d_1 = distancia a partir de la estructura, en m.

T = empuje total debido a la carga permanente y sobrecarga en la estructura (artículo 12.8.3.2), en kN/m.

R_c = radio de esquina de la estructura, en m.

El ancho requerido de la envolvente, adyacente al tubo, d , se puede tomar como:

$$d = \frac{T}{P_{Brg}} - R_c \quad (12.8.5.3-2)$$

donde:

d = ancho de envolvente requerido adyacente a la estructura, en m.

P_{Brg} = presión de contacto admisible para limitar la deformación por compresión en la pared de la zanja o terraplén, en kN/m².

Se deberá considerar que la envolvente de relleno estructural continúa por encima de la corona una distancia igual al menor valor entre los siguientes:

- El mínimo nivel de recubrimiento especificado para la estructura,
- La parte inferior del pavimento o capa de base granular cuando hay una capa base debajo del pavimento, o
- La parte inferior de cualquier losa de alivio o construcción similar, donde uno esté presente.

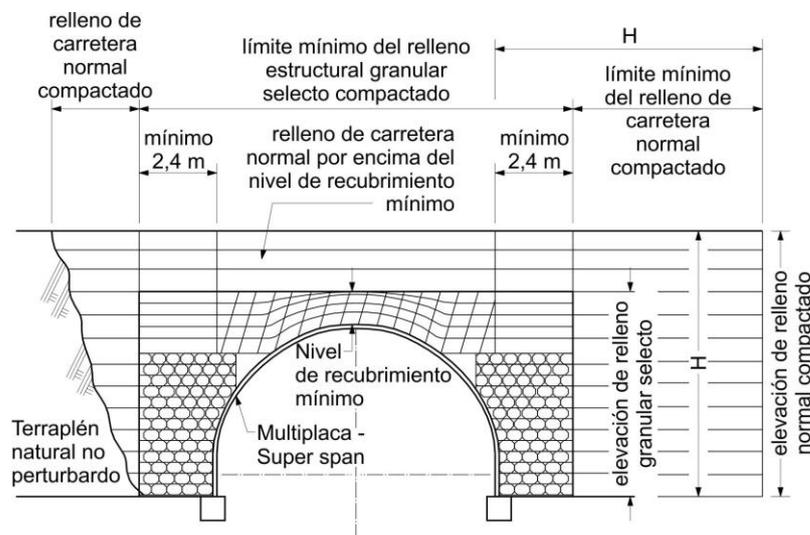


Figura 12.8.5.3-1. Típica envolvente de relleno estructural y zona de influencia de la estructura

12.8.6. Seguridad contra las fallas estructurales – Diseño del tratamiento de los extremos

12.8.6.1. Requisitos generales

La selección y el diseño del tratamiento de los extremos se deberán considerar como una parte integral del diseño estructural.

12.8.6.2. Tipos de extremos de camisa estándar

Se deberán considerar los tipos de extremos estándar, para las camisas construidas con chapas corrugadas, ilustrados en la Figura 12.8.6.2-1.

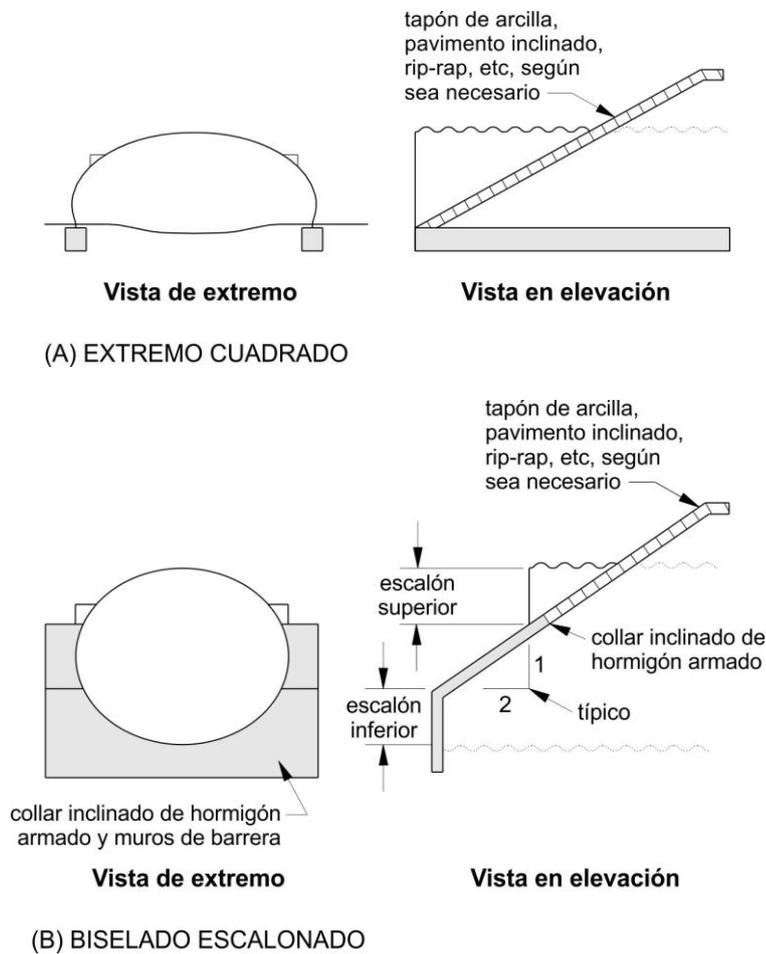
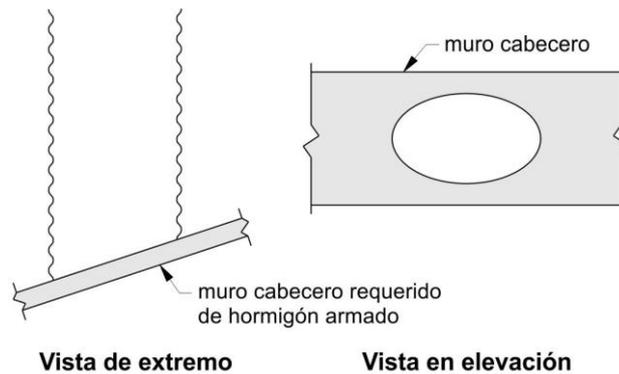


Figura 12.8.6.2-1. Tipos de extremos de estructura estándar



(C) EXTREMO DE CORTE OBLICUO
(Requiere un muro cabecero completo)

Figura 12.8.6.2-1 (cont.). Tipos de extremos de estructura estándar

En el caso de los extremos biselados escalonados se deberán aplicar las siguientes consideraciones:

- La altura del escalón superior deberá ser mayor o igual que la altura del arco superior, es decir, las chapas del arco superior permanecen sin cortar.
- En las estructuras con soleras, el escalón inferior deberá satisfacer los requisitos correspondientes a un escalón superior.
- Para los arcos, el escalón inferior deberá tener como mínimo una altura de **0,15 m**.
- La pendiente de las chapas cortadas generalmente no debe ser menor que **3:1**.
- El borde superior de las chapas cortadas deberá estar abulonado y soportado por un collar inclinado de hormigón estructural, pavimento inclinado, u otro dispositivo similar.

Los extremos totalmente biselados sólo se deberán utilizar en diseños especiales. Las estructuras con solera completa deberán tener un escalón inferior que satisfaga los requisitos especificados para los extremos biselados escalonados.

El borde cortado a bisel de todas las chapas deberá ser soportado por un collar inclinado de hormigón rígido adecuado.

Los extremos cortados en forma oblicua deberán estar totalmente conectados y soportados por un muro cabecero de hormigón armado u otra construcción rígida. El muro cabecero se deberá prolongar una distancia adecuada por encima de la corona de la estructura de manera que sea capaz de reaccionar contra las fuerzas debidas al empuje de compresión anular de las chapas cortadas. Además de los empujes activos del suelo y las sobrecargas normales, el muro cabecero se deberá diseñar para reaccionar una componente de la presión radial ejercida por la estructura tal como se especifica en el artículo 12.8.5.

12.8.6.3. Apoyo equilibrado

Los diseños y detalles deben lograr que el apoyo que proporciona el suelo sea relativamente equilibrado de un lado al otro, perpendicularmente a través de la estructura. En lugar de un diseño especial, las pendientes que corren perpendicularmente a través de la estructura no deberán ser mayores que **10 por ciento** si el recubrimiento tiene **3,0 m** de altura o menos, ni mayores que **15 por ciento** para recubrimientos mayores.

Si una estructura es oblicua respecto de un terraplén, el relleno se deberá detallar de manera que sea combado para poder mantener el apoyo equilibrado y para proveer un ancho de relleno y un suelo del terraplén adecuado para soportar los extremos.

12.8.6.4. Protección hidráulica

12.8.6.4.1. Requisitos generales

En las aplicaciones hidráulicas, se deben implementar medidas para proteger la estructura, incluyendo la camisa, las zapatas, la envolvente de relleno estructural, y demás materiales de relleno dentro de la zona afectada por la estructura.

12.8.6.4.2. Protección del relleno

Al diseñar o seleccionar la granulometría del relleno se deberá considerar la pérdida de integridad del relleno debida a la tubificación. Si se utilizan materiales propensos a la tubificación, la estructura y los extremos de la envolvente de suelo de relleno se deberán sellar adecuadamente para controlar la migración y/o la infiltración de suelo.

12.8.6.4.3. Muros de barrera

Todas las estructuras hidráulicas con solera completa se deberán diseñar y detallar con muros de barrera aguas arriba y aguas abajo. Las chapas de las soleras se deberán abulonar a los muros de barrera utilizando bulones de **19 mm** con una separación máxima entre centros de **0,5 m**.

El muro de barrera se deberá prolongar hasta una profundidad adecuada para limitar la percolación hidráulica, controlar las fuerzas de levantamiento tal como se especifica en el artículo 12.8.6.4.4 y la socavación tal como se especifica en el artículo 12.8.6.4.5.

12.8.6.4.4. Subpresión hidráulica

La subpresión hidráulica se debe considerar para estructuras hidráulicas con solera completa donde el nivel del flujo de diseño en el tubo puede caer rápidamente. El diseño debe proveer medios para limitar el gradiente hidráulico resultante, con el nivel de agua más alto en el relleno que en el tubo, de manera tal que la solera no pandeé y la estructura no flote. El pandeo puede ser evaluado como se especifica en el artículo 12.7.2.4, con el tramo de la estructura tomado como dos veces el radio de la solera.

12.8.6.4.5. Socavación

El diseño de socavación deberá satisfacer los requisitos del artículo 12.6.5. Si se encuentran suelos erosionables, para satisfacer estos requisitos estará permitido utilizar medios convencionales de protección contra la socavación.

No se deben utilizar fundaciones profundas tales como pilotes o caissons, a menos que se realice un diseño especial que considere los asentamientos diferenciales y la incapacidad de los apoyos discontinuos para retener el relleno estructural en caso que se produzca socavación debajo del cabezal de los pilotes.

12.8.7. Losas de alivio de hormigón

En las estructuras de gran ancho se pueden utilizar losas de alivio de hormigón para reducir los momentos.

La longitud de la losa de alivio de hormigón deberá ser como mínimo **0,6 m** mayor que el ancho de la estructura. La losa de alivio se deberá extender en todo el ancho sujeto a cargas vehiculares, y su espesor se determinará de acuerdo con el artículo 12.9.4.6.

12.8.8. Construcción e instalación

El pliego de condiciones deberá exigir que la construcción e instalación se realicen conforme a la Sección 26 de la norma AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, hasta tanto se desarrolle un documento específico al respecto.

12.8.9. Estructuras de chapas estructurales con corrugado profundo

12.8.9.1. Requisitos generales

Las disposiciones de este Artículo se deben aplicar al diseño estructural de chapa estructural enterrada con corrugado profundo. Estas estructuras se diseñan como alcantarillas de gran ancho pero también deben cumplir las disposiciones para flexión y pandeo general. Estas estructuras se pueden fabricar de múltiples formas. Los criterios de flexibilidad y las características especiales no son aplicables a las estructuras con corrugado profundo. No se aplica el límite, de la relación altura-ancho, igual a **0,3** especificado en el artículo 12.7.1.

12.8.9.2. Ancho del relleno estructural

12.8.9.2.1. Estructuras con corrugado profundo, con relación entre el radio de la corona y el radio de la cartela ≤ 5

La zona del relleno estructural alrededor de las estructuras con corrugado profundo, con una relación entre el radio de la corona y el radio de la cartela ≤ 5 , se debe extender hasta por lo menos la altura mínima del recubrimiento por encima de la corona. En los lados de la estructura la extensión mínima del relleno estructural, desde la parte exterior de la línea de arranque de la estructura, debe cumplir uno de los siguientes puntos:

- Estructura construida en una zanja en la cual el suelo natural es por lo menos tan rígido como el suelo diseñado: **2,4 m** o
- Estructura construida en un terraplén o en una zanja en la cual el suelo natural es menos rígido que el suelo diseñado: **un tercio del tramo** de la estructura pero no menos que **3 m** ni más que **5 m**.

pero no menos que lo requerido por un análisis de interacción suelo-alcantarilla.

12.8.9.2.2. Estructuras con corrugado profundo, con relación entre el radio de la corona y el radio de la cartela > 5

La zona del relleno estructural alrededor de las estructuras con corrugado profundo, con una relación entre el radio de la corona y el radio de la cartela > 5 , se debe extender hasta por lo menos la altura mínima del recubrimiento por encima de la corona. En los lados de la estructura, la extensión mínima del relleno estructural debe cumplir con uno de los siguientes puntos:

- Para estructuras con tramos de hasta **7,8 m** y menos que **1,5 m** de recubrimiento: un mínimo de **1 m** más allá de la parte más ancha de la estructura, o
- Para estructuras con tramos de hasta **7,8 m** y mayor que **1,5 m** de recubrimiento y para estructuras con tramos mayores que **7,8 m** en toda la profundidad del relleno: un mínimo de **un quinto del tramo** de la estructura más allá de la parte más ancha de la estructura, pero no menos que **1,5 m** ni mayor que **5 m**.

pero no menos que lo requerido por un análisis de interacción suelo-alcantarilla.

12.8.9.3. Seguridad contra las fallas estructurales

Las estructuras con corrugado profundo se deben diseñar de acuerdo con las disposiciones de los artículos 12.8.1 a 12.8.8 excepto por las disposiciones modificadas o adicionadas del artículo 12.8.9.

12.8.9.3.1. Requisitos de la chapa estructural

Las chapas estructurales con corrugado profundo utilizadas para fabricar estructuras diseñadas bajo este capítulo, debe cumplir con los requisitos de AASHTO M 167/M 167, hasta tanto se desarrolle un documento específico al respecto.

Las secciones se pueden rigidizar. Si se proporciona rigidización por medio de nervaduras, las mismas deben estar abulonadas al corrugado de la chapa estructural antes de la colocación del relleno, utilizando una separación entre bulones menor o igual a **0,40 m**. Se deben aplicar las propiedades de la sección transversal de la Tabla A12-14.

12.8.9.3.2. Análisis estructural

Las estructuras diseñadas bajo las disposiciones de este artículo se deben analizar por medio de métodos aceptados de elementos finitos que consideren las propiedades de rigidez y resistencia tanto de la chapa estructural como del suelo. El análisis dará los empujes y momentos que deben utilizarse en el diseño. El análisis tiene que considerar todas las combinaciones aplicables de cargas de construcción, suelo, sobrecargas, y otras condiciones de cargas aplicables. El empuje en la línea de arranque, debido a la carga de suelo utilizado en el diseño por resistencia de la pared, pandeo, y resistencia de la costura, no debe ser menor que **1,3 veces** el empuje de la carga de suelo calculado de acuerdo con el artículo 12.7.2.2.

12.8.9.4. Profundidad mínima del relleno

Para estructuras de chapas estructurales con corrugado profundo, la profundidad mínima del recubrimiento (H_D) debe ser el menor entre **0,9 m** y los límites dados en la Tabla 12.8.3.1.1-1, para estructuras de gran ancho con chapa estructural basados en el radio

superior y el espesor de chapa. Para estructuras con corrugado profundo, con relación entre el radio de la corona y el radio de la cartela > 5 , el recubrimiento mínimo debe ser **0,45 m** para tramos $\leq 7,8 m$ y **0,6 m** para tramos $> 7,8 m$. El recubrimiento mínimo en todos los casos no debe ser menor que el requerido por un análisis de interacción suelo-alcantarilla.

12.8.9.5. Empuje y momento combinados

Los efectos combinados de momento y empuje en todas las etapas de construcción deben cumplir con el siguiente requisito:

$$\left(\frac{T_f}{R_t}\right)^2 + \left|\frac{M_u}{M_n}\right| \leq 1,00 \quad (12.8.9.5-1)$$

donde:

T_f = empuje mayorado.

R_t = resistencia minorada al empuje = $\phi_h F_y A$

M_u = momento aplicado mayorado.

M_n = resistencia minorada al momento = $\phi_h M_p$

M_p = capacidad de momento plástico de la sección.

12.8.9.6. Pandeo global

El empuje mayorado en la pared de la alcantarilla, en la condición final de instalación, no debe exceder la resistencia nominal de la capacidad de pandeo general de la alcantarilla, calculada como:

$$R_b = 1,2 \phi_b C_n (E_p I_p)^{\frac{1}{3}} (\phi_s M_s K_b)^{\frac{2}{3}} R_h \quad (12.8.9.6-1)$$

donde:

R_b = fuerza axial nominal en la pared de la alcantarilla que genera pandeo general.

ϕ_b = factor de resistencia para pandeo general.

C_n = factor de calibración escalar para tener en cuenta algunos efectos no lineales = **0,55**

E_p = módulo de elasticidad del material de la pared del tubo, en kN/m².

I_p = momento de inercia de la pared rigidizada de la alcantarilla por unidad de longitud, en m⁴/m.

ϕ_s = factor de resistencia para el suelo.

M_s = módulo de suelo restringido (Tabla 12.12.3.5-1), en kN/m².

$$K_b = (1 - 2\nu)/(1 - \nu^2)$$

ν = relación de Poisson del suelo.

R_h = factor de corrección para la geometría del relleno
= $11,4 / (11 + S/H)$

S = tramo de la alcantarilla

H = profundidad del relleno sobre la parte superior de la alcantarilla

12.8.9.7. Conexiones

La resistencia minorada al momento, de las conexiones longitudinales, debe ser por lo menos igual al momento aplicado mayorado pero no menor que el mayor valor entre:

- **75 por ciento** de la resistencia minorada al momento del miembro, o
- El promedio del momento aplicado mayorado y la resistencia minorada al momento del miembro.

La resistencia al momento de las conexiones se puede obtener de ensayos calificados o de normas publicadas.

12.9. ESTRUCTURAS TIPO CAJÓN CONSTRUIDAS CON CHAPAS ESTRUCTURALES

12.9.1. Requisitos generales

La aplicación del método de diseño, aquí especificado, se deberá limitar a recubrimientos cuyas profundidades estén comprendidas entre **0,40 y 1,5 m**.

Los requisitos del presente artículo se deberán aplicar al diseño de las estructuras tipo cajón construidas con chapas estructurales las cuales, en adelante, se denominarán "alcantarillas metálicas tipo cajón". Salvo las excepciones específicamente indicadas, los requisitos de los artículos 12.7 y 12.8 no se deberán aplicar al diseño de las alcantarillas metálicas tipo cajón.

Si para incrementar la resistencia a la flexión y la capacidad de momento de las chapas se utilizan nervios rigidizadores, los rigidizadores transversales deberán consistir de secciones de aluminio o acero estructural curvadas de manera que se adapten a las chapas estructurales. Los nervios se deberán abulonar a las chapas para desarrollar la resistencia plástica a flexión de la sección compuesta. La separación entre los nervios no deberá ser mayor que **0,6 m** sobre la corona ni mayor que **1,37 m** sobre la cartela. Los empalmes de los nervios deberán desarrollar la resistencia plástica a flexión requerida en la ubicación del empalme.

12.9.2. Cargas

Para las sobrecargas se deben aplicar los requisitos del artículo 3.6.1.

Se pueden considerar los pesos unitarios del suelo de relleno especificados en el artículo 12.9.4.2, excepto el valor de **18,85 kN/m³**.

12.9.3. Estado límite de servicio

Para el diseño de las alcantarillas tipo cajón no es necesario aplicar ningún criterio correspondiente al estado límite de servicio.

12.9.4. Seguridad contra las fallas estructurales

12.9.4.1. Requisitos generales

La resistencia de las alcantarillas tipo cajón corrugadas se deberá determinar en el estado límite de resistencia de acuerdo con los artículos 12.5.3, 12.5.4, y 12.5.5 y de acuerdo con los requisitos aquí especificados.

En la Figura 12.9.4.1-1 y la Tabla 12.9.4.1-1 se definen las secciones de las alcantarillas tipo cajón a las cuales se aplican estos artículos. Se debe aplicar la Tabla A12-10.

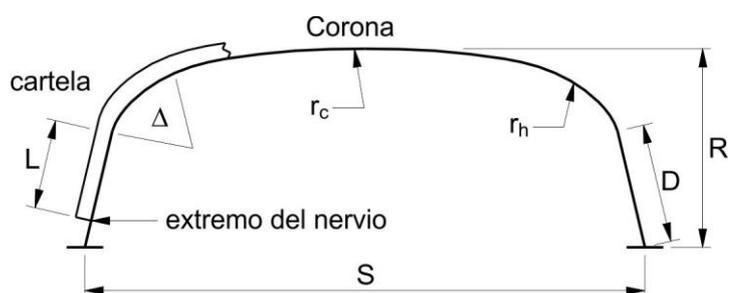


Figura 12.9.4.1-1. Geometría de las alcantarillas tipo cajón

Tabla 12.9.4.1-1. Requisitos geométricos para las alcantarillas tipo cajón con anchos desde 2,67 m a 7,75 m.

Ancho de la alcantarilla, S: 2,67 m a 7,75 m
Altura de la alcantarilla, R: 0,76 m a 3,20 m
Radio de la corona, $r_c \leq 7,56$ m
Radio de la cartela, $r_h \geq 0,76$ m
Ángulo incluido en el radio de cartela, $\Delta = 50^\circ$ a 70°
Longitud de la rama recta, D: medida hasta el fondo de la chapa, puede variar entre 0,12 m y 1,80 m
Mínima longitud del nervio sobre la rama recta, L: menor valor entre 0,48 m; ($D - 0,076$ m); o hasta 0,076 m de la parte superior de una zapata de hormigón.

Tabla 12.9.4.1-2. Requisitos geométricos para las alcantarillas tipo cajón con ancho desde 7,80 m a 11,00 m.

Ancho, S: 7,80 m a 11,00 m
Altura, R: 1,70 m a 4,30 m
Radio de la corona, $r_c \leq 8,0$ m
Radio de la cartela, $r_h \geq 1,1$ m
Ángulo incluido en el radio de cartela, $\Delta = 48^\circ$ a 68°
Longitud de la rama recta, D: medida hasta el fondo de la chapa, puede variar entre 0,12 m y 1,80 m
Mínima longitud del nervio sobre la rama recta, L: menor valor entre 0,71 m; (D - 0,076 m); o hasta 0,076 m de la parte superior de una zapata de hormigón.

La resistencia a flexión, de las estructuras tipo cajón construidas con chapas corrugadas, se debe determinar utilizando la tensión especificada de fluencia de las chapas corrugadas.

La resistencia a flexión, de las estructuras tipo cajón construidas con chapas de sección nervada, se debe determinar utilizando los valores de la tensión especificada de fluencia tanto de los nervios como de la camisa corrugada. Los valores calculados sólo se podrán utilizar para el diseño luego de ser confirmados por ensayos de flexión representativos. Los empalmes en los nervios deberán desarrollar la capacidad de momento plástico requerida en la ubicación del empalme.

12.9.4.2. Momentos debidos a las cargas mayoradas

Los momentos no mayorados en la corona y la cartela, debidos a la carga permanente y la sobrecarga, M_{de} y M_{ee} , se pueden tomar como:

Para tramos $\leq 7,8$ m:

$$M_{de} = \gamma_s \left[S^3 \left(0,0053 - \frac{(S - 3,66)}{1270} \right) + 0,053 (H - 0,43) S^2 \right] \quad (12.9.4.2-1)$$

Para tramos desde **7,8 m** hasta **11 m** con un perfil geométrico que cumple $r_c = 7,9$ m, $r_h = 1,14$ m y $\Delta = 49,16^\circ$:

$$M_{de} = \gamma_s \left\{ S^3 \left[0,00194 - \frac{(S - 7,93)}{464,52} (H - 0,34) \right] + (H - 0,43) \left[0,053 S^2 + 0,6 (S - 7,93)^2 \right] \right\} \quad (12.9.4.2-2)$$

$$M_{ee} = C_{ee} K_1 \frac{S}{K_2} \quad (12.9.4.2-3)$$

donde:

M_{de} = sumatoria de los momentos nominales, en la corona y cartela, debidos a las cargas permanentes, en kNm/m.

M_{ee} = sumatoria de los momentos nominales, en la corona y cartela, debidos a las sobrecargas, en kNm/m.

S = ancho de la alcantarilla tipo cajón, en m.

γ_s = peso unitario del suelo, en kN/m³.

H = altura de recubrimiento, desde la parte superior de la alcantarilla tipo cajón hasta la parte superior del pavimento, en m.

C_{ee} = sobrecarga ajustada
= $C_1 C_2 A_L$, en kN.

A_L = sumatoria de todas las cargas por eje de un grupo de ejes, en kN.

C_1 = **1,0** para ejes simples y **$0,5 + S/15 \leq 1,0$** para ejes de tándem

C_2 = factor de ajuste que considera el número de ruedas en un eje de diseño tal como se especifica en la Tabla 12.9.4.2-1

en el cual:

$$K_1 = \frac{0,08}{\left(\frac{H}{S}\right)^{0,2}} \quad \text{para } 2,4 \leq S < 6 \quad (12.9.4.2-4)$$

$$K_1 = \frac{0,08 - 0,0066 (S - 6)}{\left(\frac{H}{S}\right)^{0,2}} \quad \text{para } 6 \leq S \leq 8 \quad (12.9.4.2-5)$$

$$K_2 = 5,8 H^2 - 1,31 H + 5,05 \quad \text{para } 0,4 \leq H < 0,9 \quad (12.9.4.2-6)$$

$$K_2 = 6,24 H + 3 \quad \text{para } 0,9 \leq H \leq 1,5 \quad (12.9.4.2-7)$$

Tabla 12.9.4.2-1. Valores del coeficiente de ajuste (C_2) que considera el número de ruedas por eje

Número de ruedas por grupo de eje ideal	Profundidad del recubrimiento, en m.			
	0,4	0,6	0,9	1,5
2	1,18	1,21	1,24	1,02
4	1,00	1,00	1,00	1,00
8	0,63	0,70	0,82	0,93

A menos que se especifique lo contrario, se debe suponer que el camión de diseño especificado en el artículo 3.6.1.2.2 tiene cuatro ruedas en un eje. Se debe suponer que el tándem de diseño especificado en el artículo 3.6.1.2.3 consta de un grupo de ejes compuestos por dos ejes con cuatro ruedas cada uno.

Los momentos mayorados, $M_{d\ell u}$ y $M_{e\ell u}$ indicados en el artículo 12.9.4.3, se deben determinar tal como se especifica en la Tabla 3.4.1-1, excepto que el factor de sobrecarga utilizado para calcular $M_{e\ell u}$ deberá ser igual a **2,0**. Las reacciones mayoradas se deben determinar mayorando las reacciones especificadas en el artículo 12.9.4.5.

12.9.4.3. Capacidad de momento plástico

La resistencia de momento plástico de la corona, M_{pc} , y la resistencia de momento plástico de la cartela, M_{ph} , no deberán ser menores que la sumatoria proporcional de los momentos ajustados debidos a la carga permanente y la sobrecarga. Los valores de M_{pc} y M_{ph} se deberán determinar de la siguiente manera:

$$M_{pc} \geq C_H P_c (M_{d\ell u} + M_{e\ell u}) \quad (12.9.4.3-1)$$

$$M_{ph} \geq C_H (1,0 - P_c) (M_{d\ell u} + R_h M_{e\ell u}) \quad (12.9.4.3-2)$$

donde:

C_H = factor que considera el recubrimiento de suelo sobre la corona especificado en el artículo 12.9.4.4.

P_c = rango admisible de la proporción del momento total soportado por la corona, tal como se especifica en la Tabla 12.9.4.3-1

R_h = valores aceptables del factor de reducción de los momentos en la cartela, tal como se especifica en la Tabla 12.9.4.3-3

$M_{d\ell u}$ = momento mayorado debido a las cargas permanentes, tal como se especifica en el artículo 12.9.4.2, en kNm.

$M_{e\ell u}$ = momento mayorado debido a las sobrecargas, tal como se especifica en el artículo 12.9.4.2, en kNm.

Tabla 12.9.4.3-1. Valores de proporcionalidad del momento de la corona, P_c , para tramos $\leq 7,75$ m.

Ancho, en m.	Rango admisible de P_c
< 3	0,55 – 0,70
3 – 4,5	0,50 – 0,70
4,5 – 6	0,45 – 0,70
6 – 8	0,45 – 0,60

Tabla 12.9.4.3-2. Valores de posicionamiento del momento de la corona, P_c , para tramos desde 7,8 m hasta 11 m.

Profundidad del relleno, en m.	Rango admisible de P_c
0,4 – 0,76	0,55 – 0,65
0,76 – 1,2	0,45 – 0,55
1,2 – 1,5	0,35 – 0,55

Tabla 12.9.4.3-3. Valores del factor de reducción de los momentos en la cartela, R_h , para tramos $\leq 7,75$ m.

	Profundidad del recubrimiento, en m.			
	0,4	0,6	0,9	1,2 a 1,5
R_h	0,66	0,74	0,87	1,00

Para tramos desde **7,8 m** hasta **11 m**, $R_H = 1,0$ para todas las profundidades del recubrimiento.

12.9.4.4. Factor que considera el recubrimiento de suelo sobre la corona, C_H

Si la profundidad del recubrimiento de suelo es mayor o igual que **1,0 m**, el factor que considera el recubrimiento de suelo sobre la corona, C_H , se deberá tomar igual a **1,0**.

Si la profundidad del recubrimiento de suelo sobre la corona está comprendida entre **0,42** y **1,0 m**, el factor C_H se deberá tomar de la siguiente manera:

$$C_H = 1,15 - \left(\frac{H - 0,42}{4,2} \right) \quad (12.9.4.4-1)$$

donde:

H = profundidad de recubrimiento sobre la corona, en m.

12.9.4.5. Reacciones de las zapatas

Las reacciones de las zapatas de las alcantarillas tipo cajón se deberán determinar de la siguiente manera:

$$V = \gamma_s \left(\frac{H S}{2} + \frac{S^2}{40} \right) + \frac{A_L}{2,4 + 2(H + R)} \quad (12.9.4.5-1)$$

donde:

V = reacción no mayorada de la zapata, en kN/m.

γ_s = peso unitario del relleno, en kN/m³.

H = profundidad del recubrimiento sobre la corona, en m.

R = altura de la alcantarilla, en m.

S = tramo de la alcantarilla, en m.

A_L = carga total del eje, en kN.

12.9.4.6. Losas de alivio de hormigón

Para reducir los momentos flexores en las alcantarillas tipo cajón se pueden utilizar losas de alivio. Las losas de alivio no deberán estar en contacto con la corona, tal como se ilustra en la Figura 12.9.4.6-1.

La longitud de la losa de alivio de hormigón deberá ser como mínimo de **0,60 m** mayor que el tramo de la alcantarilla y suficiente para proyectarse **0,30 m** más allá de la cartela a cada lado de la alcantarilla. La losa de alivio se deberá extender en todo el ancho sujeto a la carga vehicular.

El espesor de las losas de alivio de hormigón armado se deberá determinar de la siguiente manera:

$$t = t_b R_{AL} R_c R_f \quad (12.9.4.6-1)$$

donde:

t = mínimo espesor de la losa, en m.

t_b = espesor básico de la losa, tal como se especifica en la Tabla 12.9.4.6-1, en m.

R_{AL} = factor de corrección que considera la carga por eje, especificado en la Tabla 12.9.4.6-2.

R_c = factor de corrección que considera la resistencia del hormigón, especificado en la Tabla 12.9.4.6-3.

R_f = factor que se adopta igual a **1,2** para estructuras tipo cajón cuyo tramo es menor que **8,0 m**.

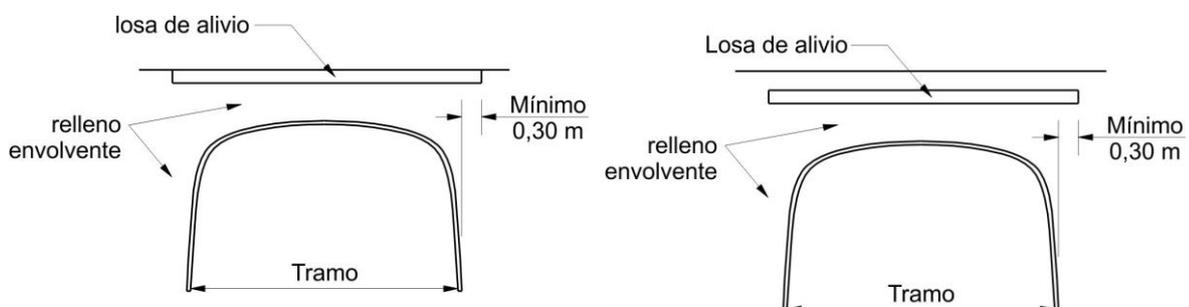


Figura 12.9.4.6-1. Alcantarillas metálicas tipo cajón con losa de alivio de hormigón.

Tabla 12.9.4.6-1. Espesor básico de la losa, t_b , en m, (Duncan et al., 1985).

Clasificación unificada de la sub base debajo de la losa	Compactación relativa – % del máximo peso unitario seco según ensayo estándar AASHTO		
	100	95	90
Espesor básico de la losa, en m			
GW, GP, SW, SP, o SM	0,19	0,20	0,22
SM-SC o SC	0,20	0,22	0,23
ML o CL	0,22	0,23	0,24

Tabla 12.9.4.6-2. Factor de corrección para considerar la carga por eje, R_{AL} (Duncan et al., 1985).

Carga por eje simple, en kN.	R_{AL}
45	0,60
90	0,80
135	0,97
145	1,00
178	1,05
200	1,10
220	1,15

Tabla 12.9.4.6-3. Factor de corrección para considerar la resistencia del hormigón, R_c (Duncan et al., 1985).

Resistencia a la compresión del hormigón, f'_c , en MPa.	R_c
20	1,19
25	1,15
28	1,10
30	1,05
35	1,01
38	0,97
40	0,94

12.9.5. Construcción e instalación

El pliego de especificaciones técnicas deberá exigir que la construcción e instalación se realicen conforme a la Sección 26 de la norma AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, "Alcantarillas Metálicas", hasta tanto se desarrolle un documento específico al respecto.

12.10. TUBOS DE HORMIGÓN ARMADO

12.10.1. Requisitos generales

Los presentes requisitos se deberán aplicar al diseño estructural de los tubos enterrados de hormigón armado prefabricado de sección circular, elíptica y en arco.

El diseño estructural, de los tipos de tubos indicados en el párrafo anterior, se puede realizar mediante uno de los dos métodos siguientes:

- El método de diseño directo en el estado límite de resistencia, como se especifica en el artículo 12.10.4.2, o
- El método de diseño indirecto en el estado límite de servicio, como se especifica en el artículo 12.10.4.3.

12.10.2. Cargas

12.10.2.1. Instalaciones estándar

El pliego de especificaciones técnicas debe especificar que el lecho de asiento y el relleno de la fundación deben satisfacer los requisitos del artículo 27.5.2 de la norma AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, hasta tanto se desarrolle un documento específico al respecto.

Los requisitos mínimos de compactación y espesor del lecho de asiento para las instalaciones estándares bajo terraplén y en zanja, deberán ser como se especifican en las Tablas 12.10.2.1-1 y 12.10.2.1-2, respectivamente.

Tabla 12.10.2.1-1. Suelos y requisitos mínimos de compactación para las instalaciones estándares bajo terraplén

Tipo de instalación	Espesor del lecho de asiento	Acostillado y lecho de asiento exterior	Lado inferior
Tipo 1	Para fundaciones en suelo utilizar como mínimo $B_c/2$ m, pero no menos que 0,075 m . Para fundaciones en roca utilizar como mínimo B_c m, pero no menos que 0,15 m .	SW 95%	SW 90%, ML 95%, o CL 100%
Tipo 2 – Instalaciones disponibles para tubos en forma de elipse horizontal, elipse vertical y arco cerrado	Para fundaciones en suelo utilizar como mínimo $B_c/2$ m, pero no menos que 0,075 m . Para fundaciones en roca utilizar como mínimo B_c m, pero no menos que 0,15 m .	SW 90% o ML 95%	SW 85%, ML 90%, o CL 95%
Tipo 3 – Instalaciones disponibles para tubos en forma de elipse horizontal, elipse vertical y arco cerrado	Para fundaciones en suelo utilizar como mínimo $B_c/2$ m, pero no menos que 0,075 m . Para fundaciones en roca utilizar como mínimo $B_c/2$ m, pero no menos que 0,15 m .	SW 85%, ML 90%, o CL 95%	SW 85%, ML 90%, o CL 95%
Tipo 4	Para fundaciones en suelo no se requiere lecho. Para fundaciones en roca utilizar como mínimo B_c m, pero no menos que 0,15 m .	No se requiere compactación, excepto si se trata de CL, utilizar CL 85%	No se requiere compactación, excepto si se trata de CL, utilizar CL 85%

Con relación a la Tabla 12.10.2.1-1 se aplican las siguientes interpretaciones:

- La simbología utilizada para la compactación y los suelos, por ejemplo "**SW 95%**", se interpreta de la siguiente manera: suelo tipo **SW** compactado hasta alcanzar, como mínimo, un grado de compactación igual al **95%** de la compactación Proctor Normal. Los valores Proctor modificados equivalentes serán como se indica en la Tabla 27.5.2.2-3 de la norma AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, hasta tanto se desarrolle un documento específico al respecto.
- El suelo en el lecho de asiento exterior, acostillado, y zonas del lado inferior, excepto a una distancia menor o igual que $B_c/3$ de la línea de arranque del tubo, se deberá compactar como mínimo hasta la misma compactación que la mayoría del suelo en la zona de relleno superior.
- El ancho mínimo de una sub-zanja deberá ser igual a $1,33 B_c$, o mayor si se necesita espacio para lograr la compactación especificada en las áreas del lecho de asiento y del acostillado.
- Para las sub-zanjas con paredes de suelo natural, cualquier parte de la zona lateral inferior de la pared de la sub-zanja deberá ser al menos tan firme como un suelo equivalente colocado respetando los requisitos de compactación especificados para la zona del lado inferior y tan firme como la mayoría de los suelos en la zona de relleno superior. En caso contrario, se lo deberá retirar y reemplazar por suelo compactado hasta el nivel especificado.

Tabla 12.10.2.1-2. Suelos y requisitos mínimos de compactación para las instalaciones estándares en zanja

Tipo de instalación	Espesor del lecho de asiento	Acostillado y lecho de asiento exterior	Lado inferior
Tipo 1	Para fundaciones en suelo utilizar como mínimo $B_c/2$ m, pero no menos que 0,075 m . Para fundaciones en roca utilizar como mínimo B_c m, pero no menos que 0,15 m .	SW 95%	SW 90%, ML 95%, o CL 100%, o suelos naturales de igual firmeza
Tipo 2 – Instalaciones disponibles para tubos en forma de elipse horizontal, elipse vertical y arco cerrado	Para fundaciones en suelo utilizar como mínimo $B_c/2$ m, pero no menos que 0,075 m . Para fundaciones en roca utilizar como mínimo B_c m, pero no menos que 0,15 m .	SW 90% o ML 95%	SW 85%, ML 90%, o CL 95%, o suelos naturales de igual firmeza
Tipo 3 – Instalaciones disponibles para tubos en forma de elipse horizontal, elipse vertical y arco cerrado	Para fundaciones en suelo utilizar como mínimo $B_c/4$ m, pero no menos que 0,075 m . Para fundaciones en roca utilizar como mínimo B_c m, pero no menos que 0,15 m .	SW 85%, ML 90%, o CL 95%	SW 85%, ML 90%, o CL 95%, o suelos naturales de igual firmeza
Tipo 4	Para fundaciones en suelo no se requiere lecho. Para fundaciones en roca utilizar como mínimo B_c m, pero no menos que 0,15 m .	No se requiere compactación, excepto si se trata de CL, utilizar CL 85%	SW 85%, ML 90%, o CL 95%, o suelos naturales de igual firmeza

En relación con la Tabla 12.10.2.1-2 se aplican las siguientes interpretaciones:

- La simbología utilizada para la compactación y los suelos, por ejemplo "**SW 95%**", se interpreta de la siguiente manera: suelo tipo **SW** compactado hasta alcanzar, como mínimo, un grado de compactación igual al **95%** de la compactación Proctor Normal. Los valores Proctor modificados equivalentes serán como se indica en la Tabla 27.5.2.2-3 de la norma AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, hasta tanto se desarrolle un documento específico al respecto.
- La parte superior de la zanja deberá estar a una profundidad menor o igual que **0,1H** por debajo de la superficie terminada; en el caso de las carreteras, la parte superior deberá estar a una profundidad mayor o igual que **0,3 m** por debajo de la parte inferior de la base del pavimento.
- El suelo, en las áreas del lecho de asiento y del acostillado, se deberá compactar como mínimo hasta la misma compactación que se especifica para la mayoría del suelo en la zona de relleno.
- Si es necesario que haya un espacio adecuado para lograr la compactación especificada en las áreas del lecho de asiento y del acostillado, el ancho de la zanja deberá ser mayor que el ilustrado en las Figuras 27.5.2.2-1 y 27.5.2.2-2 de la norma AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications.
- Si las paredes de la zanja forman un ángulo menor o igual que **10°** respecto a la vertical, no será necesario considerar la compactación o firmeza del suelo en las paredes de la zanja ni en la zona lateral inferior.
- Si las paredes de la zanja forman un ángulo mayor que **10°** respecto de la vertical y constan de un terraplén, el lado inferior se deberá compactar hasta alcanzar como mínimo la misma compactación especificada para el suelo en la zona de relleno.

La carga de suelo no mayorada, W_E , se deberá determinar de la siguiente manera:

$$W_E = F_e w B_c H \quad (12.10.2.1-1)$$

donde:

W_E = carga de suelo no mayorada, en kN/m.

F_e = factor de interacción suelo-estructura para el tipo de instalación especificada, de acuerdo con lo aquí definido.

B_c = dimensión horizontal exterior del tubo, en m.

H = altura del relleno sobre el tubo, en m.

w = peso unitario del suelo, en kN/m³.

El peso unitario del suelo utilizado para calcular la carga de suelo deberá ser el peso unitario estimado para los suelos especificados para el tipo de instalación del tubo, pero no deberá ser menor que **17,28 kN/m³**.

Las instalaciones estándares, tanto para bajo terraplén como en zanja, se deberán diseñar para proyección positiva, condiciones de carga bajo terraplén donde F_e se debe tomar como el factor de arqueamiento vertical, **VAF**, especificado en la Tabla 12.10.2.1-3 para cada tipo de instalación estándar.

Para las instalaciones estándar, la distribución del empuje de suelo deberá ser la distribución del empuje de Heger indicada en la Figura 12.10.2.1-1 y en la Tabla 12.10.2.1-3 para cada tipo de instalación estándar.

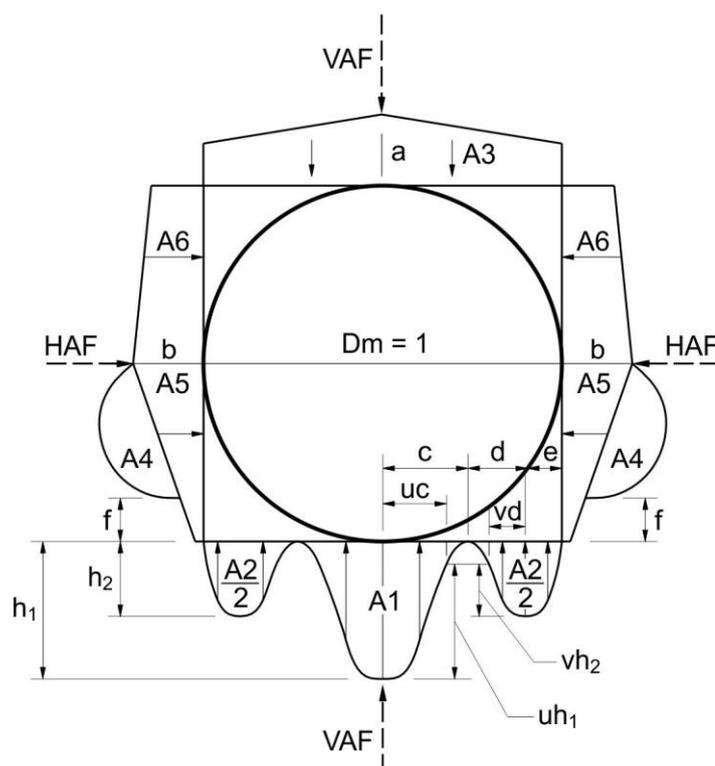


Figura 12.10.2.1-1. Distribución del empuje de Heger y factores de arqueamiento.

Tabla 12.10.2.1-3. Coeficientes a utilizar con la Figura 12.10.2.1-1.

	Tipo de instalación			
	1	2	3	4
VAF	1,35	1,40	1,40	1,45
HAF	0,45	0,40	0,37	0,30
A1	0,62	0,85	1,05	1,45
A2	0,73	0,55	0,35	0,00
A3	1,35	1,40	1,40	1,45
A4	0,19	0,15	0,10	0,00
A5	0,08	0,08	0,10	0,11
A6	0,18	0,17	0,17	0,19

Tabla 12.10.2.1-3 (Cont.). Coeficientes a utilizar con la Figura 12.10.2.1-1.

	Tipo de instalación			
	1	2	3	4
a	1,40	1,45	1,45	1,45
b	0,40	0,40	0,36	0,30
c	0,18	0,19	0,20	0,25
e	0,08	0,10	0,12	0,00
f	0,05	0,05	0,05	---
u	0,80	0,82	0,85	0,90
v	0,80	0,70	0,60	---

Con relación a la Tabla 12.10.2.1-3:

- **VAF** y **HAF** son factores de arqueamiento vertical y horizontal. Estos coeficientes representan las cargas verticales adimensionales totales y las cargas de suelo que actúan sobre el tubo, respectivamente. Las cargas reales totales, vertical y horizontal, son iguales a $(VA) \times (PL)$ y $(HAF) \times (PL)$, respectivamente, siendo **PL** el prisma de carga.
- Los coeficientes **A1** a **A6** representan la integración de los componentes adimensionales, verticales y horizontales, del empuje de suelo debajo de las porciones indicadas de los diagramas de empuje de los componentes, es decir, el área debajo de los diagramas de empuje de los componentes.
- Se supone que los empujes varían ya sea de forma parabólica como lineal, tal como se ilustra en la Figura 12.10.2.1-1, con las magnitudes adimensionales en los puntos determinantes representados por h_1 , h_2 , uh_1 , vh_2 , **a** y **b**.
- Las dimensiones adimensionales, horizontal y vertical, de las regiones de empuje de los componentes son definidas por los coeficientes **c**, **d**, **e**, **uc**, **vd**, y **f**.

donde:

$$d = (0,5 - c - e) \quad (12.10.2.1-2)$$

$$h_1 = (1,5 A1) / [c (1 + u)] \quad (12.10.2.1-3)$$

$$h_2 = (1,5 A2) / [d (1 + v) + 2 e] \quad (12.10.2.1-4)$$

12.10.2.2. Peso del fluido dentro del tubo

A menos que se especifique lo contrario, para el diseño, el peso no mayorado del fluido dentro del tubo, W_F , se deberá calcular con base en un peso de fluido igual a **1000 kg/m³**. En el caso de las instalaciones estándar, el peso del fluido deberá ser soportado por el empuje vertical del suelo el cual, se supone, tiene la misma distribución sobre la parte inferior del tubo tal como se ilustra en la Figura 12.10.2.1-1 para las cargas de suelo.

12.10.2.3. Sobrecargas

Las sobrecargas deben ser como se especifica en el artículo 3.6 y su distribución a través del recubrimiento de suelo deberá ser como se especifica en el artículo 3.6.1.2.6. Para las instalaciones estándar, se debe suponer que en la parte superior del tubo la sobrecarga tiene una distribución vertical uniforme y que en la parte inferior del tubo la sobrecarga tiene la misma distribución, tal como se ilustra en la Figura 12.10.2.1-1.

12.10.3. Estado límite de servicio

Se deberán analizar los anchos de fisuras en las paredes del tubo, en el estado límite de servicio, generados por el momento y el empuje. En general, el ancho de las fisuras no debe ser mayor que **0,25 mm**.

12.10.4. Seguridad contra las fallas estructurales

12.10.4.1. Requisitos generales

La resistencia de los tubos enterrados de hormigón armado contra las fallas estructurales se deberá determinar en el estado límite de resistencia para:

- Flexión,
- Empuje,
- Corte, y
- Tracción radial.

Las dimensiones de las secciones de los tubos se deberán determinar utilizando ya sea el método de diseño directo de base analítica o bien el método de diseño indirecto de base empírica.

Si en el pliego de especificaciones técnicas se especifica el empleo de jaulas por cuadrantes, estribos cerrados, y/o jaulas elípticas, se deberá especificar la orientación de la instalación del tubo; además, el diseño debe tener en cuenta la posibilidad de una falta de alineación de **10°** durante la instalación del tubo.

12.10.4.2. Método de diseño directo

12.10.4.2.1. Cargas y distribución del empuje

La carga vertical total que actúa sobre el tubo se deberá determinar tal como se especifica en el artículo 12.10.2.1.

La distribución del empuje sobre el tubo, debido a las cargas aplicadas y a la reacción del asiento, se deberá determinar ya sea mediante un análisis de interacción suelo-estructura o bien por una aproximación racional. Cualquiera de ambos métodos deberá permitir el desarrollo de un diagrama de empujes, como el esquematizado en la Figura 12.10.4.2.1-1, y el análisis del tubo.

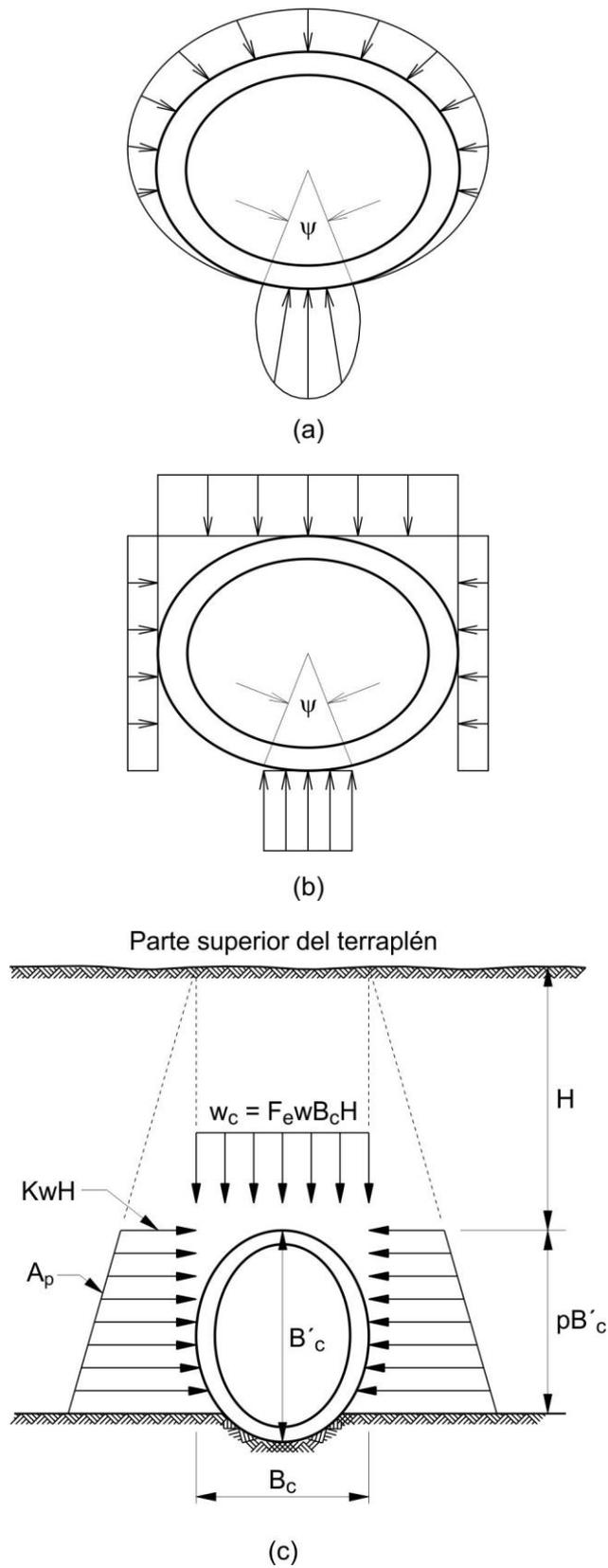


Figura 12.10.4.2.1-1. Distribución sugerida para el empuje de diseño alrededor de un tubo enterrado de hormigón para su análisis mediante el método de diseño directo.

12.10.4.2.2. Análisis de las solicitaciones con el anillo del tubo

Las solicitaciones en el tubo se deben determinar mediante un análisis elástico del anillo del tubo bajo la distribución del empuje supuesto o bien mediante un análisis de interacción suelo-estructura.

12.10.4.2.3. Factores que consideran el proceso y los materiales

Los factores que consideran el proceso y los materiales, F_{rp} para tracción radial y F_{vp} para resistencia al corte, para el diseño de tubos de hormigón armado fabricados en planta se deben tomar iguales a **1,0**. Se pueden utilizar valores mayores que **1,0** siempre y cuando su uso esté avalado por un número suficiente de ensayos de acuerdo con la norma AASHTO M 242M/M 242 (ASTM C655M y C655).

12.10.4.2.4. Resistencia a flexión en el estado límite de resistencia

12.10.4.2.4a. Armadura circunferencial

La armadura para resistencia a flexión proporcionado en una longitud, b , usualmente tomada igual a **1,0 m**, debe satisfacer:

$$A_s \geq \frac{g \ 1000 \ \phi \ d - N_u - \sqrt{g \ 1000 \ [g \ 1000 (\phi \ d)^2 - N_u (2 \ \phi \ d - h) - 2 \ M_u]}}{0,001 \ f_y} \quad (12.10.4.2.4a-1)$$

en el cual:

$$g = 0,85 \ b \ f'_c \quad (12.10.4.2.4a-2)$$

donde:

A_s = área de armadura por longitud de tubo, b , en mm²/m.

f_y = tensión de fluencia especificada de la armadura, en MPa.

d = distancia entre la cara comprimida y el baricentro de la armadura de tracción, en m.

h = espesor de la pared del tubo, en m.

M_u = momento debido a las cargas mayoradas, en kNm/m.

N_u = empuje debido a la carga mayorada, positivo si se trata de compresión, en kN/m.

ϕ = factor de resistencia para flexión especificado en el artículo 12.5.5.

12.10.4.2.4b. Armadura mínima

El área de armadura, A_s , en mm² por m de tubo, no debe ser menor que:

- Para la cara interna del tubo con dos capas de armaduras:

$$A_s \geq \frac{(S_i + h)^2 22620}{f_y} \geq 148 \quad (12.10.4.2.4b-1)$$

- Para la cara externa del tubo con dos capas de armaduras:

$$A_s \geq 0,60 \frac{(S_i + h)^2 22620}{f_y} \geq 148 \quad (12.10.4.2.4b-2)$$

- Para el caso de armaduras elípticas en tubos circulares y tubos de diámetro menor o igual que **0,84 m** con una única jaula de refuerzo en el tercio medio de la pared del tubo:

$$A_s \geq 2 \frac{(S_i + h)^2 22620}{f_y} \geq 148 \quad (12.10.4.2.4b-3)$$

donde:

S_i = diámetro interno o tramo horizontal del tubo, en m.

h = espesor de la pared del tubo, en m.

f_y = tensión de fluencia de la armadura, en MPa.

12.10.4.2.4c. Armadura máxima a flexión sin estribos

El área de armadura a flexión, en **mm²** por **m** de tubo, sin estribos deberá satisfacer:

- Para la armadura interna en tracción radial:

$$A_{s \text{ máx}} \leq \frac{110720 r_s F_{rp} \sqrt{f'_c} R_\phi F_{rt}}{f_y} \quad (12.10.4.2.4c-1)$$

donde:

r_s = radio de la armadura interna, en m.

f'_c = resistencia a la compresión del hormigón, en MPa.

f_y = tensión de fluencia especificada del acero de la armadura, en MPa.

R_ϕ = (ϕ_r / ϕ_t) ; relación entre los factores de resistencia para tracción radial y momento especificados en el artículo 12.5.5.

F_{rp} = **1,0** a menos que se utilice un factor más elevado que se justifique mediante datos de ensayos y aprobados por el Ingeniero.

en el cual:

- Para $0,30 \text{ m} \leq S_i \leq 1,80 \text{ m}$

$$F_{rt} = 1 + 0,333(1,80 - S_i)$$

- Para $1,80 \text{ m} < S_i \leq 3,60 \text{ m}$

$$F_{rt} = 0,80 + 0,0615 (3,60 - S_i)^2$$

- Para $S_i > 3,60 \text{ m}$

$$F_{rt} = 0,80$$

- Para armadura de acero en compresión:

$$A_{s \text{ máx}} \leq \frac{\left[\left(\frac{379212 g' \phi d}{600 + f_y} \right) - 0,75 N_u \right]}{0,001 f_y} \quad (12.10.4.2.4c-2)$$

en el cual:

$$g' = b f'_c [0,85 - 0,00725 (f'_c - 28)] \quad (12.10.4.2.4c-3)$$

$$0,85 b f'_c \geq g' \geq 0,65 b f'_c \quad (12.10.4.2.4c-2)$$

donde:

b = ancho de la sección tomado como $1,0 \text{ m}$.

ϕ = factor de resistencia para flexión tal como se especifica en el artículo 5.5.4.2.

12.10.4.2.4d. Armadura para controlar la fisuración

El factor de ancho de fisura, F_{cr} , se puede determinar de la siguiente manera:

- Si N_s es de compresión, se considera positiva y además:

$$F_{cr} = \frac{B_1}{0,207 \phi d A_s} \left[\frac{M_s + N_s \left(d - \frac{h}{2} \right)}{i j} - 82,97 C_1 b h^2 \sqrt{f'_c} \right] \quad (12.10.4.2.4d-1)$$

- Si N_s es de tracción, se considera negativa y además:

$$F_{cr} = \frac{B_1}{0,207 \phi d A_s} \left[1,1 M_s - 0,6 N_s d - 82,97 C_1 b h^2 \sqrt{f'_c} \right] \quad (12.10.4.2.4d-2)$$

en el cual:

$$j = 0,74 + 0,1 \frac{e}{d} \leq 0,9 \quad (12.10.4.2.4d-3)$$

$$i = \frac{1}{\left(1 - \frac{j d}{e}\right)} \quad (12.10.4.2.4d-4)$$

$$e = \frac{M_s}{N_s} + d - \frac{h}{2} \quad (12.10.4.2.4d-5)$$

$$B_1 = \left(\frac{775 t_b S_\ell}{n}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (12.10.4.2.4d-6)$$

donde:

M_s = momento flexor en el estado límite de servicio, en kNm/m.

N_s = empuje axial en el estado límite de servicio, en kN/m.

d = distancia entre la cara comprimida y el baricentro de la armadura de tracción, en m.

h = espesor de la pared, en m.

f_c = resistencia a la compresión especificada del hormigón, en MPa.

C_1 = coeficiente relacionado con el control de la fisuración que depende del tipo de armadura utilizada tal como se especifica en la Tabla 12.10.4.2.4d-1.

A_s = área de acero, en mm²/m.

b = ancho de la sección, tomado igual a **1 m**.

t_b = recubrimiento libre de hormigón sobre la armadura, en m.

S_ℓ = separación de la armadura circunferencial, en m.

n = **1,0** si la armadura de tracción se coloca en una sola capa.

n = **2,0** si la armadura de tracción se coloca en múltiples capas.

ϕ = factor de resistencia para flexión tal como se especifica en el artículo 12.5.5.

Tabla 12.10.4.2.4d-1. Coeficientes relacionados con el control de la fisuración.

Tipo	Refuerzo	C₁
1	Alambre liso o barras lisas	1,0
2	Malla soldada de alambres lisos con una separación máxima de 0,2 m entre alambres longitudinales, malla soldada de alambres conformados, malla de alambres conformados	1,5
3	Barras conformadas o cualquier armadura con estribos anclados a la misma	1,9

Para el refuerzo Tipo 2 de la Tabla 12.10.4.2.4d-1 para las cuales $t_b^2 S; 61024 / n > 3,0$, el factor de ancho de fisura, F_{cr} , también se deberá analizar utilizando los coeficientes B_1 y C_1 especificados para el refuerzo Tipo 3, utilizándose el mayor valor de F_{cr} .

Se pueden utilizar valores más elevados de C_1 siempre y cuando su uso esté avalado por datos de ensayos y sea aprobado por el Ingeniero.

12.10.4.2.4e. Mínimo recubrimiento de hormigón

Para el mínimo recubrimiento de hormigón, sobre las armaduras, se deberán aplicar los requisitos del artículo 5.12.3, con las siguientes excepciones:

- Si el espesor de la pared es menor que **0,065 m**, el recubrimiento no deberá ser menor que **19 mm**, y
- Si el espesor de la pared es mayor o igual que **0,065 m**, el recubrimiento no deberá ser menor que **25 mm**.

12.10.4.2.5. Resistencia al corte sin estribos

Se deberá analizar el corte en una sección crítica en donde $M_{nu} / (V_u \cdot d) = 3,0$. La resistencia al corte minorada sin estribos radiales, V_r , se deberá tomar como:

$$V_r = \phi V_n \quad (12.10.4.2.5-1)$$

en el cual:

$$V_n = 83 b d F_{vp} \sqrt{f'_c} (1,1 + 63 \rho) \left(\frac{F_d F_n}{F_c} \right) \quad (12.10.4.2.5-2)$$

$$\rho = \frac{A_s}{b d} \leq 0,02 \quad (12.10.4.2.5-3)$$

- Para tubos con dos o una única jaula elíptica:

$$F_d = 0,8 + \frac{0,04}{d} \leq 1,3 \quad (12.10.4.2.5-4)$$

- Para tubos cuyo diámetro es menor o igual que **0,90 m** y con una única jaula circular:

$$F_d = 0,8 + \frac{0,04}{d} \leq 1,4 \quad (12.10.4.2.5-5)$$

Si N_u es de compresión, se considera positiva y además:

$$F_n = 1 + \frac{N_u}{13790 h} \quad (12.10.4.2.5-6)$$

Si N_u es de tracción, se considera negativa y además:

$$F_n = 1 + \frac{N_u}{3447 h} \quad (12.10.4.2.5-7)$$

$$F_c = 1 \pm \frac{d}{2 r} \quad (12.10.4.2.5-8)$$

$$M_{nu} = M_u - N_u \left[\frac{4 h - d}{8} \right] \quad (12.10.4.2.5-9)$$

El signo algebraico de la Ecuación 12.10.4.2.5-8 se deberá tomar positivo si la tracción está del lado interno del tubo y negativo si la tracción está del lado externo del mismo.

donde:

$f'_{c \text{ máx}} = 48 \text{ MPa}$.

b = ancho de la sección de diseño tomado igual a **1 m**.

d = distancia entre la cara comprimida y el baricentro de la armadura de tracción, en m.

h = espesor de la pared, en m.

ϕ = factor de resistencia para corte tal como se especifica en el artículo 5.5.4.2.

r = radio hasta el eje de la pared del tubo de hormigón, en m.

N_u = empuje debido a las cargas mayoradas, en kN/m.

V_u = corte debido a las cargas mayoradas, en kN/m.

F_{vp} = factor que considera el proceso y los materiales, especificado en el artículo 12.10.4.2.3.

Si la resistencia al corte minorada, determinada como aquí se especifica, no es adecuada se deberán proveer estribos radiales de acuerdo con el artículo 12.10.4.2.6.

12.10.4.2.6. Resistencia al corte con estribos radiales

La armadura de estribos para tracción radial y corte no deberá ser menor que:

- Para tracción radial:

$$A_{vr} = \frac{1100 s_v (M_u - 0,45 N_u \phi_r d)}{f_y r_s \phi_r d} \quad (12.10.4.2.6-1)$$

$$s_v \leq 0,75 \phi_r d \quad (12.10.4.2.6-2)$$

- Para corte:

$$A_{vs} = \frac{1100 s_v (V_u F_c - V_c)}{f_y \phi_v d} + A_{vr} \quad (12.10.4.2.6-3)$$

$$s_v \leq 0,75 \phi_v d \quad (12.10.4.2.6-4)$$

en el cual:

$$V_c = \frac{4 V_r}{\frac{M_{nu}}{V_u d} + 1} \leq 166 \phi_v b d \sqrt{f'_c} \quad (12.10.4.2.6-5)$$

donde:

M_u = momento flexor debido a las cargas mayoradas, en kNm/m.

M_{nu} = momento mayorado que actúa en una sección transversal de ancho, b , modificado para considerar los efectos del empuje de compresión o tracción, en kNm/m.

N_u = empuje debido a las cargas mayoradas, en kN/m.

V_u = corte debido a las cargas mayoradas, en kN/m.

V_c = resistencia al corte de la sección de hormigón, en kN/m.

d = distancia entre la cara comprimida y el baricentro de la armadura de tracción, en m.

f_y = tensión de fluencia especificada para las armaduras; el valor de f_y se deberá tomar como el menor valor entre la tensión de fluencia del estribo y su capacidad de anclaje que desarrolla, en MPa.

r_s = radio de la armadura interior, en m.

s_v = separación de los estribos, en m.

V_r = resistencia al corte minorada de la sección de tubo sin estribos radiales por unidad de longitud del tubo, en kN/m.

A_{vr} = área de la armadura de estribos para resistir los esfuerzos de tracción radial en una sección transversal de ancho, b , en cada línea de estribos con una separación circunferencial igual a s_v , en mm^2/m .

A_{vs} = área de estribos requerida para armadura de corte, en mm^2/m .

f'_c = resistencia a la compresión del hormigón, en MPa.

ϕ_v = factor de resistencia para corte, tal como se especifica en el artículo 12.5.5.

ϕ_r = factor de resistencia para tracción radial, tal como se especifica en el artículo 12.5.5.

F_c = factor de curvatura, determinado mediante la Ecuación 12.10.4.2.5-8.

12.10.4.2.7. Anclaje de los estribos

12.10.4.2.7a. Anclaje de los estribos para tracción radial

Si se utilizan estribos para resistir tracción radial, éstos se deberán anclar alrededor de cada barra circunferencial de la jaula interna para desarrollar la resistencia del estribo, y también se deberán anclar alrededor de la jaula exterior o embeber del lado comprimido una longitud suficiente para que el estribo pueda desarrollar su resistencia requerida.

12.10.4.2.7b. Anclaje de los estribos para corte

Con las excepciones aquí especificadas, cuando no se requieren estribos para resistir tracción radial pero sí se requieren para resistir corte, su separación longitudinal deberá ser tal que puedan ser anclados alrededor de cada una de las barras circunferenciales para tracción o alrededor de barras alternadas circunferenciales para tracción. La separación de estos estribos no deberá ser mayor que **0,15 m**.

12.10.4.2.7c. Longitud embebida de los estribos

Los estribos que deben resistir esfuerzos en las regiones de la solera y la corona se deberán anclar en el lado opuesto de la pared del tubo lo suficiente para desarrollar la resistencia requerida del estribo.

12.10.4.3. Método de diseño indirecto

12.10.4.3.1. Capacidad de carga

Las cargas de suelo y sobrecargas que actúan sobre el tubo se deberán determinar de acuerdo con el artículo 12.10.2 y estos valores se deberán comparar con la D-load, es decir, la capacidad de carga del tubo obtenida a partir de ensayos de carga en tres apoyos. El estado límite de servicio se deberá aplicar utilizando el criterio del ancho de fisuración aceptable aquí especificado.

El D-load correspondiente a un determinado tamaño y clase de tubo se deberá determinar de acuerdo con la norma AASHTO M 242M/M 242 (ASTM C655M y C655).

La capacidad de carga de un tubo de hormigón armado obtenida a partir de ensayos de carga en tres bordes, la cual corresponde a una fisura de **0,254 mm** de ancho observada experimentalmente, no deberá ser menor que la carga de diseño determinada para el tubo instalado, la cual se toma de la siguiente manera:

$$D = \left(\frac{1}{S_i} \right) \left(\frac{W_E + W_F}{B_{FE}} + \frac{W_L}{B_{FLL}} \right) \quad (12.10.4.3.1-1)$$

donde:

B_{FE} = factor de asiento para la carga de suelo, especificado en los artículos 12.10.4.3.2a o 12.10.4.3.2b.

B_{FLL} = factor de asiento para la sobrecarga, especificado en el artículo 12.10.4.3.2c.

S_i = diámetro interno del tubo, en m.

W_E = carga de suelo total no mayorada, especificada en el artículo 12.10.2.1, en kN/m.

W_F = carga total no mayorada del fluido dentro del tubo, tal como se especifica en el artículo 12.10.2.2, en kN/m.

W_L = sobrecarga total no mayorada sobre un tubo de longitud unitaria, especificada en el artículo 12.10.2.3, en kN/m.

Para las instalaciones Tipo 1, las cargas **D**, calculadas como se describió anteriormente, se deberán modificar mediante la multiplicación de un factor de instalación igual a **1,10**.

12.10.4.3.2. Factor de asiento

El pliego de especificaciones técnicas deberá exigir los niveles mínimos de compactación especificados en las Tablas 12.10.2.1-1 y 12.10.2.1-2.

12.10.4.3.2a. Factor de asiento para la carga de suelo en tubos circulares

La Tabla 12.10.4.3.2a-1 presenta los factores de asiento para la carga de suelo, B_{FE} , en tubos circulares.

Para los tubos cuyos diámetros no están listados en la Tabla 12.10.4.3.2a-1, los factores de asiento para instalación bajo terraplén, B_{FE} , se pueden determinar por interpolación.

Tabla 12.10.4.3.2a-1. Factores de asiento para tubos circulares.

Diámetro del tubo, en m.	Instalación estándar			
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
0,30	4,4	3,2	2,5	1,7
0,60	4,2	3,0	2,4	1,7
0,90	4,0	2,9	2,3	1,7
1,80	3,8	2,8	2,2	1,7
3,60	3,6	2,8	2,2	1,7

12.10.4.3.2b. Factor de asiento para la carga de suelo en tubos elípticos y en arco

El factor de asiento para la instalación de tubos elípticos y en arco se deberá tomar de la siguiente manera:

$$B_{FE} = \frac{C_A}{C_N - x q} \quad (12.10.4.3.2b-1)$$

donde:

C_A = constante que depende de la geometría del tubo, tal como se especifica en la Tabla 12.10.4.3.2b-1.

C_N = parámetro que depende de la distribución de la carga vertical y la reacción vertical, tal como se especifica en la Tabla 12.10.4.3.2b-1.

x = parámetro que depende del área de la proyección vertical del tubo sobre la cual el empuje lateral es efectivo, tal como se especifica en la Tabla 12.10.4.3.2b-1.

q = relación entre el empuje lateral total y la carga vertical total del relleno aquí especificada.

La Tabla 12.10.4.3.2b-1 contiene los valores de diseño para C_A , C_N y x .

Tabla 12.10.4.3.2b-1. Valores de diseño de los parámetros que intervienen en la expresión para calcular el factor de asiento.

Geometría del tubo	C_A	Tipo de instalación	C_N	Relación de proyección, p	x
Elipse horizontal y arco	1,337	2	0,630	0,9	0,421
				0,7	0,369
		3	0,763	0,5	0,268
				0,3	0,148
Elipse vertical	1,021	2	0,516	0,9	0,718
				0,7	0,639
		3	0,615	0,5	0,457
				0,3	0,238

El valor del parámetro q se toma de la siguiente manera:

- Para tubos en forma de elipse horizontal y de arco:

$$q = 0,23 \frac{P}{F_e} \left(1 + 0,35 p \frac{B_c}{H} \right) \quad (12.10.4.3.2b-2)$$

- Para tubos en forma de elipse vertical:

$$q = 0,48 \frac{p}{F_e} \left(1 + 0,73 p \frac{B_c}{H} \right) \quad (12.10.4.3.2b-3)$$

donde:

p = relación de la proyección; relación de la distancia vertical entre la parte superior externa del tubo y el suelo de la superficie del lecho de asiento, para la altura vertical externa del tubo.

12.10.4.3.2c. Factores de asiento para la sobrecarga

En la Tabla 12.10.4.3.2c-1. se indican los factores de asiento para la sobrecarga, W_L , tanto para tubos circulares y en arco como para tubos elípticos. Si B_{FE} es menor que B_{FLL} , utilizar B_{FE} en lugar de B_{FLL} , como factor de asiento para la sobrecarga. El factor de asiento para tubos de diámetros no listados en la Tabla 12.10.4.3.2c-1, se puede obtener por interpolación.

Tabla 12.10.4.3.2c-1. Factores de asiento, B_{FLL} , para el camión aplicable.

Altura del relleno, en m.	Diámetro del tubo, en m.										
	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00	3,60
0,15	2,2	1,7	1,4	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
0,30	2,2	2,2	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1
0,45	2,2	2,2	2,1	1,8	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,1
0,60	2,2	2,2	2,2	2,0	1,8	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3
0,75	2,2	2,2	2,2	2,2	2,0	1,8	1,7	1,5	1,4	1,4	1,3
0,90	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	1,8	1,7	1,5	1,5	1,4
1,05	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	1,9	1,8	1,7	1,5	1,4
1,20	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	1,9	1,8	1,7	1,5
1,35	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
1,50	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,0	1,9	1,8
1,65	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,0	1,9
1,80	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	2,0
1,95	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2

12.10.4.4. Desarrollo del refuerzo de entramado del cuadrante

12.10.4.4.1. Armadura mínima de la jaula

En ausencia de un análisis detallado, cuando se utilizan refuerzos de entramado del cuadrante, el área de la jaula principal no deberá ser menor que el **25 por ciento** del área requerida en el punto de momento máximo.

12.10.4.4.2. Longitud de anclaje de las mallas soldadas de alambres

A menos que aquí se especifique lo contrario, se deben aplicar los requisitos del artículo 5.11.2.5.

12.10.4.4.3. Desarrollo del refuerzo de entramado del cuadrante constituido por mallas soldadas de alambres lisos

El empotramiento de la terminación de las barras longitudinales en cada extremo de las barras circunferenciales no deberá ser menor que:

- El mayor valor entre **12 diámetros** de la barra circunferencial y **tres cuartos** del espesor de la pared del tubo más allá del punto donde el refuerzo del cuadrante ya no es requerido por el ángulo de orientación, y
- Una distancia más allá del punto de máximo esfuerzo por flexión mediante el ángulo de orientación más la longitud de desarrollo, ℓ_d , siendo ℓ_d tal como se especifica en el artículo 5.11.2.5.2.

El entramado debe contener como mínimo dos barras longitudinales a una distancia de **25 mm**, mayor que la determinada por el ángulo de orientación, a cada lado del punto que requiere la máxima armadura por flexión.

El punto de empotramiento de la terminación de las barras longitudinales del entramado deberá estar como mínimo a una distancia determinada por el ángulo de orientación más allá del punto donde la armadura continua es mayor o igual que **dos veces** el área requerida para flexión.

12.10.4.4.4. Desarrollo del refuerzo de entramado del cuadrante constituido por barras conformadas, alambres conformados, o mallas soldadas de alambres conformados

Cuando se utilizan barras conformadas, alambres conformados, o mallas soldadas de alambres conformados, las barras circunferenciales en el refuerzo de entramado del cuadrante deberán satisfacer los siguientes requisitos:

- Las barras circunferenciales se deben prolongar más allá del punto donde ya no son requeridas por el ángulo de orientación más el mayor valor entre **12 diámetros** de la barra o alambre y **tres cuartos** del espesor de pared del tubo.
- Las barras circunferenciales se deben prolongar a cada lado del punto de máximo esfuerzo por flexión como mínimo el ángulo de orientación más la longitud de desarrollo, ℓ_{hd} , requerida por el artículo 5.11.2.5.1 y modificada por la aplicación del o de los factores de modificación aplicables, y
- Las barras circunferenciales se deben prolongar como mínimo una distancia determinada por el ángulo de orientación más allá del punto donde la armadura continua es mayor o igual que **dos veces** el área requerida para flexión

12.10.5. Construcción e instalación

El pliego de especificaciones técnicas deberá exigir que la construcción e instalación se realicen conforme a la Sección 27 de la norma AASHTO LRFD Bridge Construction

Specifications, "Alcantarillas de hormigón", hasta tanto se desarrolle un documento específico al respecto.

12.11. ALCANTARILLAS TIPO CAJÓN DE HORMIGÓN ARMADO COLADO IN SITU Y PREFABRICADO, Y ARCOS DE HORMIGÓN ARMADO COLADO IN SITU

12.11.1. Requisitos generales

Los presentes requisitos se deberán aplicar al diseño estructural de las alcantarillas tipo cajón de hormigón armado colado in situ y prefabricado, y a los arcos de hormigón armado colado in situ en los cuales la bóveda de cañón es monolítica con cada zapata.

A menos que se especifique lo contrario, los diseños se deberán realizar conforme a los artículos aplicables del presente Reglamento.

12.11.2. Distribución de cargas y sobrecargas

12.11.2.1. Requisitos generales

Se deben aplicar las cargas y combinaciones de cargas especificadas en la Tabla 3.4.1-1. Las sobrecargas se deben considerar tal como se especifica en el artículo 3.6.1.3. La distribución de las cargas de rueda y las cargas concentradas para las alcantarillas con menos de **0,60 m** de relleno se deben tomar como se especifica en el artículo 4.6.2.10. Para el tránsito que viaja paralelo al tramo, las alcantarillas tipo cajón se deben diseñar para un solo carril cargado con el factor de presencia múltiple de un solo carril aplicado a la carga. Los requisitos para la armadura de distribución, ubicada en la cara inferior de las losas superiores de estas alcantarillas, deberán ser tal como se especifica en el artículo 9.7.3.2 para armadura no pretensada y 5.14.4.1 para armadura pretensada.

La distribución de las cargas de rueda para las alcantarillas con **0,60 m** o más de recubrimiento deberá ser como se especifica en el artículo 3.6.1.2.6.

El incremento por carga dinámica para las estructuras enterradas deberá satisfacer el artículo 3.6.2.2.

Para las alcantarillas tipo cajón hormigonadas in situ, y para alcantarillas prefabricadas tipo cajón que tienen losas superiores con relaciones entre el tramo y el espesor (s/t) > 18 o longitudes del segmento $< 1,20 m$, se deben proporcionar vigas de borde tal como se especifica en el artículo 4.6.2.1.4, como sigue:

- En los extremos de la alcantarilla si las cargas de rueda se extienden dentro de los **0,60 m** desde el extremo de la alcantarilla,
- En las juntas de expansión, de la alcantarilla hormigonada in situ, si las cargas de rueda se extienden sobre o adyacente a la junta de expansión.

12.11.2.2. Modificación de las cargas de suelo para considerar la interacción suelo-estructura

12.11.2.2.1. Instalaciones en zanja y bajo terraplén

En ausencia de un análisis más refinado, la carga de suelo total no mayorada, W_E , que actúa en la alcantarilla se puede tomar de la siguiente manera:

- Para instalaciones bajo terraplén:

$$W_E = F_e \gamma_s B_c H \quad (12.11.2.2.1-1)$$

en el cual:

$$F_e = 1 + 0,20 \frac{H}{B_c} \quad (12.11.2.2.1-2)$$

- Para instalaciones en zanja:

$$W_E = F_t \gamma_s B_c H \quad (12.11.2.2.1-3)$$

en el cual:

$$F_t = \frac{C_d B_d^2}{H B_c} \leq F_e \quad (12.11.2.2.1-4)$$

donde:

W_E = carga de suelo total no mayorada, en kN/m.

B_c = ancho exterior de la alcantarilla tal como se especifica en las Figuras 12.11.2.2.1-1 o 12.11.2.2.1-2, según corresponda, en m.

H = profundidad del relleno tal como se especifica en las Figuras 12.11.2.2.1-1 o 12.11.2.2.1-2, en m.

F_e = factor de interacción suelo-estructura para instalaciones bajo terraplén.

F_t = factor de interacción suelo-estructura para instalaciones en zanja.

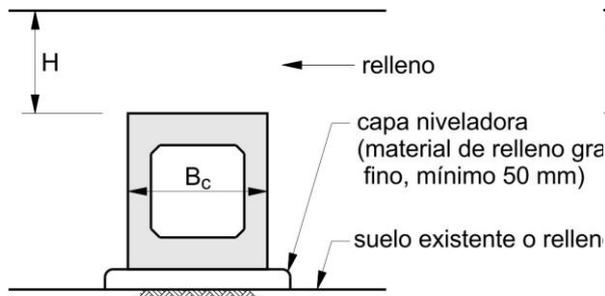
γ_s = peso unitario del relleno, en kN/m³.

B_d = ancho horizontal de la zanja tal como se especifica en la Figura 12.11.2.2.1-2, en m.

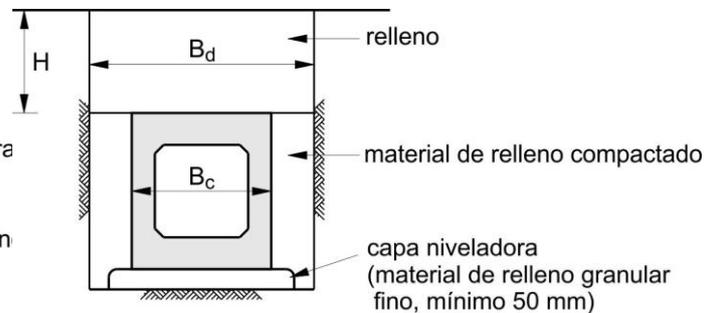
C_d = coeficiente especificado en la Figura 12.11.2.2.1-3.

F_e no deberá ser mayor que **1,15** para las instalaciones con relleno compactado a lo largo de los laterales de la sección tipo cajón, ni mayor que **1,40** para las instalaciones con relleno no compactado a lo largo de los laterales de la sección tipo cajón.

Para instalaciones de zanja ancha, donde el ancho de la zanja supera la dimensión horizontal de la alcantarilla, transversal a la zanja, en más de **0,30 m**, F_t no deberá ser mayor que el valor especificado para instalaciones bajo terraplén.



INSTALACIÓN BAJO TERRAPLÉN



INSTALACIÓN EN ZANJA

Figura 12.11.2.2.1-1.
Instalaciones bajo terraplén –
Secciones tipo cajón de
hormigón prefabricado

Figura 12.11.2.2.1-2.
Instalaciones en zanja –
Secciones tipo cajón de
hormigón prefabricado

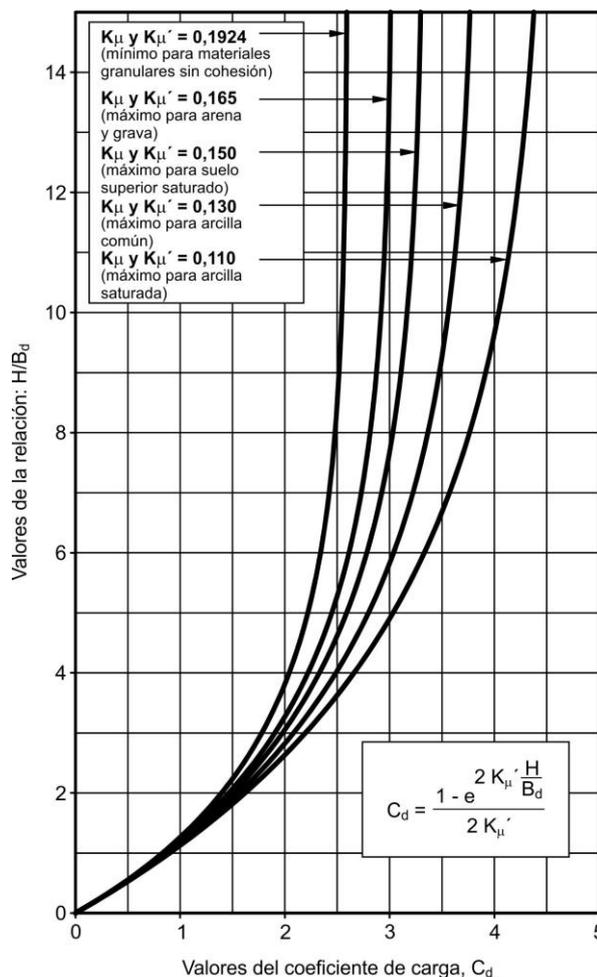


Figura 12.11.2.2.1-3. Coeficiente C_d para instalaciones en zanja

12.11.2.2.2. Otras instalaciones

Además de las instalaciones en zanja y bajo terraplén, se pueden utilizar otros métodos de instalación para reducir las cargas sobre la alcantarilla, incluyendo instalaciones con proyección positiva parcial, proyección nula, proyección negativa, en zanja inducida, y gateadas. Para estos tipos de instalaciones las cargas se pueden determinar mediante métodos aceptables basados en ensayos, análisis de interacción suelo-estructura, o experiencias previas.

12.11.2.3. Distribución de las cargas concentradas a la losa inferior de una alcantarilla tipo cajón

El ancho de la faja de losa superior utilizada para distribuir las cargas concentradas de rueda, especificado en el artículo 12.11.2, también se deberá utilizar para determinar los momentos, cortes, y empujes en las paredes laterales y en la losa inferior.

12.11.2.4. Distribución de las cargas concentradas en las alcantarillas tipo cajón oblicuas

No es necesario corregir la distribución de las cargas de rueda, como se especifica en el artículo 12.11.2.3, para considerar los efectos de la oblicuidad.

12.11.3. Estado límite de servicio

Para controlar el ancho de fisura en las alcantarillas tipo cajón de hormigón armado colado in situ y prefabricado, y en los arcos de hormigón armado colado in situ, se deberán aplicar los requisitos del artículo 5.7.3.4.

12.11.4. Seguridad contra las fallas estructurales

12.11.4.1. Requisitos generales

Salvo las modificaciones aquí especificadas, todas las secciones se deberán diseñar para las cargas mayoradas aplicables especificadas en la Tabla 3.4.1-1 en el estado límite de resistencia. El esfuerzo de corte en las alcantarillas se deberá analizar de acuerdo con el artículo 5.14.5.3.

12.11.4.2. Momento de diseño para las alcantarillas tipo cajón

Si se especifican cartelas monolíticas con una inclinación a **45°**, la armadura negativa en las paredes y en las losas se puede dimensionar con base en el momento flexor en la intersección de la cartela y el miembro de espesor uniforme. En caso contrario, se deberán aplicar los requisitos del Capítulo 5.

12.11.4.3. Armadura mínima

12.11.4.3.1. Estructuras hormigonadas in situ

En todas las secciones transversales sujetas a tracción generadas por la flexión, incluyendo la cara interna de las paredes, la armadura no deberá ser menor que la especificada en el artículo 5.7.3.3.2. Se debe proporcionar armadura de contracción y

temperatura, cerca de las superficies internas de las paredes y losas, de acuerdo con el artículo 5.10.8.

12.11.4.3.2. Estructuras tipo cajón prefabricadas

En todas las secciones transversales sujetas a tracción generadas por la flexión, la relación entre la armadura principal por flexión en la dirección del tramo de la estructura y el área bruta de hormigón no deberá ser menor que **0,002**. Esta armadura mínima se debe proporcionar en las caras interiores de las paredes y en cada dirección en la parte superior de las losas de las secciones tipo cajón que tienen menos de **0,60 m** de recubrimiento.

Los requisitos del artículo 5.10.8 no se aplicarán a las secciones tipo cajón de hormigón prefabricado que se fabrican en longitudes menores o iguales que **5,0 m**. Si la longitud de fabricación es mayor que **5,0 m**, la armadura longitudinal mínima para contracción y temperatura debe satisfacer el artículo 5.10.8.

12.11.4.4. Recubrimiento mínimo de hormigón sobre las armaduras para las estructuras tipo cajón prefabricadas

Salvo las modificaciones aquí especificadas, para las estructuras tipo cajón prefabricadas se deberán aplicar los requisitos del artículo 5.12.3.

Si la altura del relleno es **< 0,60 m**, el recubrimiento mínimo de hormigón sobre la armadura de la losa superior deberá ser de **50 mm**, cualquiera que sea el tipo de armadura.

Si se utiliza malla soldada de alambres, el recubrimiento mínimo de hormigón deberá ser igual al mayor valor entre **tres veces** el diámetro de los alambres y **25 mm**.

12.11.5. Construcción e instalación

El pliego de especificaciones técnicas deberá exigir que la construcción e instalación se realicen conforme a la Sección 27 de la norma AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, "Alcantarillas de hormigón", hasta tanto se desarrolle un documento específico al respecto.

12.12. TUBOS TERMOPLÁSTICOS

12.12.1. Requisitos generales

Los presentes requisitos se deberán aplicar al diseño estructural de los tubos termoplásticos enterrados de paredes macizas, corrugadas, o perfiladas, fabricados de **PE** o **PVC**.

12.12.2. Estado límite de servicio

12.12.2.1. Requisitos generales

La distorsión admisible máxima localizada de los tubos plásticos instalados se debe limitar con base en los requisitos de servicio y la estabilidad global de la instalación. La deformación de tracción en la fibra extrema no debe exceder la deformación admisible a largo plazo de la Tabla 12.12.3.3-1. La deformación neta de tracción será la diferencia

numérica entre la deformación de tracción por flexión y la deformación de compresión en el anillo.

12.12.2.2. Requerimientos de deflexión

La deflexión total, Δ_t , debe ser menor que la deflexión admisible, Δ_A , como sigue:

$$\Delta_t \leq \Delta_A \quad (12.12.2.2-1)$$

donde:

Δ_t = deflexión total del tubo expresada como una reducción del diámetro vertical tomada como positiva para la reducción del diámetro vertical y expansión del diámetro horizontal, en mm.

Δ_A = deflexión admisible total del tubo, reducción del diámetro vertical, en mm.

La deflexión total, calculada utilizando la expresión de Spangler para predecir la deflexión por flexión en combinación con la expresión para el acortamiento de la circunferencia, se debe determinar como:

$$\Delta_t = 1000 \left(\frac{K_B (D_L P_{sp} + C_L P_L) D_o}{1000 (E_p I_p / R^3 + 0,061 M_s)} + \varepsilon_{sc} D \right) \quad (12.12.2.2-2)$$

en la cual:

$$\varepsilon_{sc} = \frac{T_s}{1000 (A_{eff} E_p)} \quad (12.12.2.2-3)$$

$$T_s = P_s \left(\frac{D_o}{2} \right) \quad (12.12.2.2-4)$$

donde:

ε_{sc} = deformación de compresión en servicio debido al empuje, tal como se especifica en el artículo 12.12.3.10.1c y tomada como positivo para compresión.

T_s = empuje de servicio por unidad de longitud, en kN/m.

D_L = factor de arrastre por deflexión, un valor típico es **1,5**.

K_B = coeficiente para el asiento, un valor típico es **0,10**.

P_{sp} = presión del prisma de suelo (**EV**), evaluada en el eje del tubo, en kN/m².

C_L = coeficiente de distribución de la sobrecarga.

P_L = presión de diseño de la sobrecarga incluyendo el vehículo, el incremento por carga dinámica, y el efecto de presencia múltiple, en kN/m².

D_o = diámetro exterior del tubo, tal como se indica en la Figura C 12.12.2.2-1, en m.

E_P = módulo a corto o largo plazo del material del tubo, tal como se especifica en la Tabla 12.12.3.3-1, en MPa.

I_P = momento de inercia del perfil del tubo por unidad de longitud, en m^4/m .

R = radio al baricentro de la pared del tubo, tal como se indica en la Figura C 12.12.2.2-1, en m.

D = diámetro al baricentro de la pared del tubo, tal como se indica en la Figura C 12.12.2.2-1, en m.

M_s = módulo secante del suelo restringido, tal como se especifica en el artículo 12.12.3.5-1, en MPa.

P_s = carga de diseño en servicio, en kN/m^2 .

A_{eff} = área efectiva de la pared del tubo por unidad de longitud del tubo, tal como se especifica en el artículo 12.12.3.10.1b, en m^2/m .

12.12.3. Seguridad contra las fallas estructurales

12.12.3.1. Requisitos generales

Las alcantarillas termoplásticas enterradas se deben analizar en el estado límite de resistencia para empuje, pandeo general y local, y deformación combinada.

12.12.3.2. Propiedades de la sección

Las propiedades de la sección para tubos termoplásticos, incluyendo el área de la pared, el momento de inercia, y la geometría del perfil se deben determinar a partir de secciones cortadas del tubo u obtenidas del fabricante del mismo.

12.12.3.3. Requisitos químicos y mecánicos

Las propiedades mecánicas a utilizar en el diseño deberán ser como se especifica en la Tabla 12.12.3.3-1.

Excepto para el pandeo, la elección ya sea de los requisitos para las propiedades mecánicas iniciales o a largo plazo, según corresponda para cada aplicación en particular, deberá estar a cargo del Ingeniero. El análisis del pandeo general se deberá basar en el valor del módulo de elasticidad que represente la vida de diseño del proyecto.

Tabla 12.12.3.3-1. Propiedades mecánicas del tubo termoplástico.

Tipo de tubo	Mínima clase de celda	Límite de deformación de tracción en servicio a largo plazo ϵ_{yt} (%)	Límite de deformación de compresión mayorada ϵ_{yc} (%)	Inicial		50 años		75 años	
				F_u mín (MPa)	E mín (MPa)	F_u mín (MPa)	E mín (MPa)	F_u mín (MPa)	E mín (MPa)
Tubo de pared maciza de PE – ASTM F714	ASTM D3350, 335434C	5,0	4,1	20	760	10	152	9,6	145
Tubo corrugado de PE – AASHTO M 294	ASTM D3350, 435400C	5,0	4,1	20	760	6,2	152	6,2	145
Perfil del tubo de PE – ASTM F894	ASTM D3350, 334433C	5,0	4,1	20	550	7,7	138	7,6	131
	ASTM D3350, 335434C	5,0	4,1	20	760	10	152	9,6	145
Tubo de pared maciza de PVC – AASHTO M 278, ASTM F679	ASTM D1784, 12454C	5,0	2,6	45	2760	25,5	965	24,8	945
	ASTM D1784, 12364C	3,5	2,6	40	3035	18	1089	17,2	1075
Perfil del tubo de PVC – AASHTO M 304	ASTM D1784, 12454C	5,0	2,6	45	2760	25,5	965	24,8	945
	ASTM D1784, 12364C	3,5	2,6	40	3035	18	1089	17,2	1075

12.12.3.4. Empuje

Las cargas sobre tubos termoplásticos enterrados se deben basar en la carga de prisma de suelo, modificada como sea necesario para considerar los efectos de la interacción suelo-tubo. Los cálculos deben considerar la duración de la carga cuando se seleccionen las propiedades del tubo para utilizar en el diseño. No es necesario considerar las sobrecargas para la condición de largo plazo.

12.12.3.5. Cargas de servicio y mayoradas

La carga mayorada, P_u , en kN/m², se debe tomar como:

$$P_u = \eta_{EV} (\gamma_{EV} K_{\gamma E} K_2 VAF P_{sp} + \gamma_{WA} P_w) + \eta_{LL} \gamma_{LL} P_L C_L \quad (12.12.3.5-1)$$

La carga de servicio, P_s , en kN/m², se debe tomar como:

$$P_s = K_2 VAF P_{sp} + P_L C_L + P_w \quad (12.12.3.5-2)$$

en el cual:

$$VAF = 0,76 - 0,71 \left(\frac{S_H - 1,17}{S_H + 2,92} \right) \quad (12.12.3.5-3)$$

$$S_H = \frac{\phi_s M_s R}{E_p A_g} \quad (12.12.3.5-4)$$

$$C_L = \frac{L_w}{D_o} \leq 1,0 \quad (12.12.3.5-5)$$

$$L_w = L_0 + LLDF(H) \quad (12.12.3.5-6)$$

donde:

K_{yE} = factor de instalación, generalmente igual a **1,5**, para proporcionar seguridad tradicional. El uso de un valor menor de **1,5** requiere un monitoreo adicional de la instalación durante la construcción y se deben proporcionar disposiciones para dicho monitoreo en el pliego de especificaciones técnicas.

K_2 = coeficiente que tiene en cuenta la variación del empuje alrededor de la circunferencia;
= **1,0** para empuje en el eje del tubo,
= **0,6** para empuje en la corona.

VAF = factor de arqueamiento vertical.

S_H = factor de rigidez anular.

P_w = presión hidrostática en el eje del tubo, en kN/m².

C_L = coeficiente de distribución de la sobrecarga.

L_w = ancho de distribución de la sobrecarga en la dirección circunferencial a la altura de la corona, en m.

H = espesor del recubrimiento, en m.

η_{EV} = factor de modificación de la carga, especificado en el artículo 1.3.2, según se aplican a las cargas verticales de suelo sobre las alcantarillas.

γ_{EV} = factor de carga para la presión vertical debida a la carga permanente del relleno, tal como se especifica en el artículo 3.4.1.

P_{sp} = presión del prisma de suelo (**EV**), evaluado en el eje del tubo, en kN/m².

γ_{WA} = factor de carga para la presión hidrostática, tal como se especifica en el artículo 3.4.1.

η_{LL} = factor de modificación de la carga, especificado en el artículo 1.3.2, según se aplican a las sobrecargas sobre las alcantarillas.

γ_{LL} = factor de carga para la sobrecarga, tal como se especifica en el artículo 3.4.1.

P_L = presión debida a la sobrecarga (**LL**) con el incremento por carga dinámica, en kN/m^2 .

ϕ_s = factor de minoración de resistencia para la rigidez del suelo.

M_s = módulo secante del suelo restringido, especificado en la Tabla 12.12.3.5-1, en MPa.

R = radio al baricentro de la pared del tubo, en m.

E_p = módulo del material del tubo a corto o largo plazo, tal como se especifica en la Tabla 12.12.3.3-1, en MPa.

A_g = área bruta de la pared del tubo por unidad de longitud, en m^2/m .

D_o = diámetro exterior del tubo, en m.

W_o = ancho de la superficie del área de contacto con el terreno de la sobrecarga paralela al flujo en el tubo, tal como se especifica en el artículo 3.6.1.2.5, en m.

LLDF = factor para distribución de la sobrecarga a través del relleno de suelo del artículo 3.6.1.2.6.

En ausencia de datos específicos del predio, el módulo secante del suelo restringido, M_s , se puede seleccionar de la Tabla 12.12.3.5-1 con base en el tipo y densidad del relleno, y a la presión geostática del suelo, P_{sp} . Para determinar M_s se puede interpolar linealmente entre los diferentes niveles de tensión del suelo.

Para alcantarillas en terraplenes o en zanjas anchas bajo rellenos de hasta **3 m**, el tipo y la densidad del suelo seleccionados de la Tabla 12.12.3.5-1 deben ser representativos de las condiciones para un ancho igual a medio diámetro a cada lado de la alcantarilla, pero nunca menor que **0,45 m** a cada lado de la alcantarilla. Para alcantarillas bajo profundidades de relleno superiores a **3 m**, el tipo y la densidad del suelo seleccionados serán representativos de las condiciones para un ancho de un diámetro a cada lado de la alcantarilla.

El módulo confinado también se puede determinar experimentalmente utilizando la curva tensión-deformación que resulta de un ensayo uniaxial de deformación sobre una probeta de suelo compactado hasta la densidad especificada de campo. El módulo confinado es la pendiente de la secante desde el origen de la curva hasta un punto en la curva que corresponde a la presión del prisma de suelo, P_{sp} , Figura C 12.12.3.5-1.

Tabla 12.12.3.5-1. M_s en función del tipo de suelo y las condiciones de compactación.

Nivel de tensión P_{sp} (kN/m ²)	Sn-100 (MPa)	Sn-95 (MPa)	Sn-90 (MPa)	Sn-85 (MPa)
7	16,2	13,8	8,8	3,2
35	23,8	17,9	10,3	3,6
70	29,0	20,7	11,2	3,9
140	37,9	23,8	12,4	4,5
280	51,7	29,3	14,5	5,7
420	64,1	34,5	17,2	6,9

Nivel de tensión P_{sp} (kN/m ²)		Si-95 (MPa)	Si-90 (MPa)	Si-85 (MPa)
7		9,8	4,6	2,5
35		11,5	5,1	2,7
70		12,2	5,2	2,8
140		13,0	5,4	3,0
280		14,4	6,2	3,5
420				

Nivel de tensión P_{sp} (kN/m ²)		Cl-95 (MPa)	Cl-90 (MPa)	Cl-85 (MPa)
7		3,7	1,8	0,9
35		4,3	2,2	1,2
70		4,8	2,4	1,4
140		5,1	2,7	1,6
280		5,6	3,2	2,0
420		6,2	3,6	2,4

- Los tipos de suelo se designan mediante dos letras que indican la clasificación general del suelo, Sn para arenas y gravas, Si para limos y Cl para arcillas. En la Tabla 12.12.3.5-2. se listan los grupos de suelo comprendidos dentro de estas categorías, con base en las normas ASTM D2487 y AASHTO M 145.
- El sufijo numérico junto al tipo de suelo indica el nivel de compactación del suelo como porcentaje de la máxima densidad seca determinada de acuerdo con la norma AASHTO T 99.

Tabla 12.12.3.5-2. Equivalencia entre las clasificaciones de suelos ASTM y AASHTO.

Tipo básico de suelo (1)	ASTM D2487	AASHTO M 145
Sn (arena gravosa, SW)	SW, SP (2) GW, GP arenas y gravas con porcentaje de finos menor que 12%	A-1, A-3 (2)
Si (limo arenoso, ML)	GM, SM, ML también GC y SC con menos del 20% que pasa el tamiz N° 200	A-2-4, A-2-5, A-4
Cl (arcilla limosa, CL)	CL, MH, GC, SC también GC y SC con más del 20% que pasa el tamiz N° 200	A-2-6, A-2-7, A-5, A-6

- La clasificación del suelo indicada entre paréntesis es el tipo que se ensayó para desarrollar los valores del módulo de suelo restringido listados en la Tabla 12.12.3.5-1. Las correlaciones con otros tipos de suelos son aproximadas.
- Los materiales de granulometría uniforme con un tamaño de partícula promedio menor que el tamiz N° 40 no se deben utilizar como relleno para las alcantarillas termoplásticas a menos que estén específicamente permitidos en el pliego de especificaciones técnicas y que se tomen precauciones especiales para controlar el contenido de humedad y monitorear los niveles de compactación.

12.12.3.6. Requisitos para la manipulación e instalación

El factor de flexibilidad, **FF**, en m/kN, se deberá tomar como:

$$FF = \frac{S^2}{1000 E I} \quad (12.12.3.6-1)$$

donde:

I = momento de inercia, en m⁴/m.

E = módulo de elasticidad inicial, en MPa.

S = diámetro del tubo, en m.

El factor de flexibilidad, **FF**, se debe limitar tal como se especifica en el artículo 12.5.6.3.

12.12.3.7. Prisma de suelo

La carga del prisma de suelo se debe calcular como la presión que representa el peso del suelo por encima del eje del tubo. La presión se debe calcular para tres condiciones:

- Si el nivel freático está por encima de la parte superior del tubo y, en o por encima de la superficie del terreno:

$$P_{sp} = (H + 0,11 D_o) \gamma_b \quad (12.12.3.7-1)$$

- Si el nivel freático está por encima de la parte superior del tubo y por debajo de la superficie del terreno:

$$P_{sp} = \left[\left[\left(H_w - \frac{D_o}{2} \right) + 0,11 D_o \right] \gamma_b + \left[H - \left(H_w - \frac{D_o}{2} \right) \right] \gamma_s \right] \quad (12.12.3.7-2)$$

- Si el nivel freático está por debajo de la parte superior del tubo:

$$P_{sp} = (H + 0,11 D_o) \gamma_s \quad (12.12.3.7-3)$$

donde:

P_{sp} = presión del prisma de suelo (**EV**), evaluada en el eje del tubo, en kN/m².

D_o = diámetro exterior del tubo, en m.

γ_b = peso unitario del suelo flotante, en kN/m³.

H = altura del relleno por encima de la parte superior del tubo, en m.

H_w = altura del nivel freático por encima del eje del tubo, en m.

γ_s = peso unitario del suelo húmedo, en kN/m³.

12.12.3.8. Presión hidrostática

La presión debida al agua subterránea se debe calcular como:

$$P_w = \gamma_w K_{wa} H_w \quad (12.12.3.8-1)$$

donde:

P_w = presión hidrostática en el eje del tubo, en kN/m².

γ_w = peso unitario del agua, en kN/m³.

K_{wa} = factor por la incertidumbre en el nivel freático.

12.12.3.9. Sobrecarga

La sobrecarga se debe determinar como la presión aplicada en la corona del tubo. La magnitud de la sobrecarga se debe basar en la sobrecarga vehicular de diseño del artículo 3.6.1.2 y debe incluir los modificadores por presencia múltiple/sobrecarga, incremento por carga dinámica, y distribución a través de los suelos de recubrimiento.

La presión de sobrecarga, P_L , se debe calcular como:

$$P_L = \frac{P (1 + IM/100) m}{[L_0 + (H + K_1) LLDF][W_0 + (H + K_1) LLDF]} \quad (12.12.3.9-1)$$

donde:

P_L = sobrecarga de servicio sobre la alcantarilla, en kN/m².

P = carga de rueda de diseño, tal como se especifica en el artículo 3.6.1.2, en kN.

IM = incremento por carga dinámica, tal como se especifica en el artículo 3.6.2.2, en %.

m = factor de presencia múltiple, tal como se especifica en la Tabla 3.6.1.1.2-1.

L_0 = longitud del área de la superficie de contacto de la sobrecarga paralela al diámetro del tubo, tal como se especifica en el artículo 3.6.1.2.5, en m.

H = altura del relleno por encima de la parte superior del tubo, en m.

$LLDF$ = factor para distribución de la sobrecarga a través de los rellenos de tierra, tal como se especifica en el artículo 3.6.1.2.6.

W_0 = ancho del área de contacto de la sobrecarga sobre el terreno paralela al flujo en el tubo, tal como se especifica en el artículo 3.6.1.2.5, en m.

K_1 = coeficiente para considerar la ubicación de diseño, en m.
 = 0 para sobrecarga en la corona del tubo,
 = $D_o/2$ para sobrecarga en el eje.

12.12.3.10. Resistencia de la pared

12.12.3.10.1. Resistencia al empuje axial

12.12.3.10.1a. Requisitos generales

Los elementos del tubo de pared perfilada se deben diseñar para resistir el pandeo local. Para determinar la resistencia al pandeo local, la geometría del tubo de pared perfilada se debe idealizar tal como se especifica aquí y se debe determinar un área efectiva de acuerdo con las siguientes disposiciones.

12.12.3.10.1b. Área efectiva de pandeo local

Para la determinación de la resistencia al pandeo, el tubo de pared perfilada se debe idealizar como elementos rectos. A cada elemento se le debe asignar un ancho con base en la distancia libre entre los elementos adyacentes y un espesor con base en el espesor en el centro del elemento. La idealización de un perfil corrugado típico se debe basar en la aproximación de la Figura 12.12.3.10.1b-1.

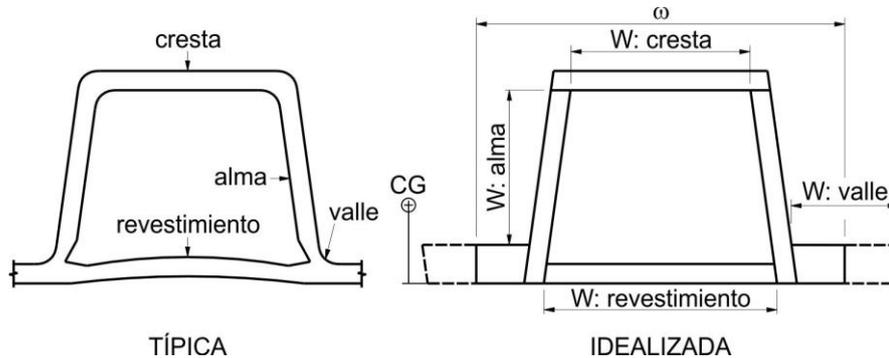


Figura 12.12.3.10.1b-1. Sección transversal típica e idealizada de la pared del perfil del tubo.

Para evaluar la resistencia al empuje axial, el área del perfil se debe reducir a un área efectiva, A_{eff} , para efectos de pandeo local. El área efectiva del perfil se debe determinar restando el área inefectiva de cada elemento del área de la sección bruta:

$$A_{eff} = A_g - \frac{\sum (w - b_e) t}{\omega} \quad (12.12.3.10.1b-1)$$

en el cual:

$$b_e = \rho w \quad (12.12.3.10.1b-2)$$

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0,22}{\lambda}\right)}{\lambda} \quad (12.12.3.10.1b-3)$$

$$\lambda = \left(\frac{w}{t}\right) \sqrt{\frac{\varepsilon_{yc}}{k}} \geq 0,673 \quad (12.12.3.10.1b-4)$$

donde:

A_{eff} = área efectiva de la pared del tubo por unidad de longitud del tubo, en m²/m.

b_e = ancho efectivo del elemento, en m.

ρ = factor del ancho efectivo.

λ = factor de esbeltez.

ω = separación del corrugado, tal como se especifica en la Figura 12.12.3.10.1b-1, en m.

ε_{yc} = deformación límite de compresión mayorada, tal como se especifica en la Tabla 12.12.3.3-1.

A_g = área bruta de la pared del tubo por unidad de longitud del tubo, en m²/m.

t = espesor del elemento, en m.

w = ancho libre total del elemento entre elementos de apoyo, en m.

k = coeficiente de pandeo de la chapa, **k = 4** para elementos apoyados, **k = 0,43** para elementos sin apoyo, tales como las nervaduras en voladizo.

Como alternativa para determinar el área efectiva por medio del procedimiento de cálculo presentado arriba, se pueden utilizar los resultados del ensayo corto de compresión, AASHTO T 341, en cuyo caso el área efectiva **A_{eff}** debe satisfacer:

$$A_{eff} = \frac{P_{st} K_t}{1000 F_u} \leq A_g \quad (12.12.3.10.1b-5)$$

en el cual:

P_{st} = capacidad a compresión de AASHTO T 341, en kN/m.

K_t = factor de tiempo, tal como se especifica en la Tabla 12.12.3.10.1b-1.

F_u = tensión de fluencia del material para la duración de la carga de diseño, en MPa.

Tabla 12.12.3.10.1b-1. Factor de tiempo.

Período de tiempo	PE	PVC
Inicial	0,90	0,95
50 años	0,30	0,60
75 años (estimado)	0,25	0,50

12.12.3.10.1c. Deformación de compresión

La deformación de compresión debida al empuje mayorado, ε_{uc} , y la deformación de compresión debida al empuje de servicio, ε_{sc} , se debe tomar como:

$$\varepsilon_{uc} = \frac{T_u}{1000 (A_{eff} E_p)} \quad (12.12.3.10.1c-1)$$

$$\varepsilon_{sc} = \frac{T_s}{1000 (A_{eff} E_p)} \quad (12.12.3.10.1c-2)$$

en el cual:

$$T_u = P_u \left(\frac{D_o}{2} \right) \quad (12.12.3.10.1c-3)$$

donde:

ε_{uc} = deformación de compresión debida al empuje mayorado.

ε_{sc} = deformación de compresión debida al empuje de servicio.

T_u = empuje mayorado por unidad de longitud, en kN/m.

T_s = empuje de servicio por unidad de longitud, en kN/m.

A_{eff} = área efectiva de la pared del tubo por unidad de longitud del tubo, en m²/m.

E_p = módulo de corto plazo para cargas de corto plazo o módulo de largo plazo del material del tubo para cargas de largo plazo, tal como se especifica en la Tabla 12.12.3.3-1, en MPa.

D_o = diámetro exterior del tubo, en m.

P_u = carga mayorada, tal como se especifica en la Ec. 12.12.3.5-1.

12.12.3.10.1d. Límites de deformación por empuje

La deformación de compresión debida al empuje mayorado, ε_{uc} , debe satisfacer:

$$\varepsilon_{uc} \leq \phi_T \varepsilon_{yc} \quad (12.12.3.10.1d-1)$$

donde:

ε_{uc} = deformación de compresión debida al empuje mayorado.

ϕ_T = factor de resistencia por efectos del empuje.

ε_{yc} = límite de deformación por compresión mayorada del material de la pared del tubo, tal como se especifica en la Tabla 12.12.3.3-1.

12.12.3.10.1e. Límites de deformación por pandeo general

La deformación de compresión debida al empuje mayorado, que incorpora los efectos del pandeo local, ε_{uc} , debe satisfacer:

$$\varepsilon_{uc} \leq \phi_{bck} \varepsilon_{bck} \quad (12.12.3.10.1e-1)$$

La capacidad nominal de deformación para pandeo general del tubo se debe determinar como:

$$\varepsilon_{bck} = \frac{1,2 C_n (E_p I_p)^{\frac{1}{3}}}{A_{eff} E_p} \left[\frac{\phi_s M_s (1 - 2 \nu)}{(1 - \nu)^2} \right]^{\frac{2}{3}} R_h \quad (12.12.3.10.1e-2)$$

en el cual:

$$R_h = \frac{11,4}{11 + \frac{D}{H}} \quad (12.12.3.10.1e-3)$$

donde:

ε_{uc} = deformación de compresión debida al empuje mayorado.

ϕ_{bck} = factor de resistencia para pandeo global.

ε_{bck} = capacidad de deformación nominal para pandeo general.

R_h = factor de corrección por la geometría del suelo de relleno.

C_n = factor de calibración para tener en cuenta los efectos no lineales = **0,55**

E_p = módulo de corto o largo plazo del material del tubo, tal como se especifica en la Tabla 12.12.3.3-1, en MPa.

I_p = momento de inercia del perfil del tubo por unidad de longitud, en m⁴/m.

A_{eff} = área efectiva del perfil del tubo por unidad de longitud, en m²/m.

ϕ_s = factor de resistencia por la presión del suelo.

M_s = módulo secante del suelo restringido, tal como se especifica en la Tabla 12.12.3.5-1, en MPa.

ν = relación de Poisson del suelo.

D = diámetro al baricentro de la pared del tubo, en m.

H = altura del relleno por encima de la parte superior del tubo, en m.

12.12.3.10.2. Límites de deformación por flexión y empuje

12.12.3.10.2a. Requisitos generales

Para asegurar la capacidad adecuada a flexión se tiene que evaluar la deformación combinada en las fibras extremas del perfil del tubo en los límites admisibles de la deflexión contra los valores limitantes de deformación.

12.12.3.10.2b. Deformación combinada

Si la suma de la deformación axial, ε_{uc} , y la deformación por flexión, ε_f , produce deformación de tracción en la pared del tubo, la deformación combinada en la fibra extrema donde la flexión genera tracción debe satisfacer:

$$\varepsilon_f - \varepsilon_{uc} < \phi_f \varepsilon_{yt} \quad (12.12.3.10.2b-1)$$

La deformación combinada en la fibra extrema donde la flexión genera compresión debe satisfacer:

$$\varepsilon_f + \varepsilon_{uc} < \phi_T 1,5 \varepsilon_{yc} \quad (12.12.3.10.2b-2)$$

donde:

ε_f = deformación debida a la flexión mayorada.

ε_{uc} = deformación de compresión debida al empuje mayorado.

ε_{yt} = límite de deformación de tracción en servicio a largo plazo del material de la pared del tubo, tal como se especifica en la Tabla 12.12.3.3-1.

ϕ_f = factor de resistencia para flexión.

ϕ_T = factor de resistencia para el empuje.

ε_{yc} = límite de deformación de compresión mayorada del material de la pared del tubo, tal como se especifica en la Tabla 12.12.3.3-1.

A falta de un análisis más detallado, la deformación por flexión se puede determinar con base en la relación empírica entre deformación y deflexión, como:

$$\varepsilon_f = \gamma_{EV} D_f \left(\frac{c}{R} \right) \left(\frac{\Delta_f}{D} \right) \quad (12.12.3.10.2b-3)$$

en el cual:

$$\Delta_f = \Delta_A - \varepsilon_{sc} D \quad (12.12.3.10.2b-4)$$

donde:

ε_f = deformación debida a flexión mayorada.

ε_{sc} = deformación de compresión debida al empuje en servicio.

Δ_f = reducción del diámetro vertical debido a la flexión, en m.

γ_{EV} = factor de carga para la presión vertical de la carga permanente del relleno, tal como se especifica en el artículo 3.4.1.

D_f = factor de forma, tal como se especifica en la Tabla 12.12.3.10.2b-1. Los factores de forma para el tubo corrugado de PE se pueden reducir por uno de los valores de la tabla para considerar el efecto de la baja relación de rigidez anular.

c = la mayor entre la distancia desde el eje neutro del perfil hasta la fibra extrema más interna o más externa, en m.

R = radio desde el centro del tubo al baricentro de la pared del tubo, en m.

D = diámetro al baricentro de la pared del tubo, en m.

Δ_A = deflexión admisible total del tubo, reducción del diámetro vertical, en m.

Tabla 12.12.3.10.2b-1. Factores de forma, D_f , en función de la rigidez del tubo, el material de relleno y el nivel de compactación.

Rigidez del tubo ($F/\Delta y$, MPa) = $E \cdot I / (0,149 \cdot R^3)$	Material en que está embebido el tubo y nivel de compactación			
	Grava (1)		Arena (2)	
	Sin compactar a levemente compactada (3)	Moderadamente compactada a muy compactada (4)	Sin compactar a levemente compactada (3)	Moderadamente compactada a muy compactada (4)
0,0621	5,5	7,0	6,0	8,0
0,1241	4,5	5,5	5,0	6,5
0,2482	3,8	4,5	4,0	5,5
0,4964	3,3	3,8	3,5	4,5

1 GW, GP, GW-GC, GW-GM, GP-GC y GP-GM de acuerdo con ASTM D 2487 (incluyendo roca triturada).

2 SW, SP, SM, SC, GM y GC o mezclas de las mismas de acuerdo con ASTM D 2487.

3 < 85% de la máxima densidad seca de acuerdo con AASHTO T 99; densidad relativa < 40% (ASTM D 4253 y D 4254).

4 ≥ 85% de la máxima densidad seca de acuerdo con AASHTO T 99; densidad relativa ≥ 40% (ASTM D 4253 y D 4254).

12.12.4. Construcción e instalación

El pliego de especificaciones técnicas deberá exigir que la construcción y la instalación se realicen conforme con la Sección 30 de la norma AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, "Alcantarillas termoplásticas", hasta tanto se desarrolle un documento específico al respecto.

12.13. CHAPAS DE ACERO UTILIZADAS COMO REVESTIMIENTO DE TÚNELES

12.13.1. Requisitos generales

Los requisitos del presente artículo se deberán aplicar al diseño estructural de las chapas de acero utilizadas como revestimiento de túneles. La construcción se deberá realizar conforme a la Sección 25 de la norma AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, "Revestimientos para túneles de acero y hormigón", hasta tanto se desarrolle un documento específico al respecto.

Las chapas de revestimiento pueden tener dos alas, completamente corrugadas con costuras longitudinales solapadas, o bien pueden tener cuatro alas, parcialmente corrugadas con costuras longitudinales con alas. Para ambos tipos se deberán abulonar entre sí de manera de formar anillos anulares.

12.13.2. Cargas

Los requisitos para cargas de suelo indicados en el artículo 3.11.5 no se deberán aplicar a los túneles.

12.13.2.1. Cargas de suelo

Se deberán aplicar los requisitos del artículo 12.4.1. Si no se utilizan métodos de análisis de suelos más refinados, el empuje del suelo se puede tomar como:

$$W_E = C_{dt} \gamma_s S \quad (12.13.2-1)$$

donde:

C_{dt} = coeficiente de carga para instalación de túnel especificado en la Figura 12.13.2.1-1.

γ_s = peso unitario total del suelo, en kN/m³.

W_E = empuje del suelo en la corona, en kN/m².

S = diámetro o tramo del túnel, en m.

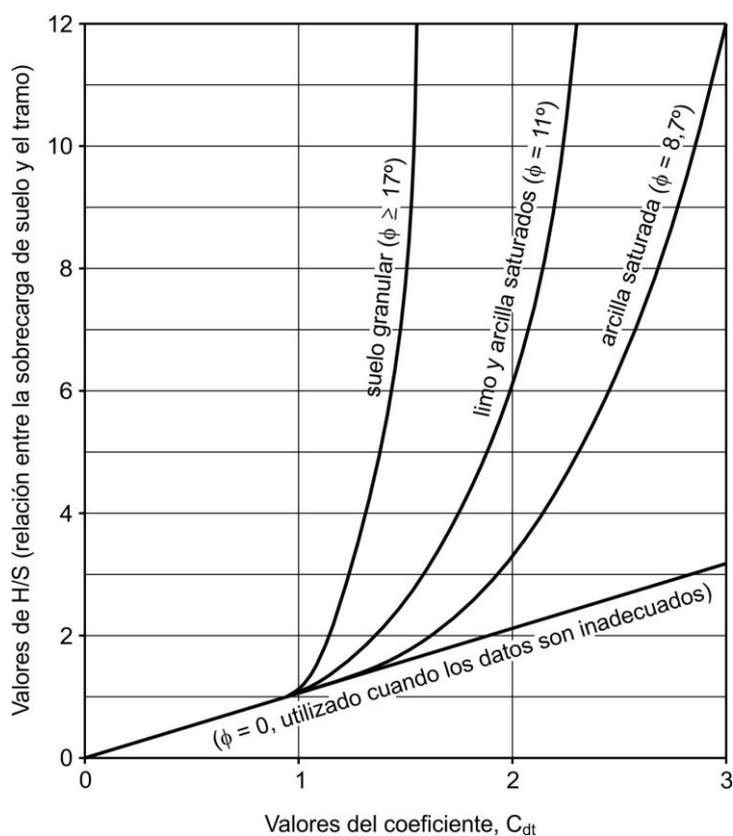


Figura 12.13.2.1-1. Diagrama para determinar el coeficiente C_{dt} para túneles en suelo.

en el cual:

H = altura de suelo sobre la parte superior del túnel, en m.

12.13.2.2. Sobrecargas

Se deberán aplicar los requisitos del artículo 12.6.1.

12.13.2.3. Presión de inyección

Si la presión de inyección del mortero o lechada de cemento es mayor que la carga de diseño calculada, la carga de diseño sobre el revestimiento del túnel, W_T , deberá ser igual a la presión de inyección.

12.13.3. Seguridad contra las fallas estructurales

12.13.3.1. Propiedades de la sección

Las chapas de acero para revestimiento de túneles deberán satisfacer los requisitos mínimos de la Tabla 12.13.3.1-1 para las propiedades de sección transversal, la Tabla 12.13.3.1-2 para la resistencia de costuras, y la Tabla 12.13.3.1-3 para las propiedades mecánicas.

12.13.3.2. Área de las paredes

Se deberán aplicar los requisitos de los artículos 12.7.2.2 y 12.7.2.3 utilizando el área efectiva de la Tabla 12.13.3.1-1.

12.13.3.3. Pandeo

Se deberán aplicar los requisitos del artículo 12.7.2.4, excepto que el factor de rigidez del suelo, k , puede variar entre **0,22** y **0,44** dependiendo de la calidad y extensión del material de empaque utilizado.

12.13.3.4. Resistencia de las costuras

Se deberán aplicar los requisitos del artículo 12.7.2.5.

12.13.3.5. Rigidez constructiva

La rigidez constructiva se deberá indicar mediante un factor de rigidez constructiva, C_s en kN/m, de la siguiente manera:

$$C_s = 1000 \frac{EI}{S^2} \quad (12.13.3.5-1)$$

donde:

S = diámetro o tramo, en m.

E = módulo de elasticidad, en MPa.

I = momento de inercia, en m⁴/m.

El valor de C_s obtenido de la Ecuación 12.13.3.5-1 no deberá ser menor que los valores indicados en el artículo 12.5.6.4 para chapas de acero para revestimiento de túneles.

Tabla 12.13.3.1-1. Propiedades de la sección transversal – Chapas de acero para revestimientos de túneles.

Chapas para revestimiento de túneles de 2 alas			
Espesor, en mm	Área efectiva, en m²/m	Momento de inercia, en m⁴/m	Radio de giro, en m
1,90	0,00244	5,572×E-07	0,0151
2,67	0,00343	8,030×E-07	0,0153
3,43	0,00442	10,488×E-07	0,0154
4,17	0,00541	12,946×E-07	0,0155
4,55	0,00592	14,257×E-07	0,0155
5,31	0,00691	16,879×E-07	0,0156
6,07	0,00792	19,337×E-07	0,0156

Tabla 12.13.3.1-1 (Cont.). Propiedades de la sección transversal – Chapas de acero para revestimientos de túneles.

Chapas para revestimiento de túneles de 4 alas				
Espesor, en mm	Área, en m²/m	Área efectiva, en m²/m	Momento de inercia, en m⁴/m	Radio de giro, en m
2,70	0,00338	0,00170	6,883xE-07	0,0142
3,04	0,00386	0,00193	8,030xE-07	0,0144
3,43	0,00432	0,00216	9,013xE-07	0,0144
4,17	0,00531	0,00267	11,471xE-07	0,0147
4,55	0,00577	0,00290	12,290xE-07	0,0141
5,31	0,00671	0,00335	14,257xE-07	0,0146
6,07	0,00762	0,00381	19,664xE-07	0,0161
6,35	0,00785	0,00394	16,551xE-07	0,0145
7,94	0,00980	0,00490	20,156xE-07	0,0143
9,52	0,01168	0,00584	23,434xE-07	0,0141

Tabla 12.13.3.1-2. Resistencia mínima de la costura longitudinal, con requisitos de bulones y tuercas, para revestimientos de túneles con chapas de acero.

Espesor de la chapa, en mm	Chapa de 2 alas			Chapa de 4 alas		
	Bulones en la costura longitudinal		Resistencia última de la costura, en kN/m	Bulones en la costura longitudinal		Resistencia última de la costura, en kN/m
	Diámetro, en mm	Material ASTM		Diámetro, en mm	Material ASTM	
1,90	15,90	A307	291,9	---	---	---
2,67	15,90	A307	437,8	12,70	A307	379,4
3,43	15,90	A307	685,9	12,70	A307	627,5
4,17	15,90	A307	802,7	12,70	A307	729,7
4,55	15,90	A307	904,8	15,88	A307	788,1
5,31	15,90	A449	1269,7	15,88	A307	977,8
6,07	15,90	A449	1342,6	15,88	A307	1182,1
7,95	15,90	---	---	15,88	A307	1678,3
9,52	15,90	---	---	15,88	A307	1736,7

Todas las tuercas deben satisfacer los requisitos de ASTM A 307, grado A o superior.

Los bulones en la costura circunferencial deben satisfacer los requisitos de ASTM A 307 o superior, cualquiera sea el espesor de la chapa.

Tabla 12.13.3.1-3. Propiedades mecánicas – Chapas de acero para revestimiento de túneles (Chapa antes del conformado en frío).

Resistencia mínima a la tracción	290 MPa
Tensión de fluencia mínima	193 MPa
Alargamiento, 51 mm	30%
Módulo de elasticidad	200000 MPa

12.14. ESTRUCTURAS DE TRES LADOS DE HORMIGÓN ARMADO PREFABRICADO

12.14.1. Requisitos generales

Los presentes requisitos se deben aplicar al diseño de las estructuras de hormigón armado prefabricado de tres lados apoyadas sobre zapatas de hormigón.

12.14.2. Materiales

12.14.2.1. Hormigón

El hormigón deberá satisfacer los requisitos del artículo 5.4.2, excepto que la evaluación de f'_c también se podrá basar en testigos.

12.14.2.2. Armadura

Las armaduras deberán satisfacer los requisitos del artículo 5.4.3, excepto que para las mallas soldadas de alambres se podrá utilizar una tensión de fluencia de **450 MPa**. La máxima separación de los alambres longitudinales de las mallas soldadas de alambres deberá ser de **0,20 m**. La separación de los alambres circunferenciales, de las mallas soldadas de alambres, no deberá ser mayor que **0,1 m** ni menor que **0,05 m**. Si se utiliza pretensado, el mismo deberá satisfacer los requisitos del artículo 5.9.

12.14.3. Recubrimiento de hormigón sobre el refuerzo

En las estructuras prefabricadas de tres lados, armadas con mallas soldadas de alambres, el recubrimiento mínimo de hormigón deberá ser igual a **tres veces** el diámetro de los alambres, pero nunca menor que **25 mm**, excepto para la armadura superior de la losa superior de la estructura sobre las cuales hay menos de **0,6 m** de relleno, en cuyo caso el recubrimiento mínimo deberá ser igual a **50 mm**.

12.14.4. Propiedades geométricas

Salvo las excepciones aquí indicadas, la geometría de las estructuras prefabricadas de tres lados puede variar en cuanto a su tramo, altura, espesor de pared, dimensiones de la cartela, y curvatura. El fabricante deberá indicar las propiedades geométricas específicas. Las paredes deberán tener como mínimo **0,20 m** de espesor, si el tramo es menor que **7,5 m**, y **0,25 m** para tramos mayores que **7,5 m**.

12.14.5. Diseño

12.14.5.1. Requisitos generales

Salvo las excepciones aquí indicadas, los diseños deberán satisfacer los artículos aplicables del presente Reglamento. El análisis se debe realizar considerando una conexión articulada en la zapata y deberá tener en cuenta los movimientos anticipados de la zapata.

12.14.5.2. Distribución de los efectos de la carga concentrada en la losa superior y en los laterales

La distribución de las cargas de rueda y de las cargas concentradas, en la losa superior y en los laterales de las estructuras de tres lados, se debe realizar tal como se especifica en el artículo 12.11.2.1.

12.14.5.3. Distribución de las cargas concentradas en las alcantarillas oblicuas

Las cargas de rueda que actúan sobre una alcantarilla oblicua se deben distribuir utilizando los mismos requisitos especificados para las alcantarillas con su armadura principal paralela a la dirección del tránsito. Para los elementos de la alcantarilla cuya oblicuidad es mayor que **15°**, se deberá considerar en el análisis el efecto de la oblicuidad.

12.14.5.4. Transferencia de corte en las juntas transversales entre secciones de una alcantarilla

Se deben aplicar las disposiciones del artículo 4.6.2.10.4.

Adicionalmente, con la excepción de lo aquí dispuesto, se debe proporcionar un medio de transferencia de corte entre unidades adyacentes en la losa superior de las estructuras con topes planos debajo de menos de **0,6 m** de relleno y sujetas a sobrecargas vehiculares. La transferencia de corte entre unidades adyacentes se puede considerar adecuada si el espesor de la losa superior es igual o mayor que:

- Para losas pretensadas:

$$S/28 \quad (12.14.5.4-1)$$

- Para losas no pretensadas:

$$(S + 3)/30 \quad (12.14.5.4-2)$$

donde:

S = tramo libre medida de forma paralela a la junta con la sección adyacente, en m.

12.14.5.5. Longitud del tramo

Si se especifican cartelas monolíticas con una inclinación de **45°**, la armadura negativa en las paredes y losas se puede dimensionar con base en el momento flexor en la intersección entre la cartela y el miembro de espesor uniforme.

12.14.5.6. Factores de resistencia

Se deben aplicar los requisitos de los artículos 5.5.4.2 y 1.3.1, según corresponda.

12.14.5.7. Control de la fisuración

Para estructuras enterradas se deben aplicar los requisitos del artículo 5.7.3.4.

12.14.5.8. Armadura mínima

Los requisitos del artículo 5.10.8 no se deben aplicar a las estructuras prefabricadas de tres lados.

La armadura principal de flexión en la dirección del tramo debe proporcionar una cuantía (relación entre el área de armadura y el área bruta de hormigón) como mínimo igual a **0,002**. Se debe proveer de esta armadura mínima en todas las secciones transversales sujetas a tracción por flexión, en la cara interna de las paredes, y en cada dirección de la parte superior de las losas de las secciones de tres lados con menos de **0,6 m** de relleno.

12.14.5.9. Control de las deflexiones en el estado límite de servicio

Los límites de deflexión especificados en el artículo 2.5.2.6.2 se deberán considerar obligatorios para estructuras de hormigón, y para el uso peatonal se limitará a las áreas urbanas.

12.14.5.10. Diseño de las zapatas

El diseño deberá considerar los movimientos diferenciales, horizontales y verticales, y las rotaciones de las zapatas. El diseño de las zapatas deberá satisfacer todos los artículos aplicables de los Capítulos 5 y 10.

12.14.5.11. Relleno estructural

Los requisitos especificados para el material de relleno deberán ser consistentes con las hipótesis utilizadas para el diseño. A fin de evitar el asentamiento de la calzada en la zona adyacente a la estructura, el pliego de especificaciones técnicas debe indicar que se logre como mínimo un grado de compactación del relleno igual al **90%** de densidad con Proctor normal. Para las estructuras que utilizan un sistema de interacción suelo-estructura puede ser necesario compactar el relleno hasta lograr una densidad mayor.

12.14.5.12. Protección contra la socavación y consideraciones hidrológicas e hidráulicas

Se deberán aplicar los requisitos del artículo 2.6, según corresponda.

APÉNDICE A12. PROPIEDADES DE CHAPAS, TUBOS, Y ARCOS CERRADOS

Tabla A12-1. Tubos de acero corrugado – Propiedades de la sección transversal.

Corrugado: 38,1 × 6,35 mm (1 ½ × ¼ in)			
Espesor [mm]	A × 10⁻⁴ [m²/m]	r × 10⁻³ [m]	I × 10⁻¹⁰ [m⁴/m]
0,71	6,43	---	---
0,86	8,04	---	---
1,02	9,65	2,07	41,459
1,32	12,87	2,09	56,372
1,63	16,11	2,11	71,939
2,01	20,11	2,15	92,915
2,77	28,17	2,23	140,437
3,51	36,24	2,33	197,464
4,27	44,41	2,46	267,928

Corrugado: 67,7 × 12,7 mm (2 ⅔ × ½ in)			
Espesor [mm]	A × 10⁻⁴ [m²/m]	r × 10⁻³ [m]	I × 10⁻¹⁰ [m⁴/m]
1,02	9,84	4,32	183,699
1,32	13,10	4,34	245,806
1,63	16,40	4,35	310,043
2,01	20,49	4,37	391,979
2,77	28,70	4,42	561,257
3,51	36,91	4,49	742,826
4,27	45,15	4,56	938,159

Corrugado: 76,2 × 25,4 mm (3 × 1 in)			
Espesor [mm]	A × 10⁻⁴ [m²/m]	r × 10⁻³ [m]	I × 10⁻¹⁰ [m⁴/m]
1,63	18,84	8,68	1418,956
2,01	23,56	8,70	1783,404
2,77	33,02	8,76	2533,276
3,51	42,50	8,82	3307,401
4,27	52,03	8,89	4111,678

Corrugado: 127 × 25,4 mm (5 × 1 in)			
Espesor [mm]	A × 10⁻⁴ [m²/m]	r × 10⁻³ [m]	I × 10⁻¹⁰ [m⁴/m]
1,63	16,81	9,29	1450,255
2,01	21,00	9,30	1817,653
2,77	29,42	9,34	2564,576
3,51	37,85	9,38	3329,360
4,27	46,27	9,43	4111,842

Tabla A12-2. Tubos de acero con nervios en espiral – Propiedades de la sección transversal.

Corrugado: 19,1 × 19,1 × 190,5 mm ($\frac{3}{4} \times \frac{3}{4} \times 7 \frac{1}{2}$ in)			
Espesor [mm]	A × 10⁻⁴ [m²/m]	r × 10⁻³ [m]	I × 10⁻¹⁰ [m⁴/m]
1,63	10,77	6,55	462,279
2,01	15,07	6,35	606,485
2,77	25,06	6,02	907,352
3,51	36,34	5,79	1218,050

Corrugado: 19,1 × 25,4 × 292,1 mm ($\frac{3}{4} \times 1 \times 11 \frac{1}{2}$ in)			
Espesor [mm]	A × 10⁻⁴ [m²/m]	r × 10⁻³ [m]	I × 10⁻¹⁰ [m⁴/m]
1,63	7,92	9,73	750,528
2,01	11,09	9,47	996,333
2,77	18,69	9,02	1517,442

Nota: Las propiedades de la sección efectiva se toman con la tensión de fluencia total.

Tabla A12-3. Chapa de acero estructural – Propiedades de la sección transversal.

Corrugado: 152,4 × 50,8 mm (6 × 2 in)			
Espesor [mm]	A × 10⁻⁴ [m²/m]	r × 10⁻³ [m]	I × 10⁻¹⁰ [m⁴/m]
2,79	32,94	17,32	9897,787
3,56	42,40	17,37	12814,684
4,32	51,84	17,42	15764,356
4,78	57,98	17,48	17698,029
5,54	67,71	17,53	20795,184
6,32	77,26	17,58	23957,888
7,11	87,19	17,65	27169,752
8,08	98,87	17,73	31135,422
9,65	118,81	17,88	38017,988

Tabla A12-4. Tubo de aluminio corrugado – Propiedades de la sección transversal.

Corrugado: 38,1 × 6,35 mm (1 $\frac{1}{2}$ × $\frac{1}{4}$ in)			
Espesor [mm]	A × 10⁻⁴ [m²/m]	r × 10⁻³ [m]	I × 10⁻¹⁰ [m⁴/m]
1,22	12,87	2,09	56,372
1,52	16,11	2,11	57,191

Corrugado: 67,7 × 12,7 mm (2 $\frac{2}{3}$ × $\frac{1}{2}$ in)			
Espesor [mm]	A × 10⁻⁴ [m²/m]	r × 10⁻³ [m]	I × 10⁻¹⁰ [m⁴/m]
1,52	16,40	4,35	310,043
1,90	20,49	4,37	391,979
2,67	28,70	4,42	561,257
3,43	36,94	4,49	742,826
4,17	45,08	4,56	938,159

Tabla A12-4 (Cont.). Tubo de aluminio corrugado – Propiedades de la sección transversal.

Corrugado: 76,2 × 25,4 mm (3 × 1 in)			
Espesor [mm]	$A \times 10^{-4}$ [m²/m]	$r \times 10^{-3}$ [m]	$I \times 10^{-10}$ [m⁴/m]
1,52	18,84	8,68	1418,956
1,90	23,66	8,70	1783,404
2,67	33,02	8,76	2533,276
3,43	44,20	8,82	3307,401
4,17	52,03	8,89	4111,678

Corrugado: 152,4 × 25,4 mm (6 × 1 in)			
Espesor efectivo [mm]	$A \times 10^{-4}$ [m²/m]	Área efectiva $\times 10^{-4}$ [m²/m]	$r \times 10^{-3}$ [m]
1,52	16,40	8,19	9,22
1,90	20,49	10,24	9,22
2,67	28,70	14,35	9,24
3,43	36,91	18,46	9,26
4,17	45,15	22,56	9,29

Tabla A12-5. Tubo de aluminio con nervadura en espiral – Propiedades de la sección transversal.

Corrugado: 19,1 × 19,1 × 190,5 mm ($\frac{3}{4} \times \frac{3}{4} \times 7 \frac{1}{2}$ in)			
Espesor [mm]	$A \times 10^{-4}$ [m²/m]	$r \times 10^{-3}$ [m]	$I \times 10^{-10}$ [m⁴/m]
1,52	8,78	6,91	419,181
1,90	12,04	6,78	552,572
2,67	19,35	6,55	831,316
3,43	27,31	6,40	1118,581

Corrugado: 19,1 × 25,4 × 292,1 mm ($\frac{3}{4} \times 1 \times 11 \frac{1}{2}$ in)			
Espesor [mm]	$A \times 10^{-4}$ [m²/m]	$r \times 10^{-3}$ [m]	$I \times 10^{-10}$ [m⁴/m]
1,52	6,60	10,06	668,592
1,90	9,04	9,93	893,095
2,67	14,75	9,65	1374,875
3,43	21,36	9,37	1881,235

Nota: Las propiedades de la sección efectiva se toman con la tensión de fluencia total.

Tabla A12-6. Chapa estructural o arco cerrado de aluminio corrugado – Propiedades de la sección transversal.

Corrugado: 228,6 × 63,5 mm (9 × 2 ½ in)			
Espesor [mm]	A × 10⁻⁴ [m²/m]	r × 10⁻³ [m]	I × 10⁻¹⁰ [m⁴/m]
2,54	29,72	21,43	13617,650
3,17	37,04	21,45	17042,547
3,81	44,45	21,46	20467,443
4,44	51,84	21,47	23908,726
5,08	59,25	21,49	27366,397
5,71	66,65	21,51	30840,454
6,35	74,10	21,52	34314,512

Tabla A12-7. Resistencia mínima de la costura longitudinal de tubos de aluminio y acero corrugados – Remachada o soldada por puntos.

Tubo de aluminio corrugado: 50,8 × 12,7 y 67,7 × 12,7 mm (2 × ½ y 2 ⅔ × ½ in)				
Espesor [mm]	Tamaño del remache		Remaches simples [kN/m]	Remaches dobles [kN/m]
	[mm]	[in]		
1,52	7,94	5/16	131,35	204,31
1,90	7,94	5/16	131,35	262,69
2,67	9,52	3/8	227,66	459,71
3,43	9,52	3/8	236,42	481,60
4,17	9,52	3/8	245,18	496,19

Tubo de aluminio corrugado: 76,2 × 25,4 (3 × 1 in)				
Espesor [mm]	Tamaño del remache		Remaches dobles [kN/m]	
	[mm]	[in]		
1,52	9,52	3/8	240,80	
1,90	9,52	3/8	299,18	
2,67	12,70	1/2	408,63	
3,43	12,70	1/2	612,94	
4,17	12,70	1/2	795,37	

Tubo de aluminio corrugado: 152,4 × 25,4 (6 × 1 in)				
Espesor [mm]	Tamaño del remache		Remaches dobles [kN/m]	
	[mm]	[in]		
1,52	12,70	1/2	233,50	
1,90	12,70	1/2	290,42	
2,67	12,70	1/2	407,17	
3,43	12,70	1/2	523,92	
4,17	12,70	1/2	634,83	

Tabla A12-7 (Cont.). Resistencia mínima de la costura longitudinal de tubos de aluminio y acero corrugados – Remachada o soldada por puntos.

Tubo de acero corrugado: 50,8 × 12,7 y 67,7 × 12,7 mm (2 × ½ y 2 ⅔ × ½ in)				
Espesor [mm]	Tamaño del remache		Remaches simples [kN/m]	Remaches dobles [kN/m]
	[mm]	[in]		
1,63	7,94	5/16	243,72	315,23
2,01	7,94	5/16	265,61	434,90
2,77	9,52	3/8	341,50	682,99
3,51	9,52	3/8	357,55	715,10
4,27	9,52	3/8	373,60	748,67

Tubo de acero corrugado: 76,2 × 25,4 (3 × 1 in)				
Espesor [mm]	Tamaño del remache		Remaches dobles [kN/m]	
	[mm]	[in]		
1,63	9,52	3/8	418,85	
2,01	9,52	3/8	521,00	
2,77	11,11	7/16	773,48	
3,51	11,11	7/16	929,63	
4,27	11,11	7/16	1031,79	

Tabla A12-8. Resistencias mínimas de la costura longitudinal de tubo de chapa estructural de acero y aluminio – Abulonada.

Tubo de chapa estructural de acero: 152,4 × 50,8 (6 × 2 in)					
Espesor del bulón [mm]	Diámetro del bulón		4 bulones / m [kN/m]	6 bulones / m [kN/m]	8 bulones / m [kN/m]
	[mm]	[in]			
2,77	19,05	3/4	627,54	---	---
3,51	19,05	3/4	904,82	---	---
4,27	19,05	3/4	1182,11	---	---
4,78	19,05	3/4	1357,23	---	---
5,54	19,05	3/4	1634,52	---	---
6,32	19,05	3/4	1926,40	---	---
7,11	19,05	3/4	2101,52	2626,90	2831,22
8,08	22,22	7/8	---	---	3429,57
9,65	22,22	7/8	---	---	4159,26

Tubo de chapa estructural de aluminio: 228,6 × 63,5 (9 × 2 ½ in)				
Espesor [mm]	Diámetro del bulón		Bulones de acero	Bulones de aluminio
	[mm]	[in]	5,5 bulones / m [kN/m]	5,5 bulones / m [kN/m]
2,54	19,05	3/4	408,63	385,28
3,17	19,05	3/4	598,35	507,87
3,81	19,05	3/4	745,75	647,97
4,44	19,05	3/4	929,63	770,56
5,08	19,05	3/4	1071,19	770,56
5,71	19,05	3/4	1214,21	770,56
6,35	19,05	3/4	1358,69	770,56

Tabla A12-9. Propiedades mecánicas del tubo y arco cerrado, de metal corrugado con nervadura en espiral.

Material	Mínima tensión de tracción, F_u [MPa]	Mínima tensión de fluencia, F_y [MPa]	Módulo de elasticidad, E_m [MPa]
Aluminio H34 ^{(1)&(4)}	214	165	69000
Aluminio H32 ^{(2)&(4)}	186	138	69000
Acero ⁽³⁾	310	228	200000

1. Debe cumplir con los requisitos de AASHTO M 197 (ASTM B744), para aleación Alclad 3004-H34
2. Debe cumplir con los requisitos de AASHTO M 197 (ASTM B744), para aleación Alclad 3004-H32
3. Debe cumplir con los requisitos de AASHTO M 167M / M 167 (ASTM A761 / A761M), M 218 y M 246 (ASTM A742)
4. Se debe utilizar material templado H34 con tubo remachado para alcanzar la resistencia de costura. Tanto el material templado H32 como el H34 se pueden utilizar con tubo helicoidal

Tabla A12-10. Propiedades mecánicas – Chapa corrugada de aluminio y acero.

Material	Mínima tensión de tracción, F_u [MPa]	Mínima tensión de fluencia, F_y [MPa]	Módulo de elasticidad, E_m [MPa]
Espesor de la chapa de aluminio ⁽¹⁾ [mm]			
2,54 – 4,45	241	165	69000
4,46 – 6,35	234	165	69000
Espesor de la chapa de acero ⁽²⁾ [mm]			
todos	310	228	200000
Chapa corrugada profunda de acero	379	303	200000

1. Debe cumplir con los requisitos de AASHTO M 219 (ASTM B746), para aleación 5052
2. Debe cumplir con los requisitos de AASHTO M 167M/M (ASTM A761/A761M)

Tabla A12-11. Tubos corrugados de PE (AASHTO M 294).

Diámetro nominal [mm]	Mín. ID ⁽¹⁾ [mm]	Máx. OD ⁽¹⁾ [mm]	Mín. $A \times 10^{-4}$ [m²/m]	Mín. c [mm]	Mín. $I \times 10^{-10}$ [m⁴/m]
305	300	373	31,75	8,9	3932,895
381	376	457	40,22	11,4	8685,144
457	450	546	48,68	12,7	10159,980
610	599	729	65,62	16,5	19008,994
762	749	925	82,55	19,0	26710,914
914	902	1079	95,25	22,9	36379,282
1067 ⁽²⁾	1054	1219	99,27	28,2	88981,758
1219 ⁽²⁾	1206	1397	109,01	29,2	88981,758

1. **ID** = diámetro interior (interior diameter) // **OD** = diámetro exterior (outside diameter)
2. Para el tubo de **1067 mm** y **1219 mm**, el espesor de la pared se debe diseñar utilizando la disposición de resistencia a tracción a largo plazo, es decir, **6,2 MPa**, hasta tanto se establezcan nuevos criterios de diseño

Tabla A12-12. Tubos nervados de PE (ASTM F894).

Diámetro nominal [mm]	Mín. ID [mm]	Máx. OD [mm]	Mín. A × 10 ⁻⁴ [m ² /m]	Mín. c [mm]	Mín. I × 10 ⁻¹⁰ [m ⁴ /m]	
					Clasificación de celda PE 334433C	Clasificación de celda PE 335434C
457	452	533	62,65	8,7	8521,273	6227,084
533	528	615	87,84	10,4	11470,945	8357,403
610	605	691	98,64	10,9	13273,522	9668,368
686	679	770	125,10	13,2	20483,830	14912,228
762	756	851	125,10	13,2	20483,830	14912,228
838	832	945	147,96	15,1	26383,173	21630,924
914	908	1024	171,03	16,3	33101,869	27038,656
1067	1060	1196	165,31	18,1	45392,167	37198,635
1219	1213	1349	186,69	20,0	55388,276	45392,167

Tabla A12-13. Tubos de pared perfilada de PVC (AASHTO M 304).

Diámetro nominal [mm]	Mín. ID [mm]	Máx. OD [mm]	Mín. A × 10 ⁻⁴ [m ² /m]	Mín. c [mm]	Mín. I × 10 ⁻¹⁰ [m ⁴ /m]	
					Clasificación de celda 12454C	Clasificación de celda 12364C
305	297	345	25,40	3,8	655,483	491,612
381	363	419	27,52	4,3	983,224	819,353
457	445	508	33,87	4,6	1474,836	1310,965
533	523	584	38,10	5,3	1966,448	1802,577
610	594	660	41,27	5,8	2621,930	2458,060
762	747	833	48,68	6,9	3932,895	3277,413
914	897	1003	55,03	7,9	5735,472	5079,990
1067	1049	1168	61,38	8,6	7701,920	7046,438
1219	1201	1321	66,89	9,4	9996,109	9176,756

Tabla A12-14. Chapa de acero estructural con corrugaciones profundas – Propiedades transversales.

Corrugado: 381 × 139,7 mm (15 × 5 ½ in)			
Espesor de recubrimiento [mm]	A × 10 ⁻⁴ [m ² /m]	r × 10 ⁻³ [m]	I × 10 ⁻¹⁰ [m ⁴ /m]
3,56	47,84	49,48	117003,637
4,32	58,46	49,50	143386,810
4,78	65,36	49,53	160429,357
5,54	76,28	49,58	187468,012
6,32	87,16	49,61	214342,797
7,11	98,07	49,63	241217,582

Tabla A12-15. Resistencia mínima de la costura longitudinal, estructuras de corrugaciones profundas – Abulonadas.

Corrugado: 381 × 139,7 mm (15 × 5 ½ in)			
Espesor de recubrimiento [mm]	Diámetro del bulón		6 bulones / corrugado [kN/m de costura]
	[mm]	[in]	
3,56	19,05	3/4	963,20
4,32	19,05	3/4	1269,67
4,78	19,05	3/4	1488,58
5,54	19,05	3/4	1853,43
6,32	19,05	3/4	2101,52
7,11	19,05	3/4	2101,52
6,32	22,22	7/8	2320,43
7,11	22,22	7/8	2583,12

INTI

INSTITUTO NACIONAL DE
TECNOLOGÍA INDUSTRIAL



CIRSOC

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LOS
REGLAMENTOS NACIONALES DE
SEGURIDAD PARA LAS OBRAS CIVILES