

Conducciones forzadas por gravedad con tuberías de PEAD

Abrahán Segundo López Rodríguez

Pro. Msc. Centro de Investigación de Recursos Hídricos (CIDRHI). Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Estado Falcón, Venezuela

email: abrahamlopez@unefm.edu.ve

RESUMEN

El uso del polietileno de alta densidad (PEAD) como material de las tuberías en los sistemas de abastecimiento de agua, viene desplazando a otros materiales tradicionalmente utilizados. El cálculo de conducciones forzadas por gravedad se enfoca a la determinación del diámetro de tubería hidráulicamente funcional, con espesor que soporte las presiones hidráulicas y que garantice una solución económica. La selección de ese diámetro, desde el punto de vista hidráulico y estructural, es un proceso complejo. El objetivo del presente trabajo es identificar, a partir de un listado de tuberías normalizadas, las combinaciones económicamente factibles en el uso de tuberías de PEAD para el diseño de conducciones forzadas por gravedad y orientar el proceso de selección de las mejores soluciones.

Palabras clave: tuberías de polietileno, conducciones forzadas, abastecimiento de agua.

Gravity water pressure flow with HDPE pipes

ABSTRACT

High density polyethylene (HDPE) in flow pipes is displacing other traditional materials in water supply systems. Calculation of gravity water pressure pipe flow is focused in finding a hydraulically functional pipe diameter with enough thickness to withstanding hydraulic pressures to ensure an economical solution. The selection of the pipe diameter is then a complex process from the hydraulic as well as the structural points of view. The scope of this paper is to identify, from a standard pipe catalog, economically feasible combinations of HDPE pipe diameters for gravity water pressure flow and to guide the selection to the best solutions.

Keywords: polyethylene pipes, pressure pipe flow, water supply.

INTRODUCCIÓN.

La estrategia para el cálculo y diseño de una conducción forzada por gravedad se enfoca en la determinación del diámetro, o la combinación de ellos, que la hagan hidráulicamente funcional, estructuralmente segura y se garantice una solución económica al proyecto.

El primer paso para el diseño parte de la definición de los casos de carga más desfavorables. Algunos autores consideran crítico el caso del fluido en reposo porque se experimenta la máxima carga hidrostática y a partir de ella pueden estimarse preliminarmente los espesores de las tuberías. Méndez (1995) asegura que la primera atención del proyectista debe orientarse hacia el pronóstico de las presiones determinadas por la operación de la tubería en régimen permanente, o bien, a las relacionadas con una condición hidrostática del líquido (por ejemplo, una conducción por gravedad controlada aguas abajo).

El polietileno de alta densidad (PEAD) en tuberías para los sistemas de abastecimiento de agua viene desplazando a materiales tradicionalmente utilizados tales como el hierro fundido, acero galvanizado, acero al carbono, asbesto cemento, PVC y otros. Las tuberías de polietileno han pasado de ser utilizadas exclusivamente en conducciones de pequeño diámetro a ser empleadas en aplicaciones de diámetros mayores. Su caracterización ha cambiado desde la entrada en vigor de la nueva norma europea que las regula, contemplando nuevas tipologías de polietileno (PE-40, PE-63, PE-80 y PE-100) sustituyendo a los antiguos tipos (alta, media o baja densidad), Balairon (2009).

La calidad de la materia prima tiene un impacto sobre el costo de las tuberías disponibles para el diseño y las características de las mismas se presentan en términos de la información relativa a: diámetro nominal (diámetro externo), espesor de la tubería, tipo o calidad del material (PE100, PE80..), serie S, relación de dimensiones estándar (SDR), conocida como relación diámetro-espesor, esta última permite identificar la presión máxima de trabajo según la calidad o especificación del material (...PE-80, PE-100).

La selección de la tubería desde el punto de vista hidráulico y estructural es un proceso complejo. Identificar las combinaciones factibles en el uso de tuberías de PEAD para el diseño de conducciones forzadas que disminuyan de manera significativa los costos, considerando las tuberías normalizadas, es el objetivo esencial del presente trabajo.

ELEMENTOS DE UNA CONDUCCIÓN FORZADA POR GRAVEDAD

En la figura 1 se observa una conducción por gravedad con una válvula de control aguas abajo, la cual, una vez cerrada, genera una línea de carga de presiones equivalente a la presión hidrostática representada por la diferencia de nivel entre dicha línea horizontal y la cota de cada punto en la conducción.

La figura 2 muestra la conducción sin válvula o con válvula completamente abierta, generando una línea de carga de presiones equivalente a la línea de presión dinámica (piezométrica). Las presiones en este caso son menores que en el caso anterior, por tanto, los requerimientos de espesores son menores y por ende los costos de la conducción. Nótese en ambos casos la influencia del perfil topográfico sobre las condiciones de diseño.

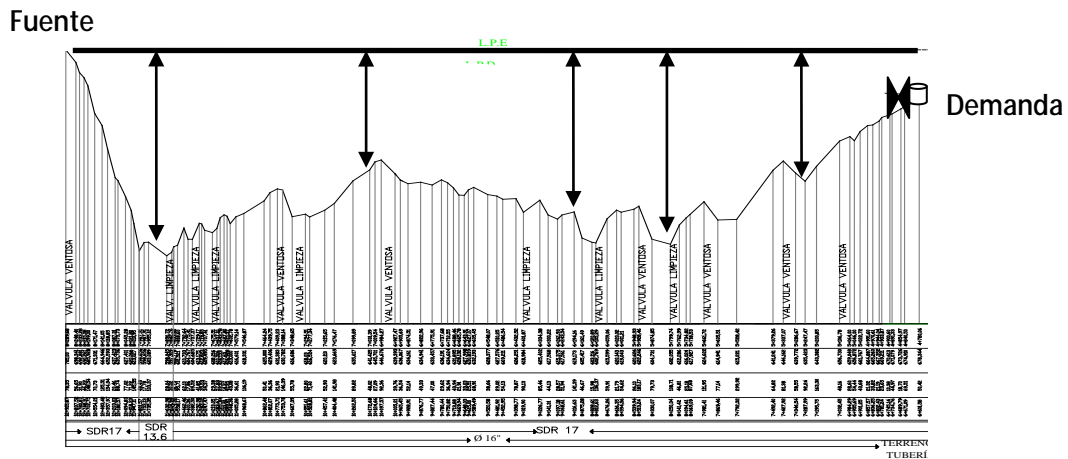


FIGURA 1. Perfil y línea de energía de una conducción por gravedad con válvula aguas abajo cerrada.

Este análisis ilustra la importancia de los criterios para el diseño hidráulico y estructural de la conducción forzada como son el criterio de operación, las maniobras operativas y las características topográficas. La mayoría de los trabajos en la literatura abordan la selección de diámetros sin enfocar críticamente el tema de las presiones y los espesores. De hecho, en estas aducciones, la ubicación de válvulas de línea y sistemas automáticos de apertura y cierre de válvulas puede apoyar ese tema y reducir los costos de diseño.

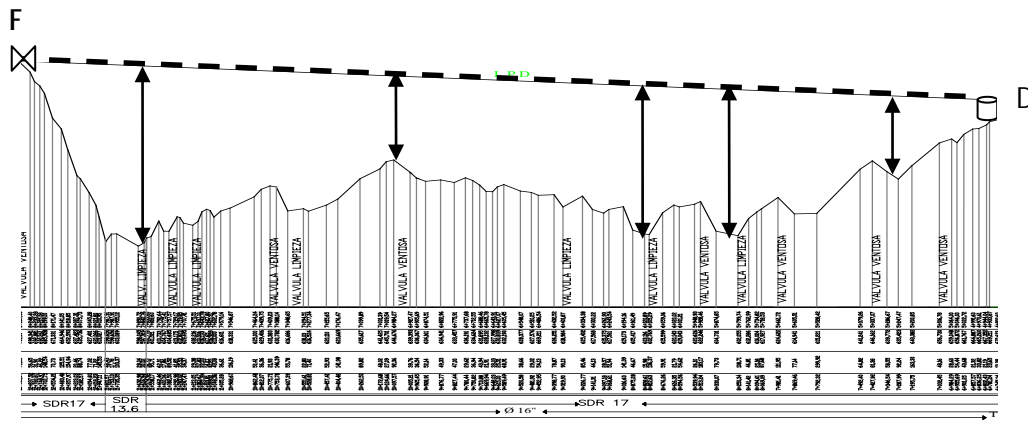


FIGURA 2.- Perfil y línea de energía de conducción forzada por gravedad con válvula aguas arriba y completamente abierta.

DISEÑO DE CONDUCCIONES CON PEAD CONSIDERANDO LA PRESIÓN

Para iniciar el estudio se hace necesario conocer las características básicas del material, la propuesta tecnológica de su implementación, las limitaciones de uso, las restricciones de comercialización y otros. Entre los aspectos fundamentales están los relacionados con el comportamiento mecánico y estructural de las tuberías de este material. Dependiendo de la aplicación, se hace necesario un análisis de las solicitaciones estructurales y la definición del espesor mínimo requerido.

La tensión de diseño de la tubería se obtiene del valor de la máxima resistencia requerida (*MRS*) del material (norma ISO 12162) al dividir por un coeficiente de diseño *C*. Según el criterio de la norma europea UNE EN 12.201:2003, el valor de *C* recomendado es de 1,25 también dividiendo el valor de *MRS* (Balairon 2006).

$$\sigma = \frac{MRS}{C} \quad (1)$$

En la tabla 1 se especifican los valores de *MRS* y las tensiones según norma europea.

TABLA 1. Designación de material y tensión de diseño

Designación n	Resistencia requerida (<i>MRS</i>) (kg/cm ²)	Tensión de diseño σ (kg/cm ²) C=1.25
PE 100	100	80,0
PE 80	80	64,0
PE 63	63	50,4
PE 40	40	32,0

Las tuberías para servicios a presión se fabrican para resistir una presión interna específica. Esta es la presión nominal *PN* que indica la máxima presión de trabajo a la cual la conducción puede ser sometida en operación continua a una determinada temperatura.

Dos son los posibles criterios para la selección de los tubos de materiales termoplásticos ante la acción de la presión interior: el utilizado en Norteamérica a partir de las normas AWWA y ASTM y el seguido en Europa conforme a las normas EN (Balairon 2006).

La fórmula industrialmente aceptada para calcular la presión de trabajo de un tubo dado, está definida en el ASTM D 2837 citado por (Mogar 2011) y es como sigue:

$$PN = \frac{2 \sigma e}{(D_e - e)} \quad (2)$$

donde: *D_e*: diámetro externo; *PN*: presión nominal; σ : tensión de diseño; *e*: espesor de pared

El espesor de la tubería en términos del diámetro externo (*D_e*) se deduce de (2):

$$e = \frac{D_e * PN}{(2 \sigma) + PN} \quad (3)$$

Estas expresiones son ligeramente conservadoras al calcular espesor porque, en su deducción, se ha utilizado un diámetro medio en vez del diámetro interior. Para tuberías de PEAD se ha utilizado la relación diámetro/espesor para identificar tuberías de la misma clase o presión de trabajo dada una calidad. Esta relación es conocida como relación estándar de diámetro o *SDR*.

$$SDR = \frac{D_e}{e} \quad (4)$$

Sustituyendo la ecuación (4) en (2):

$$PN = \frac{2\sigma}{(SDR - 1)} \quad \text{o} \quad SDR = \left(\frac{2\sigma}{PN}\right) + 1 \quad (5)$$

La relación SDR 17, por ejemplo, indica que el diámetro exterior es diecisiete veces el espesor y tendrá asociada una presión de trabajo según la calidad o especificación del material (...PE-80, PE-100). Una propiedad característica del PEAD es el hecho de que para igual diámetro nominal (externo), se dispone de diferentes diámetros internos de acuerdo con la relación SDR. (ver tabla 2).

TABLA 2. Resumen tabla típica de presiones nominales y diámetros en tubos de PEAD

Factor C=1,25	SDR 33	SDR 26	SDR 21	SDR 17	SDR 13,6	SDR 11
PE-80	4,0 bar (40,83 mca)	5,0 bar (51,04 mca)	6,3 bar (64,30 mca)	8,0 bar (81,66 mca)	10,0 bar (102,07 mca)	12,5 bar (127,59 mca)
PE-100	5,0 bar (51,04 mca)	6,3 bar (64,30 mca)	8,0 bar (81,66 mca)	10,0 bar (102,07 mca)	12,5 bar (127,59 mca)	16,0 bar (163,32 mca)
De (mm)	Di (mm)	Di (mm)	Di (mm)	Di (mm)	Di (mm)	Di (mm)
180	169,0	166,2	162,8	158,6	153,4	147,2
200	187,6	184,6	180,8	176,2	170,6	163,6
250	234,6	230,8	226,2	220,4	213,2	204,6
fuente: Revinca (2010) (mca: metros de columna de agua)						

Tradicionalmente el diseño de sistemas en ingeniería ha sido acometido como un proceso de tanteo, el cual proporciona soluciones apropiadas cuando se trabaja con sistemas sencillos, puesto que un proyectista experimentado puede predecir la influencia de las variables de diseño sobre la operación del sistema. Sin embargo, resulta casi imposible utilizar tal procedimiento en el diseño de sistemas complejos debido al gran número de variables y a la interdependencia que existe entre ellas. A continuación se propone un procedimiento para adaptar las tuberías normalizadas a los requerimientos estructurales por presión interna.

Selección de tuberías de PEAD en función de la presión y el esquema de operación.

- Identificar el punto de presión máxima en el perfil topográfico con respecto a la línea de presión según la condición de operación de diseño.
 - Con control de flujo, válvula cerrada en la descarga. (ver figura 1).
 - Con control de flujo en la captación o válvula abierta en la descarga (ver figura 2), para esta condición (b), se estima previamente el diámetro según el punto 5 o se supone una piezométrica dada una presión residual en el punto de descarga (*PR*).
- Comparar la presión máxima identificada en el punto 1, casos (a) o (b), con la clase de presión para las tuberías de PEAD disponibles según una tabla completa como la tabla 2.
- Definición de los límites de utilización de cada clase de tubería:
 - Para la condición de operación (a) (ver figura 1) estimar según la expresión (6)

$$CLUC_i = CF - PNC_i \quad (6)$$

donde: $CLUC_i$: cota límite de utilización de clase (m); CF : cota de la fuente (m).

PNC_i : presión nominal de clase (m).

-Para la condición de operación (b) (ver figura 2), se compara la diferencia máxima entre la cota de terreno y la piezométrica del diámetro teórico (punto 5 abajo) y se selecciona el $PN(max)$.

4. Proponer opciones de combinación posibles de acuerdo con la disponibilidad de tuberías.
5. Definición del diámetro teórico bajo el criterio de diámetro de mínimo costo.
6. Normalización de diámetros definitivos para la conducción.
7. Determinación del costo para cada solución planteada.

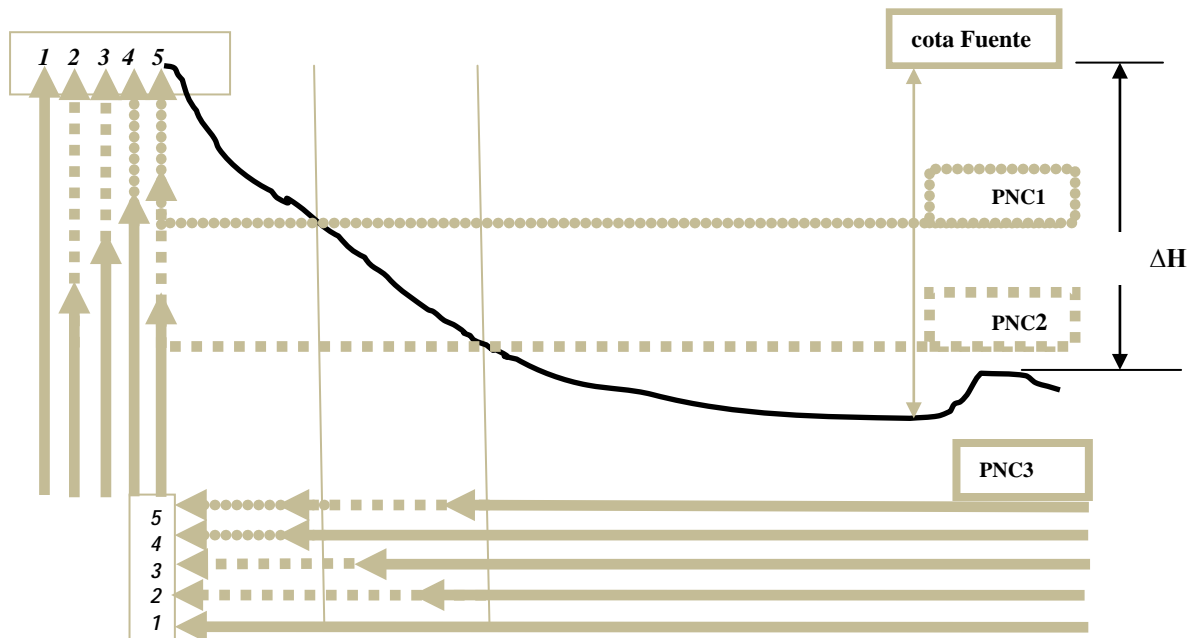


FIGURA 3. Esquema de combinación de presiones para un perfil que admite tuberías para tres presiones nominales de clase diferentes.

El esquema de la figura 3, muestra el número de combinaciones posibles para tuberías de PEAD en un perfil topográfico que acepta hasta tres (3) tipos de presión nominal determinados mediante la ecuación (7) ($PNC3 > PNC2 > PNC1$), resultando cinco (5) soluciones de combinación de presiones, sin embargo, la complejidad del diseño se incrementa al definir el diámetro o combinación de diámetros mínimos requeridos para satisfacer el funcionamiento hidráulico de la conducción, ya que se generan ahora combinaciones de presiones y diámetros. Las soluciones de combinación de presiones para la figura 3 se muestran en la tabla 3.

TABLA 3.- Combinaciones según perfil y presiones de trabajo disponibles.

Solución	Combinación de tuberías en función de límites de presión.
1	PNC3
2	PNC3+PNC2
3	PNC3+PNC2 solución similar a 2 (longitudes diferentes)
4	PNC3+PNC1
5	PNC1+PNC2+PNC3.

De la tabla 3 se puede evidenciar que cada problema tendrá un número de combinaciones posibles dependiendo de la configuración altimétrica del perfil topográfico y de las presiones nominales que pueden ajustarse a dicho perfil.

ASPECTOS HIDRÁULICOS

Para la determinación de los diámetros hay que tomar en cuenta las posibles soluciones, estudiando diversas alternativas bajo el punto de vista económico.

Arocha (1995) establece que para toda la longitud de la línea de aducción, o por tramos, la mejor selección de diámetros será la combinación que aproveche todo el desnivel disponible. Esto se logra igualando las pérdidas de carga al desnivel disponible entre la fuente y el punto de descarga, o del tramo que se requiera dimensionar, según la expresión:

$$h_{ft} = \Delta H \quad (7)$$

donde: h_{ft} : pérdida de carga total; ΔH : desnivel disponible.

Para determinar diámetro económico en conducciones de agua se han propuesto expresiones como las de Bresse, Mougny, Mendiluce, Melzer, Vibert, Agüera, citadas por Pérez (2004). Se considera que proporcionan resultados iniciales aceptables y pueden usarse indistintamente, ya que la incertidumbre en los datos supera la discrepancia entre los diámetros obtenidos. Sin embargo, en los cálculos con estas expresiones no se toman en cuenta las presiones a las que serán sometidas las tuberías.

Los diámetros obtenidos con las ecuaciones mencionadas son diámetros teóricos que deben normalizarse a diámetros comerciales. Por tanto, hay dos niveles en la formulación de diámetros, uno de diámetros teóricos continuos y el otro de diámetros comercialmente disponibles, a los que se debe en lo posible adaptar las soluciones definitivas. Esto indica la necesidad de disponer de un mecanismo que permita normalizar los diámetros teóricos.

Según Pérez (2004), la forma más sencilla de normalización del diámetro es sustituir el diámetro teórico por el diámetro normalizado más cercano en tamaño, bien sea el inmediato superior (supra-normalización) o el inmediato inferior (infra-normalización).

La supra-normalización genera una pérdida de carga inferior y la infra-normalización una superior, ambas con respecto al diámetro teórico. Lo más conveniente será sustituir el diámetro teórico por dos tramos de diámetros normalizados diferentes, cuya suma de pérdidas de carga sea equivalente a la obtenida por el diámetro teórico bajo las mismas condiciones. Según Fujiwara y Dey (1987) puede comprobarse que con la estructura convencional de precios de las tuberías, la combinación más económica está formada por dos diámetros normalizados adyacentes D_1 y D_2 entre cuyos valores esté comprendido el diámetro teórico.

Para la determinación de la pérdida de carga es posible la utilización de las ecuaciones tradicionales tales como la expresión de Darcy-Weisbach, Williams-Hazen y otras como la de Cruciani-Margaritora citada por Martínez (1993), para tuberías de polietileno. La ecuación (8) se escribe ahora:

$$h_{ft} = \Delta H = h_{f1} + h_{f2} \quad (8)$$

donde: h_{f1} y h_{f2} serían las pérdidas de carga respectivas de los diámetros D_1 y D_2 mencionados.

Con cualquiera de las ecuaciones se puede desarrollar una expresión para calcular las longitudes respectivas de cada diámetro, cuya suma es la longitud total del tramo o aducción.

COSTOS DE LOS TUBOS

Al analizar los costos de las tuberías surge la cuestión de si conviene utilizar la mejor calidad de material para obtener espesores menores así como el impacto sobre los costos si se emplean tuberías de espesores y calidades diferentes (PE-100, PE-80...etc). Además, dado que es posible utilizar el mismo diámetro y espesor para calidades diferentes (ver tabla 2), esto genera la necesidad de analizar la economía de las posibles combinaciones.

TABLA 4. Costos de materia prima para tuberías de PEAD

Parámetros		PE-100	PE-80
tensión s permisible (kg/cm ²)		80	63
relación entre tensiones permisibles		1,270	1,000
precio promedio (8 Bs = 1 USD)	(Bs/Kg)	20,69	19,15
	(Bs/ton)	20685,61	19147,60
	(USD/ton)	2585,70	2393,45
relación entre precios		1,080	1,000
**densidad γ_{PE} aproximada (kg/m ³)		> 950	930 a 950
**fuente: UNIDELTA (2001) (Bs : bolívares fuertes)			

Es de interés observar en la tabla 4 que el aumento de s con la calidad es mucho mayor que el de su costo, lo cual induce a seleccionar el mejor material posible en el diseño. Como el costo se expresa por unidad de peso y se emplea el Sistema Métrico Gravitacional, entonces el peso específico ρ^3 930 kg/m³. En lo adelante se emplea ρ

Función de costo

A partir de la siguiente notación:

K_{PE} : costo por unidad (p/u) de longitud (\$/m) (\$ = USD); w : precio p/u de peso (\$/ton)

ρ_e : peso específico del PEAD (ton/m³); Vol : volumen de PEAD p/u de longitud (m³/m)

D_e : diámetro exterior (m); D_i : diámetro interior (m)

e : espesor de pared (m)

s : esfuerzo permisible (kg/cm²); PN : presión nominal (kg/cm²)

$$D_i = D_e - 2 e \quad (9)$$

$$e = D_e / [2 (\rho / PN) + 2] \quad (\text{fórmula rigurosa para espesor}) \quad (10)$$

El costo p/u de longitud se expresa en función del volumen y peso:

$$K_{PE} = Vol \cdot \rho_e \cdot w \quad \left(\frac{m^3}{m} \cdot \frac{ton}{m^3} \cdot \frac{\$}{ton} = \frac{\$}{m} \right) \quad (11)$$

$$K_{PE} = (\rho/4) (D_e^2 - D_i^2) \cdot \rho_e \cdot w \quad (12)$$

Factorizando la diferencia de cuadrados y aplicando las relaciones indicadas en la notación:

$$K_{PE} = \pi * \left[D_e - \frac{D_e}{2 * \left(\frac{\sigma}{PN} + 1 \right)} \right] * \frac{D_e}{2 * \left(\frac{\sigma}{PN} + 1 \right)} * \gamma_{pe} * \omega \quad (13)$$

$$K_{PE} = \frac{\rho}{4} D_e^2 \cdot g_{pe} \cdot w \left[\frac{2 \frac{S}{PN} + 1}{\left(\frac{S}{PN} + 1 \right)^2} \right] \quad (14)$$

En la expresión anterior de K_{PE} puede verse que el costo varía linealmente con g_{pe} y con w . a mayor densidad o mayor calidad el costo crece en la misma proporción. Interesa ahora analizar cómo varía la función de costo con la resistencia S de manera analítica. Ya antes se había visto que S crece mucho más con la calidad que w y en cuanto a la densidad g_{pe} la diferencia entre calidades es muy baja. Para ello se toma la ecuación de K_{PE} y se deriva parcialmente respecto a S , considerando g_{pe} , w , D_e y PN como constantes. Entonces la ecuación (14) puede escribirse de la forma siguiente:

$$K_{PE} = C * \left(2 * \frac{\sigma}{PN} + 1 \right) * \left(\frac{\sigma}{PN} + 1 \right)^{-2} \quad (15)$$

y la mencionada derivada:

$$\frac{\partial K_{PE}}{\partial S} = C \cdot \left[\left(2 \frac{S}{PN} + 1 \right) (-2) \left(\frac{S}{PN} + 1 \right)^{-3} \left(\frac{1}{PN} \right) + \left(\frac{2}{PN} \right) \left(\frac{S}{PN} + 1 \right)^{-2} \right] \quad (16)$$

Desarrollando y simplificando:

$$\frac{\partial K_{PE}}{\partial S} = 2 * \frac{C}{PN} * \frac{\left(-\sigma/PN \right)}{\left(\left(\sigma/PN \right) + 1 \right)^3} \quad (17)$$

Donde se demuestra que la variación es negativa, lo que significa que si esta disminución del costo con el aumento de S es mayor que lo que aumenta dicho costo con g_{PE} y w , entonces K_{PE} disminuye al crecer S . Los análisis anteriores sustentan esta última afirmación.

Es conveniente también expresar la función de costo en términos de D_i el diámetro interior:

$$K_{PE} = \pi * (D_i + e) * e * \gamma_{PE} * \omega \quad (18)$$

Empleando las ecuaciones (9) y (10):

$$K_{PE} = \rho * g_{PE} * w * D_i^2 * \left(1 + \frac{PN}{2 * \sigma} \right) * \left(\frac{PN}{2 * \sigma} \right) \quad (19)$$

Y para expresarla de forma similar a la anterior:

$$K_{PE} = \rho * g_{PE} * w * D_i^2 * \left[\frac{2 * \frac{\sigma}{PN} + 1}{\left(\frac{\sigma}{PN} \right)^2} \right] \quad (20)$$

La conclusión que se obtiene de este análisis es que, si no intervienen criterios de consumo de energía, dado un D_i y un PN se debe escoger el máximo S para obtener el mínimo costo. Aparte del resultado de la ecuación (17), en la ecuación (19) se ve claramente que el aumento de S reduce K_{PE} a pesar de que crece W .

APLICACIÓN PRÁCTICA

Sea una región con topografía ondulada donde se pretende abastecer desde una fuente (F) de agua situada a cierta altura por encima de la comunidad que va a ser abastecida (ver figura 4).

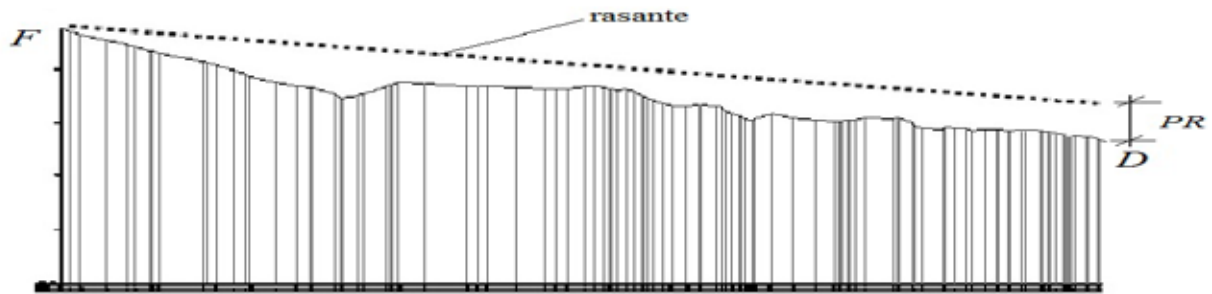


FIGURA 4.- Perfil topográfico de una conducción forzada por gravedad

Este es un caso de topografía favorable que no requiere de suministro exterior de energía (bombeo). Como se aprecia en la figura 4, F es la fuente y D es la demanda. En D se sitúa un valor de presión (PR) a la entrada de la red distribuidora. Si se considera libre de válvula en D se puede trazar una rasante piezométrica (aproximada por una línea recta) entre F y D.

La tubería conductora parcial o completamente soterrada une ambos puntos (F y D) y conduce el caudal de diseño. Esa conductora tiene una alineación cercana a la superficie del terreno ondulado y la presión que debe soportar en cada punto vendrá dada por la distancia vertical entre el eje del tubo y la rasante trazada.

Partiendo de las presiones nominales (PN) de las tuberías de PEAD (ver tabla 2), es posible subdividir la conductora en tramos que se correspondan con dichas presiones. La división en tramos comienza por el punto de máxima PN y se expande la longitud de este tramo hacia ambos lados hasta alcanzar el valor de la PN inferior siguiente. Los demás tramos se delimitan de forma similar. Una vez realizada la división en tramos de PN fija, es necesario determinar la longitud inclinada real de cada tramo. Sin embargo, la cantidad final de tramos diferentes se decidirá después al aplicar la secuencia de cálculo que se propone.

El procedimiento de diseño para el caso tratado (sin control de flujo en la descarga, figura 4) se aplica como una secuencia de cálculos al disponer de los siguientes datos:

1. Perfil topográfico con todas sus cotas y distancias.
2. Presión requerida en el punto de descarga (PR).
3. Trazado de la rasante piezométrica aproximada como una línea recta.
4. Verificar que la piezométrica aproximada no intercepte el terreno.
5. Trazado de la conductora y división en tramos de PN fija usando la piezométrica.
6. Longitud real inclinada de cada tramo y longitud total (L_t). Para uso posterior la longitud de la tira de tubo de fábrica se denota por L_o .
7. Caudal de diseño Q .
8. Pérdida total de carga piezométrica. ($h_f = \text{cota } F - \text{cota } D + PR$).

Secuencia de cálculos

- 1) Con Q , h_f y L_t y adoptando un valor lógico para el coeficiente de fricción se calcula un valor teórico de D_i despejando de la ecuación de pérdidas. No hace falta aquí fórmula alguna de diámetro más económico.
- 2) El primer tramo a diseñar es el de la presión máxima (PN máximo). El principio a seguir aquí en cuanto a la cantidad de tramos diferentes es que se comienza con solo uno o dos tramos para todo el perfil. Luego se podrán diferenciar y añadir nuevos tramos siempre que resulte económicamente conveniente.
- 3) En la tabla 2 o similar (Tito Méndez 2010) se busca la columna SDR que tenga ese máximo PN con la mayor calidad de material (si es posible con PE-100). En ella se busca un D_e cuyo valor de $(D_e - 2 e_{min})$ sea igual o mayor que el D_i teórico.
- 4) Si el D_i real está muy cerca del teórico se recalcula su h_f y se verifica la presión en la descarga contra la presión residual (PR) (una variación $\pm 10\%$ puede ser aceptable). De ser aceptable, se calcula el costo K_{PE} , mediante la ec. (17) multiplicada por la longitud del tramo ajustada por exceso a múltiplos de L_o . Las ecuaciones (14) y (19) no serían aplicables en esta etapa ya que el espesor e es ahora un valor real conocido y en dichas ecuaciones el espesor es teórico proveniente de la ecuación (10). Si esta fuera la solución final, el perfil completo tendría un solo tramo.
- 5) En caso de no estar cerca (o no ser aceptable la solución del punto 4) se escogen de la tabla el diámetro normalizado interior mayor y el menor más próximos al teórico. Con ellos y usando la fórmula de pérdidas se calcula la longitud de cada diámetro para cumplir la misma h_f total anterior. Estos dos diámetros en lo posible se mantienen con la misma calidad y el mismo PN . Se calcula el costo mediante la misma fórmula anterior para cada longitud ajustada a múltiplo de L_o y se suman para obtener el costo total. Si esta fuera la solución final el perfil completo tendría dos tramos.
- 6) Si en la tabla, se localiza en otra columna SDR (mayor SDR), un diámetro exterior *menor* que el del punto 4 con la misma calidad y la PN siguiente menor, se puede recalcularse este diámetro con nuevos valores de PN , D_i y e . Pero hay que verificar su longitud y, por ende, la del diámetro mayor. La longitud L_1 que tiene el diámetro mayor en el punto 4 es la calculada para cumplir con la h_f . Pero ahora el diámetro mayor debe cubrir toda la longitud L_2 del tramo de máxima PN . Como L_1 y L_2 son conocidas se pueden dar dos situaciones:
 - a) Si $L_2 > L_1$ hay que usar L_2 y ahora la $h_{f_{total}}$ va a ser menor por esto y porque el segundo diámetro (el menor) tiene menos espesor.
 - b) Si $L_1 > L_2$ se pueden probar ambas: se puede usar L_1 y ahora el tramo de PN máxima es más largo y la $h_{f_{total}}$ se reduce; se puede usar L_2 y esto hace que la $h_{f_{total}}$ crezca pero pudiera compensarse porque el diámetro menor tiene menos espesor. También se puede probar una intermedia.

En cualquier situación hay que ajustar las longitudes parciales para hallar una solución que cumpla con la $h_{f_{total}}$ y que cubra la PN máxima en toda la longitud necesaria. Lo expuesto en el punto anterior puede repetirse para PN menores si hay datos en la tabla. Lo que sucedió antes con L_1 y L_2 ya aquí no vuelve a ocurrir, pero con cada cambio en PN de la misma calidad, el espesor e se reduce y se reduce la pérdida $h_{f_{total}}$.

Las variantes adicionales expuestas en el punto 6, pueden adoptarse como soluciones finales si se produce una reducción sensible del costo (p.ej. del 10%). Esto debe quedar claro ya que en esa secuencia de tramos en que se van añadiendo nuevos tramos con menor PN , sus longitudes son cada vez menores y, por tanto, es menor su impacto sobre el costo total.

En caso de no existir en la tabla los diámetros que permitan considerar las variantes del punto 6, se podrían considerar otras variantes cambiando la PN (y la calidad) dentro de la misma columna SDR . Estas otras variantes no parecen muy recomendables porque el ahorro es poco y no parece justificarse, desde el punto de vista práctico, el hecho de tener que comprar y colocar tubos de diferente calidad, porque aunque sean del mismo diámetro y espesor, exige un control muy preciso en obra de dónde se deben colocar sin confusión.

La consideración de variantes expuesta en los párrafos anteriores también se puede hacer en el caso de dos diámetros del punto 5 anterior. Solo deberán tenerse en cuenta los mismos cuidados señalados en el punto 6.

EJEMPLO

Una conductora por gravedad de 1300 m de longitud inclinada, con perfil topográfico según figura 5, conduce un gasto $Q=82$ l/s con una presión residual $PR=15$ m. Tiene control de flujo aguas arriba y por tanto las presiones se miden desde la piezométrica. Se dispone de tubería de PEAD para diferentes valores de PN y PE según tabla serie típica (Tito Méndez 2010). Se supone la densidad del PEAD con un valor de $\gamma_{PE}=974,5$ kg/m³. $LO=12$ m. Los precios usados del PEAD por tonelada se tomaron según la tabla 5. Para calcular la pérdida por fricción se empleó la fórmula de Darcy-Weisbach con $f=0,02$.

TABLA 5. Precios del PEAD para ejemplo

PE (calidad)	100	80	63	40
precio (\$/ton)	1986	1919	1862	1788

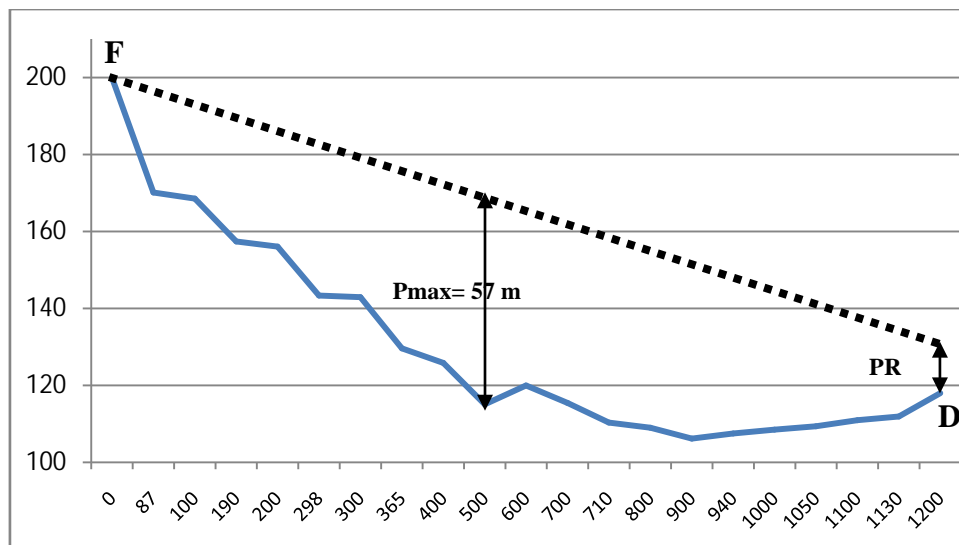


FIGURA 5. Perfil topográfico y línea piezométrica teórica.

La tabla 6 y la figura 5 ilustran los datos del perfil de la conducción. La tabla 7 contiene los datos de los puntos extremos de la fuente y la demanda y sus desniveles.

TABLA 6. Datos del perfil del terreno y la línea recta piezométrica

distancia	0	87	100	190	200	298	300
cota terreno	200,00	170,52	160,00	158,21	149,00	144,64	134,54
cota piezom.	200,00	195,52	194,85	190,21	189,69	184,64	184,54
distancia	365	400	500	600	700	710	800
cota terreno	131,19	119,38	117,23	115,08	113,92	113,41	113,00
cota piezom.	181,19	179,38	174,23	169,08	163,92	163,41	158,77
distancia	900	940	1000	1050	1100	1130	1300
cota terreno	112,00	111,55	112,43	113,88	117,50	116,76	118,00
cota piezom.	153,62	151,55	148,46	145,88	143,31	141,76	133,00

TABLA 7. Datos de puntos extremos

Cota terreno F	200 msnm
Cota terreno D	118 msnm
ΔH total	82 m
Presión residual	15 m
ΔH hidráulico	67 m

Resultados

Siguiendo lo expuesto anteriormente se calcularon 9 variantes que se resumen en la tabla 8.

TABLA 8. Resultados de las variantes

SDR	Var.Nº	SOLUCIONES.	COSTOS	AHORRO (%)
17,6 (solo PN 6)	1	PN6-PE63: ϕ 225 mm L=1308 m	20252,31	-
	2	PN6-PE63: ϕ 225 mm L=564 m PN6-PE63: ϕ 220 mm L=744 m	17851,31	13,40% respecto a 1
21 (PN6, PN5, PN3,2)	3	PN6-PE80: ϕ 225 mm L=312 m	14935,96	19,5% respecto a 2
		PN6-PE80: ϕ 200 mm L=996 m		
	4	PN6-PE80: ϕ 225 mm L=348 m	14732,44	21,2 % respecto a 2
		PN5-PE63: ϕ 200 mm L=960 m		
	5	PN6-PE80: ϕ 225 mm L=348 m	14578,4	22,5 % respecto a 2
PN5-PE63: ϕ 200 mm L=588 m PN3,2-PE40: ϕ 200 mm L=372 m				
26 (PN6, PN5, PN4, PN2,5)	6	PN6-PE100: ϕ 225 mm L=24 m	11831,25	50,9 % respecto a 2
		PN6-PE100: ϕ 200 mm L=1284 m		
	7	PN6-PE100: ϕ 225 mm L=24 m	11546,97	54,6% respecto a 2
		PN6-PE100: ϕ 200 mm L=348 m		
		PN5-PE80: ϕ 200 mm L=936 m		
	8	PN6-PE100: ϕ 225 mm L=24 m	11388,83	56,7% respecto a 2
		PN6-PE100: ϕ 200 mm L=348 m		
		PN5-PE80: ϕ 200 mm L=324 m		
		PN4-PE63: ϕ 200 mm L=612 m		
	9	PN6-PE100: ϕ 225 mm L=24 m	11332,47	57,5% respecto a 2
PN6-PE100: ϕ 200 mm L=348 m				
PN5-PE80: ϕ 200 mm L=324 m				
PN4-PE63: ϕ 200 mm L=444 m				
PN2,5-PE40: ϕ 200 mm L=168 m				

Análisis del comportamiento del ejemplo demostrativo.

Para valores fijos de *SDR*, *PN* y materia prima (PE), la solución de combinación de diámetro (dos diámetros, var. 2) puede alcanzar hasta un 13,4 % de ahorro con respecto a una solución de diámetro único (var. 1), evidenciándose la influencia de la variación del espesor y por ende del volumen de materia prima de las tuberías.

Para una combinación de diámetros (dos diámetros) donde se mejora la calidad de la materia prima, se registra un incremento en el ahorro de hasta un 19,5% (var. 3) respecto a la combinación para menor *SDR* y materia prima. Se valora el cambio de longitud de cada diámetro y el efecto de la densidad del material.

Para combinaciones de dos o más diámetros de diferentes valores de *PN* (var. 4 y 5) el ahorro se incrementa con respecto a la combinación para *SDR* menor y materia prima de inferior calidad, pero este ahorro no es significativo y desde el punto de vista práctico, poco factible.

Para un incremento del *SDR* y un PE de máxima calidad (PE-100) la combinación de diámetro (dos diámetros) genera un ahorro significativo (var. 6) ubicándose por encima del 50%, sin embargo, al combinar más de dos diámetros para diferente calidad (var. 7, 8 y 9), el ahorro genera un incremento poco significativo.

CONCLUSIONES.

Para lograr el diseño económico de una conducción forzada por gravedad utilizando tecnología del sistema PEAD deben considerarse las orientaciones siguientes:

Si en una conducción, un diámetro único cumple con los requerimientos hidráulicos bajo el concepto ($hf = \Delta H$) para la condición de operación determinada, se recomienda seleccionar clases de tubería en función de la presión para el diámetro calculado a fin de buscar la mejor solución económica, es decir, mantener la relación *SDR* para diferentes valores de *PN* según las exigencias de presión interna. (seleccionar y combinar valores de *PN* según PE disponible).

Si en la conducción es necesario combinar diámetros para satisfacer el concepto de diámetro económico ($hf = \Delta H$) y garantizar su funcionamiento hidráulico, se recomienda el criterio anterior para los tramos de diámetro constante y verificar con enfoque práctico de obra cuán diferentes son los diámetros externos e internos a combinar. Existe aquí un mayor diapasón de combinaciones ya que ahora se puede mantener o no la relación *SDR* y el valor de PE, siendo el menor costo de entre estas diferentes variante el que en definitiva indica la mejor solución.

La adopción de soluciones con un diámetro y una clase de tubería única, pueden ser viables desde el punto de vista hidráulico y estructural, si se incorporan al diseño mecanismos de regulación en el funcionamiento de la conducción y las características del perfil topográfico.

El criterio de operación asumido para el diseño, hace significativa la diferencia de costos de la conducción, en tal sentido una conductora con control aguas abajo aumenta los costos de la conducción respecto a la misma conducción con solo control aguas arriba por los mayores requerimientos de presión que se requieren.

REFERENCIAS

- Arocha, S.** (1995.) “Abastecimientos de agua. Teoría y diseño”. Tercera edición, Ediciones Vega. Caracas. Venezuela. Pp.169.
- ASTM D2837-11** (2011)“Standard test method for obtaining hydrostatic design basis for thermoplastic pipe materials or pressure design basis for thermoplastic pipe products”. American Society for Testing Materials (ASTM). Philadelphia, USA.
- Balairon, L.** (2006).”Nuevos criterios para la caracterización de las conducciones a presión”. Ciencia y Técnica de la Ing. Civil. Revista de Obras Públicas. N° 3463 (febrero). España.
- Balairon, L.** (2009) “Guía técnica de las tuberías plásticas en las obras hidráulicas” AseTUB. Universidad de Salamanca. España.
- Fujiwara, O and Dey, D.** (1987), “Two adjacent pipe diameters at the optimal solution in the water distribution network models”. Water Resources Research, vol.23, no. 8, pp. 1457-1460.
- Hernández, M.** (2008). “Diseño hidráulico de una línea de conducción de agua potable por gravedad a la población de Arteaga, Michoacán”. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Hidráulica. México.
- Martínez, M.** (1993).“Hidráulica aplicada a proyectos de riego” Universidad de Murcia, Secretariado de Publicaciones. Murcia. España.
- Méndez, M.** (1995). “Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua”. Universidad Católica Andrés Bello,. Fondo Polar – UCAB. Facultad de Ingeniería. Publicaciones UCAB. Caracas.
- Mogar, S.A.** “Sistema de tuberías de polietileno de alta densidad sujetas a presión interna”. Disponible en: carlos@mogar.com.mx pp. 11. Consultado: dic. 2011.
- Pérez, R.** (2004). “Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. España. (Octubre).
- Revinca, C.A.** (2010). “Folleto técnico”. Zulia. Venezuela. Disponible en la página web: www.revinca.com. e-mail: revinca@iamnet.com. Consultado: dic. 2010.
- Tito Méndez, M.** (2010). ”La tecnología de tuberías de polietileno”. Editorial GEOCUBA, Ministerio de las Fuerzas Armadas, Habana.
- UNE-EN 12201-2:2003.** (2003). “Sistemas de canalización en materiales plásticos para conducción de agua. Polietileno (PE). Parte 2: Tubos” (Norma europea: EN 12201-2: 2003).
- UNIDELTA** (2001). “Manuale Tecnico T2001”. Unidelta S.P.A. Italia. Disponible en U.R.L.: www.unidelta.it, e-mail: unidelta@unidelta.it. Consultado: dic. 2010.