

Nuevos criterios para la caracterización de las conducciones a presión

New criteria for the specification of pressure pipes

Luis Balairón Pérez. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

*Director del Programa de Estructuras Hidráulicas del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX . luis.balairon@cedex.es
Profesor Asociado de la Universidad de Salamanca. balairon@usal.es. Escuela Politécnica Superior de Ávila*

Resumen: El presente artículo resume las conclusiones principales de la tesis doctoral "Nuevos criterios para la caracterización de las conducciones a presión" defendida por D. Luis Balairón Pérez en abril de 2005 en la Universidad Politécnica de Madrid para la obtención del grado de Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, la cual será publicada este año 2006 en el Programa Editorial del Ministerio de Fomento como monografía CEDEX. En ella se proponen unas nuevas directrices para simplificar la actual normativa técnica relativa a las conducciones a presión.

Palabras Clave: Tuberías, Normativa, Terminología, Coeficientes de seguridad, Clasificación

Abstract: This paper deals the main conclusions of the thesis "New criteria for the standardization of the pressure water pipelines" delivered by Mr. Luis Balairón Pérez in April 2005 at the Madrid Polytechnical University in which a new guidelines are proposed for improving the actual technical standardization in the field of pipes. The complete thesis will be published this year at the official Spanish Ministry of Fomento Editorial Programme as a CEDEX monography.

Keywords: Pipes, Standards, Terminology, Design coefficients, Classification

1. Introducción

La actual normativa técnica en materia de tuberías, aun siendo abundante, es susceptible de ser mejorada especialmente en lo que se refiere a establecer criterios unificados para caracterizar las distintas tipologías de conducciones, de manera que se trate de solucionar la problemática actual derivada de la enorme dispersión de criterios existente en el sector (distinta terminología, diferentes valores de los coeficientes de seguridad, controles de calidad heterogéneos, múltiples métodos para el dimensionamiento, etc.).

Así, aunque en los últimos 40 ó 50 años se han promovido notables actuaciones normativas en España en materia de tuberías para el transporte de agua en un sentido amplio (abastecimientos y saneamientos de poblaciones, regadíos, hidroelectricidad, trasvases, emisarios submarinos, etc) auspiciadas desde numerosos organismos

(administraciones públicas, operadores del ciclo urbano del agua, organismos de normalización, etc) y con distintos objetivos lo cierto es que la Reglamentación en la materia es claramente mejorable en la actualidad, algo que, de alguna manera, es extensible al resto de obras hidráulicas las cuales cuentan, en general, con un grado de desarrollo normativo inferior al de otras infraestructuras públicas (carreteras, puertos, etc).

En concreto, en el presente trabajo se han realizado unas propuestas encaminadas a lograr una mejor caracterización de las conducciones relativas a los tres aspectos siguientes: terminología, coeficientes de seguridad y parámetros de clasificación. Tales propuestas se basan en el contenido de la Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión (CEDEX, 2003), documento redactado con el objeto de sintetizar el estado actual de la técnica en lo relativo a la normalización de dichas infraestructuras (ver Balairón, 2004).

Fig. 1. Portadas de la "Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua presión" y "Nuevos criterios para la caracterización de las conducciones a presión", publicaciones del CEDEX sobre la materia.



2. Terminología empleada para caracterizar las conducciones a presión

La normalización de la terminología científica es una ayuda fundamental a la sociedad por la eliminación que supone de barreras técnicas y comerciales, la cual, además, favorece la transferencia de conocimientos al asegurar una comunicación adecuada. Es, pues, la actividad encargada de fijar denominaciones y sus correspondientes definiciones con objeto de hacer posible una comunicación que no de lugar a confusiones como consecuencia de la univocidad de sus términos, teniendo en cuenta el principio de la economía del lenguaje, de manera que en cualquier ejercicio de normalización industrial, la utilización de criterios terminológicos comunes es clave para el éxito del proyecto.

Una de las cuestiones que mayor confusión crea en el sector específico de las tuberías es la relativa a la terminología que se emplea, pues ésta es, en ocasiones, dispar. Por ello, un avance importante en la normalización de las tuberías sería el proponer unos criterios que simplifiquen en lo posible la situación anterior, estableciendo con la mayor claridad posible la relación entre esa nueva terminología propuesta y la convencionalmente usada hasta ahora. En concreto, las propuestas de simplificación terminológica que se hacen a continuación son relativas a los dos siguientes conceptos fundamentales en el ámbito de las tuberías: los diámetros y las presiones.

2.1. El concepto de diámetro nominal, DN

En el ámbito de las tuberías, el tradicional concepto de diámetro nominal (DN) encierra una mayor complejidad de la que inicialmente cabría suponer, pues, según tipologías, tres son los posibles criterios para entender tal acepción:

- Criterio 1. Que el término *DN* se refiera estrictamente al diámetro interior. Se trata del caso de los tubos de

hormigón (y de los antiguos de fibrocemento), los cuales son fabricados de manera que se mantiene fijo su diámetro interior y las variaciones de espesor se logran por modificación del diámetro exterior.

- Criterio 2. Es el caso contrario, esto es, el término *DN* se refiere estrictamente al diámetro exterior. Ocurre en los tubos de acero y en los de materiales termoplásticos (PVC-U, PE y PVC-O), en los que su proceso de fabricación es tal que se mantiene fijo su diámetro exterior y las variaciones de espesor se logran por variación del interior.

- Criterio 3. En este caso, el término *DN* se refiere, *aproximadamente*, al interior (es el caso de los tubos de fundición). En ellos el diámetro exterior es fijo, de manera que los posibles diámetros interiores reales son variables (en función de cual sea el espesor del tubo). En consecuencia, el *DN*, al referirse en estos tubos por tradición al diámetro interior, ha de ser necesariamente un valor aproximado, pero no exacto, respecto al valor real de dicho diámetro interior (por las razones antes expuestas).

Para mayor dificultad, en los tubos de PRFV el término *DN* puede responder a los criterios 1 y 3. Efectivamente, estos tubos admiten ser fabricados por dos procedimientos diferentes, según sea constante el diámetro interior o el exterior. Si el diámetro fijo en el proceso de fabricación es el interior (arrollamiento mecánico sobre mandril; los llamados tubos de la Serie A), el *DN* se identifica con dicho valor (situación como en los tubos de hormigón; criterio 1). Si, por el contrario, el diámetro fijo durante la ejecución del tubo es el exterior (fabricación por centrifugado, tubos de la Serie B), el *DN* es aproximadamente el interior, tal y como ocurría con los tubos de fundición (criterio 3).

Indudablemente, desde el punto de vista del usuario de una conducción, lo más sencillo sería que el término *DN* se refiriera en todas las tipologías de tuberías a un mismo concepto, bien fuera el diámetro interior, el exterior, el medio o cualquier otro. A más a más, lo más intuitivo sería que el *DN* se identificara con el interior, pues éste es el que condiciona la capacidad hidráulica de una conducción, y la utilidad del concepto de *DN* es precisamente caracterizar dicha capacidad hidráulica.

Ello no es fácilmente alcanzable ya que en el motivo último de que el término *DN* se refiera en unos tubos al diámetro interior y en otros al exterior hay unas poderosas razones de peso que mucho tienen que ver con los procesos de fabricación de cada tipología de tuberías, además de razones de tradición.

Con todo, la propuesta realizada para simplificar el alcance del término *DN* sería respetar dos posibles criterios para su acepción: qué en aquellos tubos en los que el

proceso de fabricación sea tal que el diámetro interior se mantenga fijo y las variaciones de espesor se obtengan por modificación del diámetro exterior, el término DN se refiera al diámetro interior y viceversa (que en los tubos en los que el proceso de fabricación el diámetro exterior se mantenga fijo y las variaciones de espesor se obtengan por modificación del diámetro interior, el término DN se refiera al exterior).

Lo anterior supone mantener los criterios 1 y 2 antes enunciados y eliminar el 3. Obsérvese que, en la actualidad, mientras que en los tubos de hormigón, en los de acero y en los termoplásticos se sigue la propuesta realizada, en los de fundición y en los de PRFV no es así. Todo ello, de manera resumida, podría expresarse de la siguiente forma:

- DN = Diámetro interior (criterio 1) Tubos de hormigón y en los de PRFV (Serie A)
- DN = Diámetro exterior (criterio 2) Tubos de fundición, acero, materiales termoplásticos y PRFV (Serie B)

Una dificultad derivada de lo anterior sería que (en la hipótesis de mantener las actuales dimensiones normalizadas de fabricación de los tubos) los valores normalizados de los DN en los tubos de fundición y en los de PRFV de la Serie B (que realmente son los que cambian respecto a la situación actual) serían diferentes a los actuales.

Ello implicaría la necesidad de cambiar bien las normas para dar cabida a esos nuevos valores o bien variar los procesos de fabricación para adecuarlos a los valores normalizados en la actualidad de los DN. Claramente parece más sencillo lo primero, si bien los DN normalizados en los tubos de fundición y PRFV de la serie B resultarían poco intuitivos.

2.2. La terminología empleada para la caracterización de las presiones

Si la terminología que se utiliza para referirse a los diámetros es a veces confusa, el problema alcanza cotas mucho mayores en el caso de los vocablos empleados para referirse a las presiones hidráulicas que solicitan a una conducción. Así, por ejemplo el tradicional concepto de *presión nominal (PN)* es un claro ejemplo de ello. En unos tubos se entiende que incluye las sobrepresiones debidas al golpe de ariete, en otros no; en según que materiales se refiere a la resistencia del tubo en el corto o en el largo plazo; o, sencillamente, en unos tubos se utiliza el concepto y en otros no se emplea.

Y es que son muy numerosos los conceptos que se utilizan para referirse a dichas presiones sin que en lo más

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
Situación actual	Tubos de hormigón Tubos de PRFV (serie A)	Tubos de PVC Tubos de PE Tubos de acero	Tubos de fundición Tubos de PRFV (serie B)
Situación propuesta	Tubos de hormigón Tubos de PRFV (serie A)	Tubos de PVC Tubos de PE Tubos de acero Tubos de fundición Tubos de PRFV (serie B)	

Fig. 2. Nuevos criterios propuestos para caracterizar el término de "Diámetro nominal" en las conducciones.

absoluto esté precisa la frontera entre unos y otros. Así se habla de presión nominal, presión normalizada, presión de timbre, presión máxima de trabajo, presión de servicio, presión de diseño, presión máxima de diseño y así un largo etcétera, sin que esté suficientemente establecido a que se refieren unos u otros términos.

Con el afán de introducir una normalización común para las distintas tipologías de tuberías (terminología, dimensiones, parámetros de clasificación, etc), en el año 2000 se publicó la norma UNE-EN 805, la cual diseñó una terminología novedosa que pretendía ser común para todos los materiales, de manera que las sucesivas normas específicas de cada tipología fueran incorporando dichos vocablos.

En los párrafos siguientes se pretende abundar en esa dirección, estableciendo unos criterios comunes para la terminología empleada para caracterizar a las presiones (tanto las que solicitan a la conducción como las que cada componente es capaz de resistir individualmente), apoyados en las pautas que introdujo la norma UNE EN 805 y confrontados a los tradicionalmente utilizados en España a la luz del PPTG para Tuberías de Abastecimiento de Agua del MOPU de 1974.

a) Presiones hidráulicas que solicitan a la conducción

- Presión estática: *Es la presión en una sección de la tubería cuando, estando en carga, se encuentra el agua en reposo.* Este concepto, aunque obvio, no se encuentra definido en la norma UNE-EN 805:2000, si bien sí era considerado en el Pliego de Tuberías MOPU 1974.
- Presión de diseño (DP) : *Es la mayor de la presión estática o la presión máxima de funcionamiento en régimen permanente en una sección de la tubería, ex-*

Tabla 1. Denominaciones empleadas para referirse a las presiones hidráulicas que solicitan a la tubería

Concepto	Norma UNE-EN 805:2000		Pliego MOPU 1974	
	Denominación	Siglas	Denominación	Siglas
Presión solicitante cuando, estando en carga, se encuentra el agua en reposo	Presión de diseño (la mayor de ambas)	DP	Presión estática	
Presión máxima en funcionamiento en régimen permanente			Presión de servicio	
Presión máxima que puede alcanzarse considerando el golpe de ariete	Presión máxima de diseño	MDP	Presión máxima de trabajo	Pt
Presión a la que se prueba la tubería una vez instalada y previo a la Recepción	Presión de prueba de la red	STP	Presión de prueba en zanja	
			Presión de prueba de estanquidad	

cluyendo, por tanto, el golpe de ariete. El Pliego de Tuberías MOPU 1974 utilizaba el término "presión de servicio" para referirse a la máxima presión en funcionamiento, excluyendo, por tanto, el golpe de ariete. El término "presión de diseño" y sus siglas DP son las adoptadas en UNE-EN 805:2000.

Es diferente el caso de una impulsión que el de una tubería por gravedad; en el primer caso, en el funcionamiento normal, la presión en la tubería será mayor que la estática, siendo la DP, por tanto, la máxima de funcionamiento, mientras que en el caso de una tubería por gravedad, la presión en funcionamiento es menor que la estática, coincidiendo ésta en este caso, por tanto, con la DP.

- Presión máxima de diseño (MDP). *Es la presión máxima que puede alcanzarse en una sección de la tubería en servicio, considerando las fluctuaciones producidas por un posible golpe de ariete.* Este concepto, de gran importancia, sí figuraba definido expresamente en el Pliego del MOPU 74 como "presión máxima de trabajo" y lo representaba con las siglas P_t. Al igual que en el caso anterior, el término "presión máxima de diseño" y sus siglas MDP son las adoptadas en UNE-EN 805:2000.

- Presión de prueba de la red (STP). *Es la presión hidráulica interior a la que se prueba la tubería una vez instalada y previo a la Recepción para comprobar su estanquidad.* El Pliego de Tuberías MOPU 74 entendía que había dos presiones diferentes para esta finalidad: la "presión de prueba en zanja" y la "presión de prueba de estanquidad", si bien no utilizaba sigla alguna para referirse a ellas. Al igual que en los casos anteriores, el término "presión de prueba de la red" y sus siglas STP son las adoptadas en UNE-EN 805:2000.

En la tabla 1, para una mayor claridad, se relaciona la terminología empleada en UNE-EN 805:2000 y el

Pliego de Tuberías del MOPU de 1974 para referirse a las distintas presiones que solicitan a la tubería.

b) Presiones relativas a los componentes

- Presión nominal (PN). La PN (sólo para cuando haya lugar) puede entenderse como un valor numérico de una serie convencional que se adopta, a efectos de referencia, para caracterizar los componentes en relación con la presión hidráulica interior (en kp/cm²) que son capaces de resistir en ausencia de cargas externas.

A modo de resumen, la utilización del concepto de PN es de aplicación para las válvulas y para los tubos de materiales plásticos (PVC-U, PVC-O, PE y PRFV) no empleándose, en general, ni en los tubos de hormigón ni en los metálicos. En estos últimos (tubos metálicos, acero y fundición), cuando se unan mediante bridas, sí se emplea también el concepto de PN para caracterizar a las bridas en relación con la presión interior.

Simplificadamente, y a modo de síntesis, en la actualidad, en los anteriores componentes en los que se emplea este concepto de PN, se entiende que ésta es la presión que dicho elemento es capaz de aguantar en servicio sin considerar el golpe de ariete.k.golpe de ariete; y en ausencia de cargas externas.

La PN es un concepto de gran tradición en el ámbito de las tuberías a presión, el cual no figura recogido en la norma UNE-EN 805:2000, si bien sí se considera en muchas de las normas UNE específicas de producto (incluso recientes). Ya el Pliego de 1974 hablaba de "presión normalizada, P_n", para los tubos fabricados en serie, definiéndola como "aquella con arreglo a la cual se clasifican y timbran los tubos".

- Presión de funcionamiento admisible (PFA), presión máxima admisible (PMA) y presión de prueba en obra

admisible (PEA). La norma UNE-EN 805:2000 introdujo como novedosos estos términos, equivalentes de algún modo al concepto anterior de PN. No obstante, desde hace ya tiempo las normas norteamericanas AWWA para referirse a la PFA o a la PMA, tal como lo entiende la norma UNE EN 805:2000, utilizan las denominaciones de Pressure Class (PC) o Pressure Rating (PR), respectivamente. En cualquier caso, el alcance y significado de los términos anteriores es el siguiente:

- Presión de funcionamiento admisible (PFA). "Presión máxima que un componente es capaz de resistir de forma permanente en servicio"
- Presión máxima admisible (PMA). "Presión máxima, incluido el golpe de ariete, que un componente es capaz de soportar en servicio"
- Presión de prueba en obra admisible (PEA). "Presión hidrostática máxima que un componente recién instalado es capaz de soportar, durante un periodo de tiempo relativamente corto, con objeto de asegurar la integridad y estanquidad de la conducción"

De las anteriores definiciones, es fácil ver que PFA equivale aproximadamente al concepto clásico de PN. Puede también concluirse de ello que en el espíritu de la norma UNE-EN 805:2000 está el eliminar el tradicional concepto de PN y dividirlo en tres, PFA, PMA y PEA. Por otro lado, la formulación básica que rige el comportamiento de una tubería ante la acción de la presión hidráulica interior en servicio es:

$$DP \leq \frac{2eR_m}{D_m C_{DP}} \quad MDP \leq \frac{2eR_m}{D_m C_{MDP}}$$

DP y MDP: presión de diseño y máxima de diseño, en N/mm²

e: espesor de la pared del tubo, en mm

D_m: diámetro medio del tubo, en mm. (D_m = OD - e)

OD: diámetro exterior del tubo, en mm

R_m: resistencia a la tracción del material constitutivo de la tubería, en N/mm²

C_{DP} y C_{MDP}: coeficiente de seguridad ante la actuación de la DP o de la MDP, respectivamente

Conforme a las definiciones introducidas de PFA y PMA, se cumple que:

$$PFA = \frac{2eR_m}{D_m C_{DP}} \quad PMA = \frac{2eR_m}{D_m C_{MDP}} \quad \frac{PFA}{PMA} = \frac{C_{MDP}}{C_{DP}}$$

Tras la aprobación de la norma EN 805, los distintos Comités Técnicos de CEN (CTN) acordaron modificar

sus normas de producto para establecer los valores de las presiones PMA, PFA y PEA de cada tipología de tubería, si bien, en la actualidad, las únicas que han hecho esta transposición completa han sido la UNE-EN 545:2002 (tubos de fundición) y la UNE-EN 1074:2000 (válvulas). En otros materiales (PVC-U y PE, por ejemplo), las respectivas normas de producto no han hecho más que una trasposición parcial (relación de PN con PFA y PEA, por ejemplo, o solo con PFA).

Si los anteriores conceptos de PFA, PMA y PEA estuvieran completamente introducidos en la normalización de todas las tipologías de tuberías, el diseño de las conducciones se vería considerablemente simplificado, pues, conociendo los valores de DP, MDP y STP, se trataría simplemente de seleccionar una tubería cuyas PFA, PMA y PEA fueran superiores, respectivamente, a tales valores (procedimiento que no dejaría de ser una simplificación, pues siempre quedaría verificar que la conducción resiste también la acción de las cargas exteriores: peso de las tierras, tráfico u otras).

3. Los coeficientes de seguridad ante la actuación de la presión hidráulica interior

En Europa, los valores usualmente normalizados para los coeficientes de seguridad (CS) ante la actuación de la presión hidráulica interior son los que se indican la tabla 2.

En la tabla 2 no se han incluido los tubos de hormigón ya que su dimensionamiento es completamente diferente al del resto de materiales por su condición de heterogéneos, de manera que se han excluido de las propuestas realizadas en el presente trabajo de normalización de los CS. En cualquier caso, a la vista de la Tabla 2, pueden concluirse que los CS no están definidos de forma rigurosa en todos los materiales para las mismas hipótesis de carga (ya que en unos materiales solo se define el C_{DP}, en otros el C_{MDP}, e incluso en alguno ambos), que la variable sobre la que se aplican dichos CS es diferente de unos materiales a otros y que los valores en sí mismos de los CS son bastante diferentes en cada uno de los diferentes materiales

En el presente artículo se realizan unas aportaciones encaminadas a mejorar la definición de tales coeficientes.

3.1. Tubos de fundición y de acero

En la actualidad, en Europa los tubos de fundición son usualmente dimensionados según el criterio recogido en

Tabla 2. Coeficientes de seguridad (CS) actualmente utilizados en las distintas tipologías de tuberías

Material	C_{DP}	C_{MDP}	Variable sobre la que se aplica el CS	Norma
Fundición	3,00	2,50	Resistencia mínima a la tracción (R_m)	UNE-EN 545:2002
Acero	2,00		Límite elástico (L_e , min)	AWWA M11
PVC-U	DN<110	2,50	Tensión mínima requerida (MRS)	UNE EN 1452:2000
	DN>110	2,00		
PE	1,25		Tensión mínima requerida (MRS)	UNE EN 12201:2003
PVC-O	1,60		Tensión mínima requerida (MRS)	prISO 16422.4:2000
PRFV	1,80		Resistencia a la tracción de la parte estructural del tubo a largo plazo (σ_p , 50)	AWWA M 45

la norma UNE-EN 545:2002, según la cual se establece que el C_{DP} ó el C_{MDP} sean, respectivamente, 3,0 ó 2,5 (ver Tabla 2) sobre el valor de la R_m de la fundición. Otras normas, no obstante (AWWA C-150) proponen simplemente un C_{MDP} de 2,0 afectando al valor del L_e , si bien es un criterio poco utilizado en España.

Los tubos de acero, sin embargo, no tienen un criterio universalmente aceptado para la fijación de los valores de los CS, sino que en función de la norma o manual consultado, el procedimiento es variable.

Así, en primer lugar, debe destacarse el hecho de que el proyecto de norma europea prEN 10.224:1998, llamado a normalizar estos tubos en el ámbito de la Unión Europea en un futuro cercano, nada dice al respecto de los valores recomendados para estos CS, al contrario de lo que ocurre en la práctica mayoría de las restantes tipologías de tuberías, para las que las respectivas normas europeas de producto orientan al usuario al respecto.

En este estado de cosas, la mayoría de los manuales y normas técnicas al respecto (AWWA, 1985; United States Pipe and Foundry Company, 1976; Steel Plate Fabricators Association, 1970) suelen adoptar como C_{MDP} en el diseño de los tubos de acero el valor de 2, aplicado sobre el L_e (eso es lo recogido en la Tabla 2). Sin embargo, otras instituciones (Bureau of Reclamation, 1975; ASCE, 1993) recomiendan como valor del CS el que resulte más restrictivo de las dos siguientes condiciones: C_{MDP} de valor 3 aplicado sobre la R_m ó C_{MDP} de 1,5 considerado sobre el L_e . En cualquier caso, no se suele fijar el C_{DP} en los tubos de acero.

La primera diferencia notable entre todos los criterios anteriores es que en unos casos el CS se aplica sobre el valor de la R_m y en otros sobre el de su L_e , los cuales son dos indicadores altamente representativos de las características mecánicas de un acero o de una fundición y susceptibles de ser aplicados sobre ellos el CS, de manera

que la primera propuesta de este trabajo sería que este CS se aplique en ambos casos sobre la misma variable (L_e o R_m), ya que no parece justificado el que se haga de forma diferente en cada caso.

En concreto, se propone que el CS en los tubos metálicos se aplique sobre el L_e y no sobre la R_m , ya que tiene mas sentido físico limitar el L_e que la R_m , pues, al no ser aconsejable que los materiales metálicos trabajen por encima de su L_e , esta variable es la que representa realmente su capacidad de resistir tracciones.

Además, en los tubos de fundición es prácticamente indiferente aplicar el CS sobre una u otra variable, ya que ambos parámetros están relacionados sensiblemente de forma directa habida cuenta que las propiedades mecánicas de cualquier fundición son casi idénticas (según UNE-EN 545:2002, la R_m de la fundición es 420 N/mm² y el L_e oscila entre 270 y 300 N/mm², con lo que la relación entre ambas se mueve entre 1,40 ó 1,55). En los tubos de acero, sin embargo, la relación entre ambas magnitudes puede llegar a ser altamente variable, de manera que en función de la norma de producto empleada y el tipo de acero seleccionado, pueden resultar valores de la R_m en el acero del orden de 1,15 a 3,00 veces superiores a su L_e , de manera que en el acero no es indiferente establecer el CS sobre uno u otro parámetro, ya que las relaciones no son inmediatas.

En cuanto a los nuevos valores propuestos para los CS en los tubos de fundición aplicados sobre el L_e habría que proceder a transformar los valores actuales minoradores de la R_m . Así, el C_{DP} de valor 3 aplicado sobre la R_m equivaldría a un valor que debería moverse entre 1,93 y 2,14 sobre el L_e ; análogamente, el C_{MDP} de valor 2,50 aplicado sobre la R_m equivaldría a un valor que debería oscilar entre 1,61 y 1,78 sobre el L_e .

Se propone que en los tubos de fundición el C_{DP} aplicado sobre el L_e sea de valor 2,00, cifra que encaja per-

fectamente entre la horquilla de valores antes citada y resulta fácilmente normalizable. Para el C_{MDP} aplicado sobre el L_e se propone el valor de 1,65 ya que queda también perfectamente encajado en la horquilla de valores posibles y además, mantiene la misma proporcionalidad con el anterior C_{DP} propuesto de 2 que la existente entre los C_{DP} y C_{MDP} establecidos en UNE EN 545:2000 aplicados sobre la R_m (3,0 y 2,5).

El diseño resultante con este criterio (y por ende con el de la norma UNE EN 545:2002, pues ambos son muy similares) es algo menos conservador que el de la norma AWWA C-150, pues en ella se propone un C_{MDP} de 2,00 en el L_e . En cualquier caso, la experiencia europea en el uso de estas tuberías no hace necesario aumentar los CS.

Para los tubos de acero se propone aplicar los mismos valores que los especificados para los tubos de fundición (C_{DP} y C_{MDP} 2,0 y 1,65, respectivamente, y minorando el L_e), pues parece lógico emplear similares coeficientes por las analogías que ambas tipologías de tuberías presentan (similares características técnicas, geométricas, económicas, parecidos usos de estas conducciones, etc.).

3.2. Tubos de materiales termoplásticos

Dos son actualmente los posibles criterios para el diseño 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 las normas EN. Conceptualmente ambos son similares, pues parten de minorar la resistencia que se supone tendrá el material constitutivo de la tubería en el largo plazo por un CS, para, de esta manera, determinar la máxima presión que puede solicitar a dicha tubería a partir de las fórmulas clásicas de la resistencia de materiales:

$$P \leq \frac{2eR_m}{D_m CS}$$

- P: presión hidráulica interior (N/mm²)
- e: espesor de la pared del tubo (mm)
- D_m : diámetro medio del tubo (mm)
- R_m : resistencia a la tracción del material de la tubería a largo plazo (N/mm²)
- CS coeficiente de seguridad

Las diferencias, conforme se detalla en los apartados siguientes, surgen al cuantificar los CS, al considerar o no las sobrepresiones debidas al golpe de ariete en el diseño o al precisar el alcance de la resistencia a la tracción del material constitutivo de la tubería a largo plazo.

- El criterio de las normas norteamericanas AWWA y ASTM. Estas normas han sido utilizadas en Norteamérica

ca para el diseño de los tubos de materiales termoplásticos desde hace más de 40 años. Como criterio general, se basan en identificar la resistencia de cálculo a la tracción del material constitutivo de la tubería a largo plazo con la denominada HDB (Hidrostatic Basis Design; Base Hidrostática de Diseño), que, simplificada, es la resistencia a tracción que se supone tendrá el material dentro de 11 años (100.000 horas). Como criterios específicos para el diseño de los tubos de PVC-U o de PE se siguen los que se indican a continuación.

a) Tubos de PVC-U. En los tubos de PVC-U de diámetro igual o inferior a 3 pulgadas (los típicos de las redes de distribución) la norma AWWA C900 (o el Manual AWWA M23) determina que el C_{MDP} sea de 2,5, limitando la máxima sobrepresión debida al golpe de ariete (ΔP_{max}) a la calculada mediante la fórmula de Allievi suponiendo una velocidad de circulación del agua de 0,6 m/s (2 fps). Ello permite calcular la PFA y la PMA para cada una de las relaciones de dimensiones estándar SDR (relación entre el diámetro y el espesor) normalizadas en AWWA (ver Tabla 3).

En los tubos de PVC-U de diámetro igual o superior a 4 pulgadas la norma AWWA C905 (o el Manual AWWA M23) establece que el C_{MDP} sea 2, sin especificar cual es la máxima sobrepresión admisible debida al golpe de ariete. Con tal coeficiente, los valores normalizados para la PMA son los que se indican en la Tabla 3, en función de las SDR normalizadas en la norma AWWA C 905.

b) Tubos de PE. En ellos, el criterio propuesto por las normas AWWA para su dimensionamiento es algo diferente al anterior. En concreto, tales normas proponen utilizar un C_{DP} de valor 2, a la vez que limitan el valor de la PMA a un múltiplo de la PFA:

- DN < 3 pulg. (AWWA C901)PMA = 1,25 PFA
- DN > 3 pulg. ante sobrepresiones ordinarias (AWWA C906)PMA = 1,50 PFA
- DN > 3 pulg. ante sobrepresiones extraordinarias (AWWA C906)PMA = 2,00 PFA

Lo anterior implica que el C_{MDP} a aplicar al HDB sería, respectivamente para los tres casos anteriores, 1,60, 1,33 y 1,00. Con el C_{DP} indicado de valor 2 los valores de la PFA resultan ser los que se indican en la tabla 3 según tipos de PE y SDR normalizados en AWWA (en concreto, AWWA normaliza tres tipos de polietilenos: PE 2406, PE 3406 y PE 3408, cuyos HDB son 1.250 psi para los dos primeros y 1.600 psi para el PE 3408; 8,61 y 11,02 N/mm², respectivamente). Los valores de las PMA se calcularían mediante los múltiplos anteriores, según casos.

Tabla 3. Valores de PFA y/o PMA en los tubos de materiales termoplásticos según normas AWWA (izda) o CEN (dcha) en MPa

SDR	PVC-U		PVC-U	PE2406 PE3406	PE3408	SDR	PVC-U (DN<90)	PVC-U (DN>90)	PE 40	PE 63	PE 80	PE 100
	(DN< 3 in)	(DN>4 in)										
7,3					0,55	7,4			1,00		2,00	2,50
9,0				0,55	0,69	9,0			0,80		1,60	2,00
11,0				0,69	0,86	11,0	2,00	2,50		1,00	1,25	1,60
13,5				0,86	1,10	13,6	1,60	2,00	0,50	0,80	1,00	1,25
14,0	1,71	1,43				17,0	1,25	1,60	0,40		0,80	1,00
17,0				1,10	1,38	17,6	1,00	1,25		0,60		
18,0	1,30	1,06	1,62			21,0	0,80	1,00	0,32	0,50		0,80
21,0			1,38	1,38		22,0					0,60	
25,0	0,91	0,71	1,15			26,0	0,75	0,80	0,25	0,40	0,50	
26,0			1,10			27,6						0,60
32,5			0,88			33,0		0,60		0,32	0,40	0,50
41,0			0,69			41,0	2,00	2,50		0,25	0,32	0,40

- El criterio de las normas europeas EN. Estas normas son mucho más recientes que las norteamericanas. Están basadas en normas ISO y como criterio general se basan en identificar la resistencia de cálculo a la tracción del material constitutivo de la tubería a largo plazo con la conocida como Tensión Mínima Requerida, MRS, que, simplificada, es la resistencia que se supone tendrá el material dentro de 50 años.

Los tubos de PVC-U, en particular, son dimensionados según los criterios recogidos en la norma europea UNE EN 1452:2000, según la cual el C_{DP} es 2,50 ó 2,00, según que el DN de la tubería sea menor de 90 mm o mayor de 110, respectivamente, aplicado sobre el valor del MRS. Los tubos de PE, por su parte, se dimensionan según los criterios de la norma europea UNE EN 12.201:2003, según la cual el C_{DP} recomendado es 1,25 aplicado también sobre el valor del MRS. Con tales coeficientes, los valores de las PFA en las normas europeas resultan ser los que se indican en la tabla adjunta para los tubos de PVC-U o para los diferentes PE previstos en CEN (en las normas europeas se normalizan cuatro tipos de PE: el PE 40, 63, 80 y 100, cuyos MRS son, respectivamente, 4; 6,3; 8,0 y 10,0 N/mm²).

Los tubos de PVC-O, por su parte, son de desarrollo más reciente y su normalización está mucho menos desarrollada, de manera que el proyecto de norma ISO prISO 14622-4:2000, embrión de las futuras normas europeas al respecto, prevé un C_{DP} de 1,6 también sobre el MRS.

Ninguna de las normas europeas citadas anteriormente, en cualquier caso, establece cual debe ser el C_{MDP} ,

y lo cierto es que dicha ausencia constituye una carencia importante en el acervo tecnológico de estas tuberías, pues en la práctica real hay un claro desconocimiento sobre como se deben dimensionar estos tubos ante la actuación de las sobrepresiones instantáneas debidas al fenómeno del golpe de ariete.

- Comparación entre ambos criterios. Las normas norteamericanas y las europeas difieren, básicamente, en los dos siguientes aspectos:

a) En primer lugar, las normas AWWA normalizan, en general, tanto la PMA como la PFA, mientras que las normas CEN se limitan a regular únicamente la PFA que cada tipología de tubo admite, sin concretar la máxima sobrepresión debida al fenómeno del golpe de ariete admisible en cada caso.

b) Por otro lado, las normas CEN aplican el CS sobre el MRS, mientras que las norteamericanas lo hacen sobre el HDB.

En cualquier caso (normas europeas o norteamericanas), el diseño de los tubos de PVC-U es más riguroso que el de los tubos de PE.

Por otro lado, en el caso del PE, el diseño bien sea con las normas americanas o con las europeas es relativamente similar, mientras que en el PVC-U, en el primer caso (normas AWWA) el dimensionamiento es más conservador que en el segundo (normas CEN), algo que ya ocurría con los tubos de fundición.

En cualquier caso, los estudios de algunos investigadores en la materia (PPI, 2003; Zhou, Z y Palermo, E,

2004) concluyen en que la tendencia en todo el mundo salvo en Norteamérica es a la utilización de los criterios de las normas europeas, por lo que recomiendan la actualización de las citadas normas AWWA y ASTM para adaptarse a los criterios CEN, especialmente en el caso del PE, habida cuenta que las normas europeas tratan mejor las características de los nuevos materiales termoplásticos.

- Propuesta de nuevos coeficientes de seguridad. El planteamiento general de este trabajo respecto a la propuesta de unos nuevos CS en los tubos de materiales termoplásticos ante la actuación de la presión hidráulica interior consistió, básicamente, en tratar de aproximar los criterios de CEN y los de AWWA.

En concreto, dando por válido lo estipulado por CEN en cuanto a establecer los CS sobre el MRS, y adoptando en la medida de lo posible los valores propuestos en tales normas europeas para los C_{DP} , van a completarse tales criterios a partir de la experiencia norteamericana incorporando a los mismos una propuesta para la normalización de las sobrepresiones máximas admisibles, ya que, como se ha indicado anteriormente, la normalización de los CS en los tubos de materiales termoplásticos en las normas CEN adolece, básicamente, de que están fijados los C_{DP} pero no los C_{MDP} , por lo que el principal objetivo de este trabajo fué el tratar de determinar cuales podrían ser éstos.

La determinación de la tolerancia para resistir transitorios en los tubos de materiales plásticos ya ha sido estudiada por numerosos expertos, los cuales apuntan que son razonables sobrepresiones instantáneas de hasta el 50% del valor de la PN (PMA=1,5 PFA; Urrutia, 1997; Jacobi, 1965; Lörstch, 1965; Menges y Robert, 1968; NPG, 2001; Janson, 2003). A partir de tales estudios, y buscando un equilibrio entre que los nuevos CS no sean excesivamente pequeños y respondan al comportamiento real de las conducciones se ha llegado a proponer que el C_{MDP} se calcule mediante la siguiente expresión, con lo que resultan los CS que a continuación se proponen.

$$C_{MDP} = 1 + 0,40 \times (C_{DP} - 1)$$

a) Tubos de PVC-U. Se propone para estos tubos que el C_{DP} tenga un valor único de 2,00 (simplificando la normativa europea), lo que implica que el C_{MDP} en estos tubos sea 1,40.

b) Tubos de PE. Las normas CEN recogen como posibles para el C_{DP} los valores de 1,25; 1,60; 2,00; 2,50 y 3,20 para el diseño de los tubos de PE (aplicado sobre el valor del MRS), si bien recomienda el primero, esto es, 1,25, recomendación que hasta la fecha

es habitualmente seguida en el diseño de estos tubos en Europa.

Se propone para estos tubos que el C_{DP} tenga un valor de 1,60, superior al actualmente utilizado en Europa de 1,25, siguiendo las recomendaciones propuestas desde numerosos foros de aumentar tal coeficiente. Con el C_{DP} de 1,25 se habían constatado dificultades en las pruebas de tubería instalada, en la resistencia ante los transitorios o en el propio diseño mecánico de estos tubos (CEDEX, 2003). Además, un ligero aumento en el CS permitiría una mejor adecuación a los criterios de diseño de las normas AWWA

Tal valor del C_{DP} (teniendo en cuenta la expresión propuesta anteriormente), implica que el C_{MDP} en los tubos de PE sea de 1,25

c) Tubos de PVC-O. No hay en la actualidad una metodología para el diseño de los tubos de PVC-O aceptada de manera universal, ya que la normativa que regula este tipo de tubos (por tratarse de una tecnología relativamente reciente) está aun en fase de elaboración.

De hecho en la actualidad se está elaborando el proyecto de norma prISO 16422-4:2000 que quizás en un corto plazo se convierta en norma europea EN y, consecuentemente, en UNE-EN. Las últimas versiones de dicho proyecto (2003) preveían un C_{DP} de 1,6, sin establecer cual debería ser el C_{MDP} (como en los restantes materiales termoplásticos).

El presente trabajo acepta como válido dicho C_{DP} de 1,6, el cual equivaldría (teniendo en cuenta la expresión propuesta anteriormente) a un C_{MDP} de 1,25 (igual que en el PE).

3.3. Tubos de PRFV

Los tubos de PRFV por su condición de heterogéneos presentan algunas diferencias importantes respecto a las anteriores tipologías de tipo homogéneo. Así, en ellos el CS se aplica minorando el valor de la resistencia a la tracción circunferencial de la parte estructural del tubo a largo plazo, característica mecánica aproximadamente equivalente al de R_m en los tubos de material homogéneo.

En ausencia de normas europeas para el diseño de estos tubos de PRFV, lo usual es dimensionarlos según las especificaciones de la norma AWWA C-950, la cual (ver Tabla 2), establece un C_{DP} de 1,8, afectando al valor de tal resistencia, y determinando, además, que la máxima sobrepresión debida a la actuación del golpe de ariete sea de un 40% respecto al valor de la presión en servicio, sin considerar tal efecto (PMA = 1,4 PFA). Ello implica que, el C_{MDP} sería la relación entre 1,8 y 1,40, esto es 1,30, aproximadamente.

Tabla 4. CS propuestos ante las tracciones en las distintas tipologías de tuberías

Material	C_{DP}	C_{MDP}	Relación PMA/PFA	Variable sobre la que se aplica el coeficiente de seguridad
Fundición	2,00	1,65	1,20	Límite elástico (L_e , min)
Acero	2,00	1,65	1,20	Límite elástico (L_e , min)
PVC-U	2,00	1,40	1,40	Tensión mínima requerida (MRS)
PE	1,60	1,25	1,30	Tensión mínima requerida (MRS)
PVC-O	1,60	1,25	1,30	Tensión mínima requerida (MRS)
PRFV	1,80	1,30	1,40	Resistencia a la tracción de la parte estructural del tubo a largo plazo ($\sigma_{r, 50}$)

Por la experiencia acumulada en Europa, desde el punto de vista de este trabajo se validan tales valores y se proponen los mismos como CS para el dimensionamiento de estos tubos de PRFV.

3.4. Resumen y propuesta

En la Tabla 4 se resume la propuesta de CS a emplear en las distintas tipologías de tuberías para el transporte de agua a presión en su dimensionamiento ante la actuación de la presión hidráulica interior, así como las relaciones entre la PMA y la PFA en cada una. Por simple comparación con la Tabla 2 pueden verse las diferencias introducidas, las cuales redundan sobre todo en una mayor uniformidad en la definición de estos CS.

4. Parámetros de clasificación de las tuberías

4.1. Situación actual

Los parámetros de clasificación de una tubería de material homogéneo son aquellas variables que determinan la capacidad hidráulica y mecánica de una conducción (diámetro, espesor, rigidez, resistencia característica, etc.).

Así entendidos, y en una primera aproximación, cabría pensar que los parámetros de clasificación debieran ser el diámetro de la conducción, el espesor de la pared y, en su caso, la resistencia del material (cuando no sea única para el mismo material, como ocurre en el acero, el PE ó el PVC-O), pues estas variables permiten determinar la capacidad hidráulica y mecánica de una conducción, pero, sin embargo, lo singular de las tuberías es que no hay prácticamente dos tipologías que se clasifiquen por los mismos parámetros, sino que cada una requiere una clasificación específica. En concreto, los parámetros utilizados en Europa para la clasificación de las tuberías son los siguientes según tipologías:

- Tubos de acero. Se clasifican por el DN (que se refiere al exterior), el L_e y el espesor nominal
- Tubos de materiales termoplásticos (PVC-U, PE y PVC-O). Se clasifican por su DN y por su PN y, adicionalmente, cuando sea necesario (PVC-O y PE), por su MRS. Cada combinación de DN y PN implica un valor del espesor nominal.

No obstante, en ocasiones, para clasificar los tubos de materiales termoplásticos en vez de utilizar la PN se emplea el parámetro SDR, pues ambos están directamente relacionados. Incluso otras veces se emplea el concepto serie S (relación entre el radio medio y el espesor) pues también guarda relación directa con ellos.

- Tubos de fundición. Se clasifican por su DN y por la conocida como "clase de espesor", de manera que cada combinación de ambos parámetros implica un valor de espesor nominal.

4.2. Propuesta de nuevos parámetros de clasificación

Se propone clasificar todas las tipologías de tuberías por su DN, por su espesor y, cuando sea necesario, por la resistencia constitutiva del material (esto es, extrapolar el sistema de clasificación de los tubos de acero a los de fundición y a los termoplásticos).

Una vez propuestos en apartados anteriores unos valores de los C_{DP} y C_{MDP} en cada tipología de tubería, la presente sugerencia de clasificación de las conducciones se completaría adscribiendo el valor de PFA y PMA para cada combinación de parámetros de clasificación por simple aplicación de la fórmula de los tubos delgados.

Ello permitiría hacer un predimensionamiento de la conducción, pero no obviaría la necesidad de hacer el dimensionamiento mecánico completo de la tubería para la hipótesis pésima de carga en las condiciones de instalación específicas de cada caso.

La clasificación así propuesta consistiría en una tabla para cada tipología de tubería que contuviera las com-

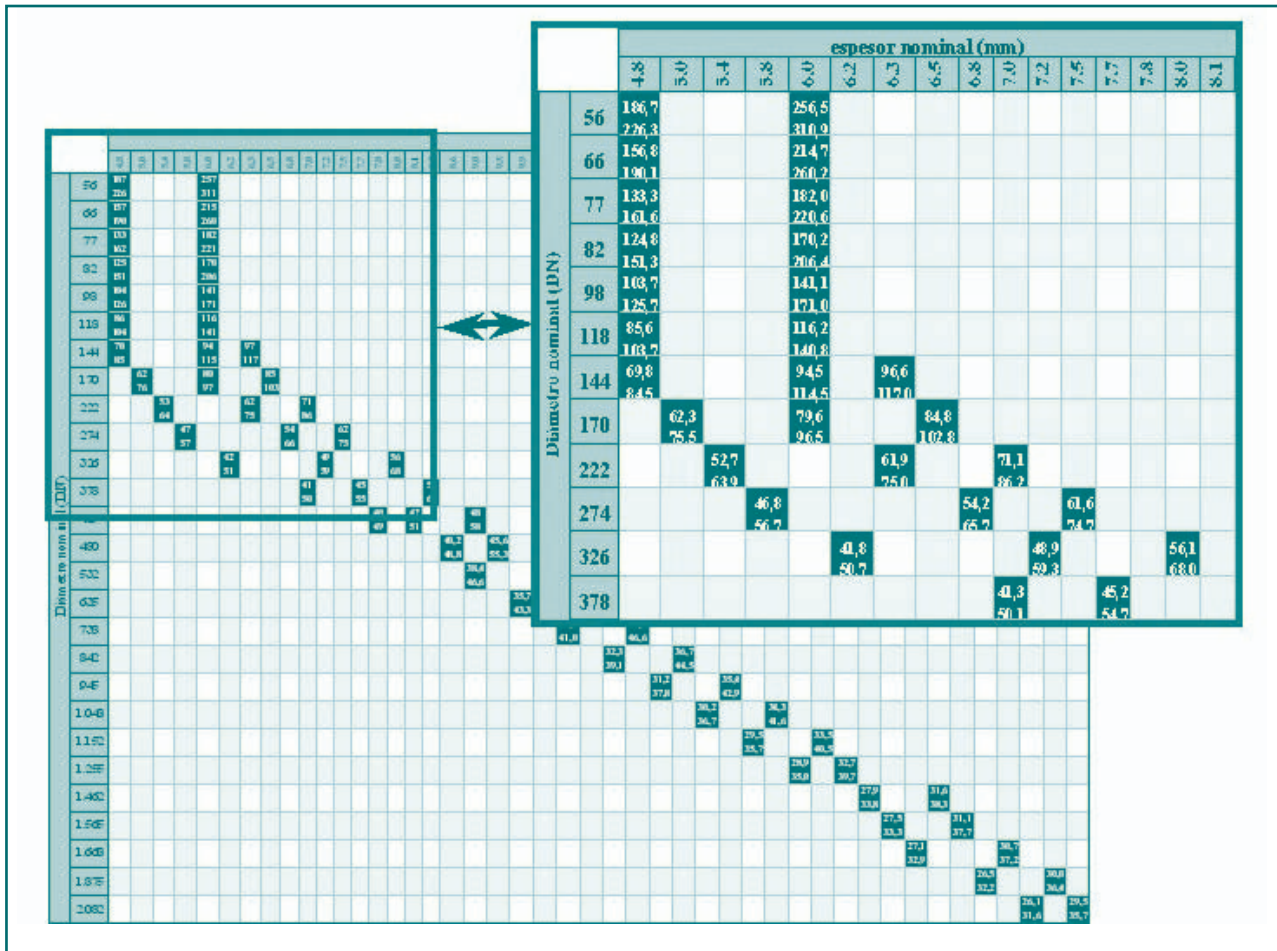


Fig. 3. Clasificación de los tubos de fundición por su diámetro y espesor nominal.

binaciones normalizadas de diámetro y espesor, así como los valores correspondientes de PFA y PMA para cada una de dichas combinaciones (en concreto, para cada combinación normalizada de DN y espesor se recogen en la misma celda los dos valores de PFA y PMA, en kp/cm^2 , el primero arriba y el segundo abajo).

Cuando la clasificación de los tubos requiera además del diámetro y del espesor como parámetros clasificatorios la resistencia del material constitutivo (lo que ocurre en el acero, el PE y el PVC-O), deberán elaborarse tantas tablas como valores normalizados haya para la resistencia, ya que los valores de PFA y PMA resultan diferentes para cada caso.

En la figura 3 se muestra un ejemplo a título orientativo del aspecto que tendrían las tablas de clasificación en los tubos de fundición tal como quedaría utilizando el DN y el espesor nominal como parámetros clasificatorios. Como se ha indicado en párrafos anteriores, en la tesis doctoral que da soporte al presente artículo se ha desarrollado en detalle la propuesta de clasificación B tal como quedaría para cada una de las tipologías de tuberías homogéneas. El presente artículo no puede incorporar todo

el contenido de tal propuesta (por su extensión), de manera que únicamente se muestran algunas figuras a título de ejemplo, que permitan tener una idea del alcance de la propuesta.

5. Conclusiones

Como conclusiones del presente artículo debe destacarse, en primer lugar, que se han propuesto unas simplificaciones terminológicas en el ámbito de las tuberías para el transporte de agua a presión, así como unos nuevos valores de los CS para el diseño de las conducciones a presión que redunden en una mejora respecto a los actualmente utilizados en Europa (ver Tabla 2 y Tabla 4)

Tales coeficientes podrían disminuirse sensiblemente, siempre y cuando la conducción tenga por destino un uso del agua que exija una garantía menor que el abastecimiento domiciliario o cuando los daños causados por posibles averías tengan una cuantía económica inferior.

Una conclusión sencilla de los valores de la Tabla 4 es que mientras que en los tubos de materiales metálicos la

máxima sobrepresión admisible debida al golpe de ariete es del 20% respecto a la presión de diseño, en los tubos de materiales plásticos dicha tolerancia aumenta al 30 o al 40%.

A partir de tales CS se ha propuesto una nueva posible clasificación de las tuberías que aportaría algunas ventajas, como las siguientes:

- La clasificación resulta igual para todas las tipologías, lo que redundaría en una simplificación de los criterios actuales
- El sistema es bastante intuitivo ya que se basa en el manejo de unas tablas de fácil comprensión
- Se aporta la información de los valores de PFA y PMA para las combinaciones normalizadas de diámetro y espesor en cada material, lo que da una idea aproximada de la capacidad de resistir presiones hidráulicas en cada caso particular. ♦

Simbología

CS	Coefficiente de seguridad
C_{DP}	CS ante la actuación de la DP
C_{MDP}	CS ante la actuación de la DP
DN	Diámetro Nominal
DP	Presión de Diseño
HDB	Base Hidrostática de Diseño
L_e	Límite elástico convencional
MDP	Presión Máxima de Diseño
MRS	Tensión Mínima Requerida
PEA	Presión de Prueba en Obra Admisible
PFA	Presión de Funcionamiento Admisible
PMA	Presión Máxima Admisible
PN	Presión Nominal
R_m	Resistencia a la tracción
SDR	Relación de Dimensiones Estándar
STP	Presión de Prueba de la Red

Referencias

-ASCE. *Steel Penstocks*. Nueva York (Estados Unidos), 1993.

-AWWA. *Manual M11. Steel pipe. A guide for design and installation*. Denver (Estados Unidos), 1985.

-AWWA. *Manual M23. PVC pipe. Design and installation*. Denver (Estados Unidos), 1980.

-AWWA. *Manual M45. Fiberglass pipe design*. Denver (Estados Unidos), 1996.

-Balairón, L. *Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*. Revista Tecnología del Agua. Enero 2004.

-Bureau of Reclamation. *Welded steel penstocks. Monograph 3*. 1975

-CEDEX. *Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*. Madrid, 2003

-Jacobi, H.R. *Dauerbrucherscheinungen an Rohr-Fittings aus Hart PVC*. *Kunststoffe* 55 (1965), p 39-43. 1965.

-Janson, L. *Plastics pipes for water supply and sewage disposal*. Borealis, 2003.

-Lörtsch, W. *Kunststoffröhre unter statischer und pulsierender Innendruckbeanspruchung*. *Kunststoffe* 55 (1965), p 460-464. 1965.

-Menges, G. y Robert, P. *Die Wirkung von dynamischen Innendruckbelastungen auf Rohre aus PE hart, GFK und deren Verbindungen*. *Plastverarbeiter* 21. 1970.

-Nordic Plastic Pipe Association, NPG. *Pipeline construction using plastic pipe systems*. Estocolmo, 2001.

-Plastics Pipe Institute, PPI. *Recommended design factors and design coefficients for thermo-*

plastic pressure pipe Informe TR-9/2002. Washington, 2002.

-Plastics Pipe Institute, PPI. *Guide to differences in pressure rating PE water pipe between the ASTM and ISO methods Informe TR-28/2003*. Washington, 2003.

-Steel Plate Fabricators Association. *Welded steel water pipe manual*. Illinois (Estados Unidos), 1970.

-United States Pipe and Foundry Company. *Welded steel pipe. Design details and dimensions*. 1976.

-Urrutia, J. *Manual técnico. 3ª edición*. Barcelona, Saenger, SA y Pipelife, 1997.

-Zhou, Z y Palermo, E. *Can ISO and ASTM HDB rated material be harmonized?*. Proc. XII Congreso Plastics Pipes. Milán, 2004.