

NORMA TÉCNICA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO

NDI-SE-AA-016/V1.0

**REQUERIMIENTOS PARA CIMENTACION DE TUBERIAS EN
REDES DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO**



EMCALI

Código	NDI-SE-AA-016
Estado	VIGENTE
Versión	1.0 – 29/04/2022
Fuente	UENAA – EMCALI EICE ESP – DISEÑO
Tipo de Documento	NORMA TÉCNICA DE SERVICIO
Tema	ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO
Comité	TÉCNICO DE APROBACIÓN DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO

Título	REQUERIMIENTOS PARA CIMENTACION DE TUBERIAS EN REDES DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO
---------------	---

ÍNDICE

	Pag.
1. PROLOGO	5
2. OBJETO	6
3. ALCANCE	6
4. DEFINICIONES	6
5. REFERENCIAS NORMATIVAS	8
6. REQUISITOS	10
7. CIMENTACIÓN DE TUBERIAS DE ALCANTARILLADO	11
7.1 TUBERÍAS RÍGIDAS	11
GENERALIDADES	11
7.1.1. CONDICIÓN ZANJA	11
7.1.1.1. EXCAVACIONES Y ANCHOS DE ZANJAS	12
7.1.1.2. CONSIDERACIONES PARA CALCULO DE CARGAS	13
7.1.1.3. CÁLCULO DE CARGA MUERTA O CARGA DE RELLENO	14
7.1.1.4. CALCULO DE CARGA VIVA	15
7.1.1.5. CARGA TOTAL	16
7.1.1.6. TIPOS DE CIMENTACIÓN. FACTORES DE CARGA	16
7.1.1.7. CHEQUEOS DE DISEÑO	17
7.1.2. CONDICIÓN TERRAPLEN	18
7.2. TUBERIAS FLEXIBLES Y SEMIRIGIDAS:	19
GENERALIDADES:	19
7.2.1. EXCAVACIONES Y ANCHOS DE ZANJAS	19
7.2.2. CONSIDERACIONES PARA CÁLCULO DE CARGAS	19
7.2.3. CALCULO DE CARGAS MUERTAS	19
7.2.3.1. TUBERÍA ENTERRADA EN ZANJA ANGOSTA ($B_d < 2B_c$)	20
7.2.3.2. TUBERÍA ENTERRADA EN UNA ZANJA ANCHA ($B_d > 2B_c$)	20
7.2.4. CARGAS VIVAS	21
7.2.5. CHEQUEOS DE DISEÑO	21
7.2.5.1. DEFLEXIONES	22
7.2.5.1.1. FACTOR DE RETARDO DE LA DEFLEXIÓN, D_L	24
7.2.5.1.2. MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE, E'	24
7.2.5.1.3. FACTOR DE SOPORTE, K	25

Pag.

7.2.5.1.4.	RIGIDEZ ESPECÍFICA DEL ANILLO, Sp	26
7.2.5.1.5.	Deflexiones máximas admisibles	26
7.2.5.2.	PANDEO	26
7.2.5.3.	ROTURA DE PARED (Wall crushing)	28
7.2.5.4.	ESFUERZO DE FLEXIÓN EN EL ANILLO (Bending Stress)	29
7.2.5.5.	CARGAS COMBINADAS (Combined Loading)	29
7.2.6.	TIPOS DE CIMENTACIÓN. TUBERIAS FLEXIBLES Y SEMIRRIGIDAS	30
8.	CIMENTACIÓN DE TUBERÍAS DE ACUEDUCTO	31
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
10.	ANEXOS	34

1. PROLOGO

La Unidad Estratégica de Negocios de Acueducto y Alcantarillado - UENAA ha establecido la Oficina de Normalización Técnica para gestionar el desarrollo y la actualización de las normas y especificaciones técnicas a ser utilizadas por el personal de EMCALI, contratistas, consultores, usuarios y otras partes interesadas. La misión principal de la Oficina de Normalización técnica consiste en la normalización de los procesos, productos y servicios, para estar acorde con el estado del arte tecnológico y las exigencias gubernamentales, en beneficio de los diferentes sectores que participan en el desarrollo de la infraestructura del entorno y de la comunidad en general.

La versión final de esta Norma Técnica fue revisada y aprobada a través de los Comités Técnico y de Aprobación y ordenada su Publicación y Cumplimiento conforme a la resolución de Gerencia General de EMCALI EICE ESP No. GG-001255 del 12 de Julio de 2011

2. OBJETO

Definir los criterios para la evaluación de cargas y selección de clases de cimentación para los diferentes tipos de tuberías en los sistemas de acueducto y alcantarillado de EMCALI EICE E.S.P.

3. ALCANCE

Esta norma establece los requisitos para dimensionamiento de cimentación de tuberías en los sistemas de acueducto y alcantarillado, para los diferentes tipos de tubería aprobados por EMCALI EICE E.S.P. y para las diferentes condiciones de instalación utilizando métodos de estado límite de servicio y resistencia última.

La carga que soporta un tubo depende no solo de las condiciones estructurales y específicas del mismo, sino también de la cimentación (base y atraque del tubo, actuando como conjunto) para distribuir apropiadamente la reacción de la tubería, de tal forma que no sea esforzada hasta su capacidad estructural.

En general las cimentaciones de tubería deben ser bien compactadas, con materiales de relleno adecuados que cumplan las especificaciones técnicas establecidas por EMCALI y que garanticen su estabilidad en el largo plazo

4. DEFINICIONES

4.1. ANCHO DE CIMENTACIÓN (Bd)

Ancho de la zanja a la altura de la clave de la tubería.

4.2. DIÁMETRO NOMINAL (DN)

Número con el cual se conoce comúnmente el diámetro de una tubería, aunque su valor no coincida con el diámetro real interno

4.3. DIÁMETRO REAL (DI)

Diámetro interno de una tubería.

4.4. DIÁMETRO EXTERNO (Be)

Diámetro externo de una tubería incluido su espesor.

4.5. DIÁMETRO MEDIO (D)

Corresponde al promedio entre el diámetro real y el diámetro externo.

4.6. ESTADOS LÍMITE

Corresponde a la evaluación de las condiciones predominantes más críticas que puedan presentarse durante la construcción y la vida útil de una estructura teniendo en cuenta el estado límite de falla y el estado límite de servicio.

4.7. ESTADO LÍMITE DE FALLA

Condición de falla y ocurrencia de deformaciones causantes de la pérdida del equilibrio estático o de rotura de la estructura.

4.8. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

Condición límite bajo la cual no se garantiza el comportamiento adecuado de la estructura bajo las cargas de servicio, debido a deformaciones.

4.9. FACTOR DE CARGA

Es la relación entre la carga máxima admisible que soporta la tubería instalada y la carga de rotura, si se utiliza tubería de concreto sin refuerzo, o la carga de grieta, en caso de utilizarse tubería de concreto reforzado. Tanto la carga de rotura como la carga de grieta se obtienen por medio del ensayo de los tres apoyos

4.10. MÉTODO DE LA RESISTENCIA

Método de diseño para estados límites que considera las solicitaciones últimas de una estructura o sistema estructural.

4.11. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Pendiente de la curva esfuerzo-deformación de un material.

4.12. RESISTENCIA ÚLTIMA

Capacidad de una estructura o un elemento para soportar cargas de trabajo antes de la falla.

4.13. TUBO FLEXIBLE

Es un conducto, cuyos cambios por efecto de las cargas externas, pueden hacer variar su dimensión vertical u horizontal hasta un 5% sin causar al material grietas o roturas. Dependen exclusivamente de su resistencia para soportar las cargas externas. Al deformarse bajo las cargas, el diámetro horizontal aumenta comprimiendo el terreno adyacente a los lados y crea, por lo tanto, una resistencia pasiva, que ayuda a soportar las cargas verticales sobre la tubería. Hacen parte de esta categoría las tuberías fabricadas en PVC, acero, GRP y polietileno.

4.14. TUBO RÍGIDO

Conducto cuyos cambios por efecto de cargas externas en cualquier sección transversal, no pueden hacer variar su dimensión vertical u horizontal en más de 0.1% sin causar al material grietas o roturas. Hacen parte de esta categoría las tuberías fabricadas en concreto y gres.

4.15. TUBO SEMIRÍGIDO

Conducto cuyos cambios por efecto de cargas externas en cualquier sección transversal, puede hacer variar su dimensión vertical u horizontal hasta un 3% sin causar al material grietas o roturas. Hacen parte de esta categoría las tuberías fabricadas en hierro dúctil con recubrimiento interno en mortero y las denominadas CCP (Tubería en acero recubierta con concreto centrifugado).

5. REFERENCIAS NORMATIVAS

MINISTERIO DE VIVIENDA CIUDAD Y TERRITORIO - MVCT

- La Resolución 0330 de 2017 expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009”. Versión vigente y sus posteriores actualizaciones.
- Resolución 0501 de 4 de agosto de 2017, expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio – REGLAMENTO TÉCNICO DE TUBERÍAS Y ACCESORIOS “Por la cual se expiden los requisitos técnicos relacionados con composición química e información, que deben cumplir los tubos, ductos y accesorios de acueducto y alcantarillado, los de uso sanitario y los de aguas lluvias, que adquieran las personas prestadoras de los servicios de acueducto y alcantarillado, así como las instalaciones hidrosanitarias al interior de las viviendas y se derogan las Resoluciones 1166 de 2006 y 1127 de 2007”

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

- Standard specification for polyethylene (PE) large diameter profile wall sewer and drain pipe. Philadelphia: ASTM. (ASTM F894).
- Standard specification for type PSM poly (vinyl chloride) (PVC) sewer pipe and fittings. Philadelphia: ASTM. (ASTM D3034).
- Standard test method for determination of external loading characteristics of plastic pipe by parallel-plate loading. Philadelphia: ASTM. (ASTM D2412).

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION.

- Concrete pressure pipe. Denver: AWWA. (AWWA M9).
- Ductile-iron pipe and fittings. Denver: AWWA. (AWWA M41).
- Fiberglass pipe design. Denver: AWWA. (AWWA M45).
- PVC pipe-design and installation. Denver: AWWA. (AWWA M23).
- Steel pipe, a guide for design and installation. (AWWA M11).
- Underground installation of polyvinyl chloride (PVC) pressure pipe and fittings for water. Denver: AWWA. (AWWA C605).

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA.

- Código colombiano de diseño sísmico de puentes. Bogotá: AIS, 1995. (CCDSP-95).
- Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente. Bogotá: AIS, 2010. (NSR-10).

CONGRESO NACIONAL DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA.

- Ley 400 de 1997: Por el cual se adoptan normas sobre construcciones sismo resistentes. Bogotá: Congreso Nacional, 1997.

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE CALI EMCALI EICE E.S.P.

- Excavaciones en zanja EMCALI EICE E.S.P. (NDC-SE-AA-006).
- Protección de tuberías en redes de acueducto y alcantarillado EMCALI EICE E.S.P. (NDC-SE-AA-010).
- Rellenos. EMCALI EICE E.S.P. (NDC-SE-AA-012).
- Requisitos para la elaboración y presentación de estudios geotécnicos EMCALI EICE E.S.P. (NDC-SE-GE-001).
- Tuberías para acueducto EMCALI EICE E.S.P. (NDC-PM-DA-046).
- Tuberías para alcantarillado. EMCALI EICE E.S.P. (NDC-PM-RA-017).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.

- Ingeniería civil y arquitectura. Instalación de tuberías para conducción de aguas sin presión. ICONTEC. (NTC 1259).
- Plásticos. Guía para la selección, diseño e instalación de sistemas de tuberías termoplástico para agua a presión. ICONTEC. (GTC 16).
- Práctica normalizada para la instalación subterránea de tubos termoplásticos de alcantarillado y otras aplicaciones de flujo por gravedad. ICONTEC. (NTC 2795).
- Tubos y accesorios de poli (cloruro de vinilo) (PVC) de perfil abierto con o sin refuerzo. Para uso en alcantarillado. ICONTEC. (NTC 4764).
- Tubos de concreto sin refuerzo para alcantarillado. ICONTEC (NTC 1022).
- Tubos de hormigón reforzado para alcantarillado. ICONTEC (NTC 401).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.

- Plastics piping systems for pressure and non-pressure water supply - Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) systems based on unsaturated polyester (UP) resin (available in English only). Ginebra: ISO. (ISO 10639).

6. REQUISITOS

La selección del tipo de cimentación debe determinarse de acuerdo con los métodos de resistencia última o estados límite de servicio, según sea el caso. Cualquier otro método o combinación de métodos de diseño diferente al indicado en esta norma puede ser permitido siempre y cuando a juicio de EMCALI EICE E.S.P. el diseñador presente evidencia que la alternativa indicada cumple con los propósitos de seguridad, durabilidad, resistencia y economía requeridos por la empresa.

Si EMCALI EICE E.S.P. para algún proyecto en particular lo requiere, el diseñador debe evaluar y presentar el diseño de la cimentación con su respectivo análisis económico. Del trabajo de diseño debe presentarse una memoria de cálculo que contenga sin excepción todas las consideraciones exigidas en la presente norma.

La responsabilidad de los diseños para las cimentaciones de tuberías, así como la adopción de todas las medidas necesarias para el cumplimiento de ellos corre por cuenta del diseñador o ejecutor de la obra.

Todos los sistemas de tuberías para acueductos y alcantarillados deben resistir los sismos de diseño. En el diseño sísmico deben utilizarse todas las disposiciones aplicables en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (**NSR-10**), encargado de regular las condiciones con las que deben contar las construcciones con el fin de que la respuesta estructural a un sismo sea favorable, la "Ley 400 de 1997" y el "Decreto 34 de 1999", o los decretos que lo complementen o lo reemplacen.

Las normas de EMCALI EICE E.S.P. que deben ser consultadas y utilizadas de forma paralela a esta norma son "NDC-SE-GE-001 Requisitos para la elaboración y presentación de estudios geotécnicos", "NDI-SE-AA-018 Criterios para selección de materiales de tuberías para redes de acueducto y alcantarillado" y "NDC-SE-AA-010 Protección de tuberías en redes de acueducto y alcantarillado".

Las Normas presentes son de rigor, tanto para los proyectistas particulares de sistemas de Acueducto y Alcantarillado para Urbanizaciones, para diseños propios elaborados al interior de EMCALI EICE ESP, para los Consultores contratados por EMCALI, como para los funcionarios de entidades oficiales que tengan a su cargo la elaboración de proyectos, siempre y cuando no contradigan el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básicos RAS – vigente.

Las cimentaciones para los sistemas de alcantarillado dependen de las características físicas y mecánicas de las tuberías, ya sean rígidas o flexibles.

En el caso de los sistemas de acueducto las tuberías utilizadas pueden ser clasificadas como flexibles o semirrígidas.

Para los cálculos de los diseños de cimentación de tuberías, las memorias deben incluir como mínimo:

- El estudio geotécnico ajustado a la Norma de EMCALI NDC-SE-GE-001 Requisitos para la elaboración y presentación de estudios geotécnicos"
- Determinación de la totalidad de las cargas (muertas y vivas) actuantes.
- Verificación de cada una de las condiciones límite de diseño.
- Especificación de los Materiales de relleno requeridos para cada una de la zona de cimentación.
- En los casos que aplique, especificación de los geotextiles a utilizar.

7. CIMENTACIÓN DE TUBERIAS DE ALCANTARILLADO

7.1 TUBERÍAS RÍGIDAS

GENERALIDADES

En tuberías rígidas, el cálculo y selección del tipo de cimentación está en función del soporte de las cargas actuantes sobre la tubería y del control de la carga de fisura de la tubería empleada.

Toda tubería enterrada se encuentra bajo una de estas dos condiciones:

- Condición de zanja
- Condición de terraplén

Estas dos condiciones se muestran en el Anexo No1, donde:

W: Peso del relleno sobre la tubería

Wc: Peso transmitido a la tubería por unidad de longitud

En condición de zanja Wc es una fracción de W y en algunos casos su valor se reduce a W/2.

En condición de terraplén Wc es mayor que W y en algunos casos se aumenta hasta 1.5 W.

De lo anterior se deduce que en condición de zanja la carga transmitida a la tubería por unidad de longitud (kg/ml, lb/ft, etc.) puede llegar a ser tres (3) veces menor que en condición de terraplén lo que se traduce en una cimentación menos exigente y en la necesidad de tuberías de menor resistencia al aplastamiento y por consiguiente de menor costo.

Ya que las condiciones de zanja y terraplén dependen exclusivamente del ancho de la zanja y que la “condición zanja” es la óptima forma para instalar las tuberías, se debe tener especial cuidado en no sobrepasar en la obra los anchos máximos de excavaciones que se especifican más adelante para esta condición, pues al hacerlo, se pasa a la condición terraplén, sobrecargando una tubería que no ha sido diseñada para resistir tal sobrecarga.

7.1.1. CONDICIÓN ZANJA

La condición zanja se presenta cuando el ancho de la excavación medido a nivel de la corona de la tubería, es menor que el ancho entre los planos de transición dado por la siguiente ecuación:

$$Apt = \left(\frac{C_c}{C_d} \right)^{0,50} * B_c$$

Donde:

Apt: Ancho entre planos de transición en m.

Bc: Diámetro exterior de la tubería en m.

C_c: Coeficiente de Marston para condición de terraplén, proyección positiva. Depende de la profundidad a la que se va a instalar la tubería.

C_d: Coeficiente de Marston para condición de zanja.

Para la determinación de C_c, en el Anexo No. 2, se entra con la relación $\frac{H}{B_c}$ y $rsd * \rho$

En donde:

rsd: Relación de asentamiento; $\rho = \frac{H}{B_c}$, donde:

H: Es la distancia vertical entre la parte superior de la tubería y el terreno natural donde se asienta el material de cimentación o el tubo, dependiendo del tipo de cimentación.

rsd= +1.0 para tuberías a instalarse sobre roca o terrenos muy firmes.

rsd= Entre +0.5 y +0.8 para tubería a instalarse en terrenos ordinarios.

rsd= Entre 0 y 0.5 para tuberías a instalarse en terrenos compresibles.

7.1.1.1. EXCAVACIONES Y ANCHOS DE ZANJAS

Los anchos de zanjas para tuberías rígidas, permitidos para cada diámetro y que cumplen con la “condición zanja”, se muestran en la Tabla No. 1.

Cuando por cualquier circunstancia se requieren anchos de zanja mayores que los especificados, deberán contar con la aprobación por escrito de la Interventoría.

La Gerencia de Acueducto y Alcantarillado no reconocerá sobreamchos no autorizados.

Tabla No. 1: Anchos de zanja Tubería rígida

Diámetro		Ancho máximo B _d (m)	Diámetro		Ancho máximo B _d (m)	Diámetro		Ancho máximo B _d (m)
6"	150 mm.	0.60	28"	700 mm.	1.35	1.50 m.	1500 mm.	2.20
8"	200 mm.	0.70	30"	750 mm.	1.40	1.60 m.	1600 mm.	2.35
10"	250 mm.	0.75	32"	800 mm.	1.45	1.70 m.	1700 mm.	2.45
12"	300 mm.	0.80	33"	825 mm.	1.48	1.80 m.	1800 mm.	2.60
14"	350 mm.	0.85	36"	900 mm.	1.50	1.90 m.	1900 mm.	2.70
16"	400 mm.	0.90	1.00 m.	1000 mm.	1.65	2.00 m.	2000 mm.	2.80
18"	450 mm.	0.95	1.10 m	1100 mm.	1.75	2.15 m.	2150 mm.	3.00
20"	500 mm.	1.05	1.20 m.	1200 mm.	1.90	2.30 m.	2300 mm.	3.15
24"	600 mm.	1.15	1.30 m.	1300 mm.	2.00	2.45 m.	2450 mm.	3.35
27"	675 mm.	1.30	1.40 m.	1400 mm.	2.10	2.60 m.	2600 mm.	3.50

7.1.1.2. CONSIDERACIONES PARA CALCULO DE CARGAS

Condiciones generales:

H: Altura de rellenos sobre el lomo de la tubería.

Considerando la altura de relleno (H) para la evaluación de la carga sobre la tubería, se tiene las siguientes condiciones:

- **Para $H \geq 3.00$ metros:** Se desprecia la carga viva y se diseña con carga muerta.
- **Para $1.80 < H < 3.00$ metros:** Se considera carga viva, carga muerta y se desprecia el coeficiente de impacto.
- **Para $0.60 < H \leq 1.80$ metros:** Se considera carga viva, carga muerta y el coeficiente de impacto para vías sin pavimentar. Condición que se presenta durante la instalación de la tubería y en el proceso de pavimentación (Ver tabla No. 2).

Tabla No. 2: Coeficiente de impacto

H _{relleno} (metros)	Coeficiente de impacto
$0.00 < H \leq 0.60$	1.50
$0.60 < H \leq 0.90$	1.43
$0.90 < H \leq 1.05$	1.38
$1.05 < H \leq 1.20$	1.30
$1.20 < H \leq 1.35$	1.23
$1.35 < H \leq 1.50$	1.17
$1.50 < H \leq 1.65$	1.10
$1.65 < H \leq 1.80$	1.04
$H > 1.80$	1.00

A partir de $H = 2.00$ m de altura de relleno sobre la corona de tubería, cada metro ó fracción de profundidad adicional, los anchos indicados pueden aumentarse así:

- Para diámetros hasta 30": 0.10 m
- Para diámetros mayores de 30": 0.20 m

NOTA 1: Para alturas de relleno sobre la tubería menores de 0.60 m se considerará la carga viva aplicada directamente sobre el tubo. En estos casos se debe recubrir la tubería. Ver NORMA ICONTEC 1259.

NOTA 2: Casos más críticos de terrenos deleznablez deben conservar estos anchos de zanja hasta mínimo 0.30 m por encima del lomo de la tubería.

Si esto no puede ser posible, debe calcularse la cimentación y clase de tubería en condición de terraplén, para cuyos cálculos deben referirse a la bibliografía.

NOTA 3: En los casos que, durante la ejecución de las obras, no se puede garantizar los anchos de la Condición Zanja, debe presentarse para aprobación de la Interventoría de EMCALI, el nuevo cálculo y rediseño de la cimentación o la modificación de la Clase de tubería

7.1.1.3. CÁLCULO DE CARGA MUERTA O CARGA DE RELLENO

Se calcula mediante la fórmula de Marston, así:

$$W_c = C_d * W * B_d^2 \text{ (Marston)}$$

Donde:

H: Altura de relleno sobre el lomo de la tubería en metros.

B_d: Ancho de zanja en metros.

W: Peso unitario del material de relleno en kg/m³.

C_d: Coeficiente para la fórmula de Marston, depende de las propiedades del suelo.

W_c: Carga muerta sobre la tubería en kilonewtons (kN) por metro lineal.

PROCEDIMIENTO:

C_d se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$C_d = \frac{1 - e^{\left[-2 \cdot K \cdot u' \left(\frac{H}{B_d}\right)\right]}}{2 \cdot K \cdot u},$$

Donde:

K: Relación de Rankine entre la presión activa lateral y la presión vertical del terreno (adimensional)

u: Coeficiente de fricción interna del material de la zanja.

u': Coeficiente de fricción entre el material de relleno y la pared de la zanja.

H: Altura de relleno sobre la corona de la tubería.

$$K = \frac{(u^2 - 1)^{1/2} - u}{(u^2 + 1)^{1/2} - u} = \frac{1 - \text{sen}\theta}{1 + \text{sen}\theta} = \tan^2\left(45 - \frac{\theta}{2}\right)$$

Donde $u = \tan\theta$

Considerando que el material de relleno y el material de la zanja regularmente son similares se tiene:

θ = Angulo de fricción interna del material.

$u = u'$, de donde Ku' y Ku son iguales (Estimando que no hay mucha diferencia entre el material de la excavación y el material de relleno).

Teniendo en cuenta que los pesos del material de relleno (W) pueden variar entre 1.600 kg/m³ y 2.100 kg/m³, en la Tabla No. 3 se presentan valores para Ku.

Tabla No. 3. Valores para Ku según tipo de suelo

Tipo de suelo	W (kg/m ³)	Ku = Ku'
Material granular sin cohesión	1600	0.1924
mezcla de arena y gravilla	1950	0.1650
Limo saturado	1800	1.5000
Arcilla seca	1800	0.1300
Arcilla saturada	2100	0.1100

7.1.1.4. CALCULO DE CARGA VIVA

Para el cálculo de carga viva puede usarse la solución dada por HOLL a la ecuación de Boussinesq.

$$W_v = C_s * \left(\frac{P * F}{L} \right)$$

Donde:

W_v: Carga viva (kg/ml)

P: Carga concentrada (kg)

F: factor impacto

L: Longitud de tramo (1 metro)

C_s: coeficiente de carga adimensional. Depende de la altura de relleno, el diámetro y de la longitud de la tubería a analizar.

$$C_s = 1 - \frac{2}{\pi} \left\{ \text{ARCSEN} \left[H \left(\frac{A^2 + B^2 + H^2}{(A^2 + H^2)(B^2 + H^2)} \right)^{0.5} \right] - \frac{ABH}{(A^2 + B^2 + H^2)^{0.5}} \left(\frac{1}{A^2 + H^2} + \frac{1}{B^2 + H^2} \right) \right\}$$

Donde:

H: Altura de relleno sobre la tubería.

A: 0.5m (es la mitad de la longitud del tramo a analizar, en este caso un metro lineal).

B: Radio exterior de la tubería (D ext/2)

Para la determinación de las cargas vivas en vías vehiculares debe tenerse en cuenta las indicaciones del "CCDSP-95 Código colombiano de diseño sísmico de puentes" del Ministerio de transporte donde se indica que el camión de diseño es el C4095 el cual aplica una carga de 7.500 kg en un área de (0.50m x 0.25m). El área de aplicación de la carga se observa el Anexo No. 3.

Sin embargo, en el proceso de instalación de la tubería y durante la construcción del pavimento, las cargas vivas a las que se somete la tubería son muy fuertes debido al cajeo y a los equipos usados, por lo que siempre se deberá considerar carga viva para profundidades de instalación de la tubería menores o iguales a 3.00m, independientemente del tipo de pavimento a usarse.

Para otro tipo de vías (peatonales, zonas verdes), se evaluará el tipo de tráfico.

Para tuberías a instalar en cruces ferroviarios (cargas vivas de ferrocarriles), o en zonas de aeropuertos (cargas vivas de aviones) se deberán adelantar los cálculos específicos para esas condiciones.

7.1.1.5. CARGA TOTAL

La Carga total que soportará la tubería es igual a la sumatoria de la carga muerta más la carga viva, (calculadas en los numerales 7.1.1.4. y 7.1.1.5.)

$$W_T = W_c + W_v$$

7.1.1.6. TIPOS DE CIMENTACIÓN. FACTORES DE CARGA

La capacidad de soporte de cargas exteriores depende en manera muy importante de la forma en que se instale la tubería y del tipo de cimentación.

Aunque las formas de instalación y los correspondientes factores de carga en cada caso han sido clasificados en formas diversas por distintas entidades, se pueden distinguir en general cuatro (4) clase de estructuras, que se denominan Clase A, Clase B, Clase C y Clase D, para cimentación de tuberías rígidas

La Tabla No. 4 relaciona los diferentes Tipos de cimentación aceptados por EMCALI para tuberías rígidas, los cuales se ilustran en las Anexos No 4 y 5

Tabla No. 4. Tipos de cimentación y Factores de carga

Clase de Cimentación	Factor de Carga
Cimentación Tipo A	3.4
Cimentación Tipo B	1.9
Cimentación Tipo C	1.5
Cimentación Tipo D	2.2.

Se podrán diseñar y presentar para aprobación de EMCALI cimentaciones con Factores de carga diferentes a los relacionados en la Tabla No. 4, siempre y cuando estén debidamente soportados y calculados. En ningún caso se aceptarán cimentaciones con Factor de Carga menor a 1.5.

Las siguientes consideraciones deberán ser tenidas en cuenta en el diseño y en la ejecución de las cimentaciones de tuberías rígidas:

- No debe haber agua ni lodos en el fondo de la excavación al colocar el material de cimentación.
- Cuando el estudio geotécnico determine que el terreno del fondo de la excavación es de mala calidad, se deberá efectuar su reemplazo por material granular en el espesor y especificaciones que recomiende el estudio geotécnico realizado para el proyecto.
- Cuando el estudio geotécnico determine que el Nivel freático se localiza por encima del fondo de la excavación, encapsular el triturado de la cimentación con geotextil NT, con las especificaciones que recomiende el estudio geotécnico realizado para el proyecto.

- El material importado seleccionado debe cumplir las siguientes especificaciones mínimas:
 - T. Máximo: 1 ½"
 - I.P. del material pasa 40 < 20%.
 - L.L. < 45%.
 - CBR > 5%.
 - Contenido material orgánico <1%.
 - Pasa 200 <35%.
 - No expansivo.
- Material seleccionado de la excavación
 - a) En vías vehiculares
 - I.P. del material pasa 40 < 20%
 - L.L. < 45%
 - Debe estar libre de materia orgánica, sobrantes de construcción, palos, plásticos, etc.
 - De no cumplir estas características se debe usar material importado T. Máximo: 2"
 - b) En andenes, vías peatonales, corredor de gradas se acepta:
 - I.P. del material pasa 40 < 45%
 - L.L. < 70%
- Los materiales de la estructura de la vía deben cumplir con las Normas INVIAS E-320 (Subbase) y E-330 (Base).
- Para profundidades a clave menor a 0.80 m (permitido solo en casos de reposición de redes) para diámetros menores o iguales a 20" usar tubería de concreto de alta resistencia.
- Para tuberías de diámetros mayores a 20", recubrir la tubería en los espesores que determine el diseño (Mínimo 0.10 m). El diseñador evaluará la necesidad o no de usar refuerzo en el recubrimiento.

Las anteriores especificaciones se complementan con los requisitos indicados en la norma de EMCALI EICE E.S.P. "NDC-SE-AA-012 Rellenos".

7.1.1.7. CHEQUEOS DE DISEÑO

En el diseño de cimentación para tuberías rígidas debe cumplirse la siguiente relación:

$$Carga\ máxima\ actuante \leq \frac{Carga\ de\ rotura\ 3\ apoyos * Factor\ de\ carga}{FS}$$

El Factor de carga corresponde al tipo de cimentación seleccionado.

Donde para tuberías no reforzadas se tiene:

- Carga de rotura método de los tres apoyos para tuberías no reforzadas corresponde a la Resistencia última. En la tabla 1 de la Norma NTC1022 (Sexta actualización) se relacionan los valores de estas resistencias.

- El factor de seguridad FS a utilizar para las tuberías no reforzadas, por corresponder la carga de rotura a la resistencia ultima, es de 1.5.

Para tuberías de concreto reforzado se tiene:

- Carga de rotura método de los tres apoyos para tuberías de concreto reforzado corresponde a la carga que produce en cada clase de tubería el agrietamiento de 0.3 mm (0.01"). Estos valores, en función del diámetro de la tubería, se indican en las Normas NTC 401 y en la ASTM C 497. Ver tabla No. 5.

Tabla No. 5. Resistencia al agrietamiento (grieta 0.3 mm) en tuberías concreto reforzado

Clase de Tubería	Resistencia en Kg/m por metro de diámetro
CLASE I	3.900
CLASE II	4.900
CLASE III	6.600
CLASE IV	9.800
CLASE V	14.600.

NOTA 1: La carga de rotura de los tres apoyos se obtiene multiplicando el valor de la resistencia al agrietamiento por el diámetro nominal de la tubería.

NOTA 2: Los valores de resistencia al agrietamiento en N/ m por metro de diámetro, consignados en algunas de las Normas referidas se encuentran redondeados.

El factor de seguridad FS a utilizar para las tuberías de concreto reforzado, por corresponder la carga de agrietamiento o fisuración inicial, es de 1.0. Por tanto, el chequeo de la cimentación debe cumplir con la siguiente expresión:

$$\text{Factor de carga de cimentación} \geq \frac{\text{Carga total actuante} * FS}{\text{Carga de rotura de 3 apoyos}}$$

7.1.2. CONDICIÓN TERRAPLEN

La condición terraplén se presenta cuando el ancho de la zanja supera el ancho de transición, ocasionando que la fricción lateral de la pared de la zanja no afecte la carga actuante sobre la tubería o en los casos en que la superficie final del terreno deba quedar por encima del terreno natural y es necesario construir un terraplén hasta alcanzar el nivel previsto.

Se consideran dos situaciones que son: la instalación en terraplenes con proyección positiva (las tuberías son instaladas sobre una cama panda, con el lomo del tubo por encima de la rasante natural y luego cubiertas con material de relleno) y la instalación en terraplenes con proyección negativa (las tuberías son instaladas por debajo de la rasante natural y luego cubiertas con material de relleno de una altura muy superior a la profundidad de la zanja).

Como se mencionó previamente, para EMCALI EICE ESP la condición zanja es la condición óptima para la instalación de las tuberías rígidas.

La condición terraplén solo será admitida en las situaciones de obra que no se puedan controlar los anchos de excavación. En esos casos la cimentación y/ o la clase de tubería deberán ser rediseñados.

Para el diseño de cimentaciones en condición terraplén, referirse a la bibliografía existente.

7.2. TUBERIAS FLEXIBLES Y SEMIRIGIDAS:

GENERALIDADES:

En tuberías flexibles y semirrígidas rígidas, el cálculo y selección del tipo de cimentación está en función del soporte de las cargas actuantes sobre la tubería y del control básico de las deflexiones de la tubería. Adicionalmente se deben controlar el pandeo, el agrietamiento o rotura de pared y la flexión en el anillo.

7.2.1. EXCAVACIONES Y ANCHOS DE ZANJAS

Los anchos de zanjas para tuberías flexibles y semirrígidas, permitidos por EMCALI para cada diámetro se muestran en la Tabla No. 6. Estos anchos de zanja han sido determinados básicamente con criterios constructivos.

Cuando por cualquier circunstancia se requieran anchos de zanja mayores que los especificados, se deberá contar con la aprobación por escrito de la Interventoría o Supervisión de EMCALI EICE ESP.

Tabla No. 6. Anchos de zanja. Tuberías flexibles y semirrígidas

Diámetro Nominal		Ancho de Zanja B_d (m)
(6")	150 mm.	0.60
(8")	200 mm.	0.60
(10")	250 mm.	0.65
(12")	315 mm.	0.70
(14")	350 mm.	0.75
(16")	400 mm.	0.80
(18")	450 mm.	0.85
(20")	500 mm.	0.90
(24")		1.05
(27")		1.15
(30")		1.20
(33")		1.25
(36")		1.35
(39")		1.45
(42")		1.50

7.2.2. CONSIDERACIONES PARA CÁLCULO DE CARGAS

Para el cálculo de cargas en cimentación de tuberías semirrígidas y flexibles, aplican las mismas determinadas para tuberías rígidas indicadas en el numeral 7.1.1.2.

7.2.3. CALCULO DE CARGAS MUERTAS

Análogo al caso de tuberías rígidas, para la determinación de las cargas muertas en tuberías flexibles y semirrígidas, debe utilizarse la ecuación de la teoría de Marston; teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

7.2.3.1. TUBERÍA ENTERRADA EN ZANJA ANGOSTA ($B_d < 2B_c$)

La carga muerta debe ser calculada como:

$$W_d = C_d \gamma B_d^2 \left(\frac{B_c}{B_d} \right)$$

Donde

W_d : Carga muerta sobre la tubería (kN/m).

C_d : Coeficiente adimensional de carga basado en H_c/B_d , donde H_c es la altura del relleno sobre la clave de la tubería, B_d ancho de la zanja, así como también del coeficiente de fricción entre el relleno y las paredes de la zanja (μ).

γ : Peso unitario del material de relleno (kN/m³).

B_d : Ancho de la zanja en la clave de la tubería (m).

B_c : Diámetro externo de la tubería (m).

El coeficiente adimensional de carga C_d se determina de acuerdo con la siguiente fórmula

$$C_d = \frac{1 - e^{-2k\mu\frac{H_c}{B_d}}}{2k\mu}$$

Donde:

k : relación de Rankine, entre la presión lateral unitaria y la presión vertical unitaria.

μ : coeficiente de fricción deslizante entre los lados de la zanja y el material del relleno ($\tan\phi$)

e : base de los logaritmos naturales

H_c : altura del material de relleno sobre la cota clave de la tubería

El valor de k puede calcularse como:

$$k = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

$$\mu = \tan \phi$$

Donde

ϕ : ángulo de fricción de terreno

7.2.3.2. TUBERÍA ENTERRADA EN UNA ZANJA ANCHA ($B_d > 2B_c$)

La carga muerta debe ser calculada como

$$W_d = C_c \gamma B_c$$

Donde:

Wd: Carga muerta sobre la tubería (kN/m)

Cc: Coeficiente que es función de las propiedades de los suelos

γ : Peso unitario del material de relleno (kN/m³)

Bc: Diámetro externo de la tubería (m).

7.2.4. CARGAS VIVAS

Las cargas vivas para el cálculo de la cimentación de tuberías flexibles y semirrígidas se determinan usando la solución dada por HOLL a la ecuación de Boussinesq, tal como se indica en el numeral 7.1.1.4.

7.2.5. CHEQUEOS DE DISEÑO

En el diseño de cimentación para tuberías flexibles y semirrígidas dependiendo de la clase del material de la tubería y de su rigidez, se deben efectuar como mínimo los siguientes chequeos de condiciones límite, indicados en la Tabla No. 7.

Las características físicas de los materiales deben ser consultadas por el diseñador a los fabricantes de los diferentes tipos de tuberías quienes a su vez deben especificar las deflexiones admisibles, los esfuerzos críticos de colapso y de pandeo en las paredes de los tubos que fabrican, valores que dependen de los efectos de restricción de la estructura de suelo alrededor del tubo y de las propiedades de la pared del mismo, y de los esfuerzos o deformaciones que producen agrietamientos, fisuración, laminación y en general cualquier efecto que cambie la apariencia y el comportamiento del material degradándolo con respecto a la situación original.

Igualmente, el fabricante debe proporcionar información referente a las deflexiones a largo plazo para diferentes condiciones de instalación, de manera que el diseñador verifique que la tubería a instalar no presenta problemas por este factor.

Los valores de estos parámetros, adoptados en los cálculos, deben soportarse y presentarse a EMCALI para su validación y aprobación.

Tabla No 7. Condiciones Límite. Tuberías flexibles y semirrígidas

MATERIAL DE TUBERÍA	CLASIFICACIÓN POR RIGIDEZ	DEFLEXIÓN (Deflection)	PANDEO (Wall Buckling)	ROTURA DE PARED (Wall Crushing)	FLEXIÓN (Bending Stress)	CARGAS COMBINADAS (Combined Loading)
Cloruro de Polivinilo, PVC	Flexible	x	x	x		
Poliéster reforzado con fibra de vidrio, GRP		x	x			x
Polietileno, PE		x	x			
Acero, SP		x	x			

Hierro dúctil, HD		x			x	
Concreto reforzado, tipo cilindro de acero con refuerzo de varilla, CCP	Semirrígida	x				

7.2.5.1. DEFLEXIONES

La deflexión horizontal que ocurre en una sección transversal de una tubería flexible al estar sometida a una carga vertical por unidad de longitud debe ser menor a la citada en este numeral (de acuerdo con el tipo de material) y puede estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta_y}{B_c} = \frac{D_L K W}{\frac{8EI}{B_c^3} + 0.06E'} * 100$$

Donde:

Δ_y/B_c : Porcentaje de deflexión de la tubería.

B_c : Diámetro exterior (mm).

Δ_y : Deflexión (m).

D_L : Factor de retardo de la deflexión.

K : Factor de soporte.

W : Carga por unidad de longitud de la tubería (N/m de tubería). (Carga muerta + carga viva).

EI : Rigidez de la pared de la tubería.

E : Módulo de elasticidad del material de la tubería (MPa).

I : Momento de inercia polar de la sección transversal de la pared del tubo (m⁴/m).

E' : Módulo de reacción de la subrasante (MPa).

La deflexión también puede ser calculada con una de las siguientes expresiones:

A.

$$\% \frac{\Delta_y}{B_c} = \frac{D_L K P (100)}{0.149 P S + 0.061 E'} ; \Delta D = \frac{\Delta_x}{B_c} = \frac{D_L K P}{8 S_p + 0.061 E'}$$

Donde:

P : Carga total aplicada sobre el suelo (psi). (Carga viva + Carga muerta).

La carga total (W) determinada en el numeral 7.1.1.5. debe ser afectada por la longitud (L) de la tubería determinada como $L (m) = 0.50 + 1.75H_c$ (ver **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, figura 2).

- $\%(\Delta_y/B_c)$: Porcentaje de deflexión de la tubería.
- D_L : Factor de retardo de la deflexión.
- K: Factor de soporte.
- PS: Rigidez de la tubería (lbf/pulg²).
- E': Módulo de reacción de la subrasante (psi).
- S_p : Rigidez específica del anillo, (suministrada por el fabricante, según norma NTC 4764).

B.

$$\% \frac{\Delta_y}{B_c} = \frac{D_L K P (100)}{[2E/3(RDE + 1)^3] + 0.061E'}$$

Donde

- P: Carga total aplicada sobre el suelo (psi). (Carga viva+ Carga muerta).

La carga total determinada en el numeral 7.1.1.5 debe ser afectada por la longitud efectiva de soporte de la tubería.

- $\%(\Delta_y/B_c)$: Porcentaje de deflexión de la tubería.
- D_L : Factor de retardo de la deflexión.
- K: Factor de soporte.
- E: Módulo de elasticidad del material de la tubería (psi).
- E': Módulo de reacción de la subrasante (psi).
- RDE: Relación diámetro espesor.

LONGITUD EFECTIVA DE SOPORTE DE LA TUBERÍA

La longitud efectiva de soporte de la tubería debe ser calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$L_e = L + 1.75 \left(\frac{3B_c}{4} \right)$$

Donde:

L = Longitud de ALL, paralelo al eje longitudinal de la tubería (m)

Bc = Diámetro externo de la tubería (m)

7.2.5.1.1. FACTOR DE RETARDO DE LA DEFLEXIÓN, D_L

El factor de retardo de la deflexión está relacionado con la deflexión adicional que ocurre a medida que el suelo que circunda la tubería se compacta o consolida, varía entre 1.0 y 1.5 (Tabla No. 8).

Tabla No. 8. Valores del parámetro D_L

Material	Sigla	D _L
Poliéster reforzado con fibra de vidrio (Glass-fiber Reinforced Pipe)	GRP	1.5
Cloruro de polivinilo (Polyvinyl chloride)	PVC	1.5
Hierro dúctil (Ductile-Iron Pipe)	HD	1.0
Acero (Steel Pipe)	SP	1.0
Concreto cilindro de acero (Concrete Cylinder Pipe)	CCP	1.0
Polietileno (Polyethylene)	PE	1.5

7.2.5.1.2. MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE, E'

El módulo de reacción de la subrasante, E', Es una medida de la rigidez del material donde se instalará la tubería, el cual debe ser calculado a partir de la relación de los módulos de elasticidad de los materiales de relleno empleados para la cimentación y el material del terreno natural. El valor del módulo de elasticidad para la cimentación y para el material del relleno natural debe ser consultado en el estudio geotécnico respectivo o ser indicado por el diseñador con su debida justificación en el caso que el proyecto no cuente con dicho estudio.

Para efectos prácticos, El módulo de reacción se puede estimar a partir de la Tabla No. 9.

También puede calcularse a partir del módulo de Young, E_s y de la relación de Poisson del suelo ν, mediante la siguiente ecuación:

$$M_s = \frac{E_s(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

Donde:

M_s: Módulo confinado del suelo (MPa)

Es: Módulo de Young (MPa).

ν : Relación de Poisson

En cualquier caso, la determinación del módulo de reacción de la subrasante, E' , debe quedar plenamente sustentada y justificada por el ingeniero geotecnista.

Tabla No. 9. Módulo de reacción de la subrasante, E' (MPa) (5)

Tipo de Suelo (Sistema de Clasificación Unificada)	E' según el grado de compactación del material de soporte (1) en, (MPa)			
	Suelto	Bajo < 85% Próctor < 40% densidad relativa	Moderado 85%-95%Próctor 40%-70% densidad relativa	Alto >95% Próctor >70% densidad relativa
Suelos Finos (LL>50). Suelos con plasticidad media a alta CH, MH, CH-MH	Consultar ingeniero geotecnista o en su defecto utilizar $E'=0$			
- Suelos Finos (LL<50). Suelos sin plasticidad o con plasticidad media con menos del 25% de partículas gruesas. CL, ML, ML-CL	0,35	1,4	2,8	6,9
- Suelos Finos (LL<50). Suelos sin plasticidad o con plasticidad media con más del 25% de partículas gruesas. CL, ML, ML-CL	0,7	2,8	6,9	13,8
- Suelos gruesos con finos GM, GC, SM, SC (2), contenidos de finos de más del 12%.				
- Suelos gruesos sin partículas finas o muy pocos finos. GW, GP, SW, SP (2) con menos del 12% de finos	1,4	6,9	13,8	20,7
Roca Triturada	7	20,7	20,7	20,7
Precisión en términos del porcentaje de la deflexión (3)	± 2	± 2	± 1	± 0,5
NOTAS (1) Según norma ASTM D 2487 o la norma NTC correspondiente. (2) O cualquier suelo en la línea límite que inicie con cualquiera de estos símbolos. (3) Para una precisión del ±1% y una deflexión estimada del 3%, la deflexión real estaría entre 2% y 4%. (4) Los valores son aplicables sólo para rellenos de menos de 15m. La tabla no incluye ningún factor de seguridad. Sólo para estimar deflexiones iniciales. Para deflexiones a largo plazo debe aplicarse el factor de retardo correspondiente. Cuando se esté en el límite entre dos categorías de compactación se debe tomar el menor valor de E' o promediar los dos valores.				

7.2.5.1.3. FACTOR DE SOPORTE, K

Los valores del factor de soporte de acuerdo con el ángulo del perímetro interior soportado de la tubería se indican en la Tabla No. 10.

Tabla No. 10. Valores para el factor de soporte K (Cont.)

ÁNGULO DEL PERÍMETRO INTERIOR SOPORTADO DE LA TUBERÍA EN (°)	K
0	0.110
30	0.108
45	0.105
60	0.102
90	0.096

120	0.090
180	0.083
Nota: 1° = 0.017 rad	-

7.2.5.1.4. RIGIDEZ ESPECÍFICA DEL ANILLO, Sp

El valor de Sp debe obtenerse utilizando la expresión que se adapte a las dimensiones y/o propiedades conocidas del tubo. Si dentro de las expresiones se involucra el módulo de elasticidad, debe adoptarse el de la Tabla No. 11 o justificarse la utilización de uno diferente:

Tabla No. 11. Valores de Rigidez de Tuberías

Material	E (KN/m ²)	E (psi)
CCP - Concreto cilíndrico de acero	27.579.029	4.000.000
HD - Hierro dúctil	170.000.000	24.656.415
PVC - Cloruro de polivinilo	2.757.903	400.000
SP - Acero	206.842.719	30.000.000
PE - Polietileno	882.599	128.054

7.2.5.1.5. Deflexiones máximas admisibles

El porcentaje de deflexión máxima admisible a largo plazo (Δ_y/B_c adm) para cada tipo de tubería se indica en la Tabla No. 12:

Tabla No 11 Valores de deflexiones máximas admisibles

TIPO DE TUBERIA	DEFLEXION MÁXIMA
Tubería de PVC ("ASTM D3034")	7.5%
Tubería de hierro dúctil ("AWWA M41")	3.0%
Tubería de polietileno ("ASTM F894")	7.5%
Tubería de GRP ("AWWA M45")	5.0%
Tubería de acero con recubrimiento en mortero ("AWWA M11")	2.0%
Tubería de acero con recubrimiento en mortero y revestimiento flexible ("AWWA M11") 3.0%	3.0%
Tubería de acero con revestimiento flexible ("AWWA M11")	5.0%

7.2.5.2. PANDEO

Una tubería enterrada en el suelo puede colapsar o presentar pandeo por inestabilidad elástica como resultado de las cargas que actúan sobre ella y de las deformaciones que sufre. Las presiones resultantes de la sumatoria de cargas externas deben ser menores o iguales que la presión admisible de pandeo.

$$q_{ext} \leq q_a$$

Las presiones externas actuantes, q_{ext} , pueden determinarse mediante la peor condición resultante de las ecuaciones siguientes:

$$q_{ext} = \gamma_w h_w + \frac{R_w W_d}{D} + \frac{W_l}{D}$$

$$q_{ext} = \gamma_w h_w + R_w \frac{W_d}{D} + P_v$$

El factor de flotación del agua es igual a $R_w = 1 - 0.33 \frac{h_w}{H}$; $0 \leq h_w \leq H$

Donde h_w = Altura de la superficie de agua por encima de la corona de la tubería (m).

La presión interna de vacío P_v = presión atmosférica - presión absoluta dentro del tubo.

Cuando se presenten cargas extremas como son las debidas a tránsito especial como equipos de construcción o similar, pueden utilizarse los métodos tradicionales de solución elástica para cargas concentradas o distribuidas e incluir el efecto de la carga en la fórmula de presiones externas actuantes.

La presión admisible de pandeo debe ser determinada por la siguiente ecuación:

$$q_a = \left(\frac{1}{FS}\right) \left(32R_w B' E' \frac{EI}{D^3}\right)^{1/2}; \text{ o; } q_a = \left(\frac{1}{FS_q}\right) (32R_w B' E' S_p)^{1/2}$$

Donde:

q_a : Presión admisible de pandeo (Pa).

FS: Factor de seguridad.

R_w : Factor de flotación del agua.

B' : Coeficiente empírico de soporte elástico.

E' : Modulo de reacción de la subrasante (Pa).

D : Diámetro nominal de la tubería (m).

Donde:

- **Factor de seguridad**

FS_q : Factor de seguridad.

$$FS_q = 2.5; \text{ si } H/B_c \geq 2$$

$$FS_q = 3.0; \text{ si } H/B_c < 2$$

En que:

H: Recubrimiento de la tubería (m)

B_c: Diámetro exterior de la tubería (m)

- **Coefficiente de soporte**

B': Coeficiente empírico de soporte elástico

$$B' = \frac{1}{1 + 4e^{-0.2133H}}$$

H: Recubrimiento de la tubería.

En una instalación las cargas externas (WL: Carga viva y WD: Carga muerta) que soportará la tubería están limitadas por:

$$\gamma_w h_w + R_w \frac{W_D}{B_C} + \frac{W_L}{B_C} \leq q_a$$

Donde:

h_w: Altura de la superficie del agua por encima de la tubería (m).

γ_w: peso específico del agua (kN/m³).

W_d: carga muerta sobre la tubería (kN/m).

W_L: carga viva actuante sobre la tubería por unidad de longitud (kN/m).

B_c: diámetro externo de la tubería (m).

q_a: Presión admisible de pandeo.

7.2.5.3. ROTURA DE PARED (Wall crushing)

Este límite se alcanza cuando los esfuerzos en la pared de la tubería llegan a la fluencia en material dúctil o la resistencia última en materiales frágiles. Indica la condición en la cual el esfuerzo en el material de la pared del tubo pasa su límite de proporcionalidad hasta llegar a la fluencia, provocando la falla. El factor más importante en este límite de funcionamiento es la compresión del anillo, σ_c, y está dada por:

$$\sigma_c = \frac{W_t + B_C}{2A}$$

donde:

WT: Carga total sobre la tubería (kN/m).

BC: Diámetro exterior de la tubería (m).

A: Área de la sección transversal (m²).

El cloruro de polivinilo (PVC) alcanza un esfuerzo máximo de compresión (σ_{c max} = 67500kN/m²), el cual no debe superado por las cargas transmitidas a la tubería, es decir, σ_{c max} debe ser mayor que σ_c.

7.2.5.4. ESFUERZO DE FLEXIÓN EN EL ANILLO (Bending Stress)

El chequeo de esta condición es utilizado en el diseño de tuberías de fundición dúctil, para las cuales el esfuerzo de flexión en el anillo (f) fue definido como 331.000 kN/m², valor que involucra un amplio factor de seguridad con respecto a la resistencia del material. Este límite no debe ser excedido por el esfuerzo de flexión generado en una cimentación (f_T) para cuyo cálculo se utiliza la siguiente expresión:

$$f_T = 3 \frac{W_T}{B_C} \left(\frac{B_C}{t-2} \right) \left(\frac{B_C}{t-2} - 1 \right) \left(K_b - \frac{K}{\frac{8E}{E' \left(\frac{B_C}{t-2} - 1 \right)^3 + 0.732}} \right)$$

donde:

f_T : Esfuerzo deflexión (kN/m²).

W_T : Carga total sobre la tubería (kN/m).

B_C : Diámetro exterior de la tubería (m).

t : Espesor de la pared (m).

K_b : Coeficiente de momento de flexión.

K : Constante de encamado.

E : Módulo de elasticidad del material de la tubería (kN/m²).

7.2.5.5. CARGAS COMBINADAS (Combined Loading)

La máxima deformación resultante del efecto combinado de la presión interna y la deflexión, se debe encontrar cumpliendo que:

$$\frac{E_{pr}}{HDB} \leq \frac{1 - \left(\frac{E_b r_c}{S_b} \right)}{FS_{pr}}$$

donde:

E_{pr} : Deformación de trabajo debida a la presión interna (m/m);

$$E_{pr} = \frac{PN(B_c - t)}{2t_r E_H}$$

en la cual:

PN : Presión nominal de la tubería (kN/m²).

B_c : Diámetro exterior de la tubería (m).

- Cuando el estudio geotécnico determine que el Nivel freático se localiza por encima del fondo de la excavación, encapsular el triturado de la cimentación con geotextil NT, con las especificaciones que recomiende el estudio geotécnico realizado para el proyecto.
- El material importado seleccionado debe cumplir las siguientes especificaciones mínimas:
 - T. Máximo: 1 ½”.
 - I.P. del material pasa 40 < 20%.
 - L.L. < 45%.
 - CBR > 5%.
 - Contenido material orgánico <1%.
 - Pasa 200 <35%.
 - No expansivo.
- Material seleccionado de la excavación
 - a) En vías vehiculares
 - I.P. del material pasa 40 < 20%
 - L.L. < 45%
 - Debe estar libre de materia orgánica, sobrantes de construcción, palos, plásticos, etc.
 - De no cumplir estas características se debe usar material importado T. Máximo: 2”
 - b) En andenes, vías peatonales, corredor de gradas se acepta:
 - I.P. del material pasa 40 < 45%
 - L.L. < 70%
- Los materiales de la estructura de la vía deben cumplir con las Normas INVIAS E-320 (Subbase) y E-330 (Base).
- Para profundidades a lomo de tubería (de rellenos) menor a 0.80 m, EMCALI no permitirá la utilización de tuberías flexibles o semirrígidas.

Las anteriores especificaciones se complementan con los requisitos indicados en la norma de EMCALI EICE E.S.P. "NDC-SE-AA-012 Rellenos".

8. CIMENTACIÓN DE TUBERÍAS DE ACUEDUCTO

EMCALI para el servicio de acueducto, acepta la implementación de la cimentación tipificada que se presenta en el Anexo No 7 para tuberías de diámetros menores o iguales a 12” y profundidades a lomo de tubería menores a 2.00 m.

Para tuberías de diámetros mayores a 12” y/ o profundidades por encima del lomo de tubería mayores a 2.00 m, en todos los casos se deberá presentar para revisión y aprobación de EMCALI los diseños y cálculos detallados (con sus soportes) del cumplimiento de cada una de las condiciones límites, teniendo en cuenta tanto las cargas externas como las presiones internas y transientes, que permiten diseñar no solamente la cimentación sino los anclajes (Norma NDI-SE-AA-017) y selección de los espesores de tuberías para cada tipo de material .

Las tuberías de acueducto deben diseñarse para la combinación de carga que resulte más crítica en cada caso particular de análisis utilizando según el tipo de material, el método de diseño por esfuerzos admisibles o el método de diseño por resistencia última y las cargas de servicio según las combinaciones y factores indicados en el Numeral G.3.3. del RAS 2000.

En todos los sistemas de tuberías a presión deben calcularse las presiones transientes que se generan como consecuencia de un cambio en las condiciones de flujo, específicamente durante el cerrado de las válvulas del sistema. En este cálculo de sobrepresiones deben incluirse al menos las siguientes variables: velocidad de la onda de presión. Velocidad de cerrado de la válvula, perfil del ducto, fricción y en general las características hidráulicas y físicas del sistema. En todos los sistemas de tuberías a presión deben calcularse las presiones transientes que se generan

Las características físicas de los materiales deben ser consultadas por el diseñador a los fabricantes de los diferentes tipos de tuberías quienes a su vez deben especificar las deflexiones admisibles, los esfuerzos críticos de colapso y de pandeo en las paredes de los tubos que fabrican, valores que dependen de los efectos de restricción de la estructura de suelo alrededor del tubo y de las propiedades de la pared del mismo, y de los esfuerzos o deformaciones que producen agrietamientos, fisuración, laminación y en general cualquier efecto que cambie la apariencia y el comportamiento del material degradándolo con respecto a la situación original. Igualmente, el fabricante debe proporcionar información referente a las deflexiones a largo plazo para diferentes condiciones de instalación, de manera que el diseñador verifique que la tubería a instalar no presenta problemas por este factor (Tomado del RAS 2000 título G 3.4.4.4).

Para cada uno de los materiales de las tuberías aceptadas, su calidad y especificaciones se deben ajustar a los requisitos mínimos previstos en las Normas Técnicas Colombiana Oficiales Obligatorias o en su defecto las Normas Técnicas Internacionales de la AWWA, ASTM o ISO indicadas en la Tabla G.3.6. del RAS 2000.

Las siguientes consideraciones deberán ser tenidas en cuenta en la ejecución de la cimentación tipificada para el servicio de acueducto:

- No debe haber agua ni lodos en el fondo de la excavación al colocar el material de cimentación (arena).
- Material seleccionado de la excavación debe cumplir las siguientes especificaciones mínimas:
 - a) En vías vehiculares
 - I.P. del material pasa 40 < 20%
 - L.L. < 45%
 - Debe estar libre de materia orgánica, sobrantes de construcción, palos, plásticos, etc.
 - De no cumplir estas características se debe usar material importado T. Máximo: 2"
 - b) En andenes, vías peatonales, corredor de gradas se acepta:
 - I.P. del material pasa 40 < 45%
 - L.L. < 70%
 - Los materiales de la estructura de la vía deben cumplir con las NORMAS INVIAE E-320(Subbase) y E-330 (Base).

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Sistema de Normas Técnicas de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (SISTEC), 2006.

Normas de Diseño y Construcción de Acueducto y Alcantarillado de Empresas Municipales de Cali, 1999.

Normas de Acueducto y Alcantarillado de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, 2006.

Normas de Acueducto y Alcantarillado de Aguas de Cartagena S.A. ESP, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Cartagena, 2005.

Normas de Diseño de Acueducto y Alcantarillado de las Empresas Públicas de Medellín (EPM) ,2006.

TUBOS MOORE. Manual de tubería de gres

ETERNIT COLOMBIA. Cálculo de tubería de fibrocemento

MANUFACTURAS DE CEMENTO S.A. TITAN. Guía Técnica. Tuberías de Concreto para alcantarillado.

10. ANEXOS

(Ver los anexos en el link correspondiente publicado en la página del SINET)

ANEXO 1. CONDICIONES ZANJA/TERRAPLÉN PARA INSTALACIÓN DE TUBERÍAS

ANEXO 2. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE MARSTON

ANEXO 3. AREA DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA VIVA

ANEXO 4. ALCANTARILLADO. CIMENTACIONES PARA TUBERÍA RÍGIDA (TIPO B, C)

ANEXO 5. ALCANTARILLADO. CIMENTACIONES PARA TUBERÍA RÍGIDA (TIPO A, D)

ANEXO 6. ALCANTARILLADO. CIMENTACIONES TIPIFICADAS PARA TUBERÍAS
FLEXIBLES Y SEMIRRÍGIDAS $\varnothing \leq 20''$

ANEXO 7. ACUEDUCTO. CIMENTACIÓN TIPIFICADA PARA TUBERÍA FLEXIBLE $\varnothing \leq 12''$