

SIMULACIÓN POR CFD DE LA PÉRDIDA DE CARGA EN CANALES CON CAMBIO ABRUPTO DE ÁREA: COMPARACIÓN CON CORRELACIONES DE LITERATURA

CFD SIMULATION OF HEAD LOSS IN CHANNELS WITH SUDDEN CHANGE OF SECTION: COPARISON WITH LITERATURE CORRELATIONS

Agustín Kourani^a, Dario M. Godino^b, Santiago F. Corzo^b, Nicolas Gimenez^a, Emanuel Gimenez^a y Damián E. Ramajo^b

^aComisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Av. Del Libertador 8250, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, akourani@cnea.gob.ar

^bCIMEC Centro de Investigación de Métodos Computacionales, UNL, CONICET, FICH, Col. Ruta 168 s/n, Predio Conicet "Dr Alberto Cassano", 3000 Santa Fe, Argentina, dmgodino@gmail.com, <http://www.cimec.org.ar>

Palabras clave: CFD, contracciones y expansiones, pérdida de carga, correlaciones.

Resumen. Las correlaciones empíricas para determinar la pérdida de carga en cañerías y canales han sido clave en el diseño de instalaciones complejas, siempre que se respeten los rangos de validez (número de Reynolds, temperatura, presión, etc.) los cuales a menudo no están bien definidos. Además, se suele asumir que la pérdida total es la suma de las pérdidas individuales, aunque estas se ensayen con flujo perfectamente desarrollado. Este trabajo utiliza simulaciones de mecánica de fluidos computacional (CFD) para evaluar la pérdida de carga en canales con contracciones y expansiones de diferentes relaciones de aspecto (L/A). Los resultados obtenidos muestran una excelente concordancia entre CFD y las correlaciones en contracciones y expansiones aisladas. Asimismo, se observa que la pérdida total no es la suma de coeficientes aislados, salvo que L/A sea elevado, lo que permite que el flujo se desarrolle antes del siguiente cambio de área.

Keywords: CFD, contractions and expansions, head loss, empirical correlations.

Abstract. Empirical correlations for determining head loss in piping systems have been crucial in the design of complex installations, provided the validity ranges (Reynolds number, temperature, pressure, etc.) are respected. However, these ranges are often poorly defined. It is also common to assume that the total head loss is the sum of individual losses, even though these fittings are tested under conditions of fully developed flow. This study employs computational fluid dynamics (CFD) simulations to evaluate head loss in channels with contractions and expansions of different aspect ratios (L/H). The results show excellent agreement between CFD and correlations for isolated contractions and expansions. Additionally, it is observed that the total head loss is not simply the sum of isolated coefficients unless the L/H ratio is high, allowing the flow to redevelop before reaching the next area change.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de correlaciones empíricas en el cálculo del coeficiente de pérdida de carga para expansiones y contracciones abruptas es ampliamente usado en la industria para determinar la caída de presión en tales accesorios. Además, estos cambios de área son de amplio uso en los campos de la microfluídica pero también como limitadores de caudal ya que inducen fuertes caídas de presión, las cuales dependen fuertemente de la geometría de tales cavidades (profundidad, largo, etc.). El flujo en cavidades no solo es importante en aplicaciones tecnológicas, sino también de interés científico ya que exhibe muchos fenómenos como la formación de remolinos en esquinas, vórtices longitudinales, o transición a flujo turbulento.

Los antecedentes de estudios en cavidades son varios: [Sinha y Oberai \(1982\)](#) realizaron experimentos para investigar flujos laminares en backsteps y cavidades rectangulares profundas y angostas, demostrando que la relación de aspecto influye en las formas y números de vórtices dentro de la cavidad. [Metzger y Chyu \(1982\)](#) testearon el flujo turbulento con transferencia de calor por convección en canales angostos que desembocan en cavidades rectangulares con paredes de diferentes alturas. Demostraron que el patrón de flujo está fuertemente influenciado por la relación de aspecto, pero en menor medida por el número de Reynolds (Re). [Shankar y Deshpande \(2000\)](#) estudiaron de forma exhaustiva, tanto para flujo laminar como turbulento a diversos Re , la formación de vórtices dentro de cavidades rectangulares y la estabilidad de los mismos. Por otra parte, [Ozsoy y Riethmuller \(2005\)](#) evaluaron una cavidad rectangular dos-dimensional (2D) abierta con una relación de aspecto longitudinal de 4 para varios Re ($Re = 4000, 9000, \text{ y } 13000$) y observaron que, a medida que el Re aumentaba, el vórtice que se generaba aguas abajo iba creciendo en tamaño y el centro del mismo se acercaba hacia el borde frontal de la cavidad. Para este caso, los experimentos fueron realizados en un túnel de viento abierto usando un velocímetro de imágenes de partículas (PIV). Por otro lado, [Faure y Pastur \(2007\)](#) observaron experimentalmente el mismo fenómeno para Re desde 1150 hasta 10670 en cavidades rectangulares abiertas con relación de aspecto desde 0.5 hasta 2. Los resultados mostraron que los patrones de flujo son ciertamente 2D. En lo que respecta al cálculo de coeficientes de pérdida de carga en contracciones bruscas, varias correlaciones son presentadas en [Idelchik \(2006\)](#) en donde expone tablas con valores para los coeficientes de expansión y contracción abrupta en cañerías pertenecientes a varios autores citados en tal libro. Cabe destacar que estas mediciones fueron hechas entre la década de 1950 y 1960 y hoy en día aún se siguen usando para la determinación de tales coeficientes en cañerías con cambio abrupto de sección.

2. ECUACIONES DE GOBIERNO

Las simulaciones se realizaron utilizando la plataforma OpenFOAM[®] v2212 (Open Field Operation and Manipulation), que es un paquete de software CFD libre y de código abierto, publicado bajo Licencia Pública General GNU.

Para este estudio se utilizó el *solver* incompresible, isotérmico y estacionario (*simpleFoam*) considerando el uso de modelos de turbulencia de dos ecuaciones y funciones de pared para capturar la fenomenología propia de los flujos turbulentos (desprendimiento de capa límite, formación de vórtices, etc.). Las propiedades termodinámicas del fluido se consideraron constantes.

2.1. Formulación compresible

Las ecuaciones que rigen un flujo compresible, isotérmico y newtoniano son la ecuación de continuidad 7 y la de momento 8. Ambas pueden verse en el Apéndice

2.2. Modelo de turbulencia

Para modelar la turbulencia, se utilizó un modelo RANS tipo $k-\omega$ *SST Menter* (1993), el cual agrega dos ecuaciones de transporte adicionales para cerrar el sistema de ecuaciones, una para la energía cinética turbulenta (k) (Eq: 10), y la otra para la tasa de conversión de energía cinética turbulenta en energía interna (ω) (Eq: 11). Ambas pueden verse en el Apéndice.

2.3. Correlaciones empíricas

Las correlaciones que existen hoy en día para el cálculo de coeficientes de pérdida de carga para expansiones y contracciones abruptas se basan, para el caso de las expansiones abruptas, en la aplicación de la ecuación de continuidad y de Bernoulli teniendo en cuenta que el flujo se encuentra desarrollado aguas abajo de la expansión. De este modo, la expresión que resulta de tal planteo es la siguiente:

$$K_{SE} = \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right)^2 \quad (1)$$

donde SE significa *sudden expansion* y d y D son diámetros aguas arriba y aguas abajo de la expansión, respectivamente. Por otro lado, para la contracción abrupta (SC por *sudden contraction*), la presencia de la vena contracta hace que la aplicación de la ecuación de Bernoulli no sea válida. Es por ello que varios autores han realizado experimentos para determinar tal coeficiente para diferentes relaciones d/D . En este trabajo se emplea la correlación extraída de [White \(2003\)](#):

$$K_{SC} = 0,42 \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right) \quad (2)$$

Como es de esperar, tanto K_{SE} como K_{SC} valen 0 cuando $d = D$. Por otro lado, K_{SE} toma un valor cercano a 1 cuando D resulta muy grande, como por ejemplo en la descarga de un caño en un tanque. Por otro lado, cuando la contracción es muy grande, D también lo es y K_{SC} toma un valor cercano a 0,42.

3. MODELO COMPUTACIONAL

Para las simulaciones se optó por un modelo 2D. La Figura 1 muestra un esquema de la geometría a modelar. En ella los canales de entrada y salida tienen dimensiones fijas, mientras que las dimensiones de la cavidad (largo L y ancho h_{tot}) varían para cada tipo de relación de aspecto.

En la Fig. 1 se muestran las relaciones de aspecto R_{rad} (h_{tot}/d) y R_{long} (L/h_{tot}) definidas para el estudio paramétrico de los coeficientes de pérdida de carga. La Tabla 1 muestra la matriz de casos, mostrando las relaciones R_{long} y R_{rad} empleadas, y la cantidad de elementos de las mallas empleadas. El análisis se dividió en cuatro casos, y en cada uno de ellos se consideraron las siete relaciones R_{long} , resultando un total de 28 simulaciones. Para cada caso, las mallas empleadas fueron realizadas mediante GMSH, generando grillas 2D completamente ortogonales y con un skewness de 0. La cantidad de elementos varió entre $1,1 \times 10^5$ y 5×10^3 .

En todas las mallas se empleó refinamiento local en las regiones de cambio de sección (expansión y contracción) buscando mantener una relación de aspecto cercana a la unidad en dichas zonas. Por otro lado, lejos de estas zonas la relación de aspecto de los elementos se acercó a 9. Para el caso de $R_{rad} = 1,875$ se decidió usar una mayor densidad de elementos en la cavidad ya que la misma tiene una baja profundidad y fue de interés captar la posible generación de

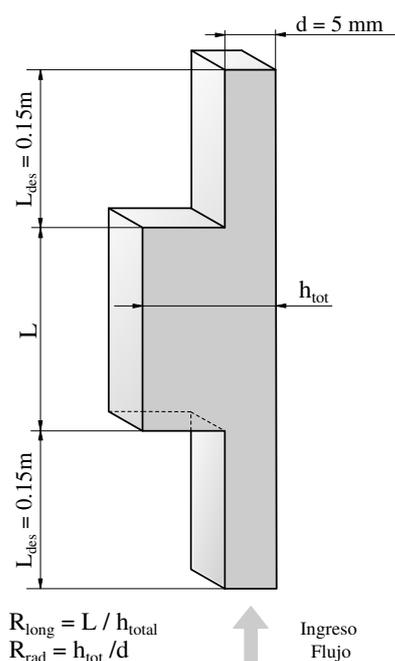


Figura 1: Esquema de la geometría 2D

N_{elem}	Caso 4 $R_{rad} = 7,5$	Caso 3 $R_{rad} = 5$	Caso 2 $R_{rad} = 2,5$	Caso 1 $R_{rad} = 1,875$
$R_{long} = 15$	111840	51840	15840	14616
$R_{long} = 10$	39840	35840	11840	12336
$R_{long} = 5$	21840	19840	7840	10056
$R_{long} = 2,5$	12840	11840	5840	9392
$R_{long} = 1$	18240	10240	5440	8880
$R_{long} = 0,5$	11040	7040	4640	8520
$R_{long} = 0,25$	8846	5440	5056	8340

Tabla 1: Matriz de casos geométricos y tamaño de malla correspondiente.

vórtices en cavidades poco profundas. En este caso, la relación de aspecto máxima se mantuvo por debajo de 2. La Fig. 2 muestra la malla en la región de cambio de área para el caso 4.

Para las condiciones de contorno en las paredes se fijó velocidad y gradiente de presión nulos y funciones de pared $kqR_{wall}Function$ para la energía cinética turbulenta κ , $\nu_{tkwall}Function$ para la viscosidad turbulenta η_t , y $\omega_{wall}Function$ para la disipación turbulenta ω . Para la entrada, se usó $fixedValue$ para la velocidad U , para ω y para κ donde los valores se muestran en la Tabla 2 junto con los parámetros físicos considerados, mientras que para la presión se usó $fixedFluxPressure$ y $calculated$ para η_t . Para la salida, se usó $inletOutlet$ para la velocidad, ω , κ y η_t , mientras que para la presión se usó $fixedValue$ con un valor de 0. Por último, al tratarse de un problema 2D, para las caras del frente y el dorso se usó $empty$ para todas las variables.

Para κ en la entrada, se empleó

$$\kappa = \frac{3}{2}(I|U_{in}|)^2 \quad (3)$$

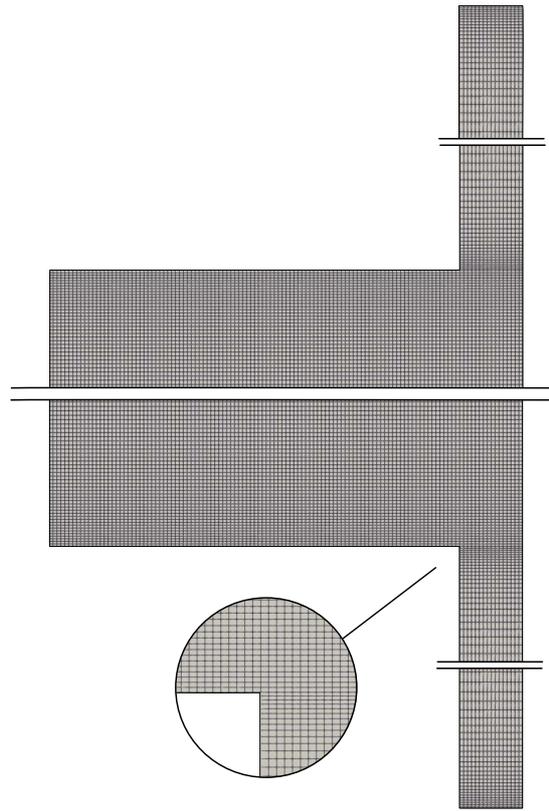


Figura 2: Detalle de malla modelada para uno de los casos.

Siendo $I = 0,16Re^{-0,125}$ la intensidad de turbulencia que, para este caso es de 4,1 %. Por otro lado, la disipación turbulenta a la entrada se estima como

$$\omega = \frac{\kappa^{0,5}}{C_{\mu}^{0,25} L} \quad (4)$$

Donde L es una longitud de referencia que se toma como $0,038D_h$. La Tabla 4 muestra los parámetros de simulación a la entrada y las propiedades del fluido. Todas las simulaciones fueron hechas considerando un $Re = 50000$ en los canales de entrada/salida, siendo el diámetro hidráulico D_h igual a 0,01 m, que para este caso es igual a dos veces la altura del canal de entrada, el cual tiene un valor $d=5$ mm

Condiciones de entrada y propiedades del fluido	
Velocidad de entrada U_{in}	4,46 (m/s)
Viscosidad dinámica μ	890×10^{-6} (N.s/m ²)
Densidad ρ	997,05 (kg/m ³)
Intensidad de turbulencia I	4,1 (%)
Energía cinética turbulenta κ	0,051 (m ² /s ²)
Disipación turbulenta ω	590 (1/s)

Tabla 2: Condiciones de entrada y propiedades del fluido.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El coeficiente K_{CFD} fue obtenido tomando la diferencia de presión entre las ramas de entrada y salida (se tomó el valor de presión a la mitad de cada rama). Dado que ambas ramas tienen mismo diámetro, la presión dinámica es igual y por ello la caída de presión total es igual a la diferencia de presión estática. Es decir que no fue necesario corregir por presión dinámica. Tampoco por presión hidrostática ya que este solver no incluye la gravedad como fuerza de cuerpo. Luego, conocida la diferencia de presión ΔP se aplicó la Ec. 6 que permite calcular la pérdida de carga de un conducto considerando la pérdida por fricción y por forma:

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \frac{1}{2} \left(K + \frac{L + 0,225}{D_h} f \right) U^2 \quad (5)$$

y despejando K:

$$K = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U^2} - \frac{L + 0,225}{D_h} f \quad (6)$$

donde f es el coeficiente de fricción. Cabe mencionar que tomando las presiones entre las ramas de entrada y salida se obtiene el K total ($K=K_{SE}+K_{SC}$). Como se observa, la Ec. 6 tiene un término de forma, proporcional a K y uno de fricción, proporcional a la longitud. En este caso la longitud total es la suma de la longitud de la cavidad (L) más la mitad del canal de salida (0,15 m) y la mitad del canal de entrada (0,075 m). Es decir $L+0,225$ m.

Para cada caso considerado, los valores del coeficiente de pérdida de carga en la expansión y contracción abrupta desde correlaciones son calculados empleando las Ec. 1 y 2 y reportados en la Tabla 3.

K_i	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
K_{SE} (Ec. 1)	0,51	0,7	0,92	0,96
K_{SC} (Ec. 2)	0,3	0,35	0,4	0,41
K_{corr}	0,81	1,05	1,32	1,37

Tabla 3: Coeficientes de pérdida de carga de correlaciones para cada caso

Inicialmente se realizó un análisis de convergencia en malla para determinar el tamaño de celda óptimo, el cual es aquel que con posteriores refinamientos no genera un cambio sustancial en los parámetros de interés (en este caso el coeficiente K). La Tabla 4 muestra las tres mallas empleadas para la geometría del caso 4 ($R_{rad} = 7,5$ y $R_{long} = 10$). Los parámetros de malla son también indicados en la tabla, junto con los resultados obtenidos con CFD.

Caso 4	N_r	N_{cav_r}	N_{cav_l}	d/N_r (mm)	y^+ max	y^+ avg	K_{CFD}	error (%)
Malla 1	8	60	150	0,625	132	45,3	1,319	4,21
Malla 2	16	120	300	0,312	66,6	22,5	1,346	2,25
Malla 3	32	240	600	0,156	30,7	11,1	1,349	2,03

Tabla 4: Convergencia en malla empleando la geometría del caso 4

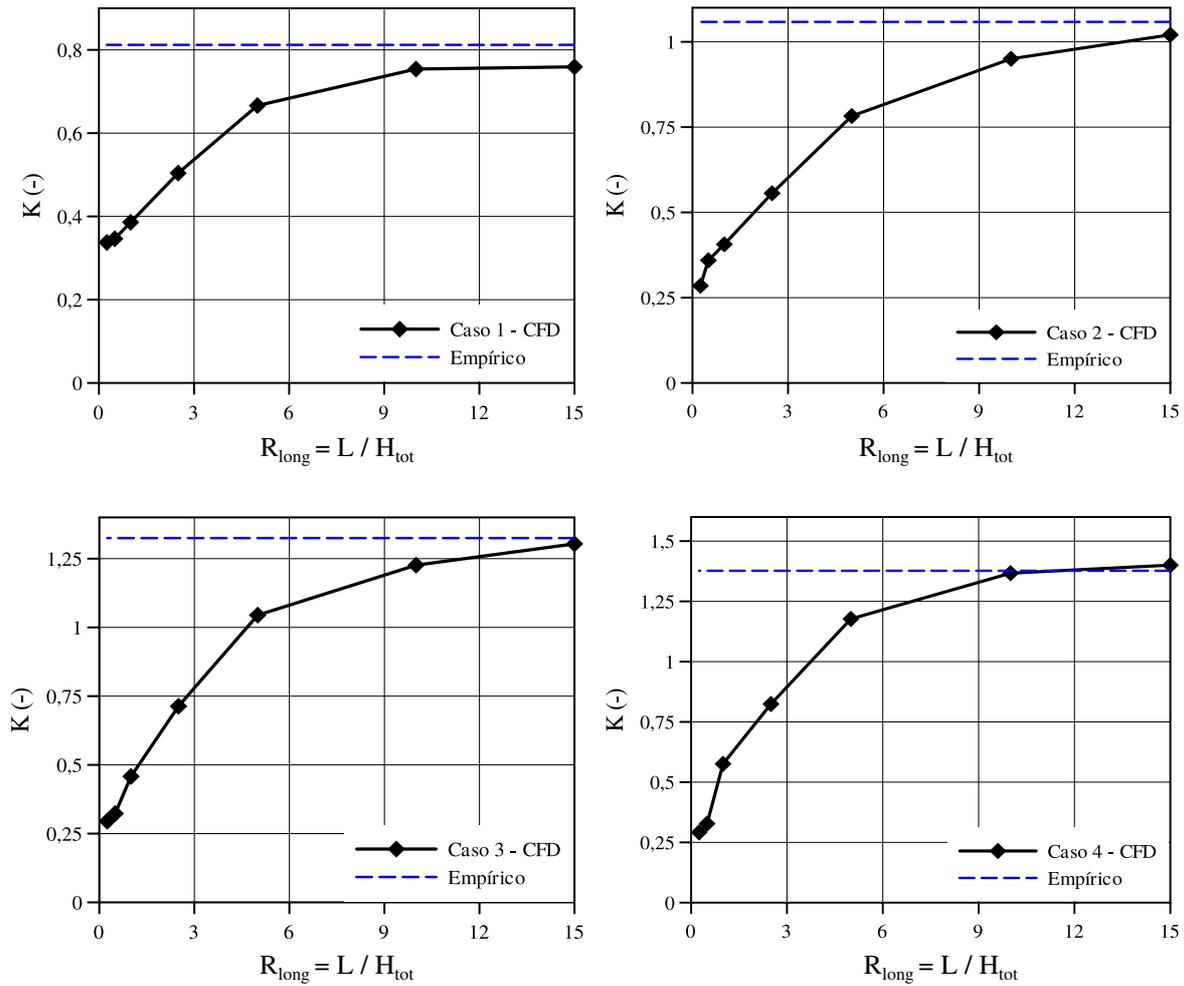


Figura 3: Coeficiente K_{CFD} para los cuatro casos en función de R_{long} .

En la Tabla 4 N_r es la cantidad de elementos en el canal de entrada, N_{cav_r} y N_{cav_l} son la cantidad de elementos radiales y longitudinales en la cavidad y K_{CFD} es el coeficiente total. Por otro lado, el valor de correlaciones K_{corr} a partir de las ecuaciones para K_{SE} y K_{SC} (Ec. 1 y 2) es de 1,377. Como se observa, las tres mallas dan resultados muy próximos, con lo cual se decidió emplear la malla intermedia, con N_r de 16, resultando en un tamaño característico de celda de 0,312 mm.

La Fig. 3 representa los valores de K_{CFD} obtenidos. Se observa que a medida que la cavidad se hace más larga (aumenta R_{long}) los valores obtenidos por simulación tienden al valor de las correlaciones dados en la Tabla 3. Esto es explicado por el hecho de que en cavidades angostas ($R_{long} < 5$) el flujo no logra re-acomodarse y la hipótesis de flujo desarrollado considerado en las correlaciones no se cumple en la contracción abrupta. Observando los cuatro casos se observa que para los casos 1 y 2 (R_{rad} menores) las estimaciones de CFD no alcanzan al valor de correlación. A pesar de las diferencias, resulta notorio que en los cuatro casos el comportamiento es muy similar y se cumple que para relaciones $R_{long} > 10$ la suma de las correlaciones empíricas para expansiones y contracciones ideales caracterizan muy bien la pérdida de carga real. Por otro lado, se observa que para cavidades profundas angostas o relativamente angostas esto no se cumple y el coeficiente de pérdida de carga resulta muy inferior al esperado, con reducciones que van desde el 60% para cavidades angostas (caso 1), pero se reduce a menos del 25% para

cavidades anchas (casos 2, 3 y 4). Este es un resultado altamente relevante a la hora de estimar la pérdida de carga en circuitos complejos donde los cambios de sección abruptos dominan la pérdida de carga global.

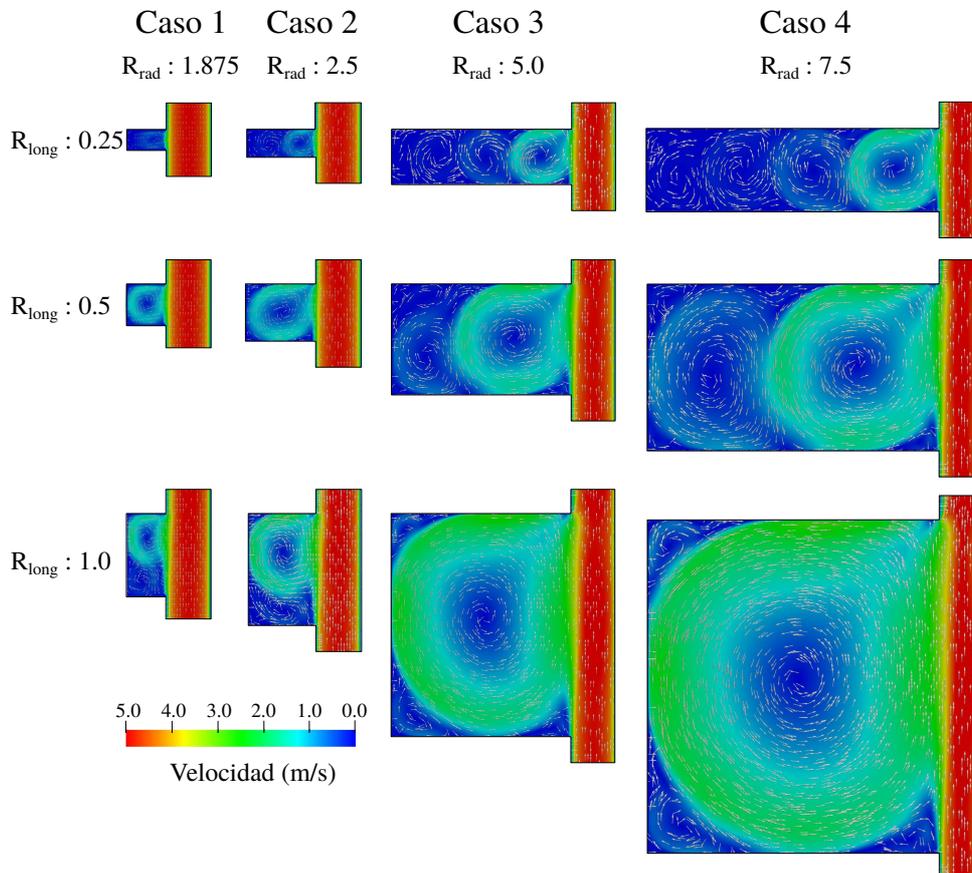


Figura 4: Magnitud de la velocidad para los cuatro casos en tres R_{long} .

La Fig. 4 muestra la magnitud de la velocidad para los cuatro casos y tres $R_{long} \leq 1$ (0,25, 0,5 y 1). En todos los casos se observa la formación de vórtices para todos los R_{rad} considerados. Particularmente, para cavidades angostas (R_{long} chico) y profundas (R_{rad} grande) se observa la aparición de dos, tres y hasta cuatro vórtices. En todos los casos el vórtice tiene un diámetro similar al ancho de la cavidad. Estos vórtices giran en contra fase unos de otros y van perdiendo intensidad a medida que se alejan del flujo de alta velocidad que circula casi sin modificarse entre el canal de entrada y el de salida. Esto puede observarse con mayor en la Fig. 5 donde se ve como decrece la magnitud de la velocidad en el borde de cada vórtice considerando el eje transversal a la cavidad. Tal figura corresponde al caso 4 con un $R_{long}=0,25$. Resultados similares pero para flujo laminar fueron obtenidos por [Shankar y Deshpande \(2000\)](#), donde observaron que a medida que la cavidad va haciéndose más profunda van apareciendo vórtices producto del desprendimiento y fusión de los vórtices formados en las esquinas de la cavidad, sumado al decaimiento en la velocidad de los mismos.

La Fig. 4 permite observar la aparición de vórtices secundarios, justo debajo del vórtice principal a la medida que la longitud de la cavidad se incrementa. Esto se ve claramente para los casos 1 y 2 con $R_{long} = 1$. Este mismo fenómeno fue observado por [Shankar y Deshpande \(2000\)](#) para un flujo de Stokes y también para flujo turbulento.

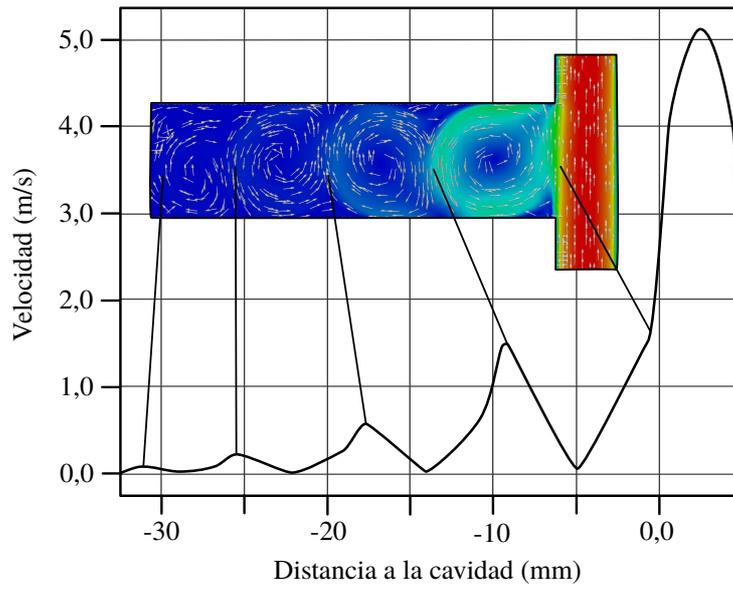


Figura 5: Magnitud de velocidad en eje transversal de la cavidad del Caso 4

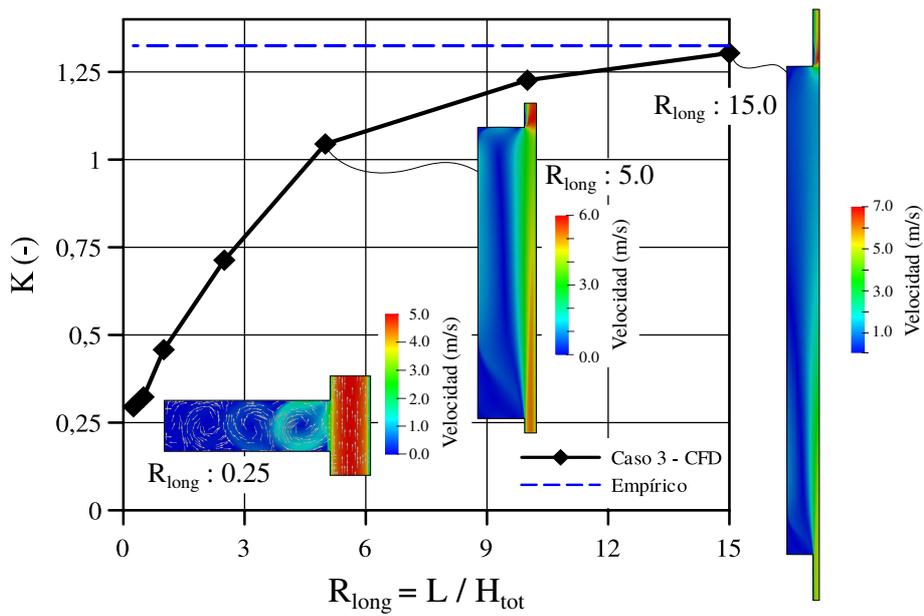


Figura 6: Resultados para el caso 3

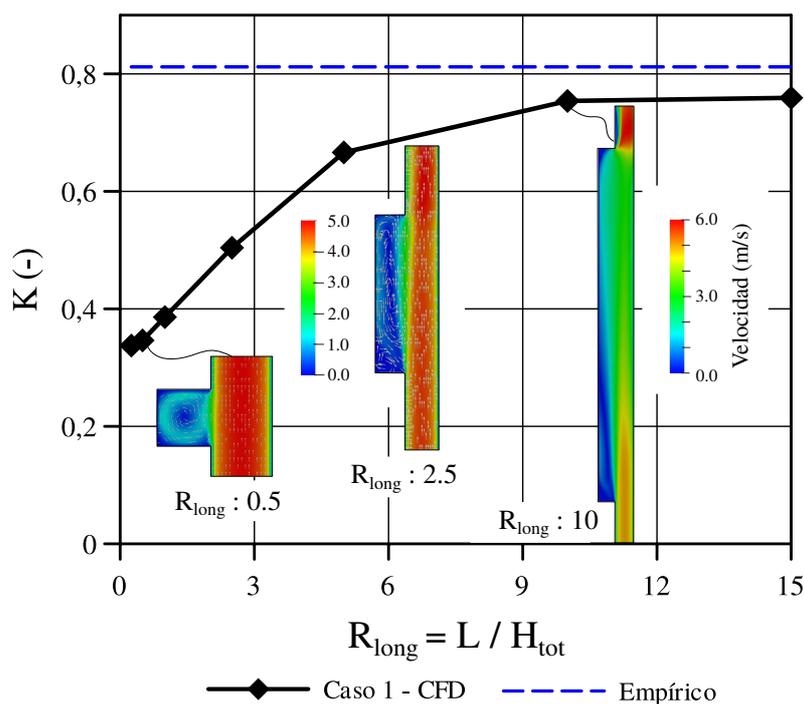


Figura 7: Resultados para el caso 1

Un escenario diferente ocurre cuando se visualiza la velocidad en cavidades alargadas (R_{long} grande). Esto se visualiza en las Figuras 6 y 7. A medida que aumenta R_{long} el único vórtice formado comienza a alargarse pero rápidamente se rompe cuando la cavidad se vuelve más larga que profunda. El flujo tiende a expandirse buscando ocupar toda la profundidad de la cavidad, el centro del vórtice se va desplazando aguas abajo pero luego se desarma y, para $R_{long} > 12$ el flujo es bastante homogéneo en la zona próxima a la contracción abrupta, donde los resultados ajustan mejor con las correlaciones.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se simuló mediante CFD la pérdida de carga en cavidades 2D con expansión y contracción abrupta y diversas relaciones de aspecto con el fin de evaluar los coeficientes de pérdida de carga y compararlos con correlaciones disponibles en la bibliografía.

Se pudo observar que, para cavidades alargadas (con $R_{long} \geq 10$) el coeficiente global de pérdida de carga puede ser correctamente aproximado como la suma algebraica de coeficientes aislados de expansión y contracción tomados de correlaciones que asumen flujo homogéneo. Por otro lado, cuando las cavidades son cortas o angostas la pérdida de carga resulta entre 60 % y 80 % menor a la estimada por correlaciones.

Cuando se evaluó cavidades profundas ($R_{rad} > 5$) se observó poca relación entre la pérdida de carga y la profundidad. Es decir que, el factor más influyente sobre la pérdida de carga es la longitud de la cavidad y no su profundidad.

A. APÉNDICE

Ecuación de Continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

Ecuación de Momento:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{t,ij}) + \rho g_i \quad (8)$$

donde g_i es la aceleración de la gravedad, $\tau_{t,ij}$ es el tensor de tensiones turbulentas, y τ_{ij} es el tensor de tensiones laminar debido a la viscosidad molecular, dado por la siguiente expresión:

$$\tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] \quad (9)$$

Ecuación de energía cinética turbulenta para el modelo $k-\omega$ SST:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega \quad (10)$$

Ecuación de velocidad de disipación de energía cinética turbulenta para el modelo $k-\omega$ SST:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{\rho}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (11)$$

Donde las constantes del modelo pueden ser consultadas en [Menter \(1993\)](#).

REFERENCIAS

- Faure T.M.; Adrianos P.L.F. y Pastur L. Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range reynolds numbers. *Exp. Fluids*, 42:169–184, 2007.
- Idelchik I. *Handbook of Hydraulic Resistance*. Begell House Inc., 2006.
- Menter F. Zonal two equation k-w turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA*, páginas 1993–2906, 1993.
- Metzger D.E.; Bunker R. y Chyu M. Cavity heat transfer on a transverse grooved wall in a narrow flow channel. *Heat Transfer journal*, 111:73–79, 1982.
- Ozsoy E.; Rambaud P.S.A. y Riethmuller M. Vortex characteristics in laminar cavity flow at very low mach number. *Exp. Fluids*, 38:133–145, 2005.
- Shankar P.N. y Deshpande M.D. Fluid mechanics in the driven cavity. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 32:93–136, 2000.
- Sinha S.N.; Gupta A. y Oberai M. Laminar separating flow over back-steps and cavities part ii: Cavities. *AIAA journal*, 20:370–375, 1982.
- White F. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, 2003.