

COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATION OF BUILDINGS DRAINAGE SYSTEMS

Arrué, P.¹; Romero, A.M.¹; Cárcel, A.C.²

¹ ITM-DIMM-DCSA, ² ITM-DIMM

The CTE in their exigency DB HS-5 marks the directives of specific legislative character in the engineered design of building drainage systems, of generalist character whose analysis is the object of this article. The investigators Hunter, Babbitt and Dawson-Kalinske, studied the behavior of the free fall of the water in the vertical network proposing empirical equations of calculation, with the purpose of being able to evacuate residual waters in the skyscrapers. Later with the investigations of Karman, Prandtl, J. Nikuradse, C.F. Colebrook and C. White, in the field of the Mechanics of Fluids is possible to use this science in the sizing of the facilities of analytical form with a greater specification of the calculation variables. As resulting from comparative the CTE proposes minors calibers that those of the empirical and analytical methods of calculation, result that there is to interpret from the specification of the variables.

Keywords: *Drainage systems; Residual waters; Building drainage systems; CTE*

ANÁLISIS COMPARATIVO DE CÁLCULO DE LOS SISTEMAS DE EVACUACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN EDIFICIOS

El CTE en su exigencia DB HS-5 marca las directrices de carácter legislativo específico en el diseño de ingeniería de los sistemas de saneamiento en los edificios, bajantes y colectores, de carácter generalista cuyo análisis es el objeto de este artículo. Los investigadores Hunter, Babbitt, Dawson y Kalinske, estudiaron el comportamiento de la caída libre del agua en la red vertical proponiendo ecuaciones empíricas de cálculo, con el fin de poder evacuar aguas residuales en los rascacielos. Posteriormente con las investigaciones de Kármán, Prandtl, J. Nikuradse, C.F. Colebrook y C. White, en el campo de la Mecánica de Fluidos es posible utilizar esta ciencia en el dimensionamiento de las instalaciones de forma analítica con una mayor especificación de las variables de cálculo. Como resultado de la comparativa el CTE propone menores calibres que los de los métodos de cálculo empíricos y analíticos, resultado que hay que interpretar desde la especificación de las variables.

Palabras clave: *Sistemas de saneamiento; Saneamiento en edificios; Aguas residuales; CTE*

1. Introducción

El Código Técnico de la Edificación (CTE) en su Documento Básico HS Salubridad en su Exigencia HS-5 Evacuación de aguas ha supuesto un cambio normativo importante en el tema de las instalaciones hidrosanitarias de evacuación de agua en la edificación. Con anterioridad a ella el técnico debía de apoyarse en métodos científicos que determinaran el diseño y dimensionamiento óptimo de las redes, no existiendo normas de carácter obligatorio. Un diseño óptimo y dimensionamiento de calidad no conlleva solo la aplicación de la normativa sino justificar que la solución propuesta garantice el perfecto funcionamiento y las condiciones higiénico-sanitarias adecuadas.

Con objeto de analizar la exigencia HS-5 del CTE se realiza una comparativa con las metodologías de cálculo empíricas y analíticas que nos permitan determinar el grado de seguridad que representa la aplicación de la exigencia HS-5 del CTE en bajantes y colectores. Las aportaciones más destacadas fueron realizadas por Hunter (1924), Babbitt (1935), Dawson y Kalinke (1937), R. Manning (1891), con metodologías basadas en la experimentación y por otro lado J.A. Swaffield y L.S. Gallowin (1992), H. Darcy (1857), J. Weisbach (1855) y C.F. Colebrook y C.M. White (1937), proporcionando herramientas analíticas fundamentadas en la Mecánica de fluidos.

De este estudio se desprende que la Exigencia HS-5 no se ha desarrollado en toda la amplitud que sería deseable en dos aspectos fundamentales. Por un lado en cuanto a los coeficientes de simultaneidad de consumos puesto que los hábitos se han ido modificando y se ha producido un aumento en el consumo de agua que determina el diseñar unas redes de evacuación de aguas adecuadas. Y por otro lado el dimensionamiento propuesto por la normativa es claramente inferior a los resultados de la aplicación de las metodologías empíricas y analíticas. Todo ello puede derivar en patologías graves causadas por una variación de presiones en el interior de las redes que provoquen fenómenos de sifonamiento que causen la eliminación de los cierres hidráulicos y la entrada de aire insalubre en el interior de los locales.

2. Materiales y Métodos.

2.1 Dimensionamiento de Bajantes de Aguas Pluviales.

En el dimensionamiento de las bajantes de aguas pluviales el CTE no se especifica la tipología de lluvias de corta o larga duración y el tiempo de retorno imprescindibles para determinar la intensidad media máxima de lluvia y su riesgo de fallo, así como el tipo de material, ni la relación entre la superficie anular de la vena líquida y la sección total de la tubería, "r", ni la temperatura y características físicas del fluido. Variables de suma importancia ya que determinan la altura y la velocidad terminal del fluido en el interior de la bajante.

Los diámetros propuestos por las ecuaciones analíticas se basan en las aportaciones de J. A. Swaffield y L.S. Gallowin (1992), A. Thancanamootoo y J.A. Swaffield (1991) y A.F.E: Wise y J.A. Swaffield (1995) en la mecánica de fluidos, con la especificación del espesor de la corona de agua se expresa en la ecuación (1) propuesta por A.M. Romero y P. Arrué (2008), teniendo en cuenta variables como la rugosidad del material, la viscosidad cinemática del fluido, temperatura y el espesor de la lámina de agua en la bajante.

$$\frac{Q}{\pi \cdot x \cdot (D - x) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot x}} = -4 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{4 \cdot x \cdot (D - x)} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{3,71} + \frac{1,26 \cdot \nu}{\sqrt{2 \cdot g \cdot x}} \right) \right] \quad (1)$$

Los diámetros propuestos por la ecuación empírica (2) se basan en las aportaciones de Hunter (1924), Dawson y Kalinske (1937) y Babbitt (1935), correspondiente al flujo vertical, estableciendo que la corona del agua en la bajante, figura 1, debe ocupar entre un 25 y un 33% de su sección transversal, es decir “r” entre 0,25 y 0,33, limitación que J.A. Swaffield propone de forma más restrictiva en una cuantía menor a 15/64.

$$Q = 3,15 \cdot 10^{-4} \cdot r^{\frac{5}{3}} \cdot D^{\frac{8}{3}} \quad (2)$$

Figura 1.- Vertido en una bajante, relación entre la sección anular y transversal de la bajante.

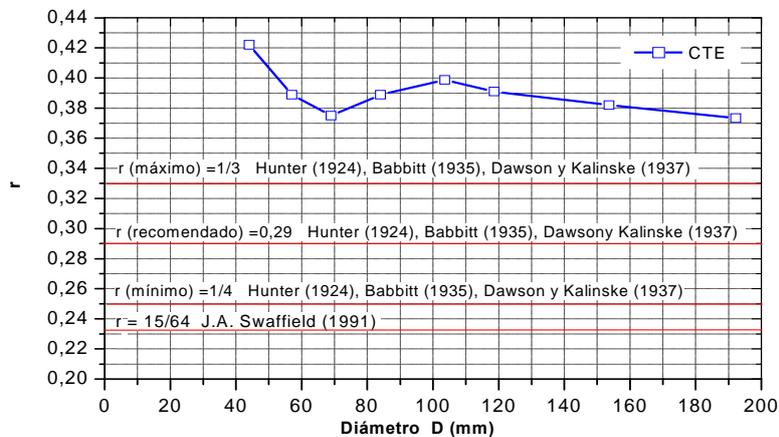


Teniendo en cuenta que el diámetro de la columna de aire “d” es la de la tubería “D” menos 2 veces el espesor “x” de la lámina de agua adherida a la pared de la bajante. Las limitaciones de “x” pueden expresarse según distintos autores como:

- Hunter (1924), Babbitt (1935) y Dawson y Kalinske (1937): $r \geq 1/4 \Rightarrow x \geq D/14,92$
 $r \leq 1/3 \Rightarrow x \leq D/10,89$
- J.A. Swaffield (1991): $r \leq 15/64 \Rightarrow x \leq D/16$

En la figura 2 se muestra la correlación entre el parámetro “r” que representa la relación entre la sección anular de fluido con respecto a la sección total de la bajante y el diámetro de la misma resultantes de la aplicación del CTE en comparación con las limitaciones.

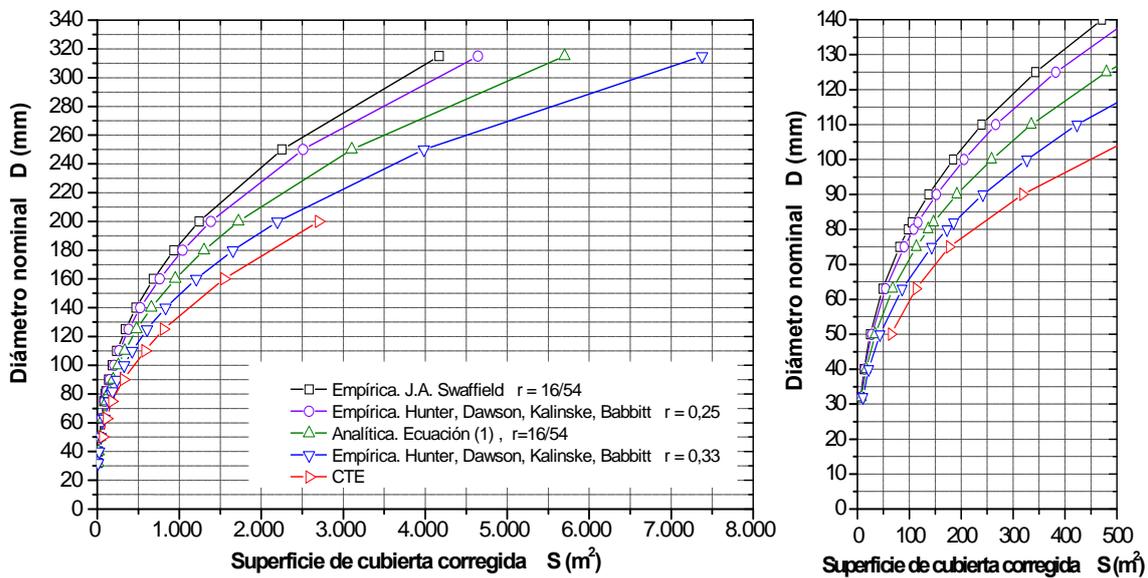
Figura 2: Correlación entre diámetro de bajante y “r”, para i=100 mm/h y PVC-U UNE 1329.



Se observa que en todos los casos los resultados de la aplicación del CTE indican valores de “r” por encima de 0,37, muy superiores a los recomendados por Hunter (1924), Babbitt (1935), Dawson y Kalinske (1937) de 0,33 máximo y por J.A. Swaffield (1991) de 0,23. La comparativa entre el CTE y las ecuaciones analíticas y empíricas se ha realizado para un régimen pluviométrico de 100 mm/h y tuberías de PVC-U UNE 1329.

En La figura 3 se muestra la comparativa entre los diámetros obtenidos mediante el modelo planteado por el CTE, claramente inferiores a los resultados obtenidos de forma empírica por Hunter, Dawson, Kalinske y Babbitt, con valores de “r” superiores al 33% llegando a alcanzar el 42%; e inferiores al modelo analítico con la limitación de “r” propuesta por J.A. Swaffield y la ecuación (1). Por ello se recomienda adoptar diámetros de bajante superiores a los propuestos por el CTE.

Figura 3: Correlación entre la superficie de cubierta corregida y el diámetro de bajante (D≤350), para i=100mm/h, según el CTE, método empírico y método analítico (PVC-U UNE 1329).



2.2 Dimensionamiento de Colectores de Aguas Pluviales.

El método analítico de cálculo se apoya en las ecuaciones de M.H. Darcy (1857), J. Weisbach (1855) y C.F. Colebrook (1939) expresando el caudal a tubería llena dada por la ecuación(3) y al 50% en la ecuación (4).

$$Q_{\text{llena}} = -\frac{\pi \cdot D^2}{2} \cdot \log_{10} \left[\frac{\varepsilon}{3,71 \cdot D} + \frac{2,51 \cdot \nu}{D \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot D \cdot s_0}} \right] \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot D \cdot s_0} \quad (3)$$

$$Q_{\theta=90^\circ} = -\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \log_{10} \left[\frac{\varepsilon}{3,71 \cdot D} + \frac{2,51 \cdot \nu}{D \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot D \cdot s_0}} \right] \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot D \cdot s_0} \quad (4)$$

Para comprobar esta hipótesis de sección llena se ha tomado como punto de partida el caudal aportado por las superficies propuestas por la tabla 4.9 del DB HS-5 del CTE con sus respectivas pendientes y aplicado a tuberías circulares con material de PVC-U UNE 1329, con una rugosidad absoluta “ε” de 0,025 mm y una viscosidad cinemática del agua a 4°C

($v=1,562 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Para el cálculo se ha adoptado la pérdida hidráulica (s_0) aproximadamente igual a la pendiente geométrica (p), y como el régimen es uniforme y permanente se puede adoptar igual a la pérdida de carga unitaria, es decir, $s_0 \cong p \cong j$, válido para ángulos de inclinación de la tubería muy pequeños. Téngase en cuenta que las pendientes oscilan entre el 1% y 4% con ángulo entre $0,5729^\circ$ y $2,2909^\circ$ y el error cometido es admisible.

En las figuras 4, 5 y 6 se muestra la comparativa entre los diámetros propuestos por el CTE y por el método analítico para los diámetros a sección llena y parcialmente llena obtenidos para las pendientes del 1, 2 y 4% con una $i=100 \text{ mm/h}$ y tuberías de PVC-U 1329.

Figura 4.- Diámetro nominal del colector respecto a la superficie según CTE y Mecánica de Fluidos a sección llena y al 50%, con pendiente del 1%; para $i=100 \text{ mm/h}$ y PVC-U 1329.

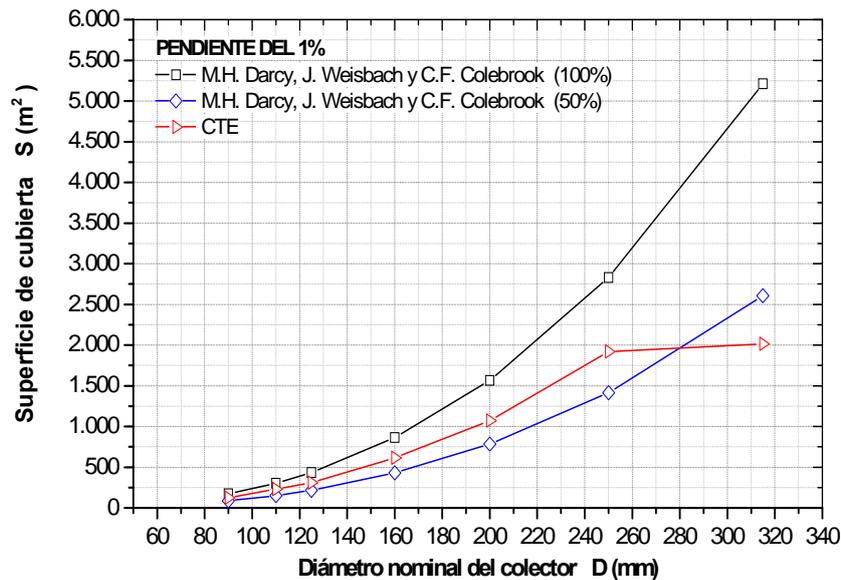


Figura 5.- Diámetro nominal del colector respecto a la superficie según CTE y Mecánica de Fluidos a sección llena y al 50%, con pendiente del 2 %; para $i=100 \text{ mm/h}$ y PVC-U 1329.

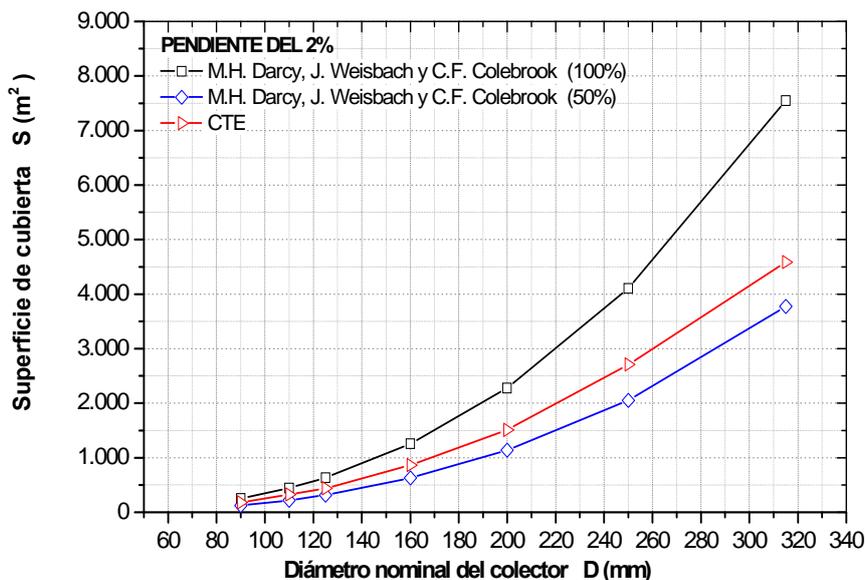
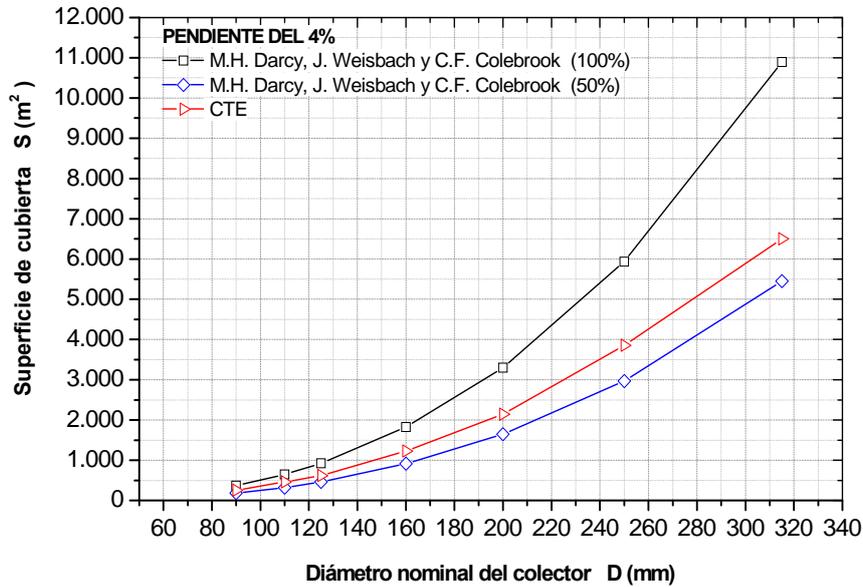


Figura 6.- Diámetro nominal del colector respecto a la superficie según CTE y Mecánica de Fluidos a sección llena y al 50%, con pendiente del 4 %; para i=100 mm/h y PVC-U 1329.



Puede apreciarse que las curvas correspondientes al CTE se encuentran entre el 50% y el 100% de calado excepto en el DN-315 con pendiente 1% que es inferior al 50%. Cabe destacar que la altura de calado máxima recomendada en los colectores es del 50%.

A partir de las ecuaciones empíricas (5, 6 y 7) de R. Manning (1891) puede obtenerse para cada diámetro de tubería y su pendiente, el caudal, el calado y velocidad de circulación.

$$Q_{\theta^{\circ}} = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{s_0} \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \left[\frac{\pi \cdot \theta^{\circ}}{180^{\circ}} - \text{sen} \theta^{\circ} \cdot \text{cos} \theta^{\circ} \right] \cdot \left[\frac{D}{4} \cdot \left(1 - \frac{\text{sen} 2\theta^{\circ}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot \theta^{\circ}}{180^{\circ}}} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

$$c_{\theta^{\circ}} = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{s_0} \cdot \left[\frac{D}{4} \cdot \left(1 - \frac{\text{sen} 2\theta^{\circ}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot \theta^{\circ}}{180^{\circ}}} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

$$y_{\theta^{\circ}} = \frac{D}{2} \cdot \left[1 + \text{cos} (180^{\circ} - \theta^{\circ}) \right] \quad (7)$$

Analizando los diámetros propuestos por el CTE y considerando tuberías de PVC-U UNE 1329 con un coeficiente de fricción de Manning n=0,009 para materiales nuevos, se obtienen los resultados de altura de calado, de la figura 7 y velocidad de circulación de la figura 8.

Figura 7: Correlación entre el diámetro propuesto por el CTE y el calado de los colectores pluviales, $i=100$ mm/h.

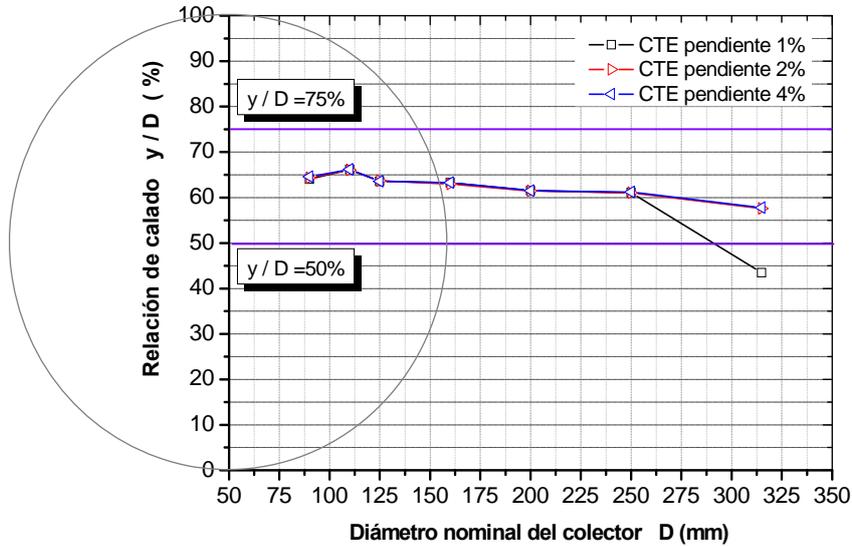
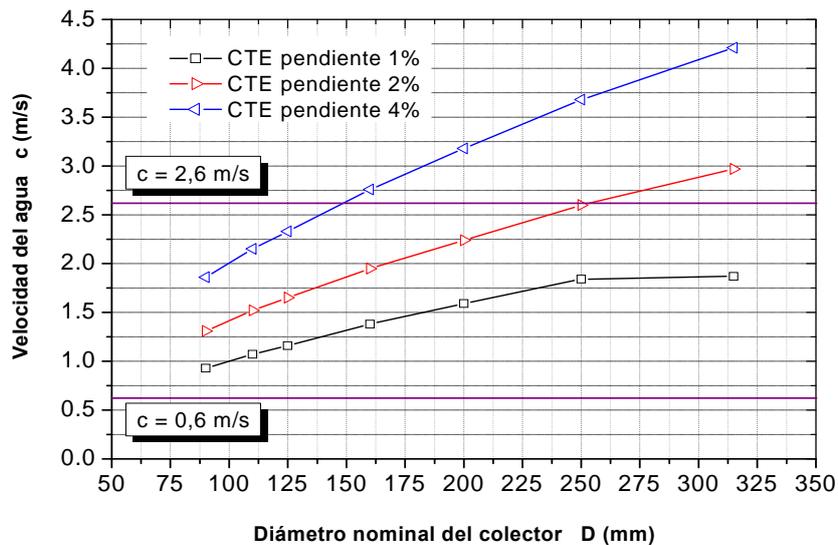


Figura 8: Correlación entre el diámetro propuesto por el CTE y la velocidad de los colectores pluviales, $i=100$ mm/h.

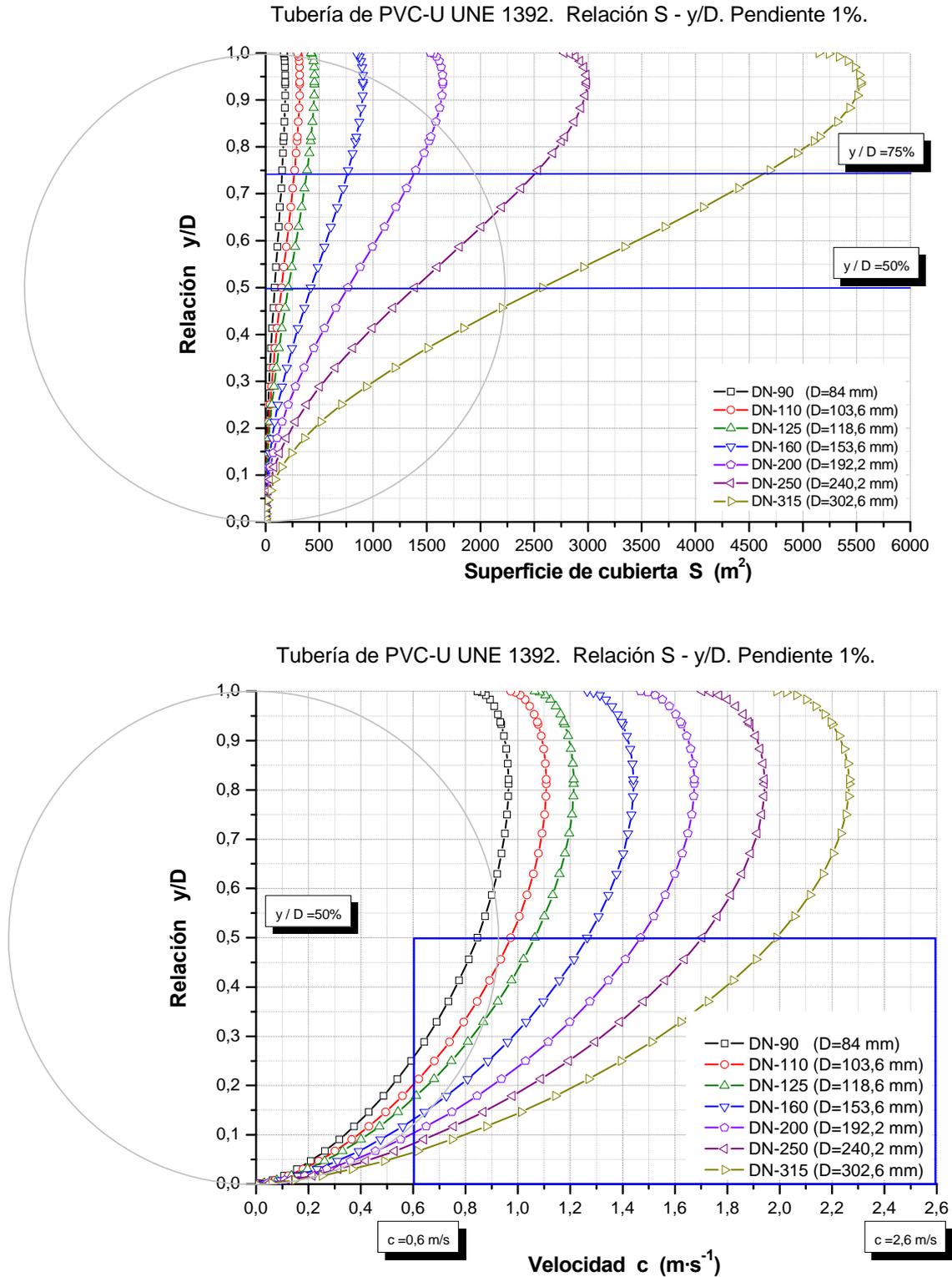


Los diámetros propuestos por el CTE muestran una relación de calado entre 43% y 66%, con un valor medio 62% y un rango de velocidad entre 0,93 m/s y 4,21 m/s.

Se recomienda dimensionar los colectores para una velocidad del fluido comprendida entre los valores $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $2,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para evitar sedimentaciones o erosiones y una altura máxima de calado del 50% del diámetro.

Los cálculos se han apoyado en las gráficas de cálculo propuestas por A.M. Romero y P. Arrué (2008) que tienen en cuenta variables como la rugosidad del material, la temperatura y viscosidad cinemática del fluido. Como ejemplo se muestra el gráfico correspondiente a colectores pluviales de PVC.U UNE 1329 con un coeficiente de fricción $n=0,009$, para una pendiente del 1% en la figura 9.

Figura 9.- Correlación entre la superficie de cubierta, el calado y la velocidad del fluido, para $i=100$ mm/h, en tuberías PVC-U UNE 1392 con una pendiente del 1%.



2.3 Dimensionamiento de las Bajantes de Aguas Residuales.

A continuación se realiza una comparativa de los diámetros propuestos por el CTE para bajantes de aguas residuales con las metodologías basadas en las ecuaciones analíticas (1), y la ecuación empírica (2), Hunter (1924), Dawson y Kalinske (1937) y Babbitt (1935).

Figura 10: Correlación D vs. UD totales según el CTE y la Mecánica de Fluidos. K (UK incluido inodoros), $x=D/16$, $\epsilon=0,025$ mm y PVC-U 1329.

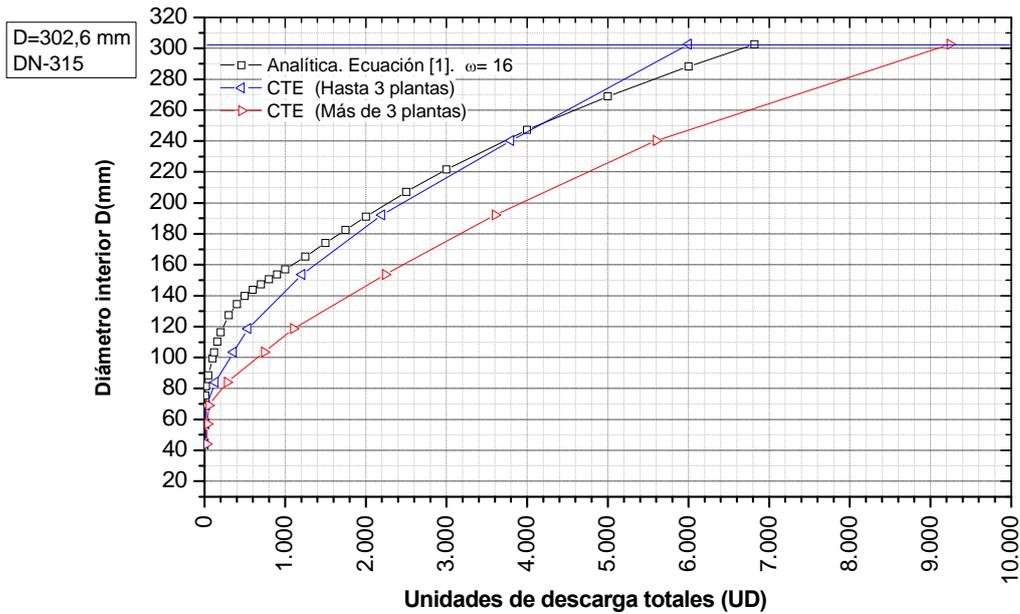
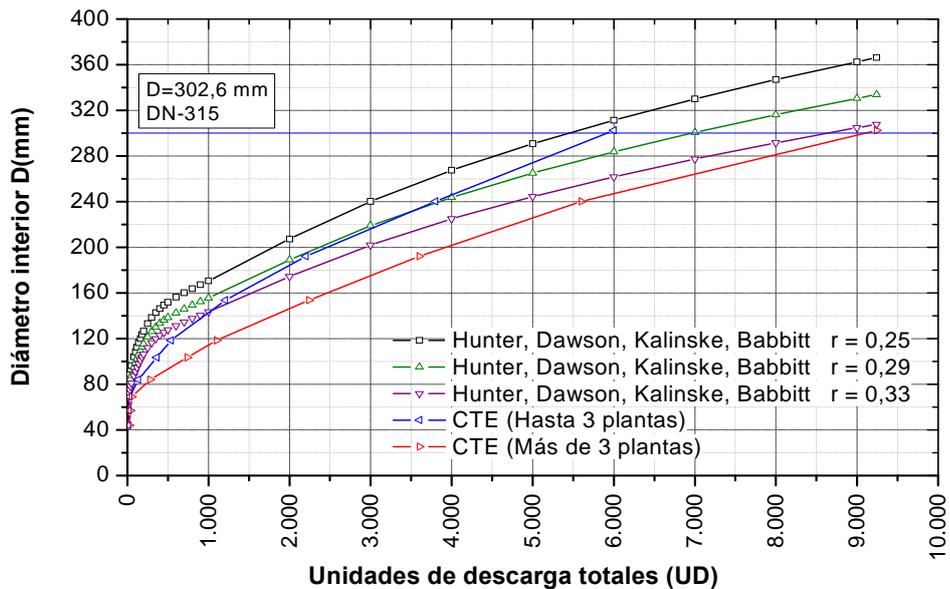


Figura 11: Correlación D vs. UD totales según el CTE y Las ecuaciones empíricas. K (UK incluido inodoros), $r=0,25, 0,29$ y $0,33$ y PVC-U 1329.



De la figura 10 y 11 se puede observar que los diámetros del CTE son claramente inferiores a los propuestos siguiendo la metodología de cálculo analítica y empírica.

2.4 Dimensionamiento de Colectores de Aguas Residuales.

El CTE dimensiona el diámetro de los colectores en función del número de unidades de descargas y de la pendiente de la tubería con la premisa de que la altura de calado sea la mitad de la tubería con un máximo del 75% bajo condiciones de flujo uniforme (art. 4.1.3 HS-5 CTE).

A continuación se muestra una comparativa de los diámetros propuestos por el CTE con las ecuaciones analíticas de M.H. Darcy (1857), J. Weisbach (1855) y C.F. Colebrook (1939). (3) y (4) para una pendiente del 1%, 2% y 4%, figura 12, 13 y 14 respectivamente, con los coeficientes de simultaneidad del modelo UK (incluido inodoros) para tubería de PVC-U 1329, rugosidad ε de 0,025 mm y el fluido a 4°C.

Figura 12: Diámetros de colectores residuales vs. UD totales según el CTE y la Mecánica de Fluidos, para una pendiente del 1%, K (UK incluido inodoros) y PVC-U 1329.

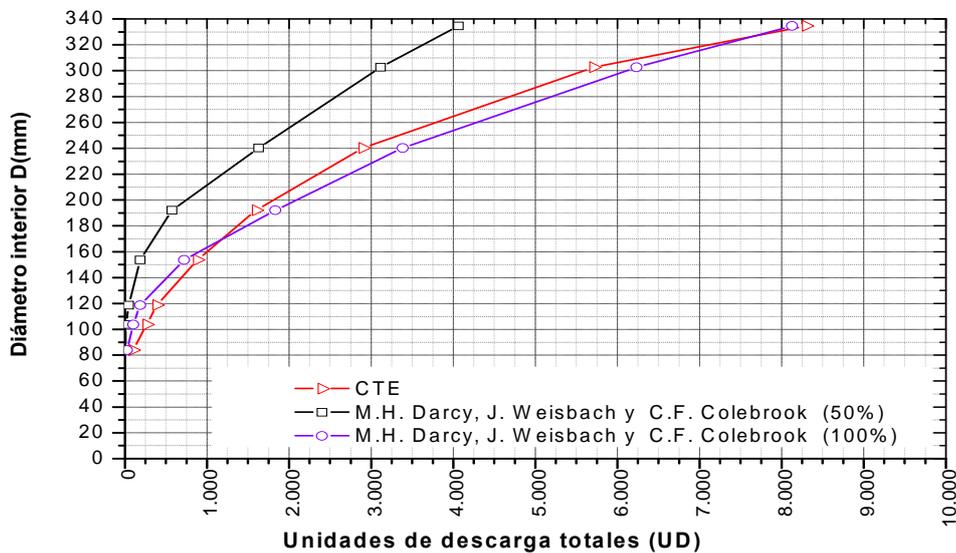


Figura 13: Diámetros de colectores residuales vs. UD totales según el CTE y la Mecánica de Fluidos, para una pendiente del 2%, K (UK incluido inodoros) y PVC-U 1329.

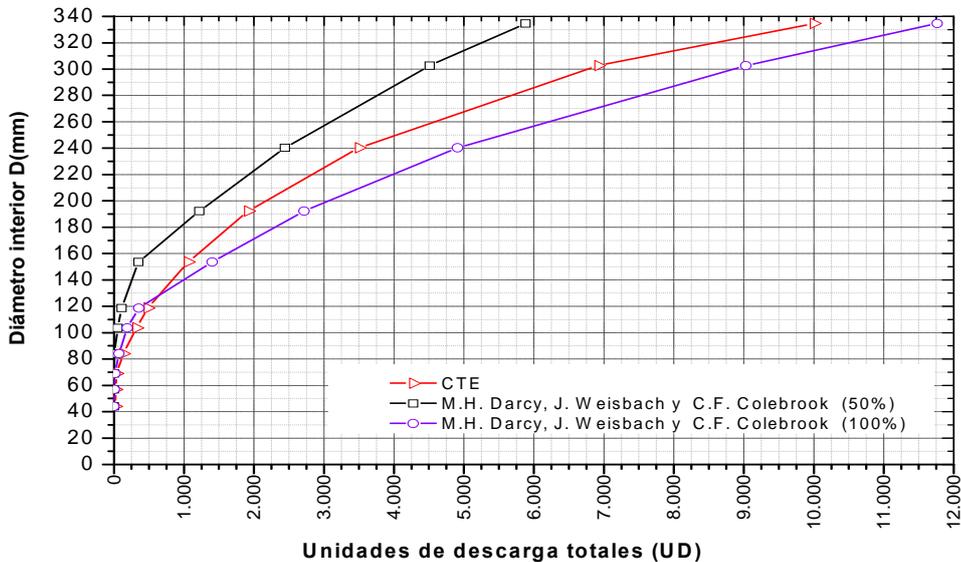
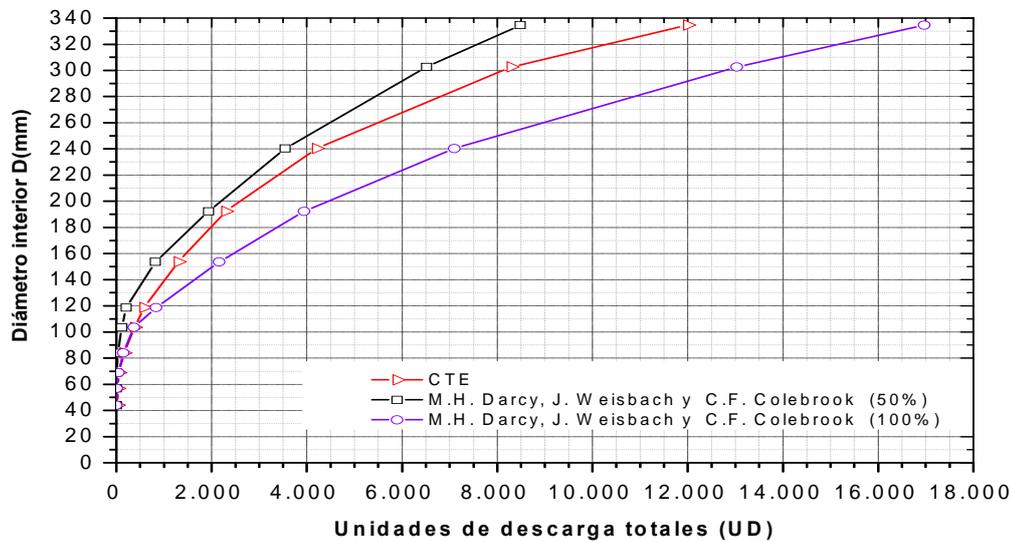


Figura 14: Diámetros de colectores residuales vs. UD totales según el CTE y la Mecánica de Fluidos, para una pendiente del 4%, K (UK incluido inodoros) y PVC-U 1329.



Se aprecia que hasta el DN-160 (D=153,6mm, p=1%) en la figura 9, DN-125 (D=118,6mm, p=2%) en las figura 10 y DN-110 (D=103,6, p=4%) en la figura 11, los diámetros del CTE son inferiores a la curva analítica para el 100% de calado implicando una entrada en carga.

Considerando que la entrada en carga no puede ser una solución aceptable tal como se indica en el art. 4.1.3 HS-5 CTE se desprende la conclusión de que el coeficiente de simultaneidad utilizado implícitamente por el CTE es muy inferior al utilizado por la norma UK (incluido inodoros). Para diámetros mayores a los indicados la altura de calado sí estaría comprendida entre el 50% y el 100%.

A continuación se muestra una comparativa de los diámetros propuestos por el CTE con las ecuaciones empíricas (5) de R. Manning (1891), para una pendiente del 1%, 2% y 4%, figura 15, 16 y 17 respectivamente, con los coeficientes de simultaneidad del modelo UK (incluido inodoros) para tubería de PVC-U 1329, n=0,009 y alturas de calado del 50%, 75%y 100%.

Figura 15: Correlación entre D vs. UD totales según el CTE y el método empírico para una pendiente del 1%, K según modelo UK (incluido inodoros) y PVC-U 1329.

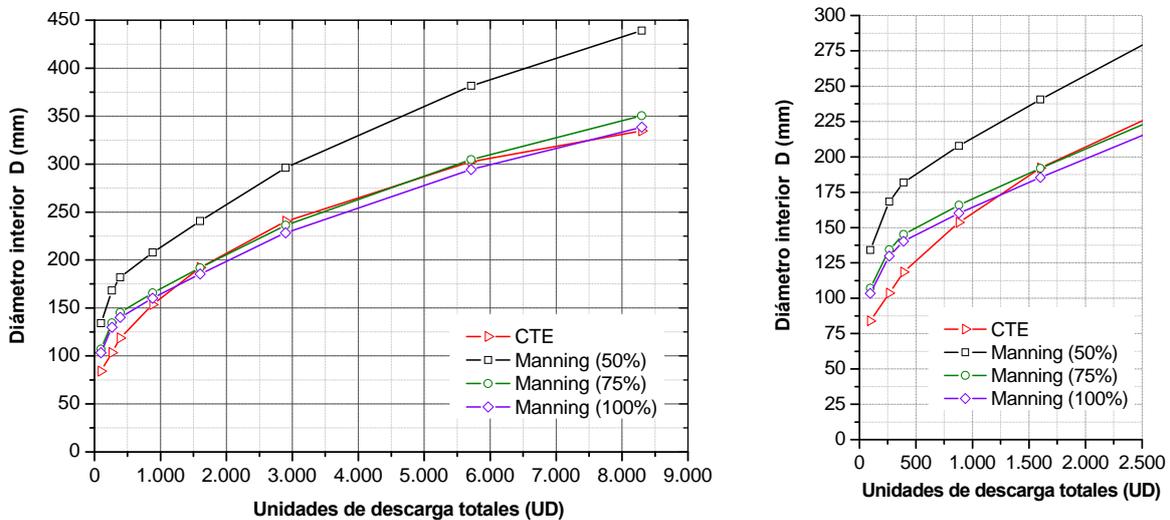


Figura 16: Correlación entre D vs. UD totales según el CTE y el método empírico para una pendiente del 2%, K según modelo UK (incluido inodoros) y PVC-U 1329.

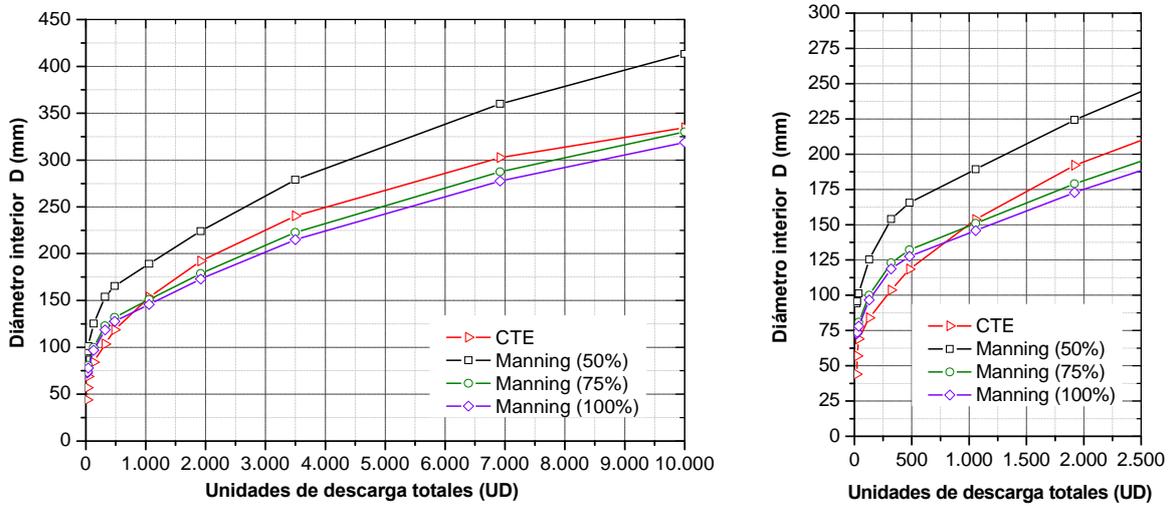
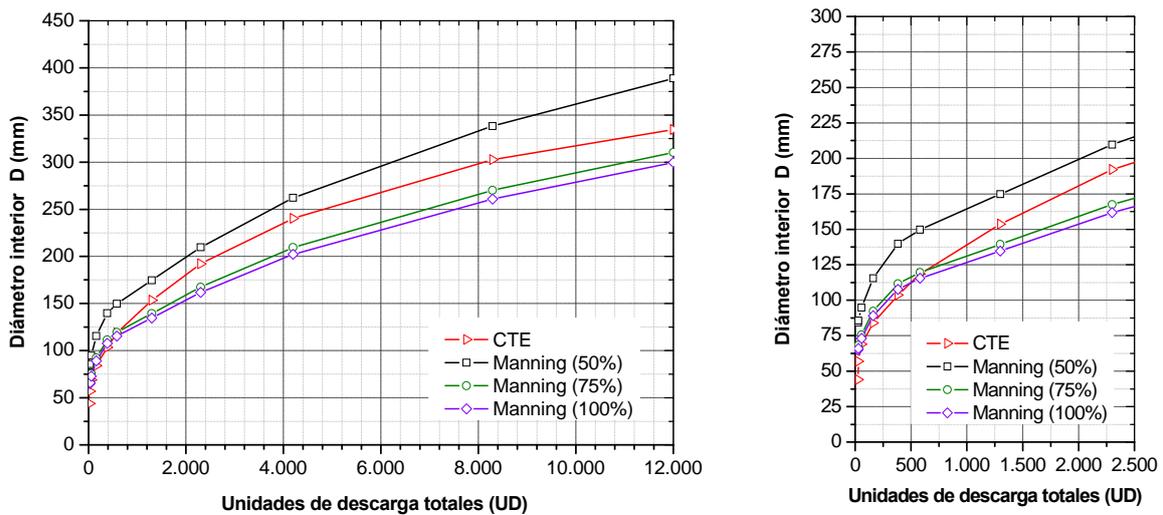


Figura 17: Correlación entre D vs. UD totales según el CTE y el método empírico para una pendiente del 4%, K según modelo UK (incluido inodoros) y PVC-U 1329.



Como se observa en las figuras 15, 16 y 17 hasta el diámetro DN-160 ($p=1\%$), DN-125 ($p=2\%$) y DN-110 ($p=4\%$), los diámetros propuestos por del CTE son inferiores a la curva empírica para el 100% de calado lo que implicaría una entrada en carga. Y en la mayoría de los casos la curva del CTE se asimila a la empírica al 75% de calado. Se obtienen las mismas conclusiones que en el caso del análisis analítico donde se desprende que el coeficiente de simultaneidad utilizado implícitamente por el CTE es muy inferior al utilizado por la norma UK (incluido inodoros). Por todo ello se recomienda dimensionar los colectores para una altura máxima de calado y del 50% del diámetro y una velocidad del fluido comprendida entre $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $2,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, considerando los diámetros propuestos por el CTE como mínimos de carácter reglamentario.

3. Resultados.

Los diámetros propuestos por el CTE son menores que los obtenidos mediante las ecuaciones empíricas y analíticas, enmarcando los resultados en el contexto de las condiciones de contorno impuestas. En las bajantes propuestas por el CTE se obtienen valores de “r” promedio de 0,39 equivalente a un 118% del máximo recomendado. En las bajantes pluviales del CTE los diámetros son inferiores a los obtenidos por métodos empíricos (90%, $r=0,33$; 76%, $r=0,25$; 73%, $r=15/64$) y analíticos (83%, $w=16$); así como en las de aguas residuales del CTE “hasta 3 plantas” en métodos empíricos (93%, $r=0,33$; 78%, $r=0,25$) y analíticos (85%, $w=16$); y con “más de 3 plantas” en empíricos (79%, $r=0,33$; 67%, $r=0,25$) y analíticos (73%).

Los diámetros de los colectores de aguas pluviales propuestos por el CTE muestran una altura de calado promedio del 62% y velocidades comprendidas entre 0,93 y 4,20 m/s. Y en el caso de las aguas residuales la altura de calado promedio es del 82% con velocidades comprendidas entre 0,93 y 3,41 m/s. Cabe destacar que los diámetros hasta DN-160 ($p=1\%$), DN-125 ($p=2\%$) y DN-110 ($p=4\%$) entran en carga, de lo que se desprende que el coeficiente de simultaneidad utilizado implícitamente por el CTE es inferior al utilizado por el modelo del Reino Unido (UK) incluido inodoros, así como de la norma AFNOR modificada según la actividad, aspecto a tener en cuenta puesto que las actuales costumbres higiénico-sanitarias han cambiado.

Las ecuaciones propuestas a través de la Mecánica de Fluidos permiten el dimensionamiento, garantizando el funcionamiento en unas condiciones de contorno más específicas que el CTE, como el tipo de material, geometría, características físico-químicas del aire y del agua a la temperatura de trabajo, espesor de la lámina de agua y la variación de presión. El análisis de este artículo no ha tenido en cuenta la influencia del aire en la red por equiparación con el CTE que requiere mayores calibres (Romero & Arrué, 2010).

4. Referencias.

- Colebrook, C. F & White, C. M. (1937). Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proc. Royal Soc. London*, 161, 367-381.
- Darcy, H. (1857). Recherches experimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux. *París: Mallet-Bachelier*.
- Manning, R. (1891). On the Flow of Water in open channels and pipes. *Transactions of the institution of civil Engineers of Ireland*.
- Romero, A. M. & Arrué, P. (2009). *Cálculo de Instalaciones Hidrosanitarias con Software para la calculadora gráfica HP y Excel. (Adaptado al CTE, exigencias HS-4 y HS-5)*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Romero, A.M., Arrué P. & Cárcel A.C. (2010). Cálculo de la ventilación de redes de saneamiento por mecánica de fluidos y comparativa con el DB HS-5 del CTE. // *Congreso Nacional de Investigación en la Edificación*.
- Swaffield, J. A. & Thancanamootoo, A. (1991). Modelling unsteady annular downflow in vertical building drainage stacks. *Building Environ*, 26(2), 99-110.
- Swaffield, J. A. & Galowin, L. S. (1992). *The Engineered Design of Building Drainage Systems*. Aldershot: Ashgate Publishing.
- Weisbach, J. (1855). *Die experimental-hydraulic*. Freiberg: Engelhardt.
- Wise, A. F. E. & Swaffield, J. A. (1995). *Water, sanitary and Waste Services for Buildings*. London: Longman.

España. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 28 de marzo de 2006, núm.74, pp. 11816-11831.