Aplicación de una ecuación de velocidad media en régimen no uniforme: Análisis detallado del transporte en el canal Caltech usando Excel

ALFREDO JOSÉ CONSTAIN ARAGÓN (*)

RESUMEN Se presenta aqui una revision provisional del artículo de J.W. Elder relativa al Coeficiente Longitudinal de dispersión para cauces naturales. Esta ecuación practica basada a su vez en el trabajo pionero de G.I. Taylor fue muy importante para guiar los primeros experimentos en dispersión y en la evaluación de las predicciones y control de la contaminación en los cauces. Sin embargo debido a que su aplicación no coincidía suficientemente bien con los resultados de las formulas más complejas usadas para "calibrarla", las investigaciones se dirigieron en adelante más bien al ajuste estadístico de los modelos con paquetes complejos de software.

Una serie de razones indicaría que hay problemas de fondo más bien en la construcción de los modelos de "calibración", especialmente en la parte dimensional. Esto puede solucionarse si se abandona la constancia del Coeficiente Longitudinal de dispersión, el cual realmente debe ser una función del tiempo. Esta dependencia se deriva de la formulación de una nueva ecuación para la velocidad media del flujo como se presentara aquí. Corrigiendo así esta interpretación errónea se puede restituir la "exactitud perdida" de la formula de Elder. Para este objeto se analiza el reporte KH-R-12-1966 de tesis doctoral de H.B. Fischer, en especial un experimento muy bien documentado en el canal de 40 metros del Mc Keck Laboratory del Caltech en Pasadena, Estados Unidos.

Dentro de la metodología presentada, el autor propone la resolución de los problemas de modelamiento mediante un simple esquema de aplicación de Excel, permitiendo también realizar análisis de sensibilidad muy útiles. Así mismo es posible calcular aproximadamente el tiempo de arribo de las primeras partículas de soluto en un proceso de vertimiento y el tiempo de permanencia final de dichas partículas, parámetros estos de gran importancia en los actuales estudios de calidad de aguas. Finalmente se hacen unas conclusiones.

APPLICATIONS OF MEAN VELOCITY EQUATION IN NON UNIFORM FLOW: DETAILED ANALYSIS OF TRANSPORT IN A CALTECH CHANNEL USING EXCEL

ABSTRACT It is presented a provisional review of the J.W Elder's formula about longitudinal dispersion coefficient for natural streams. This practical equation based on previous pioneering work of G.I. Taylor was very important to guide first experiments in dispersion and in evaluation of prediction and control of contaminations in streams. However, because of its application did not coincide sufficiently well with results of more complex models used to "calibrate it", the later researches was oriented in ahead rather to statistical adjustment by means of complex software packages.

A number of reasons would indicate that there are background problems rather with construction of these "calibration" models, because of dimensions. This may be solved if it is abandoned the constancy of longitudinal dispersion coefficient, which indeed should be a time function. This dependence is derived from a new mean velocity equation as will be explained herein. Correcting in this way this wrong interpretation it is possible to restore the "lost accuracy" of Elder's formula. To do that it is analyzed the report KH-R-12-1966 of PhD thesis of H.B. Fischer specially a very well documented experiment in 40 m flume of Mc Keck Laboratory of Caltech in Pasadena, USA. Within the presented methodology, the author proposes the solution of modelation problems using only an elementary Excel application, allowing a useful sensitivity analysis also. In the same way it is possible to calculate approximately the arrival time of solute particles in a pouring process and permanency time of those particles, very important parameters for nowadays studies of quality of water. Finally it is sated a set of conclusions.

Palabras clave: Hidráulica fluvial, Transporte de masa, Dispersión, Modelación y Técnicas de trazador.

Keywords: Fluvial Hydraulics, Mass transport, Dispersion, Modelation and tracer techniques.

(*) Ingeniero, Gerente y Director I+D Hydrocloro Ltda, Bogotá DC, Colombia. E-mail: alfredo.constain@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día es muy importante el conocimiento preciso del Coeficiente Longitudinal de dispersión para modelar y predecir las concentraciones y extensión de substancias contaminantes en flujos naturales. En efecto, el patrón con el cual se extienden estas en el flujo y la tasa a la cual disminuye su concentración pico son conocimientos críticos para el control de poluciones. Los grandes presupuestos de los programas de disminución de las contaminaciones hídricas en todo el mundo, provenientes principalmente de los impuestos por impacto ambiental (eco-tasas) no tendrían un destino claro sin disponer de la información científica oportuna, completa v precisa sobre esta dinámica del transporte en los flujos. Sin embargo, el desarrollo de las formulas para el cálculo de los coeficientes de las ecuaciones que describen estos fenómenos ha sido difícil y aun hoy en día no está libre de controversias dadas las discrepancias entre la teoría y los resultados experimentales.

La teoría básica de la dispersión de solutos en los flujos naturales es de aparición más bien reciente pues son desarrollos teóricos que van de 1953 en adelante. Una primera descripción de la dispersión se basa en las propiedades del fluido, de su geometría y del estado de turbulencia, ya que el patrón con el cual se extienden las sustancias en el flujo y la tasa de disminución de su concentración pico son dependientes en esencia de la distribución de velocidades del fluido. G.I. Taylor (Taylor, 1954) inicialmente afirmó que aunque el principal mecanismo para la dispersión de las partículas de solutos en flujos cortantes fuese la presencia de un campo variable de velocidades en la sección transversal, el proceso entero podía ser descrito por una expresión de difusión Fickiana en una dimensión (la dirección del flujo).

$$j_m = -\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \tag{1}$$

Aquí *jm* es el flujo de sustancia (masa por unidad de área y por unidad de tiempo), c la concentración de soluto (masa por unidad de volumen) y ex el coeficiente de transporte en el eje longitudinal (distancia al cuadrado por unidad de tiempo). El uso de los coeficientes para describir la dispersión en tubos rectos muy largos mediante la ecuación (1) fue una innovación conceptual que abrió ventanas importantes a la descripción compacta del transporte de masa, según las dos principales leyes para los cauces naturales en este aspecto: La ecuación diferencial de Adveccion-Difusión (ADE) y su solución la función acampanada de Fick, definidas para condiciones conservativas (sin pérdida o ganancia de masa), en flujo uniforme longitudinal.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_x \frac{\partial C}{\partial x} = E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$
(2)

у

$$C(\mathbf{x},t) = \frac{M}{A\sqrt{4tE}} e^{\frac{(X-Ut)^2}{4Et}}$$
(3)

Aquí E es el Coeficiente longitudinal de dispersión que se considera una constante, M es la masa de trazador (soluto) y A es el área de la sección transversal del flujo. Estas ecuaciones son validas cuando el trazador ha cubierto uniformemente el área de la sección transversal en la que vale entonces una velocidad media espacial, U. Posteriormente J.W. Elder y H.B.Fischer (Elder, 1959) (Fischer, 1966) (Fischer, 1969) extendieron sus análisis a flujos turbulentos naturales. Sin embargo pronto fueron evidentes las grandes divergencias de estos modelos estacionarios con respecto a los resultados experimentales, especialmente en cuanto a la interpretación y explicación del fenómeno de asimetría de las curvas de trazador. (Day, 1977)(Fischer, 1967)(Fischer, 1968).

2. DESARROLLO ESPECÍFICO DE TAYLOR Y ELDER

(

Es de importancia revisar los conceptos físico-matemáticos que llevaron a Taylor primero y luego a Elder a proponer las respectivas ecuaciones para el Coeficiente Longitudinal de dispersión. Se parte de la ecuación de balance de masa en la que se describen tanto el movimiento advectivo (ordenado) asociado a una porción continua de fluido caracterizado una sola velocidad y dirección promedios, como el movimiento difusivo (desordenado) que no puede ser descrito por una sola velocidad ni dirección. (Holley, 1969). Figura 1.

Tiene sentido formular la ecuación de conservación de la masa en un volumen pequeño con un <u>promedio temporal</u> para la concentración c (barrada) y las velocidades longitudinal, transversal y vertical respectivamente, u, v y w. Están también los coeficientes de difusión.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right)$$
(4)

El miembro izquierdo da cuenta del movimiento advectivo mientras que el miembro derecho corresponde al movimiento difusivo. Partiendo del supuesto de flujo uniforme y para un tubo recto indefinidamente largo, Taylor, considerando que aunque la principal causa del rompimiento aleatorio de las plumas de solutos en los flujos turbulentos fueran las variaciones de la velocidad convectiva dentro de la sección transversal del flujo, bajo ciertas circunstancias ese transporte podía ser representado como proporcional simple al gradiente de concentración, acorde con la ecuación (1): propuso entonces una solución aproximada para la ecuación (4) de la forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx E \frac{\partial^2 C}{\partial \xi^2} \tag{5}$$



Nótese que Taylor pasa del promedio temporal al promedio espacial, en concreto referido al desperdigamiento de la concentración de soluto en la sección transversal, ya que su ámbito básico de descripción es esta área.

$$C = \frac{1}{A} \iint_{A} c \, dA \tag{6}$$

Por consiguiente la ecuación aproximada de Taylor (5) se aplica a un plano moviéndose con el centro de masa de soluto a una velocidad media U. Para tener esto en cuenta Taylor define una ecuación simple de transformada de Galileo utilizando una falsa variable de distancia, ξ , propia para un observador situado fijo en un punto del tubo.

$$\xi = X - U t \tag{7}$$

La idea básica de Taylor (según Holley) es discriminar lo más claro posible las condiciones bajo las cuales la ecuación (5) es válida. Realiza entonces las siguientes simplificaciones en la ecuación diferencial (4) para tratar de obtener una solución referida a la dispersión: Lo primero que establece son los valores actuales de las magnitudes de interés a partir de las fluctuaciones de concentración y velocidad, c' y u', y de los <u>valores promedio espaciales</u>, C y U en la sección transversal.

$$c = C + c' \tag{8}$$

$$u = U + u' \tag{9}$$

Taylor asume que las fluctuaciones de concentración son medidas únicamente en el plano (ZY) que define la sección transversal:

$$c' = c'(z, y) \tag{10}$$

Además hace muy pequeños los términos diferenciales para la turbulencia y la adveccion longitudinales:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) \approx 0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} \approx 0 \tag{12}$$

Por último hace despreciables las velocidades transversal y vertical para el fluido, puesto que sus valores medios son nulos y su distribución estadística es similar:

$$v = w = 0 \tag{13}$$

En estas condiciones la ecuación básica de balance de masa queda:

$$u'\frac{\partial\bar{c}}{\partial\xi} \approx \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial c'}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial c'}{\partial z} \right)$$
(14)

Esta ecuación diferencial tiene una solución de la forma:

$$c' = f \frac{\partial c}{\partial \xi} \tag{15}$$

Donde f es función solo de los parámetros del flujo y de la forma de la sección transversal del mismo. Teniendo en cuenta la definición de transporte de masa por fluctuaciones y utilizando el concepto Fickiano inicial de Taylor sobre la dispersión se tiene:

$$\int_{A} u'c' \, dA \approx -AE \frac{\partial c'}{\partial \xi} \tag{16}$$

Ahora, en función del transporte turbulento asociado al valor medio espacial las variaciones de velocidad y concentración la ecuación (5) se puede escribir:

$$j_t = \overline{u'c'} \approx -E \frac{\partial C}{\partial x} \tag{17}$$

Lo que ocurra con las fluctuaciones de velocidad u' v de concentración c' en la sección transversal móvil es el factor más importante de la dispersión, por lo tanto en este punto es necesario ver como se relacionan estas variables entre sí y con otros aspectos del fenómeno. (Holley, 1969) En primer lugar la variación de velocidad u' dependerá fuertemente de la propia distribución de velocidades advectivas, esta condición es básica y se mantiene como una característica a tener en cuenta en todo el desarrollo posterior. En segundo lugar -pero no menos importante- si bien la fluctuación de concentración c' se mantiene descrita solamente sobre el plano móvil asociado a la sección transversal sobre el centro de masa, ecuación (10), tiene un efecto grande sobre la fluctuación de velocidad *u*' bien sea *adelante* o *detrás* de dicho plano (pues *u*' no se circunscribe solo al plano). En efecto, se analiza que entre más pequeña sea esta fluctuación en el plano con relación al valor espacial promedio, c'<<C, mas sinétricos serán los valores de *u' adelante* y *detrás* de dicho plano. Como quiera que se deba asegurar de entrada esta simetría para que las ecuaciones (1), (5) y (16) se cumplan en el sentido de que el transporte dispersivo únicamente dependa del gradiente de concentración longitudinal, se postula que la ecuación básica de Taylor (5) se aplique solo en condición de flujo uniforme que asegure velocidades iguales (y constancia del coeficiente E). Esta condición se aplicara invariablemente en desarrollos posteriores. A partir de este análisis Saffman postula que la ecuación de Taylor puede aplicarse únicamente después de un periodo inicial (convectivo) cuando la difusión transversal se haya extinguido, es decir cuando el soluto se haya distribuido homogéneamente en la sección transversal, lo que se conoce como condición de "Mezcla completa" (Fischer, 1968).

Las ecuaciones (16) y (17) son importantes porque definen el Coeficiente Longitudinal de dispersión en función de las fluctuaciones de velocidad y concentración. Combinando la ecuación (16) con la (15) se puede eliminar el término de fluctuación c' manteniendo el término de fluctuación u' y quedando la definición práctica final. Aquí h es un valor específico de z Aquí h es la coordenada significativa:

$$E = -h^2 \int_0^1 u' \, d\left(\frac{z}{h}\right) \int_0^{z/h} \left(\frac{1}{\varepsilon_y}\right) d\left(\frac{z}{h}\right) \int_0^{z/h} u' \, du' \tag{18}$$

Aplicando la distribución universal de velocidades establecida por Nikuradse (French, 1987) y considerando una variación radial a, integrando las expresiones correspondientes Taylor llega a su definición para el Coeficiente longitudinal de dispersión en el tubo recto largo.

$$E = 10.1 \, a \, U^{*} \tag{19}$$

Donde U^* es la llamada "velocidad cortante" y en la que g es la aceleración de la gravedad y S es la pendiente atraves de la cual se desarrolla el flujo gracias al efecto gravitacional de la componente del peso

$$U^* = \sqrt{g \ a \ S} \tag{20}$$

Asumiendo una distribución vertical de velocidades la siguiente forma, con κ como la Constante de von Kármán, (Elder, 1959):

$$u = \frac{U^*}{\kappa} (1 + Ln\left(\frac{z}{h}\right)) \tag{21}$$

Elder llega finalmente a la siguiente definición clásica para el Coeficiente Longitudinal de dispersión en cauces naturales:

$$E = 5.93 h U^*$$
 (22)

3. ANÁLISIS DEL ENFOQUE DE TAYLOR Y ELDER

Aunque la formula de Elder tiene su anclaje en la suposición de una naturaleza Fickiana para la dispersión, los resultados experimentales realizados con posterioridad al establecimiento de la ecuación, insertando los valores de E obtenidos con (22) en las ecuaciones de transporte (1) y (2) dan un amplio rango de respuestas, y lo peor, que la forma misma de las curvas experimentales no concuerda con la del modelo. H.B. Fischer por lo tanto conjetura que el propio concepto de difusión Fickiana aplicado por Taylor a la dispersión en cauces naturales *puede estar en un error* (Fischer, 1966).

Un primer punto a profundizar en este situación contradictoria es la aplicación sobre valorada que se hace de la restricción misma de flujo uniforme para la ecuación. De acuerdo con el análisis detallado que de la hipótesis de Taylor hace E. R. Holley referida en el apartado anterior de este articulo, la condición de flujo uniforme se introduce fundamentalmente para que la hipótesis Fickiana se cumpla cabalmente, esto es que el transporte solo dependa del gradiente de concentración. Si no hubiese este tipo de flujo entonces las velocidades del trazador (incluidas las fluctuaciones u') adelante y atrás no serian simétricas y el coeficiente *E* seria *variable* Figura 2. Esta condición aparentemente coherente con el hecho físico, en realidad introduce un elemento extraño, contradictorio en la descripción física de la dispersión puesto que en multitud de verificaciones experimentales, aunque haya flujo uniforme la diferencia aparente de velocidades adelante-atrás se mantiene generando una "asimetría" de la curva de concentración de soluto.

Para dilucidar esta aparente paradoja, un punto importante a analizar es que la ecuación (7) utiliza en realidad una transformación de Galileo y ella debe tomarse con todas sus consecuencias. Una de ellas es que permite la descripción del evento por diferentes observadores del sistema, teniendo en cuenta las diferentes velocidades a componer. Esas velocidades se muestran en la Figura 3 que describe una curva real de trazador y corresponden al movimiento advectivo asociado a la velocidad U, y al movimiento dispersivo asociado a las velocidades dispersivas a lado y lado del centro de masa $\pm Vdisp$. Con la composición Galileana operando se ve entonces un filo frontal de la distribución más pendiente debido a la suma de U+Vdisp y luego un flanco descendiendo más lento debido a



la composición *U-Vdisp*. Por lo tanto la descripción del fenómeno desde el punto de vista de la cinemática relativista clásica lleva de forma natural a la presencia de una asimetría de la curva de concentración del soluto mirada por un observador fijo en el límite del flujo.

Por el contrario, si el observador viaja con la velocidad Usobre el centro de masa de soluto, en tal sistema desaparece la velocidad media U (pues el observador se mueve con ella) y la curva que describe la ecuación es perfectamente Gaussiana. Esta última circunstancia es muy importante pues se puede afirmar que la naturaleza Fickiana de la distribución nunca se pierde, ni aun en momentos muy cercanos al vertimiento en el flujo (como lo suponía equivocadamente Saffman).

Pese a que han pasado más de 40 años desde que H.B. Fischer publicó el informe KH-R-12, los problemas fundamentales que aborda el estudio se mantienen sin una solución integral y completa, habiéndose más bien derivado a soluciones de software mediante la aplicación de complejos algoritmos de ajuste de las curvas teóricas para que converjan con las experimentales, lo cual se logra pero en detrimento de la capacidad explicativa y predictiva de las teorías utilizadas. De hecho, al no tenerse una explicación razonable para la asimetría de las curvas de soluto y ser tomadas ellas como hechos "reales", numerosos investigadores han propuesto a través de estos años diversidad de modelos matemáticos que "ajustan" las curvas teóricas a las experimentales, pero ello en detrimento de valores realistas del Coeficiente longitudinal de dispersión. Entonces, si la no correspondencia de la formula de Élder se ha derivado del hecho de que los diversos métodos de interpretación de las curvas de soluto no toman en cuenta la verdadera naturaleza del fenómeno, es factible que el error este en los métodos mismos y no en la formula de Elder. Una clave para la revisión del tema es que se analicen los efectos de la aplicación correcta de una transformación de Galileo sobre la



Ingeniería Civil 170/2013



descripción completa del fenómeno, especialmente lo que tiene que ver con la noción correcta de dimensionalidad del fenómeno dispersivo y la naturaleza de las ecuaciones utilizadas, que no se acoplan. Este acople será posible utilizando un coeficiente longitudinal de dispersión función del tiempo, E(t). De esta forma se mostrara como las ecuaciones modificadas no solo describen apropiadamente las curvas experimentales sino también como se acoplan a la realidad física de implica que el flujo es no uniforme y que esta condición no es necesaria para mantener la esencia Fickiana de las ecuaciones utilizadas.

4. UN MODELO ALTERNO QUE DESCRIBE LAS CURVAS **REALES DE TRAZADOR A PARTIR DE UN CONCEPTO** NO ESTACIONARIO DEL PROCESO

Dado que la estructura matemática de las ecuaciones (3), (4) y (5) es esencialmente correcta, una posible explicación al comportamiento "anómalo" de las curvas experimentales es que se haya incurrido en un problema de interpretación dimensional, relacionada con una aplicación limitada y defectuosa del principio de relatividad clásica de Galileo. Se tratará de mostrar que en toda circunstancia el proceso básico del transporte de masa en los flujos naturales ocurre en realidad en dos coordenadas (longitudinal y transversal) y no en una sola (longitudinal) implicando un error la aplicación simple de la ecuación mono-dimensional. Entonces, en una primera fase una vez hecha la invección de soluto, la dispersión se desarrolla porque la difusión turbulenta que opera también transversalmente (flecha verde) pone de manera aleatoria partículas de trazador en el campo de velocidades distribuida en el flujo (flechas negras).

Esto genera un desperdigamiento Gaussiano de la distribución de las partículas en el eje longitudinal (flecha azul) en la que existe una separación aleatoria de cada par de partículas con un patrón Browniano. (Constain et al, 2006). Figura 4. Una vez logrado el equilibrio químico a lo ancho del flujo, el mecanismo difusivo transversal cesa su rol principal en este proceso, pero esto no quiere decir de forma alguna que el movimiento transversal aleatorio cese, pues hay un mecanismo que lo sigue soportando: la transferencia irreversible de calor que evecta entropía hacia los alrededores. Es el efecto "Soret" en el que para sistemas en desequilibrio un efecto de flujo de calor acopla a un efecto de flujo de materia (flecha roja), de acuerdo al principio de Gibbs-Duhem de la termodinámica. (Prigogine et al, 1996). Figura 5.

Esto ocurre hasta que el proceso se extingue con la obtención del equilibrio termodinámico en todo el volumen ocupado



FIGURA 5. Movimiento térmico-dispersivo en dos ejes.

por el soluto. Entonces, la naturaleza bidimensional de la dispersión en los flujos turbulentos es un hecho inevitable y permanente. La solución trivial seria usar las ecuaciones bi-dimensionales con sus correspondientes dificultades de interpretación y resolución matemática. La solución no trivial para acoplar esta situación es definir un coeficiente longitudinal de dispersión, E, como función del tiempo. Esto puede ser así porque la variación temporal en las ecuaciones diferenciales equivale a variaciones espaciales de cualquier naturaleza. De esta forma la ecuación mono-dimensional de Fick con un tal coeficiente función del tiempo puede representar apropiadamente el movimiento bi-dimensional descrito.

Es posible mostrar que un coeficiente de transporte función del tiempo implica una velocidad media del flujo con la siguiente forma (Constain et al, 2002):

$$U = \frac{1}{\phi(t)} \sqrt{\frac{2E(t)}{\tau}}$$
(23)

Aquí τ es el tiempo característico de dispersión y $\Phi(t)$ es una función que describe el grado de asimetría de la curva de concentración. La función $\Phi(t)$ que aparece en esta ecuación es en realidad una función de estado y por lo tanto da cuenta de la evolución termodinámica de la pluma de soluto. Será sensible al momento en que la difusión transversal desaparece y la transmisión de calor irreversible toma su lugar. En otro artículo del autor se demuestra detalladamente que esto ocurre para $\Phi \approx 0.38$. (Constain et al, 2005). Figura 6.

5. DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL TRANSPORTE CON BASE EN UNA VISIÓN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA LOS PARÁMETROS **DE TRANSPORTE**

Cálculo del Coeficiente longitudinal de dispersión

Para un análisis integral del fenómeno hidráulico, de transporte de masa y de la geomorfología de un cauce se parte del hecho de que se debe investigar cada caso en particular con trazadores. Estas son sustancias que actúan de forma parecida a las moléculas de agua, que en lo posible deben ser inertes y de disipasion muy rápida para no causar impactos ambientales de importancia.

La ecuación (23) de velocidad media basada en la integración de conceptos hidráulicos y de transporte es válida incluso para régimen de flujo no uniforme, a diferencia de la ecuación clásica de Chezy, ya que la heterogeneidad de las condiciones dinamices impuestas a la mezcla de soluto conducen a una mejor precisión de los parámetros involucrados. Para desarro-



llar una metodología específica a partir de estas ideas nuevas interesa en primer lugar despejar el Coeficiente E:

$$E = \frac{\phi^2 U_x^2 \tau}{2} \tag{24}$$

Se puede demostrar que la relación que existe entre τ como tiempo característico y t como tiempo general (variable independiente) está determinada por la distribución de Poisson aplicada al movimiento totalmente aleatorio (estadístico) de las partículas del trazador. (Constain et al, 2006) Esta relación numérica es.

$$\frac{\tau}{t} = \beta \approx 0.215 \tag{25}$$

Por lo tanto la ecuación anterior queda:

$$E = \frac{\phi^2 U_x^2 \beta t}{2} \tag{26}$$

Cálculos prácticos de U y ø

En la práctica, tanto Ucomo ϕ y la misma t se miden en la curva de soluto en examen, conociendo la distancia desde el punto de inyección súbita y el punto de medición fijo en la orilla y estableciendo el tiempo transcurrido entre estos dos eventos. En la Figura 7 se muestra una pantalla de un instrumento de software útil para medición y análisis de cauces con el tiempo como abscisa (T=segundos). En esta pantalla se muestra el instante de inyección súbita de una masa determinada de trazador mediante una pequeña flecha roja. La curva de trazador (sal común en el caso mostrado) se sobrepone en una concentración de fondo Co, correspondiente a la concentración iónica de los aportes diversos del lecho y la escorrentía. La velocidad promedio del flujo U se calcula entonces por la razón entre la distancia ΔX (dato conocido de entrada) y el tiempo entre la flecha roja y el pico de la curva. En la Figura 8 se muestra la misma pantalla pero con los cálculos para la función Φ . (Constain et al, 2007).





FIGURA 8. Medición práctica de Φ a partir de los datos de la curva de trazador.

$$U = \frac{\Delta X}{\Delta t} \tag{27}$$

De la teoría Fickiana básica y de la definición temporal para E se tiene que:

$$\delta t = 2\sigma = 2\sqrt{\beta} \phi t \tag{28}$$

Por lo tanto Φ se calcula a partir de la siguiente formula con todos los datos conocidos, ya que δt y t se miden en la curva y $\beta \approx 0.215$:

$$\phi = \frac{\delta t}{2 t \sqrt{\beta}} \tag{29}$$

Por lo tanto estos datos numéricos se aplican a resolver la definición (26).

Cálculo del tiempo de llegada de las partículas de trazador

La varianza sirve para determinar los puntos "extremos" de la curva real de trazador, en especial el punto más "avanzado" correspondiente a la llegada de las primeras partículas del soluto. Se sabe de la estadística matemática que un 95% del área de la curva Gaussiana se cubre aproximadamente con dos desviaciones a partir de centro de la curva. Esta indicación sirve para calcular en avance el tiempo en el cual aparecerán las primeras partículas de trazador. Entonces si se llama a "t1" como el tiempo contado desde el centro de la curva en que aparecen las primeras partículas de soluto dispersándose, se tendrá como en la Figura 9.

Se tiene entonces:

$$t_1 = 2 \times \sqrt{\beta} \phi t \tag{30}$$

$$T_{primeras \ particulas} = T_p \approx t - t_1 = t(1 - 2 \times \sqrt{\beta} \phi) \tag{31}$$

Ahora, es necesario calcular el "punto extremo" de las últimas partículas. Se debe tener en cuenta que la curva vista desde la orilla presenta una asimetría debido a la composición de Galileo sobre las velocidades participantes. Este efecto se mide por la función Φ , a partir de la siguiente fórmula que permite calcular la razón entre los tiempos internos de la



curva, *t1* y *t2*. Esta fórmula se deduce de la relación entre tiempos y velocidades para la composición de Galileo si $\phi \neq 1$ (Constain et al, 2003).

$$\frac{t_2}{t_1} \approx \frac{1+\phi}{1-\phi} \tag{32}$$

Por lo tanto:

$$t_2 \approx \left(\frac{1+\phi}{1-\phi}\right) \times t_1 = 2 \times \left(\frac{1+\phi}{1-\phi}\right) \times \sqrt{\beta} \phi t$$
(33)

Este tiempo medido desde el punto de vista del observador será:

$$T_{\acute{u}ltimas\ partículas} = T_u \approx t + t_2 \tag{34}$$

Estos cálculos aproximados serán de gran importancia para los estudios de calidad de aguas en los que además del tiempo medio de transporte, t, es necesario conocer a t1 y t2.

Si se parte de la ecuación (26) y se reemplaza en la ecuación clásica de Fick (3) se llega a una nueva relación para la concentración del soluto en función del tiempo. Aquí el sumando Co es la concentración salina de fondo del cauce considerado.

$$C(t) = \frac{M}{Q \times \phi \times t \times \sqrt{2\pi\beta}} e^{-\frac{(X-U)^2}{2\beta\phi^2 U^2 t^2}} + Co$$
(35)

Esta ecuación que resulta de definir al Coeficiente Longitudinal de dispersión como función del tiempo, y por lo tanto acoplando a la realidad bidimensional del proceso de transporte difusion-dispersion, representa de forma muy precisa las curvas experimentales de trazador, a diferencia de la ecuación clásica, como ya se ha señalado. Entonces, a partir de la ecuación modificada de Fick anterior se puede expresar el valor para la concentración pico, según la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{M}{Q \phi t \sqrt{2\pi\beta}} \tag{36}$$

Reubicando a Φ :

$$C_p \phi = \frac{M}{Q t \sqrt{2\pi\beta}} \tag{37}$$

Multiplicando el numerador y denominador por α un factor de utilidad para aplicar las dos definiciones por aparte:

$$C_p \phi = \frac{M \alpha}{Q \alpha t \sqrt{2\pi\beta}} \tag{38}$$

Operando algebraicamente el tiempo:

$$C_p \phi = \frac{M \alpha}{Q \alpha t^{(3)} \sqrt{2\pi\beta}}$$
(39)

Entonces:

$$C_p \phi = \frac{M \alpha t^{\frac{2}{3}}}{Q \alpha t^{\frac{1}{3}} \sqrt{2\pi\beta}}$$
(40)

Separando:

$$C_p \phi = \frac{M}{Q \alpha t^{\binom{4}{3}} \sqrt{2\pi\beta}} \times \alpha t^{-\frac{2}{3}}$$
(41)

Definiendo por aparte:

$$\phi(t) = \frac{M}{Q \,\alpha \, 1.16} \times \frac{1}{\sqrt[3]{t}} \tag{42}$$

Ingeniería Civil 170/2013

Y:

$$C_{p}(t) = \alpha t^{-\frac{2}{3}}$$
 (43)

El coeficiente α se obtiene examinando cada caso experimental. Para ello se calcula primero la función temporal específica para el caso *i* y luego se mide la concentración pico correspondiente de la curva de trazador y se utiliza la siguiente ecuación:

$$\alpha_i \approx \frac{C_p(t_i)}{(t_i)^{\frac{2}{3}}} \tag{44}$$

7. ANÁLISIS DE LOS DATOS ORIGINALES DE UNA EXPERIMENTACIÓN CON TRAZADOR DOCUMENTADA POR H.B. FISCHER EN 1966

Consideraciones generales

Para verificar la teoría propuesta fue escogido un experimento detallado realizado por H.B. Fischer en el canal calibrado de 40 metros con pendiente ajustable v recirculación. del W.M Keck Laboratory de Caltech en 1966 (Fischer ,1966), Figuras 10 y 11. Este es un canal rectangular de paredes de plástico y lecho de acero inoxidable. Tiene un recorrido uniforme desde 0.0 m hasta los 38.6 m. Para el experimento en cuestión se utilizo una pendiente de 0.0002 ajustada mediante los aparejos mecánicos de precisión del laboratorio. El experimento denominado por su autor como "Series" 2700 consistió en ocho vertimientos ("Run") con sal común. Cuatro (2700 a 2704) hechos a X1= 14.06 m y otros cuatro (2705-2708) hechos a X2= 25.06 m. Para todos los vertimientos-salvo la distancia-las demás condiciones del experimento fueron mantenidas iguales. Para pasar de una "serie" a otra (de X1 a X2) se movió el dispositivo inyector de trazador, en lugar de mover las sondas para no modificar la calibración. En realidad para cada distancia se promediaron los cuatro (4) vertimientos, así que el dato dado para cada serie es un promedio. Para este experimento se obtuvo una profundidad de la lamina de agua de h = 0.128 m y una velocidad media del flujo de U=0.362 m/s. La profundidad de cada experimento se controlo con un indicador ("pointer") especial colocado sobre la lamina de agua mientras que la velocidad del flujo fue medida con un tubo pitot tipo Prandlt.



FIGURA 10. Vista panorámica del canal de 40 metros

Instrumentación del experimento

El equipo de procesamiento electrónico de las señales desde los sensores de conductividad en el canal de 40 metros se muestra en la Figura 12.

En 1966 la instrumentación electrónica de precisión era de gran volumen como puede observarse en la Figura anterior. Se utilizó en esa oportunidad un equipo "Sanborn recording system series 150". Este equipo recogía las señales electrónicas por seis canales independientes desde los sensores. Luego esta información era procesada por un computador digital. Los sensores fueron colocados según una distribución especial en la sección transversal del canal para tener una información representativa de la distribución del trazador, similarmente a como aparece en el arreglo de la Figura 13.

Los sensores de conductividad se hicieron especialmente para obtener una constante de sensibilidad acorde con los requerimientos de la instrumentación electrónica. Fueron tres electrodos alineados, el electrodo central con potencial de señal mientras los dos electrodos externos estaban a tierra (referencia) dando un excelente arreglo sin ruido. Su material fue de platino de alta pureza embebido en un plástico especial. Sus dimensiones fueron 1/8 x 1/8 x 0.01 pulgadas. Figura 14.



FIGURA 11. Plano esquemático de las facilidades del canal.



FIGURA 12. Instrumentación electrónica multicanal.

Método de inyección del trazador

La sustancia trazadora iónica sal común se inyecto súbitamente mediante un aparejo especial semejante al mostrado en la Figura 15.

Medición de velocidades

Las velocidades puntuales en el canal de 40 metros fueran hechas por un tubo Prandlt-Pitot estático de 1/8 de pulgada de diámetro, con una cabeza de apertura dinámica de 0.042 pul-



FIGURA 13. Colocación fija de los electrodos en un experimento sobre el canal.

gadas. Su calibración se realizo con transductores de presión y con los datos hidráulicos del canal. La salida eléctrica se obtuvo de dispositivos magnéticos acoplados al medidor, y su valor se manejo atraves del registrador electrónico "Sanborn" lo mismo que los datos de conductividad. La Figura 16 muestra a la derecha el montaje del tubo Prandlt al centro un indicador de precisión de la profundidad de la lámina de agua.

Método utilizado en el experimento original

El experimento básicamente estaba orientado a lograr de manera rápida una condición de "Mezcla completa" en el flujo del trazador para los estudios requeridos. Por lo tanto para el experimento 2700 esta canaleta de la Figura 15 ocupaba todo el ancho del canal. De esta forma el trazador inyectado alcanzaba mezcla ideal en toda la sección transversal del flujo de manera casi instantánea. La masa de trazador para cada vertimiento fue la misma ya que la canaleta se llenaba en las dos oportunidades con la misma cantidad de solución conductora.



FIGURA 14. Detalle de los electrodos de conductividad.





Datos del Experimento

Los Datos hidráulicos y mecánicos básicos del canal en la "corrida" 2700 se muestran en la Tabla 1.

Especificación
L(max)= 40 m W= 1.09 m h=0.128 m R=0.104 m A= 0.140 m ² S= 0.0002 Ux=0.362 m/s Q= 50.8 l/s
Sal común (NaCl) E= 0,0236 m²/s (Método "Routing")
Seis (6) para asegurar una medición precisa en la sección transversal Sensibilidad de los sensores: 0.5 mgr/l Rango: Hasta 100 mgr/l
Tubos de Pitot estáticos 1/8 pulgada
Súbito en toda la sección a 14.08 m primero y a 24.8 m después



FIGURA 16. Medición de la velocidad y la profundidad.

Curvas de trazador en los dos sitios de medición

Las graficas de los dos vertimientos se muestran en la Figura 17. Hay que notar que para el tipo de experimento que realizó H.B. Fischer no era necesaria la información de la conductividad real y solo utilizo datos relativos, asegurando masas iguales de trazador en cada vertimiento. De esta forma aparece el eje de las ordenadas en unidades arbitrarias. El resultado de E por Fischer se resalta en amarillo.

8. APLICACIÓN DE LAS NUEVAS ECUACIONES A UN EXPERIMENTO ESCOGIDO

En seguida se analizan los diversos aspectos del estudio y se aplican los nuevos criterios y formulas explicadas en este artículo.

Cálculo de los valores de $\Phi(t)$ para las dos curvas de trazador

Para este ejercicio se hacen las graficaciones correspondientes sobre las dos curvas de trazador específicas, tal como se muestra en la Figura 18.

Se utiliza la ecuación (29) en cada curva:

<u>Curva a X1=14.06 m.</u>

$$\phi_1 = \frac{\partial t_1}{2 t_1 \sqrt{\beta}} = \frac{4.71}{2 \times 38.5 \times 0.464} \approx 0.131$$

Curva a X2=25.06 m.

$$\phi_2 = \frac{\delta t_2}{2 t_2 \sqrt{\beta}} = \frac{8.04}{2 \times 68.8 \times 0.464} \approx 0.126$$

Cálculo de la masa vertida en cada experimento de trazador

El dato de la masa es importante pues es indispensable para la modelación teórica de las curvas de trazador. Sin embargo Fischer no documentó este dato pues para el objetivo propuesto en la tesis se consideró que se podía trabajar con uni-



FIGURA 17. Graficación original de los dos vertimientos de sal en el canal de 40 m.



dades arbitrarias de masa y por lo tanto de concentración de soluto. Esto implica de entrada un inconveniente y hay que investigar los datos discretos congruentes para ingresarlos luego en las formulas en el Excel. Se buscan las tablas de datos de la conductividad numérica relativa que se dan al final del reporte KH-R-12. Pero se encuentra que ellos tampoco dan la información directa que se buscaba, pues son simplemente la salida de los instrumentos calibrados a máxima deflexión del medidor utilizado. La clave es determinar que magnitudes son proporcionales y entonces ajustarlas debidamente para poder comparar las curvas teóricas con las experimentales. Se desconocen tanto la masa, M de trazador como la Concentración pico (altura), Cp del trazador, pero su razón si se conoce pues corresponde al siguiente producto de datos ya sabidos, de acuerdo con la ecuación (36).

$$\frac{M}{C_p} = Q \phi t \ 1.16 = Cte$$

Entonces, basta con fijar arbitrariamente un valor de uno de los ´parámetros desconocidos y se puede calcular el valor del otro. Esto vale tanto para los datos de los experimentos de Fischer como para el ajuste de las ecuaciones de Modelacion. Por ejemplo, de manera completamente arbitraria se escoge un valor de la masa que sea razonablemente significativa para el caudal manejado, por ejemplo M=40.5 gramos. Se calcula en seguida para cada serie de datos (a X1 y a X2) los valores de Cp1 y Cp2:

$$\frac{M}{C_{p1}} = Q \times \phi_1 \times t_1 \times 1.16 = 50.8 \times 0.131 \times \frac{14.06}{0.362} \times 1.16 = 300 \ litros$$
$$\frac{M}{C_{p2}} = Q \times \phi_2 \times t_2 \times 1.16 = 50.8 \times 0.126 \times \frac{25.06}{0.362} \times 1.16 = 514.0 \ litros$$

Por lo tanto, con M=40.5 gramos se tiene:

$$C_{p1} = \frac{M}{300} = \frac{40500}{300} = 135 Mgr/l$$
$$C_{p2} = \frac{M}{514} = \frac{40500}{514} = 78.8 Mgr/l$$

Esta misma proporción tiene que ser aplicada a los datos arbitrarios (pero proporcionales) de las tablas numéricas del reporte KH-R-12. Para ajustar esto se buscan en cada serie el valor máximo (Cp) y se halla la constante por la cual debe multiplicarse para igualar al Cp hallado anteriormente: Así, para la serie a X1=14.06 m el valor máximo Cp1(arbitrario)=73.3 pero debe quedar igual a Cp1(absoluto)=135.0Mgr/l Esto quiere decir que cada número de esta serie debe ser multiplicado por este mismo factor, k para ajustar la serie.

Aquí *k1* vale :
$$k_1 = \frac{135}{73.3} = 1.842$$

Ahora para la otra serie a X2=25.06~m el valor máximo Cp2(máximo)=106.6 pero debe transformarse a Cp2~(absoluto)=78.8~Mgr/l.

Aquí
$$k2$$
 vale: $k_2 = \frac{78.8}{106.6} = 0.739$

Se muestran en la Tabla 2 de datos ajustados con estos multiplicadores para los dos vertimientos.

Estos datos numéricos discretos ajustados se grafican en la Figura 19 mediante una rutina apropiada de Excel. A partir de estos datos específicos de concentración para el experimento en el canal de 40 metros en Caltech es posible realizar enseguida los modelamientos teóricos que se requieran para comprobar las diferentes hipótesis.

Modelación usando la ecuación de Fick clásica (con Coeficiente longitudinal de dispersión constante) con los datos dados por H.B. Fischer

Con los datos que da Fischer para este experimento se modela la fórmula clásica de Fick y con los datos correspondientes consignados originalmente en el informe KH-R-12.

$$C(x,t) = \frac{M}{A\sqrt{4tE}} e^{-\frac{(X-Ut)^2}{4Et}}$$

<u>X1=14.06 m</u>

Con $E=0.0256 m^2/s$, con $A=0.140 m^2$ y con U=0.362 m/s.

Tiempo en X2=25.06 m después del vertimiento	Concentración promedio en unidades arbitrarias y su valor ajustado. (Mgr/l)	Tiempo en X1=14.06 m después del vertimiento.	Concentración promedio en unidades arbitrarias y su valor ajustado. (Mgr/l)
57	0.0→0.0	32	0.0→0.0
59	0.7→0.52	33	1.5→2.76
61	13.4→9.90	34	16.2→29.8
62	31.4→23.2	35	42.4→78.1
63	52.4→38.7	36	70.0→128.9
64	72.5→53.6	36.5	73.3→135.0
65	91.5→67.6	37	72.9→134.3
66	102.1→75.5	38	66.0→121.6
67	106.6→78.8	39	51.7→95.2
68	105.3→77.8	40	41.0→75.5
69	97.1→71.8	41	34.3→63.2
70	84.4→62.4	42	25.6→47.2
71	71.6→52.9	43	16.1→29.7
72	61.4→45.4	44	10.9→20.1
73	50.6→37.4	46	4.7→8.7
74	41.1→30.4	48	1.7→3.13
75	32.1→23.7	50	0.5→0.92
76	25.0→18.5	52	0.2→0.37
77	18.4→13.6		
79	10.3→7.61		
81	4.9→3.62		
83	2.0→1.48		
85	1.0→0.74		
87	0.5→0.37		
89	0.2→0.15		

TABLA 2. Distribución de concentraciones en el tiempo.



Para este sitio se tienen los siguientes datos para ingresar en el modelo Excel que graficara el modelo teórico superpuesto a la curva experimental. Se muestra en seguida las dos modelaciones aisladas y en conjunto utilizando los datos del informe KH-R-12 y la fórmula clásica de Fick. Figura 20.

<u>X2= 25.06 m</u>

Con $E=0.0256 m^2/s$, con $A=0.140 m^2$ y con U=0.362 m/s.

Es evidente de la observación de estas curvas que, tal como ha sido advertido reiteradamente en muchas publicaciones, que ni la altura de la curva ni el grado de asimetría son reproducidas correctamente, por lo menos utilizando un valor constante del coeficiente E calculado con el método "Routing" de Fischer. La curva teórica alcanza el pico un poco después que el dato experimental indicando que el dato de velocidad tiene un pequeño desfase.

Aplicación del nuevo procedimiento

Estos datos experimentales ajustados deben ser reproducibles desde el modelo teórico usando las mismas constantes de proporcionalidad. Figura 21.

<u>X1= 14.06 m</u>

Se parte de los siguientes datos: U=0.362 m/s, Φ 1=0.131, Q=50.8 l/s.

<u>X2=25.06 m</u>

Se parte de los siguientes datos: U=0.362 m/s, Φ 1=0.126, Q=50.8 l/s.

Claramente esta modelación es más exacta que la clásica de Fick. Queda en evidencia de nuevo una discrepancia con la velocidad la cual para el dato experimental de trazadores es un poco mayor que la utilizada en la ecuación. En seguida se hacen ajustes a los valores de los parámetros para mejorar el ajuste teoría-experimento.



FIGURA 20A. Modelaciones individuales y en conjunto de Fick clásica.



Ajustes de los valores para obtener curvas muy ajustadas con respecto al dato experimental

La ventaja de disponer de una formula racional para la curva de trazador (en lugar de un procedimiento de ajuste estadístico como el "Routing") es que permite introducir pequeñas variaciones hasta que las curvas coincidan de forma optima con el experimento, todo mediante una simple rutina de Excel. La primera modificación que se hace es aumentar la velocidad media del flujo para anular el pequeño desfasaje observado de las curvas teóricas con las experimentales. Estas variaciones conllevan así mismo una cierta variación de Q, $\Phi(t)$ y de Cp(t) a valores consistentes. Un cuadro de tales ajustes se muestra en Tabla 3.

Las curvas logradas en Excel para estos datos ajustados, tanto en el tiempo como en el espacio se muestran a continuación en la Figura 22.

Distancia	Cp (Mgr/l)	U (m/s)	Q (I/s)	Φ	t (s)
X1=14.06 m	128.5	0.372	53.0	0.137	37.8
X2=25.06 m	75.3	0.372	53.0	0.130	67.4

TABLA 3. Ajuste de datos básicos para que la convergencia teoría experimento sea optima.

Verificación de la formula de Elder

Inicialmente se verifican los coeficientes longitudinales de dispersión



Y

 $T_{Ultimas \ particulas} = T_u \approx t + 2\sqrt{\beta} \ \phi \left(\frac{1+\phi}{1-\phi}\right) t = t \left(1 + 2\sqrt{\beta} \ \phi \left(\frac{1+\phi}{1-\phi}\right)\right)$

$$U^* = \sqrt{g h S} = \sqrt{9.81 \times 0.128 \times 0.0002} = \sqrt{2.51 \times 10^{-4}} = 0.0159 m/s$$

$$E \approx 5.93 h U^* = 5.93 \times 0.128 \times 0.0159 = 0.0121 m^2/s$$

Se tiene entonces un error porcentual del 14%. El valor encontrado por Fischer mediante el Método de "Routing" fue



Estas formulas aproximadas aplicadas a las dos curvas del experimento de Fischer son:

$$T_{P-1} \approx t_1(1 - 2\sqrt{\beta} \phi_1) = 37.6 (1 - 2 \times 0.464 \times 0.137) = 32.8 s$$

$$T_{U-1} \approx t_1 \left(1 + 2\sqrt{\beta} \phi_1 \left(\frac{1 + \phi_1}{1 - \phi_1} \right) \right) = 37.6 \left(1 + 2 \times 0.464 \times 0.137 \times 1.317 \right) = 43.9 s$$

X2=25.06 m

$$T_{P-2} \approx t_2 (1 - 2\sqrt{\beta} \phi_2) = 67.7 (1 - 2 \times 0.464 \times 0.130) = 59.5 s$$

$$T_{U-2} \approx t_2 \left(1 + 2\sqrt{\beta} \phi_2 \left(\frac{1 + \phi_2}{1 - \phi_2} \right) \right) = 67.7 (1 + 2 \times 0.464 \times 0.13 \times 1.3) = 78.3s$$

Los valores medidos para estos tiempos se muestran en la Figura 23.

La Tabla 4 muestra la comparación entre valores medidos y valores calculados para estos tiempos notables del transporte de soluto en el canal de 40 metros de Caltech.

Verificación de caudales ajustados

Se calculan los caudales que valen para los dos sitios de medición utilizando los datos obtenidos del nuevo procedimiento:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{M}{C_{p1} \times \phi_1 \times t_1 \times 1.16} = \frac{40500}{128.5 \times 0.137 \times 37.8 \times 1.16} = 52.5 \ l/s \\ \text{Y:} \\ Q_2 &= \frac{M}{C_{p2} \times \phi_2 \times t_2 \times 1.16} = \frac{40500}{75.3 \times 0.130 \times 67.4 \times 1.16} = 52.9 \ l/s \end{aligned}$$

APLICACIÓN DE UNA ECUACIÓN DE VELOCIDAD MEDIA EN RÉGIMEN NO UNIFORME: ANÁLISIS DETALLADO DEL TRANSPORTE EN EL CANAL CALTECH USANDO EXCEL



FIGURA 23. Verificación de los tiempos de llegada y permanencia de las partículas de trazador.

Serie	X1=14.06 m	X2=25.06 m
Tp calculado (s)	32.8	59.5
Tp medido(s)	32.0	59.0
Diferencia absoluta	0.8	0.5
Diferencia porcentual	≈3%	≈1%
Tu calculado (s)	43.9	78.3
Tu medido (s)	48.0	83.0
Diferencia absoluta	4.1	4.7
Diferencia porcentual	≈9%	≈6%

TABLA 4. Tiempos co	alculados y	medidos	para las	primeras y	últimas
partículas de trazad	0.				

Experimento	Formula α
X1=14.06 m	$\alpha_1 = \frac{128.5}{(37.8)^{-0.666}} = 1447$
X2=25.06 m	$\alpha_2 = \frac{75.3}{(67.4)^{-0.666}} = 1247$
Promedio	1347 (Mgr/l/seg(-2/3))

TABLA 5. Cálculos del parámetro α .

Predicción de Cp(X) con la distancia

El conocimiento de la concentración pico del soluto en términos de la distancia tiene gran significación para los estudiosos del fenómeno de la contaminación hídrica. Para analizar este tema es necesario aplicar las ecuaciones de (43) a (44). Inicialmente se debe conocer los cálculos del parámetro α para las dos series 2700 del canal de Caltech de acuerdo con los datos de la Tabla 3 mostrados en la Tabla 5.

Se establecen las ecuaciones requeridas de la siguiente forma, con el dato anterior de α y con U=0.372 m/s:

$$Cp(t) = \alpha \times (t)^{-\frac{2}{3}} = \alpha \times \left(\frac{X}{U}\right)^{-\frac{2}{3}} = \alpha \times U^{\frac{2}{3}} \times X^{-\frac{2}{3}}$$

Por lo tanto, con distancia en metros:

$$Cp(X) \approx 697 \times X^{-\frac{2}{3}}$$

Por lo tanto la expresión buscada se grafica en conjunto con los datos experimentales en la Figura 24.

Predicción de $\Phi(X)$ con la distancia

Para el experimentador tiene sentido práctico el valor de Φ con la distancia puesto que esta función da información de cómo evoluciona la pluma de trazador desde un punto de vista energético y puede indicar cuando el soluto cubre homogéneamente la sección transversal.

$$\phi = \frac{M}{Q \alpha 1.16} \times \frac{1}{\sqrt[3]{t}} = \phi_0 \times \frac{1}{\sqrt[3]{\frac{X}{U}}} = \phi_0 \times \frac{\sqrt[3]{\frac{X}{U}}}{\sqrt[3]{\frac{X}{U}}}$$

Y entonces:

$$\phi(X) = \frac{40500}{53 \times 1347 \times 1.16} \times \frac{\sqrt[3]{U}}{\sqrt[3]{X}} = 0.490 \times \frac{\sqrt[3]{0.372}}{\sqrt[3]{X}} \approx 0.352 \times \frac{1}{\sqrt[3]{X}}$$

Por lo tanto, para el caso que se estudia la función buscada se grafica en conjunto con los datos experimentales, con distancia en metros. Figura 25.



Una utilidad muy grande de esta función es estimar la distancia a la cual ocurre la condición de "Mezcla completa" o sea cuando el soluto se ha difundido homogéneamente en toda la sección transversal del flujo en el canal. Esta condición ocurre cuando $\phi \approx 0.38$, por lo tanto se plantea la siguiente ecuación:

$$0.38 \approx 0.352 \times \frac{1}{\sqrt[3]{X}}$$

Por lo tanto:

$$X_m \approx \left(\frac{0.352}{0.38}\right)^3 = 0.80 m$$

Este resultado indica que a menos de un metro del punto del vertimiento ya se tenía el trazador distribuido uniformemente en toda la sección transversal del flujo. Esta situación extrema de inyección completa casi instantánea se debió a que el vertimiento súbito de la solución salina se hizo con un aparato especial (canaleta) que vertió al tiempo en una línea larga atraves de todo el ancho del canal.

Por último se consignan los datos finales de la revisión del experimento realizado por H.B. Fischer en 1966. Tabla 6.

9. CONCLUSIONES

1. Se analizan en este Artículo los desarrollos de G.I. Taylor sobre el fenómeno de la dispersión en flujos naturales y las restricciones que este autor puso a las ecuaciones de transporte conservativo en tubos rectos largos. Se analiza la ecuación de J.W. Elder que extiende estas formulas al caso de los cauces naturales. Especialmente



Parámetros ajustados para el Canal W.M. Keck Lab. Caltech, 1966	Sitio 1 X1= 14.06 m	Sitio 2 X2= 25.06 m	Promedio
Masa M (gr)	40.5	40.5	40.5
Concentración pico Cp (Mgr/l)	128.5	75.3	-
α (Mgr/l/s(-2/3))	1447	1247	1347
Caudal Q (l/s)	53.0	53.0	53.0
Φ	0.137	0.130	-
Pendiente S	0.000154	0.000397	0.00028
Velocidad U (m/s)	0.374	0.370	0.372
Tiempo de transporte t (s)	37.8	67.4	-
Coeficiente Longitudinal de dispersión E (m²/s)	0.0106	0.0169	0.0138
Longitud de mezcla Lm	Lm≈1	Mezcla casi instantánea	

TABLA 6. Cuadro de datos finales para las modelaciones de la revisión del experimento KH-R-12.

> se hace énfasis en la paradoja que resulta al imponer condición de flujo uniforme para garantizar un transporte dispersivo simétrico en una pluma de trazador.

- 2. Se demuestra como desde una perspectiva general el Coeficiente Longitudinal de dispersión, *E* debe ser una función del tiempo para resolver esta paradoja. Esta ampliación del campo de operación de este coeficiente de transporte permite explicar los detalles de la asimetría de las curvas de trazador. Se analiza como la dependencia temporal de este parámetro tiene profunda relación con el mecanismo mismo por el cual un observador fijo en la orilla del flujo ve la pluma sesgada (asimétrica) debido a la composición de velocidades que se desprende del principio de relatividad mecánica de Galileo y por lo tanto depende del tiempo al ser sensible a la variación de la velocidad de difusión transversal.
- 3. Se explica como la ecuación de Elder para calcular el Coeficiente Longitudinal de trazador sigue siendo cercana a la realidad, a pesar de las diversas razones que se dieron para restringir su posible rango de aplicabilidad. Se analizan las razones por las cuales esta aproximación es correcta y más bien los métodos usados para "calibrarla" están en error al tratar de involucrar la asimetría de las curvas de trazador como algo real.
- 4. Se propone un método alterno que se basa en una visión amplia de la dispersión como un fenómeno bidimensional descrito por una ecuación clásica de Fick con el coeficiente de transporte función del tiempo y por lo tanto coherente con el fenómeno que lleva a la asimetría en las curvas reales de trazador. Se explica cómo este nuevo método además de ser un tratamiento integral y preciso del fenómeno de la dispersión, permite

ser aplicado en casos prácticos con la sola ayuda del programa Excel lo cual constituye un valioso recurso para el especialista en este campo de la técnica que no va a requerir complejos programas especiales para resolver sus proyectos.

- 5. El nuevo método involucra una función que describe el desarrollo energético de la pluma de trazador y que por lo tanto es sensible al momento en que el trazador pierde un grado de libertad al llenar homogéneamente la sección trasversal en la llamada condición de "Mezcla competa".
- 6. Se explica como con estas nuevas ecuaciones es posible calcular los tiempos de aparición de las primeras partículas de trazador así como la permanencia de las últimas partículas. Estas informaciones son de vital importancia para los estudios contemporáneos de calidad de agua. Se presentan también formulas derivadas del nuevo método que permiten calcular y predecir los tiempos en los que aparecerán las primeras partículas de trazador en el flujo y también el tiempo de permanencia de las ultimas partículas. Igualmente una fórmula que permite calcular y predecir el valor de la concentración del trazador atraves del cauce. Datos estos muy importantes para los estudios actuales de calidad de aguas.
- 7. Se presentan un experimentos de trazador salino realizados por H.B. Fischer en 1966 en el canal de 40 metros del laboratorio Caltech en California, Estados Unidos. Las curvas reales son comparadas con los modelos teóricos que resultan encontrándose una convergencia satisfactoria, aceptándose entonces que el método corresponde a realidades experimentales.

- 8. Esta técnica ampliada de estudio de trazadores vale en régimen no uniforme y para etapas tempranas de la evolución de la pluma en la que coexisten la difusión transversal y la dispersión longitudinal. Por estas razones su aplicación al estudio de las contaminaciones hídricas puede ser muy ventajosa frente a las metodologías actuales, muy restringidas por ser estacionarias.
- 9. Como el Coeficiente de dispersión en este artículo es función del tiempo, en trabajos posteriores se debe establecer las condiciones temporales de su aplicación de manera general.

10. BIBLIOGRAFÍA

Constain, A., Carvajal., A., Carvajal, J., Lemos R. 2005. Nuevo método de cálculo de la Longitud de mezcla en cauces naturales usando trazadores conservativos. Revista Ingeniería del Agua, España, Vol.13, N°3.

Constain A., Carvajal R., 2007. Accurate measurements of discharge using tracers, FLUCOME 9, University of Florida, Tallahassee. USA.

Constain A. Carvajal. A., Lemos R. 2002. Applications of a non-uniform flow velocity in streams, River Flow 2002. Lovain-La-Neuve, Vol 1. 135-141.

Constain a.; Lemos r.; Carvajal a., "Tecnología IMHE: Nuevos desarrollos en la hidráulica". Revista Ingeniería Civil, CE-DEX, Vol 129, 2003.

Constain A., Carvajal. A., Lemos R. 2006. Determinación teórica del Coeficiente de tiempos β en la ecuación de velocidad

de flujo no uniforme en cauces naturales, XII Congreso de Ingeniería Mecánica de Chile, Universidad de Talca, Nº42.

Day, T.J.; "Longitudinal dispersion of fluid particles in mountain streams: Theory and field evidence", Journal of Hydrology (NZ), Vol 16, $N^{\circ}1$, 1977.

Elder J.W., 1959. The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. Journal of fluid mechanics, London, Vol 5. may. Pp 544-560.

French, R.,1986, Open Channel hydraulics, Mc Graw-Hill, New York, 461-507 N.Y.

Fischer H.B. "Longitudinal dispersion in laboratory and natural channels", PhD Thesis, CALTECH, 1966. Report No. KH-R-12, W. M. Keck Laboratory, California Institute of technology.

Fischer. H.B 1967. The mechanics of dispersion in natural streams. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of ASCE, nov. 187-215.

Fischer, H.B., 1968, Dispersion predictions in natural streams, Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the ASCE, USA. 927-943.

Fischer, H.B., 1969, The effects of bends on dispersion in streams. Water resources research, Vol 5. N° 2. 496-505.

Holley, R.E., 1969, Unified view of diffusion and Dispersion., Journal of Hydraulics Division Proceedings of ASCE. USA. 621-631.

Prigogine I.; Kondepudi D.; Modern Thermodynamics. Wiley, New York, 1998.

Taylor G.I.; "The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe". Proceedings of the Royal society of London, 233, 1954.

EDICIONES DEL CEDEX



Nº de páginas: 516 Año de edición: 2012 P.V.P.: 25€

Este libro que se presenta, es el compendio del trabajo realizado por un grupos de expertos bajo la dirección del Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria del CEDEX en el área de la seguridad del sistema ferroviario, para la identificación de aquellas amenazas significativas y su riesgo asociado que. en determinadas circunstancias, pueden interferir en el correcto funcionamiento del sistema ferroviario y que, por tanto, deben ser examinadas con especial atención en los procesos de evaluación de los diferentes subsistemas constitutivos del ferrocarril así como en las fases previas de obtención del Certificado de Seguridad para la puesta en servicio de los mismos. Estas amenazas determinan requisitos esenciales de seguridad a tener en cuenta en los Safety Cases de las diferentes instalaciones o

equipos para la concesión de la autorización de circulación de un nuevo vehículo o apertura de una línea o sección de línea. La metodología empleada en el proceso sigue las recomendaciones dadas por la ERA relativas a los Métodos Comunes de Seguridad (MCS) para el análisis del riesgo de amenazas y los criterios y los criterios expuestos en la EN 50126. La estructura que da cuerpo a todo el trabajo, es la Base de Datos General de Amenazas Significativas, Hazard Log, obtenida de la identificación y análisis de las amenazas realizado por un grupo de expertos en base a su experiencia, sobre cada uno de los subsistemas establecidos en las ETIs. De las amenazas consideradas se presentan unos Informes en los cuales, además de realizar una breve exposición de la amenaza y porqué se ha considerado, se incluyen las causas, que a juicio del experto, determinan la amenaza y las recomendaciones a seguir para reducir o mitigar su riesgo, es decir, los requisitos esenciales que a la hora de realizar el proyecto se deben tener en cuenta para mitigar o reducir el riesgo de la amenaza. En definitiva, este libro constituye una herramienta importante de ayuda en el seguimiento de la seguridad del sistema ferroviario y tiene también como objetivo la transmisión de experiencia sobre el funcionamiento real de los subsistemas ferroviarios y de sus puntos más críticos.



№ de páginas: 265 Año de edición: 2009 P.V.P.: 20€ Este Manual pretende constituir una ayuda para todos aquellos que tienen que provectar o construir firmes con capas tratadas con cemento, en especial para los técnicos que se enfrentan por primera vez a un firme de este tipo desde cualquier po-

sición: empresas consultoras, constructoras, laboratorios a administraciones. El texto detalla los conceptos básicos a los materiales tratados con cemento, las propiedades de los distintos tipos de mezclas, su dosificación y caracterización, y describe las prácticas más adecuadas para el proyecto, construcción y control de calidad de los firmes con capas tratadas con cemento. El Manual es el resultado de la colaboración entre el Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones (IECA), y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CE-DEX), del Ministerio de Fomento.



Nº de páginas: 285 Año de edición: 2011 P.V.P.: 25€

Las cimentaciones especiales hormigonadas in situ, objeto de la presente publicación, están constituidas por pilotes de desplazamiento y extracción, muros pantalla y pantallas de pilotes. La designación de estas cimentaciones proviene de sus condiciones especiales de puesta en obra de hormigón, generalmente con perforaciones profundas, bajo agua o fluido estabilizado, y con cuantías de armadura importantes; que obligan a exigir al hormigón una serie de características específicas. Si bien estos elementos están incluidos en la normativa española de aplicación a las estructuras de hormigón (EHE, Código Técnico y PG-3), al tratarse éstos de tratados generales, no se cubren muchos de los aspectos particulares en cuanto a las características que debería tener el hormigón y las precauciones que deberían tomarse durante la ejecución de este tipo de estructuras. Por ello y de forma complementaria, se ha desarrollado normativa europea de aplicación a los hormigones de cimentaciones especiales: la UNE-EN 1536 (Ejecución de trabajos especiales de geotecnia. Pilotes perforados) y la UNE- EN 1538 (Ejecución de trabajos especiales de geotecnia. Muros pantalla), ambas publicadas por AENOR en el año 2000.En este trabajo se recoge el Estado del Arte sobre el hormigonado de cimentaciones especiales, incluyendo su puesta en obra. En el texto redactado se detallan los requisitos incluidos en la normativa de aplicación (tanto la española y europea antes mencionadas como otras normativas internacionales específicas consultadas), justificando y explicando su importancia y necesidad. También se incluyen otros aspectos que pueden

contribuir a mejorar la calidad del hormigón de estas obras que, aunque no incluidos en la normativa, aparecen descritos en la bibliografía especializada o bien han sido extraídos de la experiencia práctica. El documento está dividido en diez capítulos, que cubren los materiales componentes del hormigón y su dosificación, puesta en obra, propiedades del hormigón fresco y endurecido, durabilidad, control de calidad y un último capítulo referente al hormigón autocompactante. El Estado del Arte redactado contiene un gran volumen de información, por lo que a efectos prácticos se ha puesto especial énfasis en el capítulo 10 resumen y conclusiones que de forma sintética recopila los aspectos fundamentales que deben tenerse en cuenta. Cualquier información incluida en este apartado puede ser ampliada y justificada en el capítulo correspondiente del Estado del Arte. Por último, el Anejo recoge los datos de mayor interés en relación con el hormigón utilizado en obras singulares de pantallas y pilotes "in situ" realizadas en España.

Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a: CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid

Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: +(34) 91 335 72 49 • E-mail: publicaciones@cedex.es

EDICIONES DEL CEDEX



Nº de páginas: 448 Año de edición: 2005 P.V.P.: 30€

dos por el artifex o artífice. Los materiales y maquinaria utilizados en la construcción de obras públicas, los sistemas de abastecimiento de agua a las ciudades, y la ejecución de infraestructuras para el transporte terrestre y marítimo son algunos de los temas que componen el recorrido expositivo. Se trata de una versión adaptada para la itinerancia de la muestra homónima presentada en el Museo Arqueológico Nacional de Madrid en 2002, cuyo catálogo ha sido reeditado.



№ de páginas: 103 Año de edición: 2012 P.V.P.: 20€ La exposición Artifex. Ingeniería romana España en pretende dar a conocer el inmenso legado técnico del mundo romano; muestra los saberes en diversos campos de la tecnología y, de manera particular, sus aplicaciones a la ingeniería civil en Hispania, con el acento puesto en los procedimientos v técnicas emplea-



№ de páginas: 86 Año de edición: 2008 P.V.P.: 45€

Este libro, obra de Agustín de Betancourt y Molina, describe con minuciosidad una fábrica de cañones ubicada en la pequeña isla de Ŷndrid (Francia), en el río Loira, junto a Nantes, cuvo original se guarda en la actualidad en la biblioteca del Palacio Real de Madrid bajo la custodia de Patrimonio Nacional. Esta edición, con la que se finaliza la conmemoración del 250 aniversario del nacimiento de su autor, respeta con la máxima exacti-

tud el contenido del manuscrito original, pero no así su formato (demasiado grande para ser consultado) ni su encuadernación (en piel con guardas en seda). El libro original incluye un texto preliminar manuscrito, seguido de 49 láminas de factura impecable. Fernando Sáenz Ridruejo, reconocido especialista en la trayectoria vital y profesional de Betancourt, ha realizado para esta ocasión un análisis completo de su figura, su tiempo y su obra a modo de complemento.

El presente manual es resultado del proyecto de investigación (PT-2007-035-18IAPM) "Determinación del nivel de riesgo aceptado en el funcionamiento del ferrocarril en España para los diferentes subsistemas existentes" (DETRA) subvencionado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) dentro del Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007, con el objetivo de proporcionar a la autoridad ferroviaria española información del nivel de riesgo en el ferrocarril español en base al estudio y análisis del histórico de los accidentes e incidentes ocurridos en los últimos años, siendo un referente en la gestión de riesgos desde el enfoque sistémico, tanto a nivel nacional como internacional. El manual se ha estructurado en cuatro grandes bloques. El primer bloque (capítulo 1) ofrece al lector una visión del marco normativo nacional y europeo en la gestión de la seguridad ferroviaria y describe el alcance del proyecto DETRA dentro de este marco. El segundo bloque (capítulo 2) expone la metodología más adecuada para la obtención del nivel de riesgo de un sistema ferroviario, ilustrándola con la experiencia obtenida de la aplicación de dicha metodología a través del proyecto DETRA en el ferrocarril español. En el tercer bloque (capítulo 3) se exponen los resultados de la aplicación de la metodología DETRA al sistema ferroviario español para el período temporal 2000-2008, obteniendo fundamentalmente el nivel de riesgo del sistema ferroviario español mediante los Indicadores de Valor de Referencia (IVR). Finalmente, el último bloque (capítulos 4 y 5) recoge las conclusiones y recomendaciones obtenidas en relación a: i) las tasas de nivel de riesgo; ii) el sistema ferroviario de fallos; iii) los principales colectivos de riesgo; iv) la asignación de los niveles de riesgo a los actores ferroviarios y las personas ajenas al ferrocarril y, y) indicadores de la Directiva de Seguridad Ferroviaria 2004/49/CE.

Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a: CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: +(34) 91 335 72 49 • E-mail: publicaciones@cedex.es

Ingeniería Civil

Normas de Redacción y Publicación de Artículos

Información general

La revista Ingeniería Civil, editada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas es una publicación científica destinada a un público especializado en los campos de ingeniería civil y medioambiental. Es una revista arbitrada que utiliza el sistema de revisión por pares y en la que son objeto de evaluación externa todos los trabajos recibidos. Acepta para su publicación trabajos de investigación especializados cuya cobertura temática cubre los campos de ingeniería civil y medioambiental, hidrología, transporte, geotecnia, materiales de construcción, puertos y costas e historia de las obras públicas, con el objetivo de dar a conocer la tecnología más avanzada y su contribución al desarrollo de las obras públicas.

Las personas interesadas en publicar sus artículos en la revista Ingeniería Civil, deben dirigir sus trabajos al Secretario de la revista de Ingeniería Civil. C/ Alfonso XII, 3 y 5, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Edificio CETA), 28014 Madrid, España, o bien, a las siguientes direcciones de correo electrónico:

ana.garcia@cedex.es, alejandro.d.martos@cedex.es, olga.sanchez@cedex.es, o ingcivil@cedex.es.

En cualquier caso, será indispensable entregar el artículo en soporte digital.

Los originales deberán seguir, siempre que sea posible la siguiente estructura: resumen, palabras clave, texto (introducción, material y métodos, resultados y discusión), agradecimientos y bibliografía.

Presentación de los trabajos

Con carácter general, la extensión máxima del texto será de 40 páginas tamaño DIN-A4, (en formato Word), escritas a doble espacio, cuerpo de letra 12. En casos excepcionales podrán publicarse artículos de mayor extensión, que quedarán igualmente al criterio y aprobación del Comité de Redacción.

El artículo se acompañará de una **carta de presentación** en la que se solicite la consideración del artículo y en la que, además, el autor explicará en 4-5 líneas, cual es la aportación original del trabajo que presenta y sus novedades, la declaración de no envío simultáneo a otras revistas y la confirmación de las autorías firmantes. Asimismo, en esta carta figurará la cesión de todos los derechos al editor.

Los Artículos se presentarán de acuerdo al siguiente orden y estructura:

<u>Título del artículo:</u> Conciso pero informativo, en castellano e inglés.

Nombre y dos apellidos de cada uno de los autores. En el caso del primer autor, se añadirá la dirección del correo electrónico. Se incluirán las referencias profesionales y académicas de los autores.

Información sobre becas, ayudas o soporte financiero con el que se ha contado (Proyectos de Investigación) para la subvención del trabajo y otras especificaciones, cuando sea el caso. Debe aportarse también el título traducido al inglés.

<u>Resumen del trabajo</u>: Será de una extensión entre 200-250 palabras y tendrá dos versiones, una en castellano y otra en inglés.

<u>Palabras clave</u>: Tendrá dos versiones, una en castellano y otra en inglés. Se especificarán entre 5-10 palabras clave que identifiquen el contenido del trabajo, y para facilitar su inclusión los repertorios y bases de datos nacionales e internacionales. Se recomienda utilizar términos controlados de referencia extraídos del *Thesaurus of Engineering and Scientific Terms, publicado por The American Association of Engineering Societies, Washington, D.C.* y disponible en la web:

http://www.amazon.com/Thesaurus-Engineering-Scientific-EngineersCouncil/dp/0685092895

<u>Texto del Artículo:</u> Los trabajos deben ir, si la estructura y contenidos así lo permiten, divididos en los siguientes apartados: Introducción, Material y Métodos, Resultados y Discusión.

<u>Introducción:</u> Debe incluir los fundamentos y el propósito del estudio, utilizar las citas bibliográficas estrictamente necesarias. No incluirá datos o conclusiones del trabajo que se presenta ni realizará una revisión bibliográfica detallada.

<u>Material y métodos:</u> Las fuentes y métodos previamente publicados deben describirse sólo brevemente y aportar las correspondientes citas, excepto que se hayan realizado modificaciones en los mismos. Se describirá el cálculo utilizado y la forma de muestreo, en su caso. Se hará referencia al tipo de análisis crítico, estadístico, etc., empleado (indíquese el que proceda según área de conocimiento). Si se trata de una metodología original, es necesario exponer las razones que han conducido a su empleo y escribir sus posibles limitaciones. Cuando se haga referencia a sustancias o productos químicos o materiales debe indicarse el nombre genérico.

<u>Resultados:</u> Aparecerán en una secuencia lógica en el texto, tablas o figuras. No se repetirán en todas ellas los mismos datos ya recogidos en el texto. Se procurará resaltar las observaciones importantes. Se describirán, sin interpretar ni hacer juicios de valor, las observaciones efectuadas con el material y métodos empleados.

<u>Discusión:</u> Resumirá los hallazgos, relacionando las propias observaciones con otros estudios de interés, y señalará las aportaciones y limitaciones de unos y otros. No se deben repetir con detalle los datos u otro material ya comentado en otros apartados. Mencionar las inferencias de los hallazgos y sus limitaciones, incluyendo las deducciones para una investigación futura.

Es adecuado enlazar las conclusiones con los objetivos del estudio, evitar las afirmaciones gratuitas y las conclusiones no apoyadas completamente por los datos del trabajo.

<u>Agradecimientos:</u> Únicamente se agradecerá su colaboración a personas que hayan hecho contribuciones sustanciales al estudio.

<u>Citas en el texto:</u> Autor y año entre paréntesis. Cuando el autor forma parte de la argumentación sólo el año entre paréntesis. Cuando se cita varias veces a un mismo autor pero a distinta obra del mismo año, se le añade a, b, c.

...procedimiento de cimentación suficientemente acreditado (Redwood and Jain 1992)]. Asimismo, Van der Sanden and Hoekman (2005) propusieron.....En otras situaciones (Redwood and Jain 1992a) la cimentación.....

Para la elaboración de las referencias se recomienda el seguimiento de la norma ISO 690 o los criterios de los ejemplos descritos a continuación:

Artículo de una revista:

APELLIDO(S), Nombre. Título del artículo. Responsabilidad secundaria. Título de la publicación seriada. Edición. Localización en el documento fuente: año, número, páginas.

Ejemplo:

REDWOOD, R.G., JAIN, A.K. Code provisions for seismic design for concentrically braced steel frames Canadian Journal of Civil Engineering, 1992. Vol 19, № 6. 1025–1031.

Libro:

APELLIDO(S), Nombre. *Título del libro*. Mención de responsabilidad secundaria (traductor; prologuista; ilustrador; coordinador; etc.)*. Nº de edición. Lugar de edición: editorial, año de edición. Nº de páginas*. Serie*. Notas*. ISBN

Ejemplo:

BOBBIO, Norberto. *Autobiografía*. Papuzzi, Alberto (ed. lit.); Peces-Barba, Gregorio (prol.); Benitez, Esther (trad.). Madrid: Taurus, 1988. 299 p. ISBN: 84-306-0267-4

Parte de un libro:

APELLIDO(S), Nombre. Título de la parte. En: Título de la obra. Edición. Lugar de edición: editorial, año de edición. Situación de la parte en la obra.

Ejemplo:

HEALEY, M.C. The ecology of juvenile salmon in Georgia Strait, British Columbia. En: Salmonid ecosystems of the North Pacific. Editado por W.J. McNeil, D.C. Himsworth. Corvallis, Oregon. State University Press. 1980. pp. 203–229.

Ponencias de congresos: Referencia similar a una parte de un libro

APELLIDO(S), Nombre. "Título de la parte". En: APELLIDO(S), Nombre. Título de la obra completa. Responsabilidades secundarias*. Nº de edición. Lugar: editorial, año de publicación. Serie*. ISBN

Informe:

APELLIDO(S), Nombre. *Título del informe.* Lugar de publicación: editorial, año. Serie, nº de la serie. (Disponibilidad)

SANDERS, W.W., Jr., ELLEBY, H.A. Distribution of wheel loads in highway bridges. National Cooperative Highway Research Program Report 83, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 1970.

Documentos Electrónicos:

Responsable principal. *Título* [tipo de soporte]. Responsables secundarios^{*}. Edición. Lugar de publicación: editor, fecha de publicación, fecha de actualización o revisión, [fecha de consulta]^{**}. Descripción física^{*}. (Colección)^{*}. Notas^{*}. Disponibilidad y acceso^{**}. Número normalizado^{*}

Ejemplo:

U.S. ISBN Agency. The Digital World and the Ongoing Development of ISBN [en línea]. New Providence, N.J.: RR Bowker, s.d. [ref. de 16 de agosto 2002]. Disponible en Web: http://www.isbn.org/standards/home/isbn/digitalworld.asp>.

El listado bibliográfico debe ser corregido por el autor, comparándolo con la copia en su poder. Se evitará utilizar como citas bibliográficas frases imprecisas. No pueden emplearse como tales las que precisen de aclaraciones como "observaciones no publicadas", ni "comunicación personal", aunque sí podrán citarse dentro del texto entre paréntesis. Los trabajos aceptados, pero aún no publicados, se incluirán en las citas bibliográficas especificando el nombre de la revista, seguido por la expresión "en prensa".

<u>Figuras (Tablas)</u>: Serán consideradas figuras todo tipo de imágenes fotografías, gráficas o dibujos. Se ordenarán según orden de aparición en el texto, y serán identificadas por el término abreviado fig. n° o, en su caso, tabla n°. Los títulos o pies que las acompañen deben explicar perfectamente el contenido de las mismas. Se exige que tengan una resolución mínima de 300 ppp.

Proceso editorial

Los trabajos se remitirán acompañados de una carta de presentación, en la que se solicitará la evaluación para su publicación en alguna de las secciones de la Revista, con indicación expresa de que se trata de un trabajo que no ha sido difundido ni publicado anteriormente, que se envía únicamente a la revista Ingeniería Civil para su evaluación y publicación, si procede, así como las aportaciones en cuanto a originalidad y novedad que, a juicio de los autores, plantea el trabajo.

La redacción de la Revista acusará recibo a los autores de los trabajos que le lleguen y posteriormente informará de su aceptación o rechazo.

La redacción pasará a considerar el trabajo para su publicación por el Comité Editorial, para lo que comprobará si se adecua la cobertura de la revista y cumple las normas de publicación. En tal caso se procederá a su revisión externa.

Los artículos serán revisados de forma anónima por dos expertos en el objeto de estudio y/o metodología empleada. La redacción de la Revista, a la vista de los informes externos, se reserva el derecho de aceptar/rechazar los artículos para su publicación, así como el de introducir modificaciones de estilo y/o acortar los textos que sobrepasen la extensión permitida, con el compromiso, en tal supuesto, de respetar el contenido del original.

Los autores/as de artículos aceptados recibirán las pruebas de imprenta para su corrección por correo electrónico. Deberán devolverlas corregidas a la redacción de la Revista dentro de la semana siguiente a su recepción.