



Factores de Encamado e Instalaciones Estandar Para el Método de Diseño Indirecto

Antecedentes

La teoría clásica de cargas de la tierra sobre tubos de concreto subterráneos publicada en 1930 por A. Marston, fue desarrollada para las condiciones de zanja y terraplén.

En un trabajo posterior publicado en 1933, M.G. Spangler presentó tres configuraciones de encamado y el concepto de factor de encamado para relacionar la resistencia del soporte de tubo subterráneo con la resistencia obtenida en la prueba de tres apoyos.

La teoría de Spangler proponía que el factor de encamado para una tubería en particular y, consecuentemente, la resistencia de soporte del tubo subterráneo, depende de dos características de instalación:

1. El ancho y la calidad del contacto entre el tubo y el encamado.
2. La magnitud de la presión lateral y la porción de la altura vertical del tubo sobre la cual ésta actúa.

Para la condición de terraplén, Spangler desarrolló una ecuación general para el factor de encamado, que parcialmente incluía los efectos de la presión lateral. Para la condición de zanja, Spangler estableció factores de encamado conservadores, que no incluían los efectos de la presión lateral, para cada uno de los tres encamados. Este desarrollo por separado de los factores de encamado para las condiciones de zanja y terraplén resultaron en la creencia de que la presión lateral es efectiva sólo en la transición, o a un mayor ancho de zanja. Tal suposición no es compatible con los conceptos de ingeniería y con los métodos de construcción modernos. Es razonable esperar que alguna presión lateral sea efectiva en los anchos de zanja menores que los anchos de transición. Aunque los diseños conservadores basados en el trabajo de Marston y Spangler se han desarrollado e instalado exitosamente por años, los conceptos de diseño tienen sus limitaciones cuando estos se aplican a instalaciones reales.

Las limitaciones incluyen:

- Considera que las cargas actúan sólo en la parte superior del tubo.
- No se considera el empuje axial.

- El ancho del encamado de las instalaciones de prueba es menor al ancho designado en su configuración de encamado.
- Los encamados estándar se desarrollaron para estar de acuerdo con teorías supuestas de soporte de suelo más que para facilitar su instalación y métodos de construcción.
- Los materiales de encamado y los niveles de compactación no están definidos adecuadamente.

La presente publicación, Datos de Diseño 9, trata acerca de las instalaciones estándar recientemente desarrolladas y los procedimientos de diseño indirecto apropiados para usarse con tales instalaciones.

Introducción

En 1970, la ACPA inició un programa de investigación de largo alcance acerca de la interacción entre elementos de concreto subterráneos y el suelo. Esta investigación resultó en el programa comprensivo de computadora de elementos finitos SPIDA, (Diseño y Análisis de la Interacción Suelo – Tubo por sus siglas en inglés) para el diseño directo de tubos de concreto subterráneos.

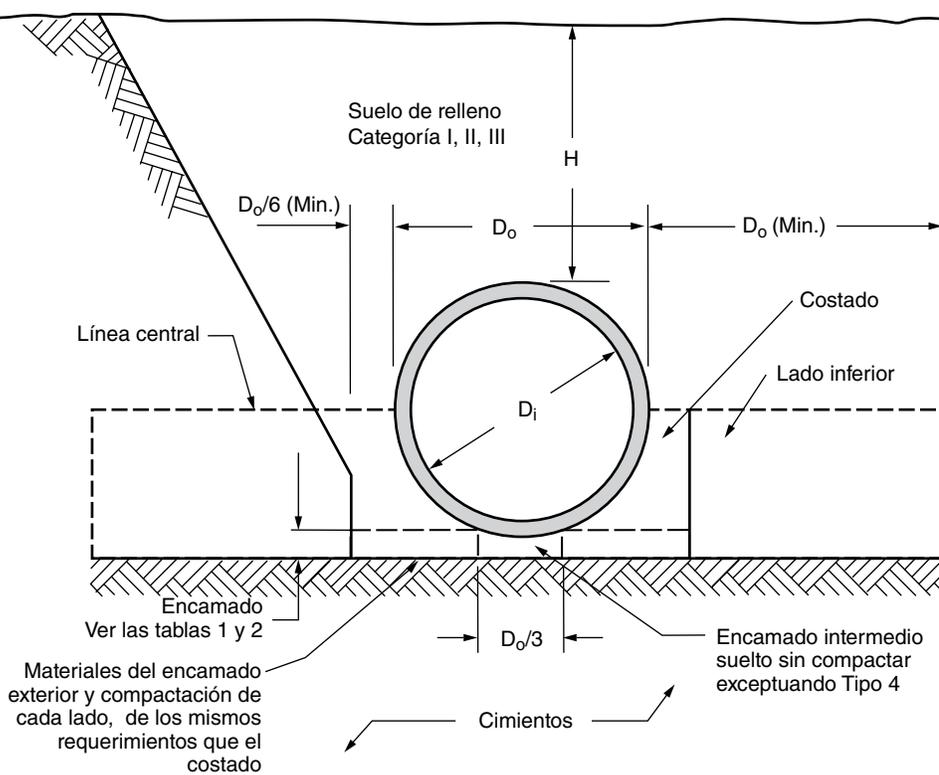
Desde inicios de los ochentas, SPIDA se ha utilizado para una variedad de estudios, incluyendo el desarrollo de cuatro nuevas instalaciones estándar, y un programa simplificado para microcomputadora, el SIDD (Diseño Directo de Instalaciones Estándar por sus siglas en inglés).

Datos de Diseño 9 reemplaza a los encamados históricos A, B, C y D empleados en el método de diseño indirecto con las cuatro nuevas instalaciones estándar, y presenta un método moderno para determinar los factores de encamado para las Instalaciones Estándar. La terminología de tubos e instalación tal como se usa en las Instalaciones, el SIDD y en Datos de Diseño 9 se definen en la Figura 1.

Cuatro Instalaciones Estándar

Se desarrollaron cuatro nuevas instalaciones estándar –y se presentan en la Tabla 2- mediante consultas con ingenieros y contratistas y con los resultados de nu-

Figura 1 Instalación estándar de zanja/terraplén



merosos estudios de parámetros SPIDA. Los estudios de SPIDA se llevaron a cabo para condiciones de terraplén de saliente positiva, que son las peores condiciones de carga vertical para el tubo, y que proporcionan resultados conservadores para otras condiciones de terraplén y de zanja.

Los estudios de parámetros confirmaron las ideas postuladas a partir de experiencias pasadas y probaron los siguientes conceptos:

- Un encamado suelto, sin suficiente compactación directamente bajo el inverso del tubo reduce significativamente el estrés del tubo.
- El suelo en las porciones del área del encamado y el costado que se encuentran directamente bajo el tubo es difícil de compactar.
- El suelo en el área del costado desde el cemento hasta la línea central del tubo proporciona un soporte significativo al tubo y reduce los estreses del tubo.
- El nivel de compactación del suelo directamente arriba del costado, desde la línea central del tubo hasta la parte superior del nivel del tubo, tiene muy poco efecto en los estreses del tubo. La compactación del suelo en esta área no es necesaria a menos que se requiera para las estructuras del pavimento.
- Los materiales de instalación y los niveles de

compactación debajo de la línea central tiene un efecto significativo sobre los requisitos estructurales del tubo.

Las cuatro Instalaciones Estándar ofrecen una

Tabla 1 Clasificaciones de Suelo equivalentes USCS y AASHTO para designaciones de Suelo SIDD

Suelo SIDD	Tipos de Suelo Representativos		Porcentaje de Compactación	
	USCS	AASHTO	Standard Proctor	Modified Proctor
Arena Con Grava (Categoría I)	SW, SP GW, GP	A1, A3	100	95
			95	90
			90	85
			85	80
			80	75
61	59			
Limo Arenoso (Categoría II)	GM, SM, ML También GC, SC con menos de 20% pasando un cedazo #200	A2, A4	100	95
			95	90
			90	85
			85	80
			80	75
49	46			
Arcilla Limosa (Categoría III)	CL, MH GC, SC	A5, A6	100	90
			95	85
			90	80
			85	75
			80	70
45	40			

Tabla 2 Suelos de Instalaciones Estándar y Requisitos Mínimos de Compactación

Tipo de Instalación	Espesura del Encamado	El Costado y Encamado Exterior	Lado Inferior
Tipo 1	$D_o/24$ mínimo, no menos de 75 mm Si los cimientos son de piedra, utilice $D_o/12$ mínimo, no menos de 150 mm.	95% Categoría I	90% Categoría I, 95% Categoría II. or 100% Categoría III
Tipo 2	$D_o/24$ mínimo, no menos de 75 mm Si los cimientos son de piedra, utilice $D_o/12$ mínimo, no menos de 150 mm.	90% Categoría I or Categoría II	85% Categoría I, 90% Categoría II, or 95% Categoría III
Tipo 3	$D_o/24$ mínimo, no menos de 75 mm Si los cimientos son de piedra, utilice $D_o/12$ mínimo, no menos de 150 mm.	85% Categoría I, 90% Categoría II, or 95% Categoría III	85% Categoría I, 90% Categoría II, or 95% Categoría III
Tipo 4	No se requiere ropa de cama, excepto si cimientos de roca, utilice $D_o/12$ mínimo, no inferior a de 150 mm.	No se requiere compactación, a menos que si la Categoría III, utilice 85% Categoría III	No se requiere compactación, a menos que si la Categoría III, utilice 85% Categoría III

Notas:

1. *Símbolos del suelo y compactación – esto es, “95% Categoría I” – se refiere al material del suelo categoría I con una compactación Proctor estándar mínima de 95%. Ver la Tabla 1 para valores Proctor modificados equivalentes.*
2. *El suelo en las zonas del encamado exterior, costado, y lado inferior, excepto bajo el tercio medio del tubo, deberá compactarse a cuando menos el mismo nivel de compactación que la mayoría del suelo en la zona de relleno.*
3. *Para las zanjas, la elevación superior no deberá ser mayor a 0.1H debajo del nivel final o, para caminos, su parte superior no deberá estar más abajo que una elevación de 300 mm debajo del fondo del material base del pavimento.*
4. *Para zanjas, el ancho deberá ser mayor que lo que se muestra en caso de requerirse para un espacio adecuado con el fin de lograr la compactación especificada en las zonas del costado y encamado.*
5. *Para las paredes de zanja que se encuentran a 10 grados de la vertical, la compactación o firmeza del suelo en las paredes de la zanja y en la zona lateral inferior no necesita considerarse.*
6. *Para las paredes de zanja con pendientes mayores a 10 grados que consisten de terraplén, el lado inferior deberá estar compactado a cuando menos la misma compactación que se especifica para el suelo en la zona de relleno.*
7. *Sub-zanjas*
 - 7.1 *Una sub-zanja se define como una zanja con su parte superior debajo del nivel terminado con mas de 0.1H o, para caminos, su parte superior está a una elevación menor que 300 mm debajo del fondo del material base del pavimento.*
 - 7.2 *El ancho mínimo de una subzanja debe ser $1.33D_o$ o mayor en caso de requerirse para un espacio adecuado y lograr la compactación especificada en las zonas del costado y encamado.*
 - 7.3 *Para las subzanjas con paredes de suelo natural, cualquier porción de la zona lateral inferior en la pared de la sub-zanja deberá encontrarse tan firme como un suelo equivalente colocado con los requisitos de compactación especificados para la zona lateral inferior y tan firme como la mayoría del suelo en la zona de relleno, o deberá de removerse y reemplazarse con suelo compactado al nivel especificado.*

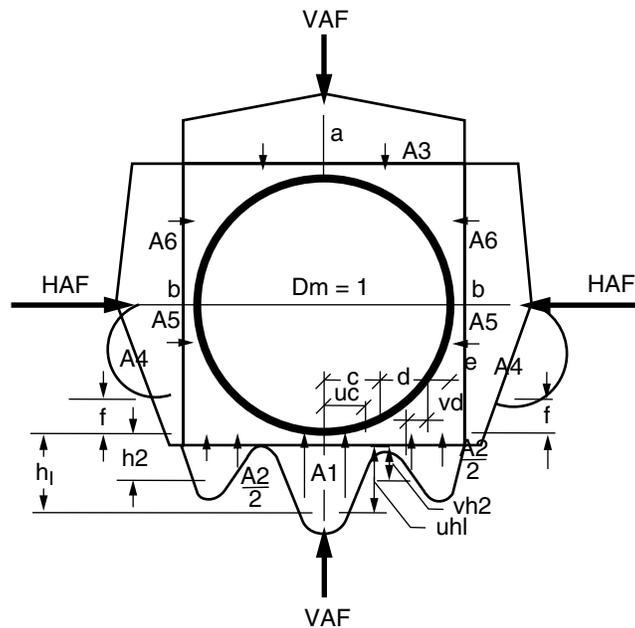
variedad óptima de características de interacción suelo-tubo. Para los materiales de relativa alta calidad y el alto esfuerzo de compactación de una instalación Tipo 1, se requerirá de un tubo de menor resistencia. A la inversa, una instalación tipo 4 requiere un tubo de mayor resistencia, ya que fue desarrollado para condiciones de poco o nulo control sobre los materiales o la compactación.

Los tipos de suelo genéricos se designan en la Tabla

1. El Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (USCS por sus siglas en inglés) y la clasificación de suelos de la Asociación Americana de Oficiales de Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO) equivalentes a los tipos de suelo genéricos en la Instalaciones Estándar también se presentan en la Tabla 1.

Presiones de Carga

Figura 2 Coeficientes de Arco y Distribuciones Heger de Presión de Tierra



Tipo de Instalacion															
Tipo	VAF	HAF	A1	A2	A3	A4	A5	A6	a	b	c	e	f	u	v
1	1.35	0.45	0.62	0.73	1.35	0.19	0.08	0.18	1.40	0.40	0.18	0.08	0.05	0.80	0.80
2	1.40	0.40	0.85	0.55	1.40	0.15	0.08	0.17	1.45	0.40	0.19	0.10	0.05	0.82	0.70
3	1.40	0.37	1.05	0.35	1.40	0.10	0.10	0.17	1.45	0.36	0.20	0.12	0.05	0.85	0.60
4	1.45	0.30	1.45	0.00	1.45	0.00	0.11	0.19	1.45	0.30	0.25	0.00	-	0.90	-

Notas:

1. VAF y HAF son los factores de arco horizontales y verticales. Estos coeficientes representan las cargas totales verticales y horizontales no dimensionales sobre el tubo respectivamente. Las cargas reales horizontales y verticales totales son $(VAF) \times (PL)$ y $(HAF) \times (PL)$, respectivamente, en donde PL es la carga de prisma.
2. Los coeficientes A1 al A6 representan la integración de los componentes verticales y horizontales no dimensionales de la presión de suelo bajo las porciones indicadas de los diagramas de presión componente (esto es, el área bajo los diagramas de presión componente). Se supone que las presiones varían ya sea parabolicamente o linealmente, como se muestra, con las magnitudes no dimensionales en puntos dominantes representados por $h_1, h_2, u_{h1}, v_{h2}, a$ y b . Las dimensiones verticales y horizontales no dimensionales de las regiones de presión componente se definen por los coeficientes c, d, e, v_c, v_d y f .
3. d se calcula como $(0.5-c-e)$, h_1 se calcula como $(1.5 A_1)/(c)(1+u)$, h_2 se calcula como $(1.5 A_2)/[(d)(1+v) + (2e)]$

El SPIDA se programó con las Instalaciones Estándar y de resultados de muchas pruebas de diseño. Una evaluación del rendimiento de los diseños por arte del Dr. Frank J. Heger produjo un diagrama de presión de carga significativamente diferente que lo que proponían las teorías previas. Vea la Figura 2. Esta diferencia es particularmente importante bajo el tubo en el área del costado inferior y se debe en parte a la suposición de la existencia de vacíos parciales adyacentes a la pared del tubo en ésta área. El SIDD utiliza estos datos de presión para determinar los momentos, el empuje, y la fuerza cortante en la pared del tubo y posteriormente emplea el método de diseño de límites de la ACPA para determinar las áreas de refuerzo requeridas para

manejar los estreses de la pared del tubo. Empleando este método, cada criterio que pudiera limitar o gobernar el diseño se considera por separado en la evaluación de los requisitos generales del sistema. El SIDD, que está basado en las cuatro instalaciones estándar, es un programa independiente desarrollado por la Asociación Americana del Tubo de Concreto.

La Administración de Carreteras Federales (FHWA) desarrolló un programa de computadora, el PIPECAR, para el diseño directo del tubo de concreto antes del desarrollo del SIDD. El PIPECAR determina los coeficientes del momento, el empuje y la fuerza cortante de cualquiera de los dos sistemas, un sistema de presión radial desarrollado por Olander en 1950 o un sistema de

presión uniforme desarrollado por Paris en los 1920's, y también utiliza el método de diseño de la ACPA para determinar las áreas de refuerzo requeridas para manejar los estreses en la pared del tubo. El sistema SIDD se ha incorporado al PIPECAR como una mejora.

Las pruebas del diseño SPIDA con las instalaciones estándar se realizaron con una compactación mediana del encamado bajo el medio tercio del tubo, y con algo de compactación del sobrerrelleno arriba de la línea central del tubo. Esta área del medio tercio bajo el tubo en las instalaciones estándar se ha designado como de material suelto sin compactar. La intención es mantener un encamado algo blando bajo el tercio medio del tubo para que el tubo se asiente en el encamado y logre una mejor distribución de cargas. No se recomienda la compactación en el medio tercio del encamado con compactadoras mecánicas, lo cual podría producir una superficie plana dura, lo que resultaría en estreses altamente concentrados en el inverso del tubo similares a aquellas que se experimentan en la prueba de soporte de los tres apoyos. La secuencia de construcción más deseable es colocar el encamado al nivel; instalar el tubo al nivel; compactar el encamado fuera del medio tercio del tubo; y luego colocar y compactar el área del costado hasta la línea central del tubo. El encamado fuera del medio tercio del tubo se puede compactar antes de colocar el tubo.

Como se indica en la figura 1, cuando el diseño incluye cargas de superficie, las áreas inferiores y de sobre rrelleno deben de compactarse conforme se requiera para soportar la carga de superficie. Estas áreas no deberán compactarse cuando no existan cargas de superficie o requisitos de estructura de superficie.

Encamados

Se proporciona el encamado para distribuir la reacción vertical alrededor de la superficie exterior inferior del tubo y reducir las concentraciones de estreses dentro de las paredes del tubo. La carga que un tubo de concreto soportará depende del ancho del área de contacto del encamado y de la calidad del contacto entre el tubo y el encamado. Una importante consideración al seleccionar el material para el encamado es asegurarse que se pueda obtener un contacto positivo entre la cama y el tubo. Debido a que la mayor parte de los materiales granulares se moverán para lograr un contacto positivo conforme el tubo se asienta, se puede obtener una distribución ideal de cargas mediante el uso de arena gruesa limpia, grava redondeada o roca molida de buena gradación.

Procedimiento de Diseño

El procedimiento de diseño indirecto de seis pasos que se presenta en el Manual de Diseño del Tubo de Concreto para la selección de la resistencia del tubo es todavía apropiado.

1. Determinación de la Carga de Tierra
2. Determinación de la Carga en Movimiento.
3. Selección de la Instalación Estándar.
4. Determinación del Factor de Encamado.
5. Aplicación del Factor de Seguridad.
6. Selección de la Resistencia del Tubo.

DETERMINACIÓN DE LA CARGA DE TIERRA

Uno de los cálculos informativos del SPIDA es el factor de arco, el cual se define como la factor de la carga vertical calculada sobre el tubo dividida por el peso del prisma de tierra directamente arriba del diámetro exterior del tubo. La evaluación del factor de arco a partir de los estudios de SPIDA muestra que el factor se aproxima a un valor de 1.45 como límite superior para cualquiera de las cuatro Instalaciones Estándar. El factor de arco varía para cada una de las cuatro Instalaciones Estándar y se presenta en la Tabla 3.

Carga de Tierra del Terraplén

Tal como se discutió anteriormente, el tubo de concreto se puede instalar ya sea en condiciones de terraplén o de zanja. El tipo de instalación tiene un efecto significativo sobre las cargas soportadas por el tubo rígido. Aunque las instalaciones de zanja estrecha son las más típicas, existen muchos casos en donde el tubo se instala en una condición de terraplén de saliente positiva, o una zanja de un ancho considerable que debe ser considerada como una condición de terraplén de saliente positiva. En esta condición, el suelo a lo largo del tubo se va a asentar más que el suelo que se encuentra arriba de la estructura del tubo rígido, y por lo tanto imponiendo una carga adicional al prisma de suelo directamente arriba del tubo. Con las Instalaciones Estándar, esta carga adicional se justifica utilizando un Factor de Arco Vertical. Este factor se multiplica por la carga del prisma (peso del suelo directamente arriba del tubo) para obtener la carga total de suelo sobre el tubo.

$$W_e = VAF \times PL \quad (1)$$

A diferencia del método anterior de diseño utilizado para los encamados de Marston/Spangler, no hay necesidad de suponer un índice de asentamiento o proyección. Los Factores de Arco Verticales para las Instalaciones Estándar se muestran en la Tabla 3, y la ecuación para la carga del prisma de suelo se muestra abajo en la Ecuación (2).

Carga de Prisma

$$PL = w \left[H + \frac{D_o(4 - \pi)}{8} \right] D_o \quad (2)$$

w= peso unitario del suelo (N/m³)
H= altura del relleno, (m)
Do= diámetro exterior del tubo, (m)

Cargas de Suelo de la Zanja

Bajo condiciones de ancho de zanja moderadas o angostas, la carga de tierra resultante es igual al peso del suelo dentro de la zanja menos las fuerzas cortas (fricción) sobre los lados de la zanja. Debido a que el material de relleno recién instalado se asentará más que el suelo existente a los lados de la zanja, la fricción a lo largo de las paredes de la zanja disminuirán algo de la carga del suelo sobre el tubo. Los Factores de Arco Verticales en este caso serán menores que los que se usan para el diseño de terraplén. La carga del relleno sobre el tubo instalado bajo condición de zanja se calcula con la siguiente ecuación:

$$W_d = C_d w B_d^2 + \frac{D_o^2 (4 - \pi)}{8} w \quad (3)$$

El valor de C_d se puede obtener usando la ecuación 4 abajo.

$$C_d = \frac{1 - e^{-2K\mu' \frac{H}{B_d}}}{2K\mu'} \quad (4)$$

En donde:

- B_d = ancho de la zanja, (pies)
- K = razón de la presión unitaria lateral activa entre la presión unitaria vertical.
- μ' = $\tan \Phi$, coeficiente de fricción entre el material de relleno y los lados de la zanja.

Los valores típicos de $K\mu'$ son:

- $K\mu' = 0.1924$ Max. Para materiales granulares sin cohesión.
- $K\mu' = 0.165$ Max. Para arena y grava
- $K\mu' = 0.150$ Max para suelo superior saturado.
- $K\mu' = 0.130$ Max. Para arcilla común.
- $K\mu' = 0.110$ Max para arcilla saturada.

Conforme se incrementa el ancho de la zanja, la reducción en la carga de las fuerzas de fricción es compensada por el incremento en el peso del suelo dentro de la zanja. Conforme el ancho de la zanja aumenta, empieza a comportarse como un terraplén, en donde el suelo al lado del tubo se asienta más que el suelo arriba del tubo. Finalmente, se alcanza la condición de terraplén cuando las paredes de la zanja están muy alejadas del

tubo como para ayudar a soportar el suelo que se encuentra inmediatamente adyacente a este. El ancho de transición es el ancho de una zanja a una profundidad en particular en donde la carga de la zanja es igual a la carga del terraplén. Una vez que se alcanza el ancho de transición, ya no existe ningún beneficio por parte de las fuerzas de fricción a lo largo de la pared de la zanja. Cualquier tubo instalado en un ancho de zanja igual o mayor que el ancho de transición deberá ser rediseñado para la condición de terraplén.

Carga de fluido

Generalmente el peso del fluido es aproximadamente de la misma magnitud que el peso del tubo y normalmente representa una porción significativa de la carga de diseño del tubo sólo para un tubo de diámetro grande bajo rellenos relativamente poco profundos. El peso del fluido no se ha tomado en cuenta en los procedimientos de diseño tradicional del pasado, incluyendo el método de diseño Marston Spangler que utiliza los encamados B y C. No están documentadas de fallas del tubo de concreto como resultado de no tomar en cuenta la carga del fluido. Sin embargo, algunas oficinas de especificación tales como la AASHTO y la CHBDC, ahora requieren que el peso del fluido dentro del tubo siempre se considere cuando se determina la carga-D. (i.e. D-Load)

La dieciseisava edición de las Especificaciones Estándar para puentes carreteros de la AASHTO dice que "El peso del fluido, W_f , en el tubo se deberá considerar en el diseño basado en un peso de fluido de 9,810 N/m³, a menos que se especifique de otra manera."

Tabla 3 Factor de Arco Vertical

Instalación Estándar	Factor de Arco Vertical, VAF
Tipo 1	1.35
Tipo 2	1.40
Tipo 3	1.40
Tipo 4	1.45

Nota:

1. VAF son los factores de arco verticales. Estos coeficientes representan las cargas verticales no dimensionales sobre el tubo. Las cargas totales reales verticales son (VAF) X (PL), en donde PL es la carga del prisma.

DETERMINACIÓN DE LA CARGA EN MOVIMIENTO

El documento de Datos de Diseño 1 se pueden utilizar para determinar la carga en movimiento tanto para la condición de zanja como de terraplén.

SELECCIÓN DE LA INSTALACIÓN ESTÁNDAR

La selección de una instalación estándar para un proyecto deberá basarse en una evaluación de la calidad de la construcción y de la inspección anticipada. Una instalación estándar Tipo 1 requiere de la más alta calidad de construcción y grado de inspección. La calidad de construcción requerida se reduce para una instalación estándar Tipo 2, y se reduce aún más para una instalación estándar Tipo 3. Una instalación estándar Tipo 4 virtualmente no requiere de inspección de calidad ni de construcción. Consecuentemente, una instalación estándar Tipo 4 requerirá de un tubo de mayor resistencia, y una instalación estándar Tipo 1 requerirá un tubo de menor resistencia para la misma profundidad de instalación.

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE ENCAMADO

Una vez instalado, la carga vertical sobre un tubo se encuentra distribuida sobre su ancho y la reacción esta distribuida de acuerdo con el tipo de encamado. Cuando se ha determinado la resistencia del tubo usada en el diseño mediante pruebas en la planta, se requiere desarrollar los factores de encamado para relacionar la resistencia en su sitio con la resistencia más severa de la prueba de planta. El factor de encamado es la relación de la resistencia del tubo bajo la condición instalada de carga y encamado con la resistencia del tubo en la prueba de planta. Esta misma proporción fue definida originalmente por Spangler como el factor de carga. Esta terminología anterior, sin embargo, se definió subsecuentemente en el método de resistencia final (ultimate) del diseño de concreto reforzado con un significado completamente diferente. Por lo tanto, para evitar una confusión, el término de Spangler fue renombrado como el factor de encamado.

La prueba de soporte de tres apoyos tal como se muestra en la figura 3 es la prueba de planta normalmente aceptada para que todos los factores de encamado descritos relacionen la resistencia de soporte en su sitio con la resistencia en la prueba de soporte de tres apoyos.

Las instalaciones estándar son más fáciles de construir para que ofrezcan diseños más realistas que los encamados A, B, C y D. El desarrollo de los factores de encamado para las instalaciones estándar, tal como se presenta en los siguientes párrafos, sigue los conceptos de las teorías de diseño de concreto reforzado. La definición básica de factor de encamado es que es la proporción del momento máximo en la prueba de soporte de tres apoyos al momento máximo en la condición de enterrado (subterráneo), cuando las cargas verticales bajo cada condición son iguales:

$$B_f = \frac{M_{TEST}}{M_{FIELD}} \quad (5)$$

En donde:

B_f = Factor de encamado

M_{TEST} = Momento máximo en la pared del tubo bajo la carga de la prueba de soporte de tres apoyos, (N•m).

M_{FIELD} = Momento máximo en la pared del tubo bajo las cargas en el campo, (N•m).

Consecuentemente, para evaluar la relación apropiada del factor de encamado, la carga vertical sobre el tubo para cada condición debe ser igual, lo cual ocurre cuando los empujes axiales y de la línea central son iguales. De acuerdo con las leyes de estática y equilibrio, M_{TEST} and M_{FIELD} son:

$$M_{TEST} = [0.318N_{FS}] \times \frac{[D + t]}{1000} \quad (6)$$

$$M_{FIELD} = [M_{FI}] - \frac{[0.38tN_{FI}]}{1000} - \left[0.125N_{FI} \times \frac{c}{1000} \right] \quad (7)$$

En donde:

N_{FS} = empuje axial en la línea central bajo la carga de la prueba de soporte de tres apoyos, (N/m).

D = Diámetro interno del tubo, (mm)

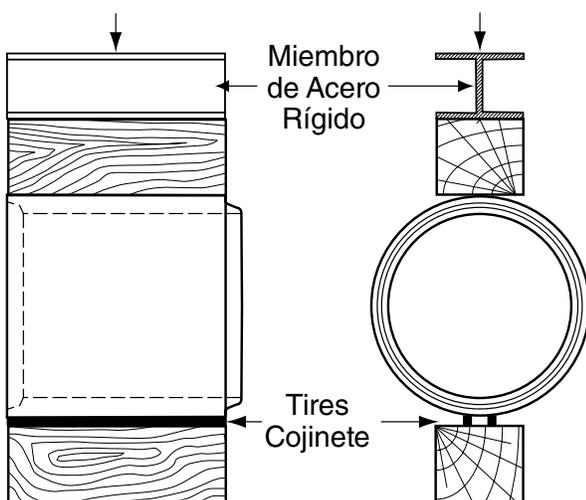
t = espesor de la pared del tubo, (mm)

M_{FI} = momento en el invert bajo la carga de campo, (N•m/m)

N_{FI} = empuje axial an el invert bajo las cargas de campo, (N/m)

c = espesor de la cubierta de concreto sobre el refuerzo interior, (mm)

Figura 3 Prueba de Soporte de 3 Apoyos



Sustituyendo las ecuaciones 6 y 7 en la ecuación 5:

$$C_d = \frac{1 - e^{-2K\mu' \frac{H}{B_d}}}{2K\mu'} \quad (4)$$

Utilizando el SIDD, se determinaron los factores de encamado para una variedad de diámetros del tubo y de profundidades de instalación. Estos cálculos se basaron en una cubierta de 25 mm sobre el refuerzo, una palanca de momento de 0.875d entre las fuerzas de tensión y compresión, y un diámetro de refuerzo de 0.075t. Las evaluaciones indicaron que para un grosor de pared A, B y C existía una variación insignificante en el factor de encamado debida al grosor de la pared de concreto o a la cubierta de concreto, c, sobre el refuerzo. Los factores de encamado resultantes se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 Factores de Encamado, Condiciones de Terraplén, B_{fe}

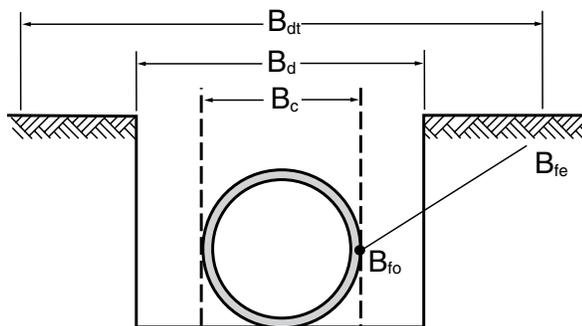
Diámetro Del Tubo	Instalación Estándar			
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
300 mm	4.4	3.2	2.5	1.7
600 mm	4.2	3.0	2.4	1.7
900 mm	4.0	2.9	2.3	1.7
1,800 mm	3.8	2.8	2.2	1.7
3,600 mm	3.6	2.8	2.2	1.7

Notas:

1. Para diámetros aparte de los citados en Tabla 4, factores de condición encamados pueden ser obtenidos por interpolación.
2. Los factores de encamado están basados en que los suelos se coloquen con la compactación mínima especificada en la Tabla 2 para cada Instalación Estándar.

El uso de las instalaciones estándar y los factores de encamado presentados en el presente documento (Datos de Diseño 9) simplifica el procedimiento de diseño indirecto. En los siguientes párrafos se describen los cambios y el uso de cada paso del procedimiento de diseño.

Figura 4 Factor de Encamado Variable



La tabla 4 presenta los factores de encamado de terraplén, B_{fe} , p para cada una de las instalaciones estándar. Para las instalaciones de zanja tal como se discutió en el C.P. Info No 12 y en el Manual de Diseño, la experiencia indica que la presión lateral activa se incrementa conforme el ancho de la zanja aumenta al ancho de transición, siempre que el relleno lateral esté compactado. Un estudio de los parámetros del SIDD de las instalaciones estándar indica que los factores de encamado son constantes para todos los diámetros del tubo bajo condiciones de presión lateral cero sobre el tubo. Estos factores de encamado existen en la interfase de la pared del tubo y el suelo y se denominan factores de encamado mínimo, B_{fo} , mostrados en la Figura 4, para diferenciarlos de los factores de encamado fijos desarrollados por Spangler. La tabla 5 presenta los factores de encamado mínimos.

Tabla 5 Factores Mínimos de Encamado de Zanja, B_{fo}

Instalación Estándar	Factor de Encamado Mínimo, B_{fo}
Tipo 1	2.3
Tipo 2	1.9
Tipo 3	1.7
Tipo 4	1.5

Notas:

1. Los factores de encamado están basados en que los suelos se coloquen con la compactación mínima especificada en la Tabla 2 para cada Instalación Estándar.
2. Para el tubo instalado en zanjas excavadas en un terraplén previamente construido, la carga y el factor de encamado deben de determinarse como una condición de terraplén a menos que el relleno colocado sobre el tubo tenga una compactación menor que el terraplén.

La ecuación para el factor de encamado de zanja variable modificado para utilizarse con las instalaciones estándar es:

$$B_{fv} = \frac{[B_{fe} - B_{fo}][B_d - B_c]}{[B_{dt} - B_c]} + B_{fo} \quad (9)$$

En donde:

- B_c = extensión horizontal exterior del tubo, pies
- B_d = ancho de zanja en la parte superior del tubo, pies
- B_{dt} = ancho de transición en la parte superior del tubo, pies
- B_{fe} = factor de encamado, terraplén
- B_{fo} = factor de encamado mínimo, zanja
- B_{fv} = factor de encamado variable, zanja

Tabla 6 Factores de Encamado, B_{fill} , para Cargas Vivas HS20

Altura del relleno, m	Diámetro del Tubo, Pulgadas										
	300	600	900	1,200	1,500	1,800	2,100	2,400	2,700	3,000	3,600
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
2.00	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2

Nota:

1. Para otros diámetros del tubo que no se encuentran enlistados en la Tabla 6, los valores, B_{fill} , se pueden obtener por interpolación.

Se supone una variación lineal conservadora entre el factor de encamado mínimo y el factor de encamado para la condición de terraplén, que inicia en el ancho de transición.

El manual de Diseño (Tablas 13 a la 39) presenta los valores del ancho de transición para ser usados en la ecuación anterior.

Para los tubos instalados con 2 m o menos de relleno y sujetos a cargas de camión, el momento máximo podría estar en la corona más que en el invert. Consecuentemente, el uso de un factor de encamado de carga de tierra pudiera producir diseños no conservadores. Se evaluaron los momentos en la corona e invert del tubo para una variedad de diámetros y profundidades sujetas a cargas de camión en movimiento HS20. También se evaluó el efecto del ángulo de encamado y el ángulo de la carga en movimiento (ancho de carga en el tubo). Cuando se encuentran HS20 o algunas otras carga viva significativa, los factores de encamado de carga viva, B_{fill} , presentados en la tabla 6 son satisfactorios para una instalación estándar Tipo 4 y se hacen más conservadores para los Tipos 3, 2 y 1. Las limitaciones de B_{fill} se discuten en la sección de la Selección de Resistencia del Tubo.

APLICACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD

El método de diseño indirecto para el tubo de con-

creto es similar al método de esfuerzo común de funcionamiento para diseño del acero, el cual emplea un factor de seguridad entre el esfuerzo producido y el esfuerzo de funcionamiento deseado. En el método indirecto, el factor de seguridad se define como la relación entre la resistencia final de la carga D y la carga D al alcanzar la grieta de 0.3 mm. Esta relación se especifica en las normas ASTM C76 y C655 para el tubo de concreto. La relación entre la carga D final de 100 o menor; 1.25 para cargas D de grieta de 0.3 mm de 150 o más; y una reducción lineal de 1.5 a 1.25 para cargas D de grieta de 0.3 mm entre mas de 100 y menos de 150. Por lo tanto, se debe aplicar un factor de seguridad de 1.0 si la resistencia de grieta de 0.3 mm se utiliza como el criterio de diseño más que la resistencia final. El ancho de la grieta de 0.3 mm es un criterio de prueba arbitrariamente seleccionado más no un criterio para desempeño en campo o límite de servicio.

SELECCIÓN DE LA RESISTENCIA DEL TUBO

La Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) ha desarrollado especificaciones estándar para el tubo de concreto precolado. Cada especificación contiene los criterios de diseño, fabricación y de pruebas.

La norma ASTM C14M cubre tres clases de resistencia para el tubo de concreto simple. Estas clases se

especifican para cumplir con cargas finales mínimas, expresadas en términos de resistencia de la prueba de soporte de tres apoyos en kilonewtons por metro lineal.

La norma ASTM C 76M para paso de agua (culvert) de concreto reforzado, drenaje pluvial y tubo de alcantarillado especifica las clases de resistencia basadas en carga D a una grieta de 0.3 mm y/o máxima carga como se muestra abajo en la tabla 7. La carga D de grieta de 0.3 mm ($D_{0.3}$) es la carga máxima de la prueba de soporte de 3 apoyos soportada por un tubo de concreto reforzado antes de que ocurra una grieta teniendo una anchura de 0.3 mm medida a intervalos cercanos, a través de una longitud por lo menos de 300 mm. La máxima carga D (D_{ult}) es la máxima carga en la prueba de soporte de 3 apoyos soportada por un tubo dividido por el diámetro interior del tubo de concreto reforzado. Las cargas D se expresan en newton por metro lineal por milímetro de diámetro interior.

La norma ASTM C 655M para la alcantarilla de la D-carga, drenaje pluvial y tubo de alcantarillado cubre la aceptación de tubos de concreto diseñados para cierta carga D.

La norma ASTM C 985M para paso de agua (culvert) de concreto simple, drenaje pluvial y tubo de alcantarillado cubre la aceptación de tubo de concreto simple diseñado para cierta resistencia especificada.

La prueba de soporte de 3 apoyos esta clasificada por carga D porque hay varias medidas de tubos de concreto reforzado disponibles. El concepto de la carga D provee la clasificación de resistencia del tubo de concreto independiente del diámetro del tubo de concreto. Para tubería de concreto reforzado, la carga de la prueba de soporte de 3 apoyos en newton por metro lineal es igual a carga D multiplicado por el diámetro interior en milímetros.

La resistencia requerida por la prueba de soporte de 3 apoyos del tubo de concreto simple se expresa en newton por metro lineal, no como carga D, y se calcula por la ecuación:

$$T.E.B = \left[\frac{W_E}{B_f} + \frac{W_L}{B_{fLL}} \right] \times F.S. \quad (10)$$

La resistencia requerida por la prueba de soporte de 3 apoyos del tubo de concreto reforzado se expresa como carga D y se calcula por la ecuación:

$$D\text{-load} = \left[\frac{W_E}{B_f} + \frac{W_L}{B_{fLL}} \right] \times \frac{F.S.}{D} \quad (11)$$

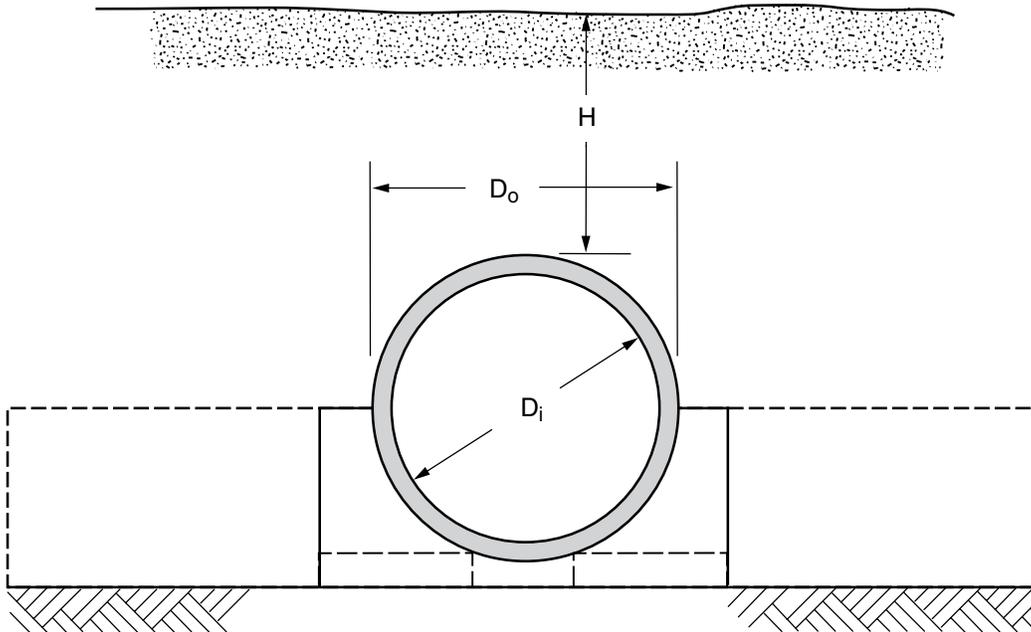
Cuando un carga viva HS20 se aplica al tubo de concreto, se utiliza el factor de encamado vivo, B_{fLL} , como se indica en las ecuaciones 10 y 11, al menos que el factor del encamado de la carga de tierra, B_f , es de un valor menor, en este caso se utiliza el valor menor de B_f en lugar de B_{fLL} . Por ejemplo, con una instalación estándar Tipo 4 de un tubo de diámetro de 1200 mm bajo un relleno de 0.3 m, los factores serían $B_f = 1.7$ y $B_{fLL} = 1.5$; pero bajo un relleno de 0.75 m o mayor, los factores serían $B_f = 1.7$ y $B_{fLL} = 1.7$, en lugar de 2.2. Para instalaciones en zanja donde el ancho de la zanja es menor que el ancho de transición, B_{fLL} será comparado al factor de encamado variable de zanja, B_{fv} .

El uso del método de diseño indirecto de seis pasos es ilustrado por un ejemplo en las siguientes páginas.

Tabla 7 Clases de Tubo Reforzado para una Grieta de 0.3 mm por ASTM C76M (N/m/mm)

Clase I	≤ 40
Clase II	≤ 50
Clase III	≤ 65
Clase IV	≤ 100
Clase V	≤ 140
Diseño Especial	> 140

Ejemplo 1 Instalación en Terraplén



Datos: Un tubo de 1200 mm será instalado en Terraplén utilizando instalación Tipo 1. La altura del relleno será de 10.7 m con un peso unitario de 19,000 newtons por metro cúbico.

Encontrar: Resistencia del Tubo en términos de una grieta de 0.3 mm carga D.

1. Determinación de la Carga de Tierra (W_E)
De acuerdo a datos, la instalación será Terraplén. Por lo tanto, usar ecuación 2 para determinar prisma de carga y multiplicar por el factor de arco vertical (VAF) apropiado.

$$D_o = \frac{1,220 + 2(127)}{1,000} \quad \text{Nota: Espesor de pared B para un tubo de 1200 mm es 127 mm de acuerdo a ASTM C76M.}$$

$$D_o = 1.47 \text{ diámetro exterior del tubo en metros}$$

$$w = \text{peso unitario del suelo en newtons por metro cúbico}$$

$$PL = 19,000 \left[10.7 + \frac{1.47(4-\pi)}{8} \right] 1.47$$

$$PL = 303,256 \text{ newtons por metro}$$

Tabla 3 Muestra Factor de Arco Vertical para las 4 Tipos de Instalaciones Standard. Usando un VAF de 1.35 para una instalación Tipo 1, la carga del relleno es:

$$W_E = 1.35 \times 303,256 \text{ newtons por metro}$$

$$W_E = 409,396 \text{ newtons por metro}$$

Carga de Fluido, $W_F = \gamma_w * A$
 $\gamma_w = 9,810 \text{ N/m}^3$
 $W_F = 9,810 \left(\frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{1220}{1000}\right)^2$
 $W_F = 11,462 \text{ newtons por metro}$

2. Determinación de la Carga Viva (W_L)
 Por Tabla 42 del Manual de Diseño, carga viva es zero a una profundidad de 10.7 m.
3. Selección de la Instalación Estándar
 Instalación Tipo 1 será usado para este ejemplo.
4. Determinación del Factor de Encamado
 El factor del encamado en Terraplén para una instalación Tipo 1 puede ser interpolado de la Tabla 4.

$$B_{fe900} = 4$$

$$B_{fe1800} = 3.8$$

$$B_{fe1200} = \frac{1800 - 1200}{1800 - 900} (4.0 - 3.8)$$

$$B_{fe1200} = 3.93$$

5. Aplicación del Factor de Seguridad
 Un factor de seguridad de 1.0 será usado basado en una grieta de 0.3 mm.
6. Selección de la Resistencia del Tubo
 La carga D es calculado usando ecuacion II

$$W_E = 409,396 \text{ newtons por metro}$$

$$W_F = 11,462 \text{ newtons por metro}$$

$$W_L = 0$$

$$B_f = 3.93$$

$$B_{rLL} = \text{N/A}$$

$$D = 1,200 \text{ mm diametro interior en mm}$$

$$D_{0.03} = \left(\frac{409,396 + 11,462}{3.93}\right) \times \left(\frac{1.0}{1,200 \text{ mm}}\right)$$

$$D_{0.03} = 89 \text{ newtons por metro lineal por cada milímetro de diámetro.}$$

Respuesta: Un tubo con una resistencia de 89 newton por metro lineal por milímetro de diámetro interior basado en prueba de soporta de 3 apoyos para una grieta de 0.3 mm.

References

1. **The Theory of External Loads on Closed Conduits in the Light of the Latest Experiments**, A. Marston, Bulletin 96, Iowa State College, 1930.
2. **The Supporting Strength of Rigid Pipe Culverts**, M.G. Spangler, Bulletin 112, Iowa State College, 1933.
3. **Design Data 38, Bedding Factors – Trench Installations**, American Concrete Pipe Association, July, 1980.
4. **CP Information No. 12, Lateral Pressures and Bedding Factors**, American Concrete Pipe Association, 1991.
5. **Design Method for Reinforced Concrete Pipe and Box Sections**, F.J. Heger and T.J. McGarth, Simpson, Gumpertz and Heger, American Concrete Pipe Association, 1992.
6. **Concrete Pipe Handbook**, American Concrete Pipe Association, 1988.
7. **Concrete Pipe Design Manual**, American Concrete Pipe Association, 1992.