

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



---

## ALGORITMO PARA CALCULAR PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN CAMBIOS DE DIRECCIÓN, AMPLIACIÓN Y REDUCCIÓN DEL DIÁMETRO DE CONDUCTOS BAJO RÉGIMEN FORZADO

---

### TESIS

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

Presenta:

**JOSE JUAN VILLEGAS LEÓN**

Director de tesis

**Dr. Felipe Correa Díaz**

Ensenada, Baja California, México, Noviembre de 2013.

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

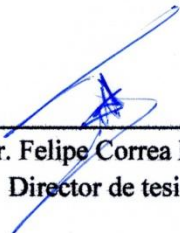
ALGORITMO PARA CALCULAR PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN CAMBIOS DE DIRECCIÓN, AMPLIACIÓN Y REDUCCIÓN DEL DIÁMETRO DE CONDUCTOS BAJO RÉGIMEN FORZADO

## TESIS

Que para obtener el grado de MAESTRO en INGENIERÍA presenta:

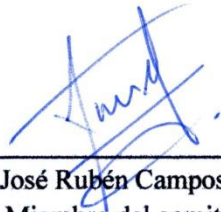
**JOSÉ JUAN VILLEGAS LEÓN**

Y Aprobada por el siguiente comité:




---

Dr. Felipe Correa Díaz  
Director de tesis




---

Dr. José Rubén Campos Gaytán  
Miembro del comité



---

M.I. José Gustavo Morales Nava  
Miembro del comité



---


Dra. Claudia Soledad Herrera Oliva  
Miembro del Comité

Ensenada, Baja California, México. Noviembre de 2013

**RESUMEN** de la tesis de **José Juan Villegas León**, presentada como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería de la UABC. Ensenada, B. C. México, noviembre de 2013

**ALGORITMO PARA CALCULAR PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN CAMBIOS DE DIRECCIÓN, AMPLIACIÓN Y REDUCCIÓN DEL DIÁMETRO DE CONDUCTOS BAJO RÉGIMEN FORZADO**

Resumen aprobado por:



---

Dr. Felipe Correa Díaz  
Director de tesis


El presente trabajo de tesis propone un algoritmo para evaluar las pérdidas de energía que experimenta un fluido al paso por dispositivos con un cambio de dirección, una ampliación o una reducción del diámetro de conductos bajo régimen forzado. El algoritmo envuelve ecuaciones deducidas de las teorías existentes y genera resultados apegados a la media entre ellas. Para éste alcance, se realizó un estudio del arte, donde se observó que los métodos utilizados para obtener las pérdidas por dispositivos, requieren el empleo de fórmulas, tablas y/o gráficos para estimar el coeficiente  $K$ , que es singular de cada accesorio. Cada teoría fue analizada y clasificada de acuerdo a cada pieza, cuando éstos se presentan de manera brusca o gradual en los conductos. Se dió tratamiento a la información, de tal manera que se homogenizó y procesó a tal grado de obtener curvas de valores medios del coeficiente  $K$ . Estos datos fueron trabajados con métodos de ajuste para curvas, hasta obtener una ecuación representativa para cada caso estudiado, donde la correlación más baja entre ellas resultó de 0.9949. Finalmente, se diseñó el algoritmo que contiene a éstas ecuaciones y que puede ser utilizado en un paquete computacional para procesar información rápida, segura y confiable como las metodologías existentes.

**Palabras clave:** Algoritmo, pérdida de energía, coeficiente  $K$ , accesorios, régimen forzado

**ABSTRACT** of the thesis of **José Juan Villegas León**, presented as a partial requirement to obtain the degree of **MASTER IN INGENIEERING** of the program of **MSc y PhD in Sciences and Engineering** of **UABC. Ensenada, B. C. Mexico**, November of 2013

**ALGORITHM TO CALCULATE ENERGY LOSSES IN BENDS, ENLARGEMENT AND REDUCTION IN THE DIAMETER OF CONDUITS UNDER FORCED REGIME.**

Abstract approved by:



---

**Dr. Felipe Correa Díaz**  
Director de tesis

The present thesis work proposes an algorithm to evaluate the energy losses that experiences a fluid when passing through devices with a bend, an enlargement or a reduction in the diameter of conduits under forced regime. The algorithm involves equations derived from existing theories and generates results that conform to the average between them. To this scope, we conducted a study of art, where it was observed that the methods used to obtain losses due to devices require the use of formulas, tables and/or graphs to estimate the coefficient  $K$ , which is singular for each accessory. Each theory was analyzed and classified according to each piece, when these are presented in an abrupt or gradual way into the conduits. A Treatment was given to information in a way that this was homogenized and processed to such an extent of obtaining curves average values of the coefficient  $K$ . These data were worked with curve fitting methods until obtaining a representative equation for each case studied, where the lowest correlation between them resulted of 0.9949. Finally, we designed the algorithm that contains these equations and that it can be used in a computational package for processing early information, secure and reliable as existing methodologies.

**Keywords:** Algorithm, energy loss, coefficient  $K$ , accessories, forced regime

## *Dedicatoria*

---

*Con eterno amor y cariño:*

*A mis padres,*

*Juan Esteban Villegas Yocupicio y Trinidad León Armenta*

*A mi esposa,*

*Fabiola Oyuki Rivera Chávez*

*A mis hijos,*

*José Juan y Ángel*

*A mis hermanos,*

*Williams Ulises, Hernán Octavio y Lizeth Trinidad*

## *Agradecimientos*

---

*A la UABC, por permitirme ser parte de ella y desarrollarme bajo sus aulas con el apoyo de sus magníficos profesores. A la FIAD, por aceptarme como estudiante y facilitarme los medios para culminar la maestría. A CONACYT, por su programa de becas, que sustentó económicamente el trayecto de mi posgrado y que fue sumamente vital para alcanzar éste logro.*

*Al Dr. Felipe Correa Díaz,*

*Por sus conocimientos brindados, por su tiempo, apoyo y paciencia para dirigirme en mi trabajo de tesis.*

*Al M.I. José Gustavo Morales Nava,*

*Por creer en mí y apoyarme ampliamente como codirector de tesis, por ser parte de mi comité y por todos sus conocimientos transmitidos que fueron fundamentales para culminar éste trabajo.*

*Al Dr. José Rubén Campos Gaytan y a la Dra. Claudia Soledad Herrera Oliva,*

*Por ser parte de mi comité y brindarme su valioso tiempo, para escucharme y guiarme a obtener una tesis de calidad.*

*Al Director de la FIAD, Dr. Juan Iván Nieto Hipólito, por dirigir la facultad con empeño para lograr egresados de calidad y por guiarme en su momento como coordinador de posgrado.*

*Al Coordinador de posgrado de la FIAD,*

*Dr. Juan de Dios Sánchez López, por su ayuda, tiempo y paciencia para guiarme en múltiples tareas a lo largo del posgrado.*

*A mis amigos Abraham y Jessie,*

*Por su invaluable e incondicional apoyo, por todos esos momentos de gozo y de tempestad que hemos compartido y por su bonita amistad que me respalda a seguir adelante.*

# CONTENIDO

	Página
<b>Resumen.....</b>	<b>i</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>ii</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>iv</b>
<b>Contenido.....</b>	<b>v</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tablas.....</b>	<b>x</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
I.1 ANTECEDENTES.....	1
I.2 JUSTIFICACIÓN.....	4
I.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
I.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	5
I.5 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	5
I.6 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
I.6.1 Objetivo general.....	6
I.6.2 Objetivos específicos.....	6
<b>CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO III. REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....</b>	<b>17</b>
III.1 ANTECEDENTES.....	17
III.1.1 Obras hidráulicas.....	17
III.1.2 Conducciones.....	18
III.2 Pérdidas de energía en conductos.....	19
III.3 Pérdidas de energía en accesorios.....	26
III.3.1 Su naturaleza.....	26
III.3.1.1 Cambios de dirección.....	26
III.3.1.2 Ampliación del diámetro.....	27
III.3.1.3 Reducción del diámetro.....	28

## **CONTENIDO (Continuación)**

	Página
III.3.2 Su cuantificación.....	29
III.3.2.1 Cambios de dirección.....	30
III.3.2.2 Ampliación del diámetro.....	36
III.3.2.3 Reducción del diámetro.....	43
<b>CAPÍTULO IV. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....</b>	<b>50</b>
IV.1 INTRODUCCIÓN.....	50
IV.2 CAMBIOS DE DIRECCIÓN.....	50
IV.2.1 Cambio brusco.....	50
IV.2.2 Cambio gradual.....	53
IV.3 AMPLIACIÓN DEL DIÁMETRO.....	55
IV.3.1 Ampliación brusca.....	55
IV.3.2 Ampliación gradual.....	58
IV.4 REDUCCIÓN DEL DIÁMETRO.....	62
IV.4.1 Reducción brusca.....	62
IV.4.2 Reducción gradual.....	64
<b>CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>68</b>
V.1 RESULTADOS.....	68
V.1.1 ECUACIONES.....	68
V.1.1.1 Cambio de dirección brusco.....	68
V.1.1.2 Cambio de dirección gradual.....	71
V.1.1.3 Ampliación brusca del diámetro.....	76
V.1.1.4 Ampliación gradual del diámetro.....	79
V.1.1.5 Reducción brusca del diámetro.....	84
V.1.1.6 Reducción gradual del diámetro.....	87
V.1.2 ALGORITMO.....	92
V.2 DISCUSIÓN.....	94
<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES.....</b>	<b>96</b>

## **CONTENIDO (Continuación)**

	Página
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>97</b>
<b>APÉNDICE I.A DATOS DEL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA CAMBIO DE DIRECCIÓN BRUSCO.....</b>	<b>101</b>
<b>APÉNDICE I.B DATOS DEL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA CAMBIO DE DIRECCIÓN GRADUAL.....</b>	<b>102</b>
<b>APÉNDICE I.C DATOS DEL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA AMPLIACIÓN BRUSCA DEL DIÁMETRO.....</b>	<b>106</b>
<b>APÉNDICE I.D DATOS DEL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA AMPLIACIÓN GRADUAL DEL DIÁMETRO.....</b>	<b>107</b>
<b>APÉNDICE I.E DATOS DEL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA REDUCCIÓN BRUSCA DEL DIÁMETRO.....</b>	<b>112</b>
<b>APÉNDICE I.F DATOS DEL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA REDUCCIÓN GRADUAL DEL DIÁMETRO.....</b>	<b>114</b>
<b>APÉNDICE II.A CURVAS DE AJUSTE Y ECUACIONES PARA CAMBIO DE DIRECCIÓN GRADUAL.....</b>	<b>117</b>
<b>APÉNDICE II.B CURVAS DE AJUSTE Y ECUACIONES PARA AMPLIACIÓN GRADUAL DEL DIÁMETRO.....</b>	<b>119</b>
<b>APÉNDICE II.C CURVAS DE AJUSTE Y ECUACIONES PARA REDUCCIÓN GRADUAL DEL DIÁMETRO.....</b>	<b>123</b>

## Lista de Figuras

	Página
Figura 1. Cambio de dirección brusco de un conducto hidráulico .....	26
Figura 2. Comportamiento del flujo a través del cambio de dirección gradual (Brater et al., 1996) .....	27
Figura 3. Comportamiento del flujo a través de una ampliación brusca (King et al., 1980).....	27
Figura 4. Comportamiento del flujo a través de una ampliación gradual (Daugherty et al., 1965) .....	28
Figura 5. Comportamiento del flujo a través de una reducción brusca (King et al., 1980).....	29
Figura 6. Comportamiento del flujo a través de una reducción gradual (Daugherty et al., 1965)	29
Figura 7. Coeficiente de pérdida $K$ para cambio de dirección brusco, (Sotelo, 1998).....	31
Figura 8. Coeficiente de pérdida $K$ para cambio de dirección brusco, (CFE, 1983).....	31
Figura 9. Coeficiente de pérdidas $K$ para cambio de dirección gradual, (USACE, 1980) .....	32
Figura 10. Curva ajustada de $K$ para cambios suaves con ángulo central de $90^\circ$ , (USB, 1985).	33
Figura 11. Factor de corrección para curvas con ángulo central distinto a $90^\circ$ , (USB, 1985)....	33
Figura 12. Coeficiente $C_c$ para curvas de diámetro constante y número de Reynolds $> a 2.2 \times 10^5$ , para tubos rugosos, (Sotelo, 1998) .....	34
Figura 13. Coeficiente $K^*$ para curvas suaves con $Re$ igual a $10^6$ , (CFE, 1983).....	35
Figura 14. Coeficiente de pérdida para ampliación brusca del diámetro, (CFE, 1983) .....	36
Figura 15. Coeficiente $K$ para ampliación brusca del diámetro, (Munson et al., 1998).....	37
Figura 16. Coeficiente $K$ para ampliación y reducción brusca del diámetro, (USACE, 1980).....	38
Figura 17. Coeficiente $C_a$ para ampliación gradual del diámetro, (Sotelo, 1998).....	39
Figura 18. Coeficiente $K$ para ampliación gradual del diámetro, (CFE, 1983).....	40
Figura 19. Coeficiente $K$ para ampliación gradual del diámetro, (White, 2008) .....	41
Figura 20. Coeficiente de pérdidas para ampliación gradual del diámetro, (USACE, 1980) .....	42
Figura 21. Factor $K_2$ para estimar el coeficiente $K$ de la ampliación gradual del diámetro, (Sabersky et al, 1999) .....	43
Figura 22. Coeficiente de pérdidas para reducción brusca del diámetro, (Sotelo, 1998).....	44
Figura 23. Coeficiente de pérdidas para reducción brusca del diámetro, (CFE, 1983).....	44
Figura 24. Coeficiente $K$ de reducción brusca del diámetro, (Cengel et al., 2006).....	45
Figura 25. Coeficiente $K$ de reducción brusca del diámetro, (Munson et al., 1998).....	46

## Lista de Figuras (Continuación)

	Página
Figura 26. Coeficiente $K$ para reducción gradual del diámetro, (Mataix, 2010).....	47
Figura 27. Coeficiente $K$ para reducción gradual del diámetro con ángulos de 3 a 40°, (Mott, 2006).....	48
Figura 28. Coeficiente $K$ para reducción gradual del diámetro, con ángulo estrechamiento de 15 a 150°, (Mott, 2006) .....	49
Figura 29. Coeficiente $K$ para reducción gradual del diámetro, (USACE, 1980) .....	49
Figura 30. Curva del coeficiente $K$ para un cambio de dirección brusco.....	52
Figura 31. Curvas del coeficiente $K_{CG}$ para distintos valores de $r/D$ .....	55
Figura 32. Curvas del coeficiente $K$ para una ampliación brusca del diámetro .....	57
Figura 33. Curvas del coeficiente $K_{AG}$ para distintos valores de $\theta$ .....	61
Figura 34. Curvas del coeficiente $K$ para una reducción brusca del diámetro .....	64
Figura 35. Curvas del coeficiente $K_{RG}$ de acuerdo a la relación $D/d$ .....	67
Figura 36. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente $K_{CB}$ .....	69
Figura 37. Pérdidas de energía en un cambio de dirección brusco.....	70
Figura 38. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente $K_{CGI}$ .....	72
Figura 39. Curva de ajuste y ecuación para constante “ $a$ ” de la ecuación 30 .....	73
Figura 40. Pérdidas de energía en un cambio de dirección gradual .....	75
Figura 41. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente $K_{AB}$ .....	77
Figura 42. Pérdidas de energía en una ampliación brusca del diámetro.....	78
Figura 43. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente $K_{AGI}$ .....	80
Figura 44. Curva de ajuste y ecuación para la constante “ $a$ ” de la ecuación 35 .....	81
Figura 45. Pérdidas de energía en una ampliación gradual del diámetro .....	83
Figura 46. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente $K_{RB}$ .....	85
Figura 47. Pérdidas de energía en una reducción brusca del diámetro.....	86
Figura 48. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente $K_{RGI}$ .....	88
Figura 49. Curva de ajuste y ecuación para la constante “ $a$ ” de la ecuación 41 .....	89
Figura 50. Pérdidas de energía en una reducción gradual del diámetro .....	91
Figura 51. Algoritmo propuesto para calcular pérdidas por accesorios .....	93

## Lista de Tablas

	Página
Tabla I. Valores de $K$ para curvas con ángulo de deflexión de $90^\circ$ , (SARH, 1984).....	35
Tabla II. Factor $\eta$ para curvas con deflexión distinta de $90^\circ$ , (SARH, 1984).....	35
Tabla III. Pérdidas de energía en ampliación brusca del diámetro, (Trueba, 1986).....	38
Tabla IV. Factor $m$ para estimar el coeficiente $K$ de una ampliación gradual, (Mataix, 2010).....	40
Tabla V. Coeficiente empírico $f$ para la ampliación gradual del diámetro, (King, 1981).....	41
Tabla VI. Coeficiente de reducción brusca del diámetro, (Brater et al., 1996).....	45
Tabla VII. Coeficiente de reducción brusca del diámetro, (Daugherty et al., 1965).....	46
Tabla VIII. Coeficiente de pérdida de energía para reducción gradual del diámetro, (CFE, 1983) .....	47
Tabla IX. Coeficiente $K$ para reducción gradual, (Fox et al., 2006) .....	48
Tabla X. Coeficiente $K$ de un cambio de dirección brusco con $Re = 20000$ , (Sotelo, 1998), (USACE ,1980) .....	51
Tabla XI. Valores del coeficiente $K$ para un cambio de dirección brusco .....	52
Tabla XII. Coeficiente $K$ de un cambio de dirección gradual, (USACE, 1980) .....	53
Tabla XIII. Valores del coeficiente $K_{CG}$ para distintos valores de $r/D$ .....	54
Tabla XIV. Valores de $K$ para una ampliación brusca, (CFE, 1983) .....	56
Tabla XV. Valores del coeficiente $K$ para una ampliación brusca del diámetro.....	57
Tabla XVI. Valores de $K$ para una ampliación gradual, (Sotelo, 1998).....	58
Tabla XVII. Valores del coeficiente $K_{AG}$ para diferentes valores de $\theta^\circ$ .....	60
Tabla XVIII. Valores del coeficiente $K$ para una reducción brusca, (Sotelo, 1998).....	62
Tabla XIX. Valores del coeficiente $K$ para una reducción brusca del diámetro .....	63
Tabla XX. Valores del coeficiente $K$ para una reducción gradual, (Mataix, 2010) .....	65
Tabla XXI. Valores del coeficiente $K_{RG}$ para una reducción gradual.....	66
Tabla XXII. Pérdidas de energía (m) en un cambio de dirección brusco, cuando la velocidad antes de la curva es de 2.5m/s.....	70
Tabla XXIII. Ecuaciones de las constantes contenidas en la ecuación 30 .....	74
Tabla XXIV. Pérdidas de energía (m) en un cambio de dirección gradual, cuando la velocidad antes de la curva es de 3 m/s y $r/D$ igual a 6 .....	75

## Lista de Tablas (Continuación)

	Página
Tabla XXV. Pérdidas de energía (m) en una ampliación brusca del diámetro, cuando la velocidad es de 2.75 m/s .....	78
Tabla XXVI. Ecuaciones de las constantes contenidas en la ecuación 35 .....	81
Tabla XXVII. Pérdidas de energía (m) en una ampliación gradual del diámetro, cuando la velocidad es de 2.9 m/s y el ángulo $\theta$ es de $30^\circ$ .....	83
Tabla XXVIII. Pérdidas de energía (m) en una reducción brusca del diámetro, cuando la velocidad es de 2.8 m/s.....	86
Tabla XXIX. Ecuaciones de las constantes contenidas en la ecuación 41 .....	89
Tabla XXX. Pérdidas de energía (m) en una reducción gradual del diámetro, cuando la velocidad es de 3.2 m/s y el ángulo reductor de $30^\circ$ .....	90

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **I.1 ANTECEDENTES**

El hombre ha construido en diferentes épocas, un sinnúmero de obras hidráulicas para cubrir sus necesidades, donde se han utilizado conductos de sección circular que operan bajo régimen forzado (a presión) y que consideran el uso de diversos accesorios para adecuarse a la geometría o necesidades del proyecto, que causan pérdidas de energía (o de carga hidráulica) en el fluido. En el diseño o revisión de las conducciones, dichas pérdidas son evaluadas con diversos métodos que requieren de la exploración de tablas y/o gráficos en manuales o libros del tema de referencia. Gran ventaja sería tener una herramienta que automatizara uno de estos métodos mediante un algoritmo programable, que incluya ecuaciones representativas de los gráficos y/o tablas antes mencionadas y así, determinar las pérdidas de energía de una forma rápida, segura y precisa.

Las obras hidráulicas constituyen un conjunto de estructuras construidas para manejar el agua, cualquiera que sea su origen, con fines de aprovechamiento o defensa (Torres, 1983). Las de aprovechamiento se pueden clasificar entre otras como: abastecimiento de agua a poblaciones e industrias, riego agrícola, producción de fuerza motriz, navegación fluvial y de recreación. Las de defensa, como contra inundaciones y contra azolves. Estas obras son determinantes para el bienestar y desarrollo de la humanidad y sin duda una de las de gran importancia son las presas para embalsar y/o desviar los cursos del agua (Morales, et al. 2009). Otras obras vitales que podemos citar son los acueductos, canales, pozos (de bombeo), sistemas de

drenaje sanitario y/o pluvial, sistemas de abastecimiento de agua potable, cárcamos de bombeo, etc. entre otras más, obras que hasta el momento continúan en desarrollo y perfección.

Las conducciones hidráulicas que comúnmente se emplean en la práctica, suelen ser a base de conductos con sección circular, debido a que proporcionan mayor resistencia estructural y mayor sección transversal para un mismo perímetro exterior, que cualquier otra forma (CRANE, 1987). Estas conducciones pueden trabajar con régimen libre, forzado o una conjugación de estos. Las conducciones con régimen libre, son las que funcionan parcialmente llenas usando la fuerza de gravedad para producir el movimiento; la presión en cualquier punto de la superficie libre del líquido es igual a la atmosférica y los conductos son colocados con pendientes pre-establecidas, exigiendo una nivelación cuidadosa (Azevedo, 1976). Como ejemplos se tienen, los casos de las redes de aguas negras, pluviales y canales entubados. Por otra parte, los conductos que trabajan con régimen forzado, siempre funcionan totalmente llenos y además el líquido fluye con una presión diferente a la atmosférica (Azevedo, 1976). Ejemplos de ello son los casos de la obra de toma en presas, las redes de abastecimiento de agua potable para poblaciones e industrias, los acueductos que transportan agua a lugares donde es escaso este líquido, las tuberías empleadas en las estaciones de bombeo y demás usos que podemos citar.

Los accesorios forman parte de las conducciones para unir tramos de ésta, para ajustarse a los accidentes topográficos del terreno y necesidades del proyecto, así como a los cambios que se presentan en la geometría de la sección transversal y a los distintos dispositivos para el control de la descarga (Sotelo, 1998). Dentro de la variedad de accesorios, gran utilización se les da a los cambios de dirección, ampliación y reducción del diámetro de los conductos.

Las pérdidas de energía o de carga hidráulica que experimenta el fluido, ocurren cuando éste fluye a través de un conducto de sección constante y encuentra obstáculos en su camino. Estas pérdidas se pueden expresar en términos de la carga de velocidad en el conducto y se le denominan de diferentes formas. Por ejemplo, se tienen las debidas a la fricción que también son conocidas por rozamiento o primarias (CFE, 1983); también se producen pérdidas localizadas en el cambio de la geometría o alteración del flujo y a ellas se les conoce como pérdidas por accesorios, menores, singulares o secundarias (Sotelo, 1998). En estas últimas se abunda el estudio y particularmente en los tres accesorios mencionados en el párrafo anterior.

Para determinar las pérdidas por accesorios (cambio de dirección, reducción y ampliación de diámetro), existe diversa bibliografía que presenta valiosos resultados de varios autores, que han permitido desarrollar proyectos de alta calidad, pero aun persisten las preguntas de ¿cuál es la más confiable?, y ¿cuál es la más adecuada para cada proyecto?, además de que con ellas el trabajo se hace lento.

La herramienta propuesta en esta investigación para determinar las pérdidas de energía, consiste en un algoritmo programable que contempla ecuaciones representativas de teorías seleccionadas entre la bibliografía existente para un cambio de dirección, ampliación y reducción del diámetro. Las ecuaciones obtenidas representan la media entre de la teoría seleccionadas para cada fin, y con ello se podrá evaluar las pérdidas de energía requeridas en el diseño o revisión de las conducciones, *sin la necesidad* de realizar una exploración bibliográfica, de forma *más rápida, segura y tan confiable* como las teorías de origen (Morales, et al. 2009).

## **I.2 JUSTIFICACIÓN**

La importancia de ésta investigación, radica en la necesidad que persiste en la comunidad hidráulica, tanto académica como laboral, de una herramienta que automatice y agilice las teorías que se siguen para la obtención de las pérdidas de energía en cambios de dirección, ampliación y reducción del diámetro de una conducción, siendo éstos muy usuales en la construcción de la misma. Lo anterior se cubre mediante ecuaciones matemáticas, que representan las teorías de los accesorios mencionados, las cuales se ejecutan en un algoritmo programable, siendo esto el objeto del presente estudio.

Lo anterior automatiza el trabajo de las revisiones bibliográficas con solo entrar datos específicos de los accesorios indicados, lo que resulta gran ventaja para la toda la comunidad que demanda el uso de esta herramienta, permitiendo evaluar las pérdidas de energía requeridas para el diseño o revisión de las conducciones, de forma rápida, segura y confiable (Morales, et al. 2009).

## **I.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la comunidad académica y laboral que tiene contacto con el diseño y revisión de conducciones con régimen forzado, existe la necesidad de una herramienta que automatice las teorías existentes para ejecutar la ecuación general que determina las pérdidas de energía en cambios de dirección, ampliación y reducción del diámetro (Azevedo, 1976), (Sabersky et al., 1999), (Morales, 2008) la cual se escribe como sigue:

$$h_f = K \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

Dónde:  $h_f$  es la pérdida de carga (m);  $\frac{v^2}{2g}$  es la carga por velocidad aguas abajo de la zona de alteración del flujo, excepto se aclare en otro lugar (m);  $K$  es un coeficiente experimental, cuyo valor depende del tipo de accesorio (adimensional).

De la expresión anterior, gran tiempo se invierte en la estimación del coeficiente  $K$  de cada accesorio, al realizar exploraciones en tablas y/o gráficos, a los que se entra con datos particulares de cada pieza para obtenerlo. Con lo anterior se enfatiza que es un procedimiento del que es necesario revisión bibliográfica, estimación a ojo y/o interpolación de datos; ello lo hace entonces tedioso, tardado y con posibles errores debido a la intervención visual y manual, además de no tener la certeza de cuál es la bibliografía más confiable y adecuada para cada proyecto.

#### **I.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

1. ¿Cuáles son las ecuaciones para calcular las pérdidas de energía en un cambio de dirección, reducción y ampliación del diámetro, que no requieren de la exploración de tablas y/o gráficos establecidos para este fin y arrojen los mismos resultados?
2. ¿Cuál es el algoritmo que determina las pérdidas de energía con la utilización de estas ecuaciones y que se pueda resolver por un paquete computacional?

#### **I.5 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA**

El presente trabajo de investigación está enfocado a las pérdidas de energía secundarias y exclusivamente a las producidas por cambio de dirección, ampliación y reducción del diámetro de conductos circulares que trabajan con régimen forzado. A tales pérdidas también

se les puede llamar menores, por accesorios o singulares durante el desarrollo de la investigación.

## **I.6 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **I.6.1 Objetivo General**

Desarrollar un algoritmo para cálculo de pérdidas de energía por cambios de dirección, ampliación y reducción del diámetro de conductos bajo régimen forzado, y que considere ecuaciones matemáticas que arrojen valores medios de las teorías que se utilizan para este propósito.

### **I.6.2 Objetivos Específicos**

1. Identificar teorías que determinen las pérdidas de energía en los accesorios bajo estudio
2. Clasificar prototipos de cálculo para cada tipo de accesorio
3. Homogenizar la información de los prototipos
4. Estimar valores medios para cada clasificación
5. Encontrar una curva de ajuste para los valores medios y la ecuación de la misma.
6. Diseñar un algoritmo para determinar las pérdidas de energía con el uso de las ecuaciones encontradas para cada caso.

## CAPÍTULO II

### ESTADO DEL ARTE

Acorde a una exploración en la bibliografía referente al tema, se presenta la información más relevante de cada una de ellas sobre la evaluación de la pérdida de energía en los accesorios de interés, así como de otras piezas donde su estudio demuestra la inquietud existente en el campo por conocer y evaluar la pérdida de carga hidráulica que estas partes generan.

- Mataix (2010) proporciona una ecuación que determina el coeficiente  $K$  de una ampliación brusca y gradual del diámetro, donde se utilizan 8 valores que rigen su ángulo difusor. Sobre una contracción brusca y gradual, se presenta un gráfico logarítmico para estimar su coeficiente, el cual depende de la relación de los diámetros (de 1.5 a 3) y del ángulo reductor (de  $0$  a  $180^0$ ). Y sobre curvas, expone solo cuatro valores de “ $K$ ” para relaciones de radio y diámetro de la pieza. Solo la información de contracciones es de interés para el presente objetivo.
- Kim, et al. (2010) expone un estudio sobre codos de  $45$  y  $90^0$  de  $50.3$  mm de diámetro donde se utilizó una mezcla de líquido y gas. Después de observar 15 condiciones diferentes se concluye que la pérdida de energía aumenta conforme se incrementa el caudal y que el coeficiente  $K$  de las piezas se aproxima al triple del recomendado en teoría.
- En Yoo, et al. (2010) se determinaron formulaciones para determinar el poder de la bomba y el diámetro del conducto de descarga, tras considerar el trabajo de una

bomba, el desnivel del terreno, las pérdidas de energía por fricción y también las producidas por accesorios.

- Morales, et al. (2009) utiliza una metodología interesante para encontrar la ecuación de cada curva media que propone, después de analizar y tratar los datos recomendados por otros autores. Cada formulación sirve para evaluar la pérdida de energía en una bifurcación de acuerdo a sus características.
- En otros documentos Morales (2006, 2008) utiliza dos ecuaciones para evaluar las pérdidas en la reducción y ampliación del diámetro, donde el factor  $K$  depende del ángulo de ocurrencia. Por otra parte también recomienda otra expresión para estimar el coeficiente de una curva el cual depende de un factor que se obtiene de la gráfica de Hoffman.
- White (2008) sugiere algunos gráficos que arrojan información del coeficiente de las curvas, ampliaciones súbitas y graduales, así como para las reducciones bruscas. Adicionalmente menciona que una reducción gradual produce un factor “K” muy pequeño sobre el cual no abunda mucho.
- Cengel, et al. (2006) presenta pocos valores del coeficiente “K” para las curvas, así como para las ampliaciones y reducciones graduales. Sin embargo para la reducción brusca, muestra un gráfico de amplia información sobre su coeficiente experimental.
- Fox, et al. (2006) muestra información muy útil para esta investigación, misma que es contenida en una tabla para la reducción gradual y sobre gráficos para la reducción brusca y ampliaciones.

- Morales, et al. (2006) propone ecuaciones para obtener el coeficiente  $K$  de una ampliación brusca y gradual, así como de la reducción brusca y gradual del diámetro. Dichas ecuaciones corresponden a la curva media que propone el autor, después de tratar y analizar los resultados sugeridos por varios autores. Las formulaciones para la ampliación y reducción brusca, se dan en función de la relación de área  $A_1/A_2$  y  $A_2/A_1$ , respectivamente; para la ampliación y reducción gradual, se dan en función del ángulo difusor o reductor  $\theta$ , respectivamente.
  
- En otro documento Morales (2006) utiliza dos ecuaciones para evaluar las pérdidas en la reducción y ampliación del diámetro, donde el factor  $K$  depende del ángulo de ocurrencia. Además también recomienda otra expresión para estimar el coeficiente de pérdidas de una curva, de acuerdo con un factor que se obtiene de la gráfica de Hoffman.
  
- Mott (2006) presenta una expresión para determinar “ $K$ ” en las ampliaciones súbitas con el uso de un gráfico y una tabla que requieren de la velocidad (de 1.2-12 m/s) y de la relación de diámetros. De iguales características expone un gráfico y tabla para contracciones súbitas. También presenta un gráfico y una tabla para la ampliación gradual, donde  $K$  depende de la relación de diámetros (de 1-3) y del ángulo difusor (de  $2-60^\circ$ ). Para la reducción gradual, presenta dos gráficos que dependen de la relación de diámetros (de 1-3) y del ángulo del cono reductor (de  $3-150^\circ$ ). Para cambios de dirección también muestra algunos valores además de un gráfico. Por lo tanto esta bibliografía es muy útil para la investigación.

- Fuentes y Rosales (2004) experimentaron en codos de  $90^{\circ}$ , en té, medidores y válvulas de globo para tubería de cobre de 13, 19 y 25 mm, donde obtuvieron gráficos del coeficiente  $K$  en función del Número de Reynolds. Estos datos fueron utilizados para evaluar las pérdidas de energía en el arreglo de una toma domiciliaria común de México. De igual manera se utilizaron valores teóricos del factor  $K$  para estimar la magnitud de las pérdidas y compararlas con las experimentales. Esta investigación demuestra que existe mayor pérdida de carga hidráulica que la que se deduce con datos teóricos.
- En Rodríguez, et al. (2004) se estudió la pérdida de carga hidráulica que ocurre en las inserciones de los ramales de riego, mediante un procedimiento analítico propuesto para estimar el coeficiente  $K$ , el cual después es validado experimentalmente.
- Smits (2003) establece que la ecuación general rige las pérdidas secundarias y trata muy superficial el valor de los coeficientes experimentales, por lo que recomienda explorar Muson (1998).
- Potter, et al. (2002) trata únicamente las pérdidas de energía debidas a la fricción en las paredes de los conductos, sin mencionar la influencia que ejercen los accesorios.
- Con base en una revisión bibliográfica, Pérez (2001) presenta una reseña de los pioneros en experimentar con pérdidas de carga hidráulica en tubos viejos y nuevos, que incluye las expresiones fruto de sus resultados. Éstos tomaban en cuenta sus propias experiencias y anteriores, para comparar sus resultados o mejorarlos. Entre ellos destacan H. Darcy, quien tomó en cuenta la rugosidad de las paredes de los

conductos y O. Reynolds, quien hizo diferencia entre flujo laminar y turbulento. Las experiencias anteriores son fundamentales para la presente investigación.

- Continuando con otro documento, Pérez (2002) describe que después de las experiencias de Darcy y Reynolds, varios investigadores propusieron expresiones para estimar las pérdidas de carga, en las que destaca la relación que hicieron Blasius en 1913 y Stanton en 1914 con el factor de fricción ( $f$ ) y el número de Reynolds ( $Re$ ) en la ecuación de Darcy-Weisbach. Con dicha relación se obtuvo la singular ecuación de Darcy-Weisbach, que hasta la actualidad se utiliza y de la que es análoga la ecuación general para pérdidas por accesorios.
- Larock, et al. (2000) menciona en general el origen de las pérdidas locales a las que también denomina menores. Indica que el factor “K” para un difusor gradual oscila entre 0.2 y 1.2. Por otra parte muestra un valor para los codos de 45 y 180<sup>0</sup>, además de tres valores para los codos de 90<sup>0</sup>. Por todo lo anterior, ésta información es muy superficial.
- En Streeter, et al. (2000) expone que es incorrecto llamarle pérdidas menores a las que ocasionan los accesorios, debido a que en ocasiones resultan mayores que las producidas por la fricción del conducto. Éste autor presenta información sobre la contracción súbita y la expansión gradual, que es significativa para nuestro objetivo
- Fernández (1999) trata el tema muy superficialmente denominándolo singularidades. Realiza una serie de procedimientos matemáticos donde tiene por resultado la ecuación general. No hace mención sobre los tipos de accesorios que existen, así como tampoco la forma de obtener sus coeficientes.

- Franzini, et al. (1999) expone gráficos interesantes sobre el coeficiente de la ampliación gradual y de las curvas de  $90^{\circ}$ . De las demás piezas es escasa la información.
- Sabersky, et al. (1999) proporciona una expresión para estimar las pérdidas por una ampliación gradual del diámetro, que está basada en la ecuación general y donde “K” se obtiene de un gráfico. También presenta dos valores para codos de  $90^{\circ}$  y dos para  $45^{\circ}$ . Por otra parte, en una tabla expone pocos valores del coeficiente para 6 relaciones de áreas de una contracción brusca. Esta información aporta poco a este trabajo.
- Chadwick, et al. (1998) introduce expresiones analíticas para obtener “k” en la ampliación y contracción brusca, las cuales son muy generales. También recomienda ciertos porcentajes de éste factor para las ampliaciones y reducciones graduales. Esto hace a la bibliografía muy imprecisa para el tema.
- Munson, et al. (1998) presenta gráficos que son muy significativos para este proyecto, donde se obtiene el coeficiente experimental para una ampliación o reducción brusca, para la ampliación gradual y para las curvas. Por otra parte muestra escasos valores para las reducciones graduales, así como para los codos.
- En Sotelo (1998) se muestra amplia información para determinar las pérdidas de energía en los accesorios bajo estudio y que contemplan datos muy valiosos sobre ellos, que se apropian para el presente trabajo.

- Brater, et al. (1996) muestra la misma información que King (1981), por lo que cualquiera de éstas bibliografías, aporta mucho a nuestro trabajo, sobre las piezas referidas anteriormente en King.
- Hauser (1996) recomienda el uso práctico de un monograma estándar para evaluar las pérdidas secundarias, donde se obtiene una longitud equivalente a la tubería. Por lo tanto éste material no es útil para la investigación.
- Levi (1996) toca muy superficial el tema de pérdidas menores, donde expone la ecuación de Borda para la ampliación brusca y 2 valores para codos de 45 y 90°. Por lo tanto no muestra información relevante para este documento.
- El USBR (1985) presenta información útil para las ampliaciones del diámetro, así como para los cambios de dirección. Por otra parte, para las reducciones del diámetro recomienda valores muy generalizados de su coeficiente  $K$ .
- En Guaycochea (1995) se recomiendan dos expresiones para encontrar una longitud equivalente a la pérdida de energía causada por un accesorio y que consideran la rugosidad del mismo. Una de estas ecuaciones surge de relacionar la ecuación (1) con la expresión de Darcy-Weisbach, la del Número de Reynolds y la ecuación de Altshul para el Factor de fricción. La otra proviene de la relación de la ecuación (1) con la ecuación de Hazen-William.
- Shames (1995) enuncia ecuaciones muy generales para estimar el factor “K” de las ampliaciones y contracciones, por lo que se pueden obtener datos muy imprecisos. Por

otra parte presenta amplios valores sobre codos roscados y bridados que resultan importantes para éste proyecto.

- Giles, et al. (1994) tiene poca información de la ampliación gradual y la brusca, así como de codos. No toca el tema sobre otras curvas y la reducción gradual. Con lo anterior, ésta información se considera pobre para el trabajo.
- Bertin (1986) muestra un gráfico del que se obtiene “K”, para una ampliación y contracción súbita, con relaciones de diámetros de 0 a 1. Para una ampliación gradual, el coeficiente se obtiene de un gráfico por medio de valores (de 0-180<sup>0</sup>) del ángulo difusor. De una contracción gradual, solo expone valores para 30, 46 y 60<sup>0</sup>, del ángulo reductor. Para curvas, solo proporciona dos valores para codos de 45, 90 y 180<sup>0</sup>. En general presenta información significativa de ciertos accesorios, pero limitada sobre otros.
- Trueba (1986), para una ampliación brusca presenta valores experimentales investigados por King. También expone tablas con amplia información sobre la ampliación gradual, la contracción brusca, así como también para las curvas. Por lo tanto muestra amplia información que encierra múltiples circunstancias sobre estos accesorios.
- En Simon (1986), se presentan ecuaciones aproximadas para codos cerrados y curvas sugeridas por Gibson y Hinds, respectivamente. Además presenta una tabla con amplios valores para estimar el factor “K” de una reducción gradual.

- CFE (1983) muestra metodologías muy populares para estimar el coeficiente “K” de los accesorios en cuestión, las cuales consisten en la relación de expresiones, tablas y gráficos que provienen de resultados experimentales de varios autores y de ellos mismos. Esta información es fundamental para el logro de los objetivos del presente trabajo de investigación.
- King, et al. (1981) expone que la ecuación de Archer para ampliaciones bruscas arroja resultados más adecuados que la ecuación de Borda. Para la reducción súbita, sugiere dos ecuaciones (de Merriman y Brightmore), que se rigen mediante la intensidad de la velocidad. Por otro lado, muestra tablas con amplios valores de “K” para los accesorios anteriores, para el ensanchamiento gradual, así como para codos y curvas. Por lo tanto, este autor aporta mucho a la investigación.
- El manual de USACE (1980), contiene información amplia para el presente trabajo sobre los tres accesorios de interés. Esta información esta embebida en gráficos y consiste en una recopilación de datos experimentales de varios autores.
- King, et al. (1980) muestra información más concreta que King (1981), donde solo introduce una teoría para cada uno de los accesorios en estudio y no hace comparación de experiencias de varios investigadores, pero presenta tablas del coeficiente experimental para ampliaciones y reducciones que son de interés para él proyecto.
- Azevedo, et al. (1976) expone que las pérdidas por accesorios son determinadas mediante la ecuación general, donde el coeficiente “K” de debe ser obtenido experimentalmente para cada caso. Adicionalmente recomienda que este coeficiente se

considere constante para  $Re > 50\,000$  y muestra una tabla con valores generales para cada accesorio.

- Shames (1967), explica el origen de las pérdidas menores, así como la utilidad de su ecuación general de la que solo refiere que el coeficiente experimental de cada accesorio, se encuentra en los manuales de los fabricantes.
  
- Daugherty, et al. (1965) presenta poca información sobre las reducciones y los codos, además de una ecuación para estimar el coeficiente de las curvas que depende del factor de fricción del conducto. Por otra parte muestra dos gráficos con amplia información experimental sobre la ampliación gradual que resulta significativa.
  
- Gibson (1930), recomienda una expresión para la ampliación brusca, que no se muestra en la demás bibliografía consultada y que depende de un factor  $m$ ; dicha ecuación arroja las pérdidas en pies y es de interés para este fin. Por otra parte solo muestra valores aislados (de  $10-180^\circ$ ) sobre ampliaciones graduales. Sobre las contracciones, presenta una ecuación que depende de un factor “ $C_c$ ” del cual solo da cifras aproximadas.
  
- Merriman (1902), muestra ecuaciones analíticas sobre las ampliaciones y reducciones las cuales no provienen del ambiente experimental. Sin embargo hace referencia de una ecuación para curvas que solo se recomienda para diámetros muy pequeños.

## **CAPÍTULO III**

### **REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

#### **III.1 ANTECEDENTES**

##### **III.1.1 Obras hidráulicas**

En acorde con Helwey et al. (1992), las obras hidráulicas como su planeación son tan antiguas como la misma civilización. Entre las principales obras se mencionan los proyectos de irrigación en Egipto y Mesopotamia que data de los años 4000 a. C., el Nilo represado, en los años 3000 a. C., el sistema de abastecimiento de agua y drenaje en el Valle Indo en los años de 2750 a. C., las Obras hidráulicas en China por los años 2200 a. C., el canal del Nilo al Mar Rojo en los años de 1950 a. C., el pozo de José Cerca del Cairo con 99 metros de profundidad, en los años de 1700 a. C.; el túnel de Hezakah para la conducción de agua, en los años 700 a. C. y el sistema de acueducto para drenaje pluvial en Roma, en el año 312 a. C.

Por otra parte, expone el autor que los avances en la hidráulica tuvieron lugar de la misma forma como en las otras áreas del conocimiento humano. Desde el desarrollo de las primeras obras, diversos investigadores invirtieron sus esfuerzos en su estudio y fueron reflejados en teorías y métodos que contribuyeron en la perfección e impulsión de las obras mismas. Durante los siglos XVII y XVIII d. C., se formaron en Europa varios grupos interesados en el avance del conocimiento y la ciencia, en la que se buscó una base científica sólida para la administración y planeación de los recursos hidráulicos, y entre estos grupos se encontraban hidrólogos precursores tales como Chezy. Se dice que el primer plan completo de los recursos

hidráulicos fue ideado en los Estados Unidos, donde se construyeron diversos diques y embalses, así como la primera planta de generación de energía eléctrica.

### **III.1.2 Conducciones**

Según la historia expuesta por Larry (2002), hace miles años, el hombre dio inicio con la transportación del agua de un punto a otro en aquel tiempo que dejó de llevar una vida de nómada para asentarse cerca de los cuerpos de agua, de los que condujo el líquido vital a base de gravedad por medio de brechas o canales con fines agrícolas. Se dice que los primeros esfuerzos por controlar el caudal de este fluido se dio en Mesopotamia y Egipto, donde todavía existen restos de estos canales de irrigación.

Las primeras conducciones fueron implementadas en el siglo XIV y fueron a base de arcilla con el fin de acercar el agua a la ciudad de Knossos en la zona del mar Egeo y de Europa. Desde entonces, su uso fue más común en los distintos tipos de obras hidráulicas en el mundo, al igual que los diversos tipos de materiales para su elaboración.

En la ciudad de Éfeso en Anatolia, Turquía, fue reconstruida durante el siglo IV a.C., tiempo en que se construyó un sistema de conducción de agua de 6 kilómetros de longitud, que consistía en tramos de tubería de arcilla.

Por otro lado en la Antigua Roma, sus gobernantes dedicaron mucho tiempo a proyectos de obras públicas, y con ello construyeron muchos acueductos, alcantarillados, entre otros. Aunque se relaciona mucho a los romanos con los acueductos, se sabe que ellos no fueron los primeros en implementar dichas obras, pero si las de mayor longitud. De esto, se tiene conocimiento que el Rey Sennacherio, los fenicios y los Helenos ya habían construido estas

estructuras. Al paso del tiempo, dio inicio de la fabricación de tuberías con materiales como el bronce, el plomo, la madera, la arcilla y el cemento, innovaciones que los romanos y demás empezaron a utilizar en los sistemas de acueductos.

En el siglo XIX, en los 70's, el gobierno de la Unión Americana inyectó grandes cantidades de dinero en la construcción de obras hidráulicas. Las primeras tuberías que se emplearon en ese país fueron de madera y datan de 1754. En los años de 1800, en Norte América, se dice que hierro fundido fue el material más usado en las líneas de abastecimiento de agua, aunque en Versalles, Francia, una red de abastecimiento ya funcionaba desde el año de 1664. Por los años de 1980, se dio una masiva implementación de las tuberías de hierro, que hasta la fecha operan en las viejas ciudades de Norte América. Posteriormente vinieron avances en la fabricación de las tuberías de hierro, que mejoraron sus características estructurales e hidráulicas e hicieron de ellas las más utilizadas.

### **III.2 Pérdidas de energía en conductos**

Se presentan los acontecimientos iniciales de las investigaciones realizadas sobre la pérdida de carga hidráulica en los conductos, así como algunos avances significativos para el caso.

De acuerdo a una reseña histórica realizada por Pérez (2001) se dice lo siguiente: que Fue C. A. Couplet en Versalles, en 1732, el primero en experimentar sobre las pérdidas de carga en tuberías, y fue en tubos viejos de 10 a 50 cm de diámetro con longitudes hasta 3000 m. Cuarenta años después, Ch. Bossut realizó 26 experimentos en tuberías nuevas de hojalata y dedujo que las pérdidas de carga hidráulica por unidad de longitud, eran proporcionales al cuadrado de la velocidad media ( $U$ ).

En 1779, P. Dubuat al realizar 18 ensayos formuló una ecuación muy complicada para la práctica. Posteriormente en 1791, después de analizar las tres experiencias anteriores, Woltmann propuso la expresión 2 para estimar las pérdidas que se originan a lo largo de los conductos.

$$rJ = 0.00062 U^{1.75} \quad (2)$$

Dónde:  $r$  es el radio interior de la tubería (m);  $J$  es la rasante hidráulica;  $U$  es la velocidad media de circulación (m/s).

Por su parte J. A. Eytelwein en 1796, basado también en las experiencias de Couplet, Bossut y Dubuat formuló la expresión 3, que después modificara y obtuviera la ecuación 4, la cual consideró más exacta.

$$rJ = 0.000795 U^2 \quad (3)$$

$$rJ = 0.0006515 U^{\frac{35}{18}} \quad (4)$$

Dónde:  $r$  es el radio interior de la tubería (m);  $J$  es la rasante hidráulica;  $U$  es la velocidad media de circulación (m/s).

Al considerar más de 50 experiencias, incluyendo todas las mencionadas, R. Prony en 1804, expuso una fórmula binómica para éste propósito que se denota como la ecuación 5 y que en el Sistema Métrico queda como la ecuación 6.

$$rJ = aU + bU^2 \quad (5)$$

$$rJ = 0.000034665 U + 0.00069652 U^2 \quad (6)$$

Dónde:  $r$  es el radio interior de la tubería (m);  $J$  es la rasante hidráulica;  $U$  es la velocidad media de circulación (m/s);  $a$  y  $b$  son coeficientes numéricos.

Años después entre 1814 y 1840, diversos investigadores propusieron fórmulas como la de Prony con diferentes valores para  $a$  y  $b$ . Hasta aquí, en las fórmulas binómicas los expertos suponían que la resistencia al flujo se debía a la simple resistencia friccional en los límites de la pared, que era directamente proporcional a la velocidad, y otra debida a los torbellinos, que era proporcional al cuadrado de la velocidad.

Todas las fórmulas examinadas hasta el momento, correspondían al régimen de circulación de agua en tuberías y que O. Reynolds en 1839 le denominara turbulento. Posteriormente en 1883, éste investigador expuso una distinción más clara entre el régimen laminar y turbulento, que se establece a partir del Numero de Reynolds (ecuación 7), aunque según Prandtl, Hagen realizó experimentos muy precisos en ese sentido a mediados del siglo XIX.

$$N_R = U \frac{D}{\nu} \quad (7)$$

Dónde:  $N_R$  es el Número de Reynolds;  $U$  es la velocidad media de circulación;  $D$  es el diámetro de la tubería;  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

En 1841, Poiseuille experimentó en tuberías de vidrio de diámetro muy pequeño, con el objeto de semejar el fluido de nuestra sangre. Cinco años después, expuso que el caudal es proporcional a la caída de presión, a la cuarta potencia del radio e inversamente proporcional a la longitud del tubo. Teniendo en cuenta lo anterior, el caudal puede ser determinado con la ecuación 8 o con la 9 en función del diámetro interior de la tubería. He aquí, la implementación de una relación del caudal que circula por cierto conducto.

$$Q = K r^2 \gamma \frac{H}{L} \quad (8)$$

$$Q = K^d D^4 \frac{H}{L} \quad (9)$$

Dónde:  $K$  es una constante;  $H$  es la pérdida de carga;  $L$  es la longitud de la tubería;  $\gamma$ : Peso específico;  $D$  es el diámetro interior de la tubería.

En continuación con fórmulas para flujo turbulento, en 1845 J. Weisbach consideró las 51 experiencias clásicas (las mismas que Prony), una de Gueymard y 11 propias, con las que formuló la expresión 10 que según Forchheimer se usaba todavía en 1935.

$$rJ = 0.00036667 U^2 + 0.00024135 U^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

Dónde:  $r$  es el radio interior de la tubería (m);  $J$  es la rasante hidráulica;  $U$  es la velocidad media de circulación (m/s).

Hagen en 1854, tras realizar de nuevo las experiencias de Couplet, Bossut y Dubuat, propuso la fórmula monómica siguiente.

$$Jr^{1.25} = b_1 U^{1.75} \quad (11)$$

Dónde:  $r$  es el radio interior de la tubería (m);  $J$  es la rasante hidráulica;  $U$  es la velocidad media de circulación (m/s);  $b_1$  es un coeficiente numérico.

Hasta aquí, todas las investigaciones no toman en cuenta la textura de las paredes de los conductos y fue hasta después de las investigaciones de Henri Darcy en 1857, cuando se establece que su rugosidad afecta la circulación del fluido. Éste investigador concluye que las leyes y teorías anteriores para el diseño, eran erróneas.

Henri Darcy al hacer ensayos con tubos de distintos diámetros, materiales y condiciones de uso, demostró que el estado de las paredes de las tuberías si se reflejan en los resultados de las

pérdidas de energía. También expresó que las tuberías se deterioran con el uso y concluyó que para velocidades más pequeñas a 0.1 m/s, la resistencia solamente es proporcional a la velocidad simple y para velocidades altas, al cuadrado de la misma. Por otra parte, expuso que al aumentar el diámetro del mismo material, los coeficientes  $a$  y  $b$  de las expresiones anteriores varían con lo que estableció, es decir, que las pérdidas de energía eran inversamente proporcional al diámetro. Esto le abrió la pauta a buscar una expresión que solo dependa del cuadrado de la velocidad. Por último, también dedujo que la presión es independiente de la pérdida de carga hidráulica y que la oposición del movimiento del agua en una tubería queda representada por la ecuación 12, cuando el tubo es rugoso y con la ecuación 13, cuando es liso.

$$rJ = b_1U^2 \quad (12)$$

$$rJ = aU + bU \quad (13)$$

Dónde:  $r$  es el radio interior de la tubería (m);  $J$  es la rasante hidráulica;  $U$  es la velocidad media de circulación (m/s);  $a$ ,  $b$ , y  $b_1$  son coeficientes numéricos que son determinados mediante las expresiones 14, 15 y 16, respectivamente.

$$a = 0.000031635 + \frac{0.0000000037556}{r^2} \quad (14)$$

$$b = 0.000442939 + \frac{0.00000620}{r} \quad (15)$$

$$b_1 = 0.00051 + \frac{0.0000065}{r} \quad (16)$$

Dónde:  $r$  es el radio interior de la tubería (m)

En una segunda parte de la evolución histórica, Pérez (2002) expresa que en 1842, Weisbach realizó la publicación de la expresión 17, que hasta hoy es muy utilizada y la cual le atribuye a

Henri Darcy. Esta formulación es conocida en el mundo hidráulico como de la fórmula Darcy-Weisbach.

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{U^2}{2g} \quad (17)$$

Dónde:  $f$  es el coeficiente de fricción que depende del Número de Reynolds;  $L$  es la longitud de la tubería;  $D$  es el diámetro de la tubería;  $U$  es la velocidad media de la circulación;  $g$  es la intensidad de la gravedad.

Después de los logros de Darcy, Dupuit en 1865, fue primero en relacionar el caudal con las pérdidas de energía, tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$h_f = C_D \frac{L}{D^5} Q \quad (18)$$

Dónde:  $C_D$  es un coeficiente numérico;  $L$  es la longitud de la tubería;  $D$  es el diámetro de la tubería;  $Q$  es el caudal de la circulación.

Posteriormente, diversos investigadores dieron a conocer varias fórmulas relacionadas al flujo en tuberías, donde sobresalen los trabajos realizados por Lampe en 1873 y tiempo más tarde los hechos por Hagen, mismos que se resumen en la expresión 19 y 20, respectivamente.

$$D^{1.25} J = a_L U^{1.802} \quad (19)$$

Dónde:  $D$  es el diámetro de la tubería;  $J$  es la rasante hidráulica;  $U$  es la velocidad media de circulación (m/s);  $a_L$  es un factor de fricción

$$\frac{h_f}{L} = a_H \frac{U^n}{D^x} \quad (20)$$

Dónde:  $h_f$  es la pérdida de energía;  $L$  es la longitud de la tubería;  $D$  es el diámetro de la tubería;  $U$  es la velocidad media de la circulación;  $a_H$ ,  $n$  y  $x$  son coeficientes que dependían de la velocidad, la rugosidad y el diámetro de la tubería.

Seguido a lo anterior y después de lo expuesto por Darcy, se dieron a conocer diversas ecuaciones de tipo exponencial por parte de múltiples estudiosos del tema y entre ellos también los antes los mencionados. Una de las formulaciones más utilizadas en América desde los años de 1902, fue la de Williams-Hazen, y que según sea el sistema de unidades se escribe como la ecuación 21 y 22.

- En pies por segundo,

$$U = 1.318 C_{WH} R^{0.63} J^{0.54} \quad (21)$$

- En metros por segundo,

$$U = 0.849 C_{WH} R^{0.63} J^{0.54} \quad (22)$$

En las que:  $C_{WH}$  es el coeficiente de fricción Hazen-Williams;  $R$  es la razón de aumento de velocidad con respecto al diámetro o radio hidráulico;  $J$  indica la razón en que decrece la fricción con la velocidad.

Después de las exposiciones de Reynolds, se dedujo que el coeficiente de fricción  $f$  de la fórmula Darcy-Weisbach es dependiente de la velocidad y del área por la que circula el fluido. De esta manera se dió cabida a la implementación del Número de Reynolds, y fue Blasius en 1913, el primero que lo relacionó con el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach ( $f$ ), en un gráfico doble logarítmico.

Se tiene entonces, desde que Couplet experimentó con conductos forzados y llegó a demostrar hasta cierto punto que existen pérdidas de carga hidráulica en el trayecto del flujo, dieron

inicio las investigaciones en el campo por diversos estudiosos como todos los mencionados y demás. De esta manera surgió la evolución de valiosas expresiones para evaluar las pérdidas de carga hidráulica, que fueron fruto de las experiencias y conclusiones de cada autor, y que hasta el día de hoy se emplean en el área.

### III.3 Pérdidas de energía en accesorios

#### III.3.1 Su naturaleza

##### III.3.1.1 Cambios de dirección

###### *a) Cambio brusco.*

Entiéndase como brusco un cambio de dirección en el conducto, si surge tal como lo representa la Figura 1. En este caso, el sentido de la trayectoria del flujo cambia bruscamente, lo que provoca desprendimiento o separación del fluido en la parte interna de la curva y un aumento de presión en la parte externa de la misma a causa de la intensidad del choque, tal fenómeno es representado en la Figura 2. Esto a su vez conduce a que el movimiento del flujo ocurra en forma de espiral, y tal comportamiento se presenta hasta longitudes igual a 50 veces el diámetro de la conducción (Sotelo, 1998), (King et al., 1980).

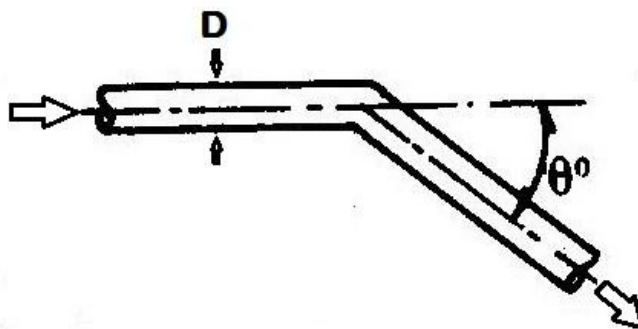


Figura 1. Cambio de dirección brusco de un conducto hidráulico

**b) Cambio gradual.**

Si el cambio se produce gradualmente como se aprecia en la Figura 2, la alteración del flujo es menor que en un cambio brusco y por consiguiente las pérdidas que ocurren son de menor intensidad.

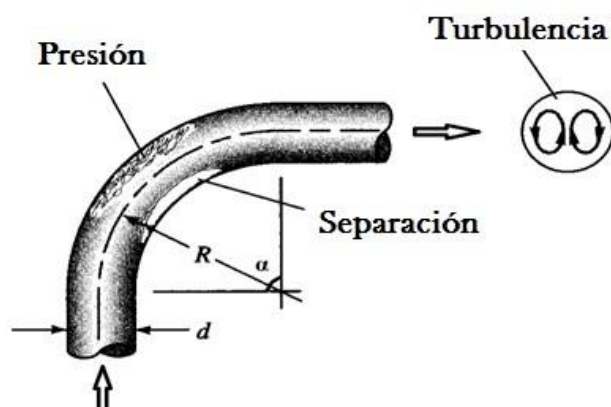


Figura 2. Comportamiento del flujo a través del cambio de dirección gradual (Brater et al., 1996)

### III.3.1.2 Ampliación del diámetro

**a). Ampliación brusca**

Al circular el fluido por una conducción de menor diámetro a una mayor, como sucede en una ampliación brusca, su velocidad de llegada disminuye repentinamente y da lugar a la formación de turbulencias que a su vez originan pérdidas de energía en tal fluido (Mott, 2006), como se muestra en la Figura 3.

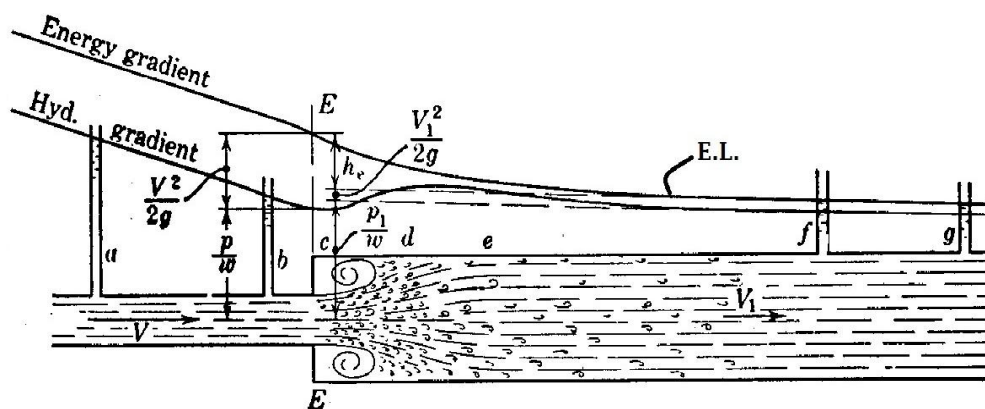


Figura 3. Comportamiento del flujo a través de una ampliación brusca (King et al., 1980)

**b). Ampliación gradual**

Si la ampliación se da gradualmente, la pérdida de carga hidráulica ocurre en menor magnitud que en la brusca y tiene relación directa con el ángulo de dilatación con que se produce (Munson et al., 1998), (Cengel et al., 2006). El fenómeno de ocurrencia se simboliza en la Figura 4.

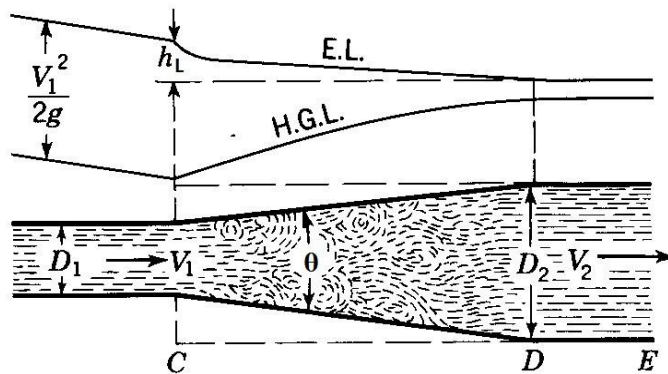


Figura 4. Comportamiento del flujo a través de una ampliación gradual (Daugherty et al., 1965)

**III.3.1.3 Reducción del diámetro**

**a). Reducción brusca**

La pérdida de energía que produce esta parte tiene relación directa con la alteración de trayectoria del flujo y con el aumento que incurre en la velocidad del mismo, lo cual depende de la intensidad en que se presente la brusquedad. En tal ocurrencia se genera una serie de turbulencias antes de la reducción, e inmediatamente después de la misma un área de separación del fluido, además de la persistencia de los remolinos como se muestra en la Figura 5 (King et al., 1981), (Mott, 2006).

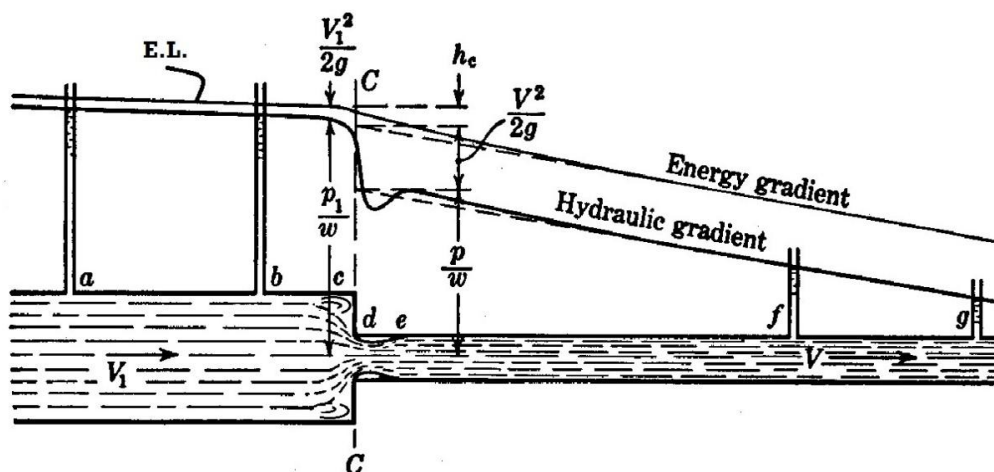


Figura 5. Comportamiento del flujo a través de una reducción brusca (King et al., 1980)

### b). Reducción gradual

Cuando la reducción se produce gradualmente, la disipación de energía ocurre con menor intensidad que en una reducción brusca y esta depende de la gradualidad con que se dé la misma (Mott, 2006), (Franzini et al., 1999). Éste comportamiento se representa en la Figura 6.

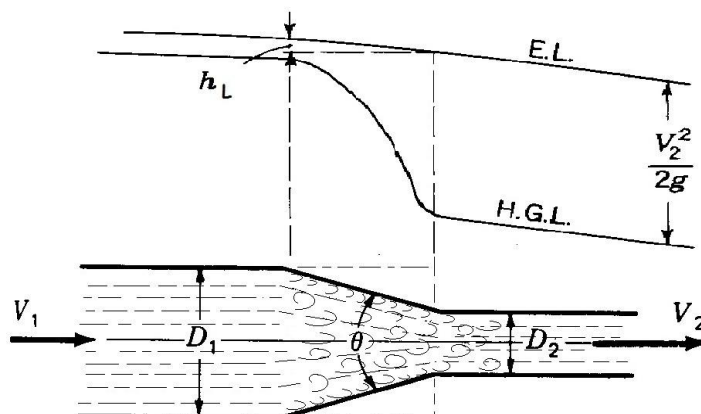


Figura 6. Comportamiento del flujo a través de una reducción gradual (Daugherty et al., 1965)

### III.3.2 Su cuantificación

De un modo general todas las pérdidas por accesorios o locales pueden ser expresadas bajo la expresión 1, donde interviene el coeficiente  $K$  que es definido experimentalmente para cada

tipo de pieza. Este trabajo experimental dio inicio desde hace varios años por ingenieros dedicados al tema, por fabricantes de conexiones y válvulas, y por laboratorios de hidráulica. Entre estos merecen especial mención las investigaciones de Giesecke, de la CRANE Company y del Laboratorio de Hidráulica de Munich, así como las observaciones más recientes de la Marina de los E. U. (Azevedo et al., 1976).

De acuerdo al estudio bibliográfico presentado en el capítulo anterior, en los siguientes párrafos se aborda la información más significativa para este trabajo y se expone en detalle lo sugerido por cada autor para determinar el valor del coeficiente  $K$  de los accesorios bajo estudio.

### **III.3.2.1 Cambios de dirección**

De acuerdo a la forma que se presenta un cambio de dirección, éste se clasificó en cambio brusco y cambio gradual. En este tipo de accesorio la velocidad que debe considerarse en la ecuación 1, es la que se produce antes del cambio de dirección del flujo.

#### ***a) Cambio de dirección brusco***

1. Sotelo (1998) y el manual de USACE (1980) consideran un gráfico con las mismas características (Figura 7) para estimar *el coeficiente  $K$*  de este tipo de accesorio. Este contiene tres curvas para números de Reynolds ( $Re$ ) distintos, que se relacionan con del ángulo de deflexión ( $\theta^\circ$ ) para obtener el coeficiente de interés.
2. Acorde al manual de CFE (1983) *el coeficiente de pérdidas* se obtiene a través del gráfico de la Figura 8, donde el valor de  $K$  está supeditado al ángulo de deflexión  $\theta_b$ .

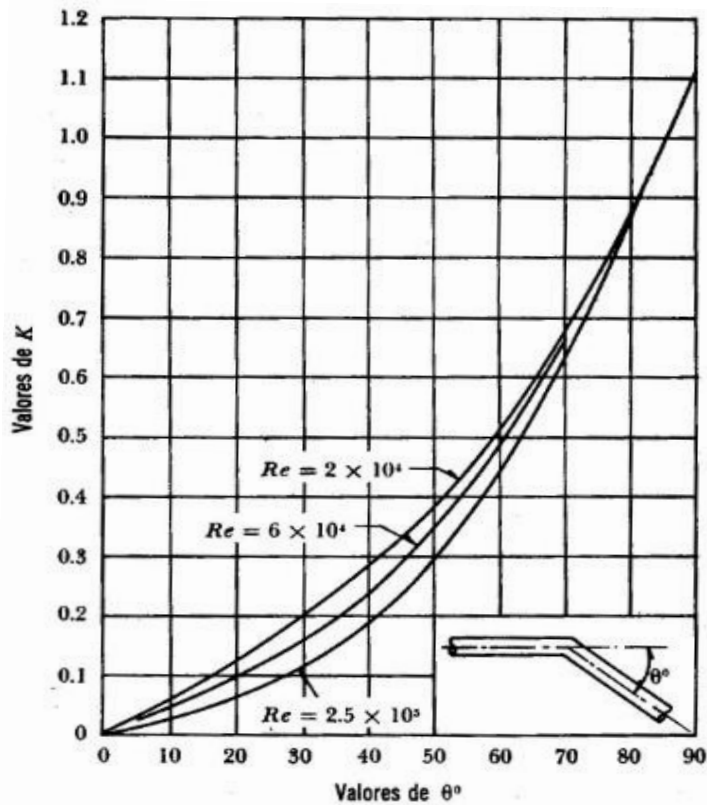


Figura 7. Coeficiente de pérdida  $K$  para cambio de dirección brusco, (Sotelo, 1998)

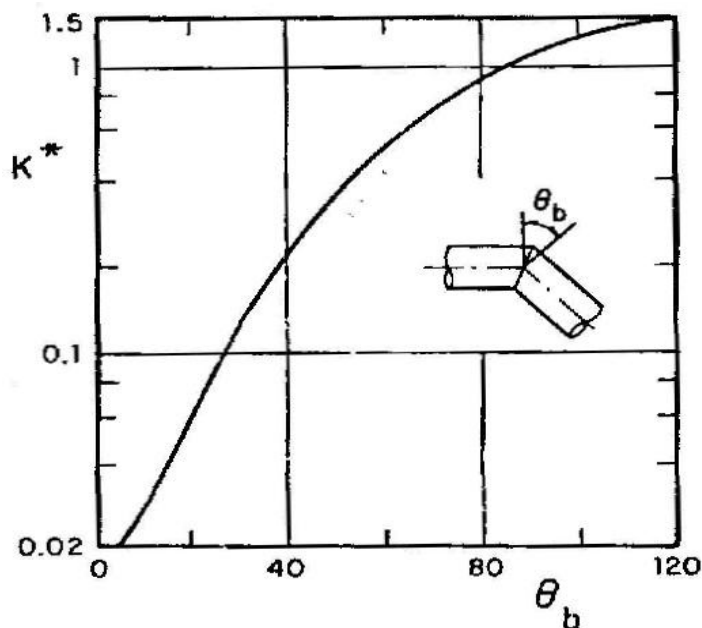


Figura 8. Coeficiente de pérdida  $K$  para cambio de dirección brusco, (CFE, 1983)

**b) Cambio de dirección gradual**

1. En el manual de USACE (1980) para el diseño de obras de toma en presas, se expone que *el coeficiente de pérdidas* de ésta parte, se estima a través del gráfico ilustrado en

la Figura 9, donde se encuentra en función del ángulo de deflexión ( $\theta^\circ$ ) y la relación del radio de curvatura con respecto al diámetro de la pieza ( $r/D$ ).

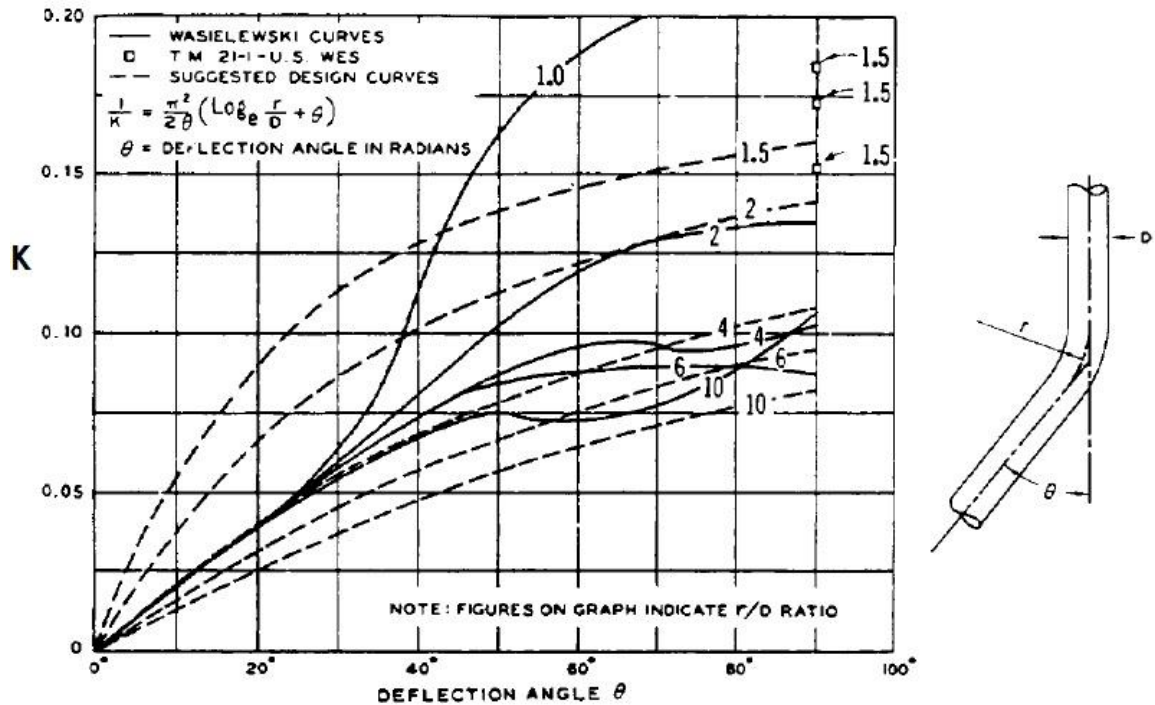


Figura 9. Coeficiente de pérdidas  $K$  para cambio de dirección gradual, (USACE, 1980)

- El USBR (1985) recomienda el gráfico de la Figura 10, para obtener el valor del *coeficiente experimental* de este accesorio, cuando el ángulo central de la curva sea de  $90^\circ$ . Este gráfico contiene curvas propuestas por varios investigadores y una curva de ajuste dada por el autor, la cual es considerada en este trabajo. Aquí el coeficiente de pérdidas depende de la relación del radio de curvatura con respecto al diámetro de la pieza ( $R_b/D$ ).

Por otra parte éste autor presenta otro gráfico (Figura 11), donde se estima un factor de corrección para cambios de dirección con ángulo de curvatura distinto a  $90^\circ$ . El factor aquí estimado es proporcional al coeficiente resultante de la curva de  $90^\circ$ , para obtener el coeficiente  $K$  adecuado.

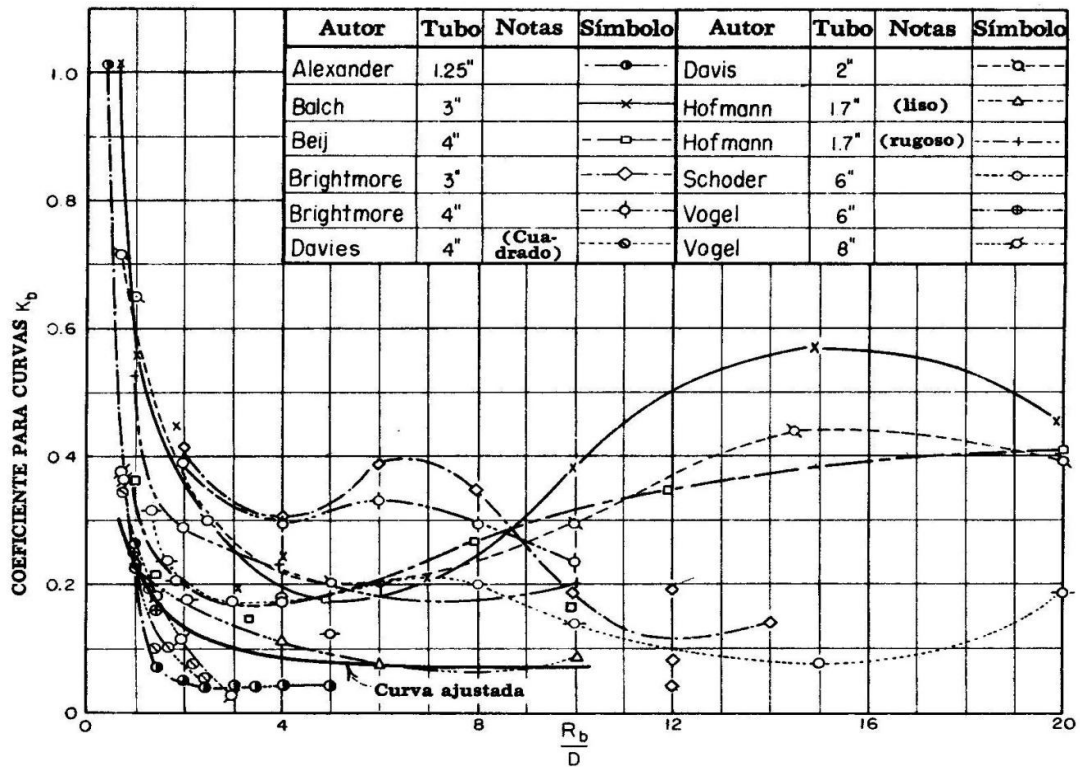


Figura 10. Curva ajustada de  $K$  para cambios suaves con ángulo central de  $90^\circ$ , (USBR, 1985)

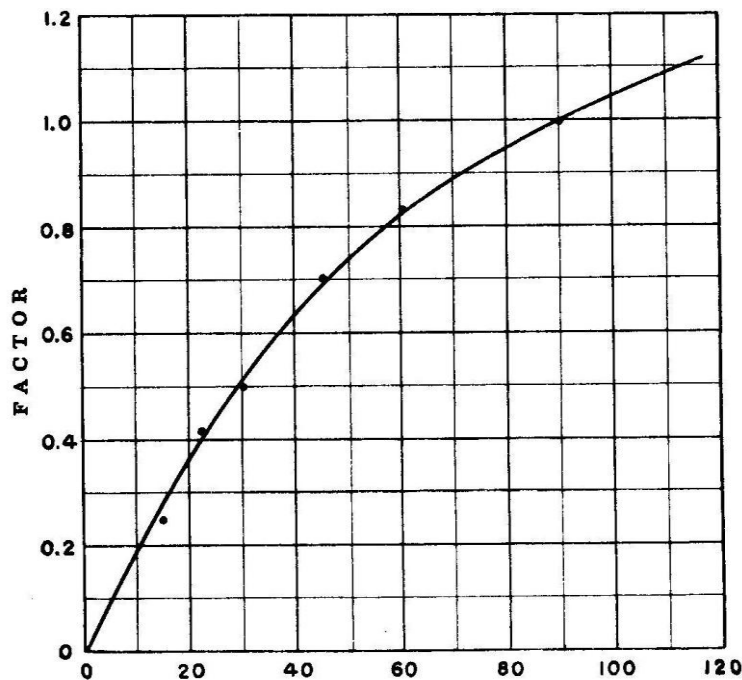


Figura 11. Factor de corrección para curvas con ángulo central distinto a  $90^\circ$ , (USBR, 1985)

- Sotelo (1998) considera que *el coeficiente  $K$*  de un cambio de dirección con sección transversal y área constante se determina mediante la siguiente formulación:

$$K = C_c \frac{\theta^0}{90^0} \quad (23)$$

Dónde:  $K$  es el coeficiente experimental;  $C_c$  es un coeficiente para curvas de diámetro constante y número de Reynolds  $> 2.2 \times 10^5$ ;  $\theta$  es el ángulo de curvatura interior.

El coeficiente  $C_c$  se obtiene en la Figura 12, donde depende de la relación del radio de curvatura con respecto al diámetro del conducto ( $r/D$ ) y también de la relación de la rugosidad con respecto al mismo diámetro ( $\varepsilon/D$ ). Para efecto del presente trabajo de tener el mismo número de variables, se considera la curva media de  $\varepsilon/D$ .

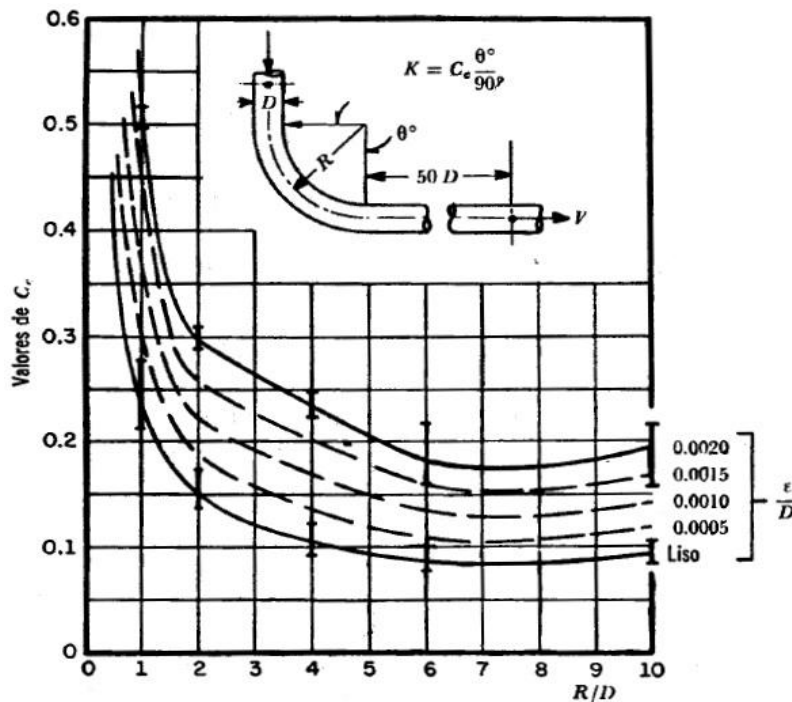


Figura 12. Coeficiente  $C_c$  para curvas de diámetro constante y número de Reynolds  $> 2.2 \times 10^5$ , para tubos rugosos, (Sotelo, 1998)

4. Conforme a CFE (1983), para un cambio de dirección en una tubería de sección transversal y área constante, *el coeficiente experimental* es denotado por  $K^*$  y se obtiene de un gráfico que corresponde a tuberías lisas (Figura 13), donde el flujo alcanza su normalización y el número de Reynolds es igual a  $10^6$ . En tal gráfico, el coeficiente es gobernado por el ángulo de deflexión ( $\theta_b$ ) y la relación de radio de

curvatura con respecto al diámetro de la pieza ( $r/D$ ). El autor también menciona 3 coeficientes para corregir al coeficiente  $K^*$ , por Número de Reynolds, por longitud después de la curva y por rugosidad del conducto. Estas correcciones no se consideran en este trabajo, para tener uniformidad de parámetros, respecto a los demás autores.

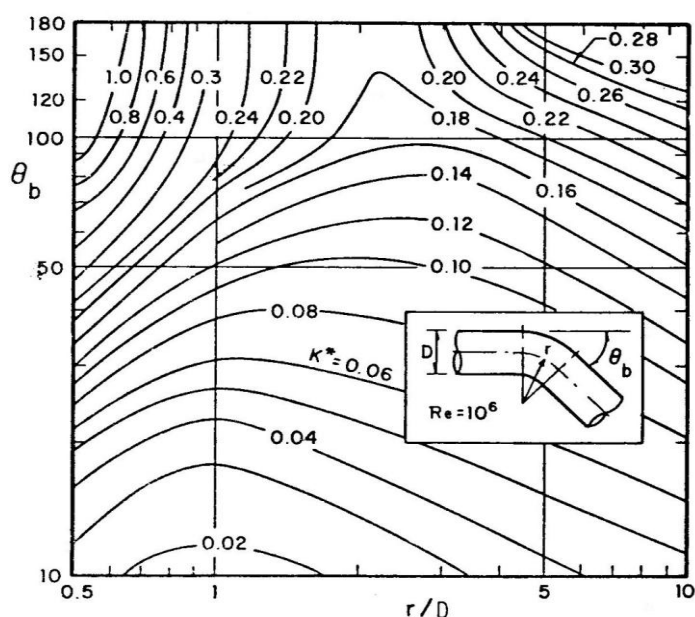


Figura 13. Coeficiente  $K^*$  para curvas suaves con  $Re$  igual a  $10^6$ , (CFE, 1983)

5. Acorde con el Manual de la SARH (1984), *el coeficiente  $K$*  de un cambio de dirección que presenta una deflexión de  $90^\circ$ , depende de la relación  $r/D$ , donde  $r$  es el radio de curvatura y  $D$  el diámetro del conducto. Los valores de este coeficiente se estiman de la Tabla I. Sin embargo, si la deflexión es distinta de  $90^\circ$  el coeficiente obtenido es proporcional al factor  $\eta$  (Tabla II), que depende de la magnitud de la deflexión.

Tabla I. Valores de  $K$  para curvas con ángulo de deflexión de  $90^\circ$ , (SARH, 1984)

$r/D$	1.0	1.5	2.0	4.0	6.0	10.0
$K$	0.52	0.40	0.29	0.23	0.18	0.20

Tabla II. Factor  $\eta$  para curvas con deflexión distinta de  $90^\circ$ , (SARH, 1984)

$\theta^\circ$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$\eta$	0.10	0.20	0.30	0.40	0.45	0.50	0.60	0.70	0.738	0.775	0.813	0.85	0.875	0.90	0.925	0.95	0.975	1.0

### III.3.2.2 Ampliación del diámetro

Según se manifieste una ampliación del diámetro se clasifica en brusca y gradual. La velocidad que se considera para computar las pérdidas de energía, es la que se genera en el conducto de menor diámetro.

#### a) Ampliación brusca

1. El manual de CFE (1983) establece que *el coeficiente de pérdidas* de esta pieza se determina por medio del gráfico presentado en la Figura 14, en la que está en función de la relación de áreas  $A_1/A_2$ , donde  $A_1$  es el área en el conducto menor y  $A_2$  es la del conducto mayor.

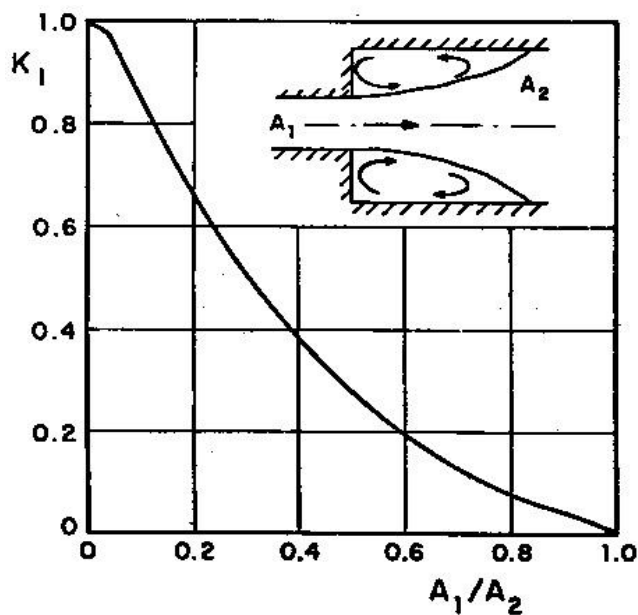


Figura 14. Coeficiente de pérdida para ampliación brusca del diámetro, (CFE, 1983)

2. En Fox et al. (2006) y Munson et al. (1998) se expone el mismo medio para estimar *el coeficiente K* de una ampliación brusca, que consiste en la exploración del gráfico de la Figura 15, donde el coeficiente de pérdidas está en función de la relación de áreas  $A_1/A_2$ .

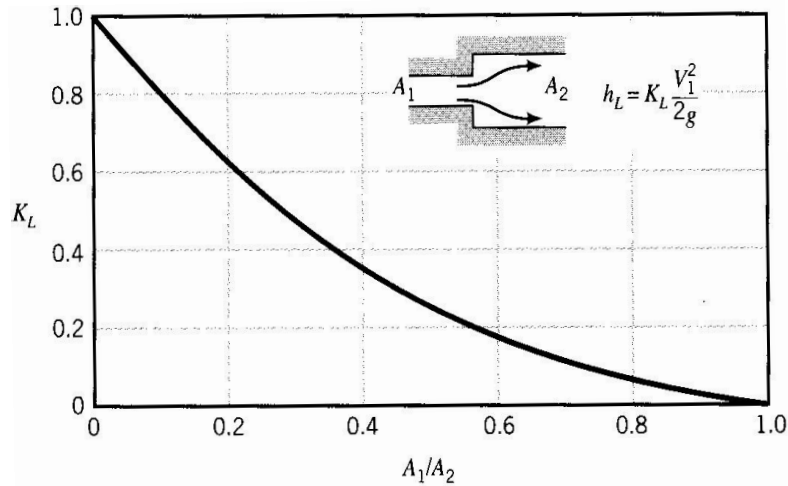


Figura 15. Coeficiente  $K$  para ampliación brusca del diámetro, (Munson et al., 1998)

3. Brater et al. (1996) y Trueba (1986) consideran la ecuación de Archer para calcular las pérdidas de energía originadas por este tipo de accesorio, que tiene la particularidad de estar en función de la velocidad de flujo en los dos tamaños de diámetro, como se expone a continuación:

$$h_l = \frac{(V_1 - V_2)^{1.919}}{2g} \quad (24)$$

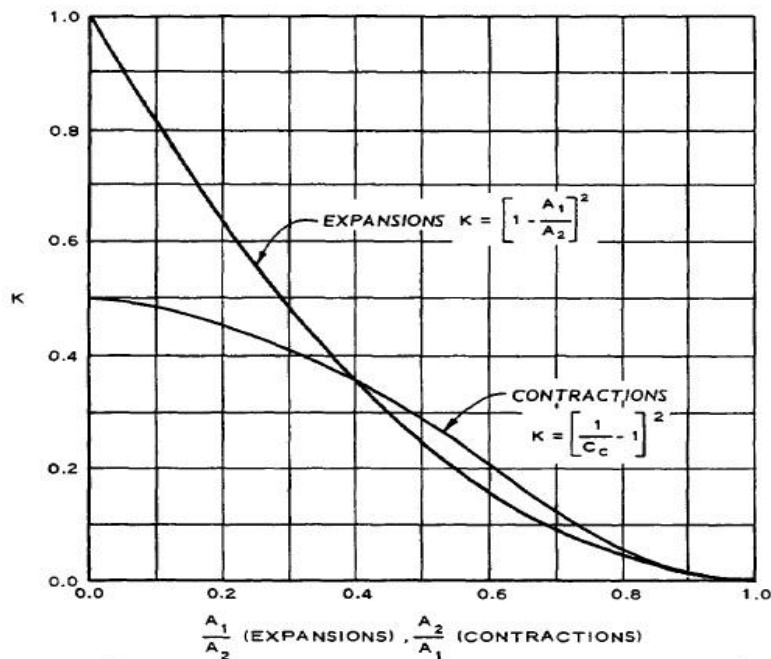
Dónde:  $h_l$  es la pérdida de energía;  $V_1$  es la velocidad en el conducto menor;  $V_2$  es la velocidad en el conducto mayor;  $g$  es la gravedad.

A partir de esta expresión, Brater presenta una tabla con varios valores del *coeficiente*  $K$  para utilizar en la ecuación 1, en función de la relación de diámetros ( $d_2/d_1$ ) y de la velocidad del flujo en el conducto de menor diámetro. Sin embargo, Trueba ilustra una tabla más detallada con valores de las pérdidas causadas (Tabla III), también en función de la relación de diámetros y de la velocidad en el conducto por ampliar. Los datos proporcionados por Trueba son los considerados para estimar el valor correspondiente al *coeficiente de interés*.

Tabla III. Pérdidas de energía en ampliación brusca del diámetro, (Trueba, 1986)

$\frac{d_2}{d_1}$	VELOCIDAD $v_1$ EN METROS POR SEGUNDO																	
	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	6.00	7.00	8.00	10.00	12.00
1.2	.0014	.0030	.0053	.0080	.0116	.0154	.0195	.0304	.0432	.0581	.0754	.0940	.1143	.1638	.2200	.2845	.4337	.6247
1.4	.0034	.0074	.0129	.0198	.0282	.0378	.0490	.0755	.1067	.1431	.1853	.2314	.2819	.4030	.5400	0.700	1.071	1.521
1.6	.0052	.0113	.0198	.0302	.0428	.0573	.0743	.1146	.1624	.2175	.2821	.3523	.4293	.6127	.8225	1.063	1.633	2.314
1.8	.0066	.0143	.0251	.0383	.0547	.0732	.0948	.1459	.2065	.2769	.3592	.4483	.5474	.7820	1.050	1.357	2.077	2.946
2.0	.0077	.0167	.0294	.0449	.0638	.0855	.1105	.1706	.2415	.3238	.4198	.5237	.6388	.9126	1.225	1.586	2.429	3.446
2.5	.0096	.0203	.0366	.0508	.0795	.1064	.1376	.2122	.3004	.4025	.5223	.6518	.7950	1.135	1.523	1.969	3.020	4.283
3.0	.0107	.0232	.0407	.0622	.0886	.1185	.1531	.2365	.3345	.4488	.5830	.7272	.8865	1.268	1.700	2.197	3.367	4.776
4.0	.0118	.0257	.0452	.0689	.0982	.1313	.1696	.2621	.3712	.4969	.6453	.8047	.9804	1.402	1.883	2.433	3.724	5.290
5.0	.0123	.0269	.0472	.0722	.1026	.1374	.1777	.2742	.3882	.5200	.6749	.8419	1.026	1.466	1.968	2.544	3.898	5.533
10.0		.0286	.0502	.0766	.1090	.1457	.1885	.2912	.4122	.5519	.7167	.8935	1.090	1.558	2.290	2.701	4.138	5.819
$\infty$			.0510	.0788	.1110	.1486	.1922	.2966	.4200	.5625	.7306	.9111	1.110	1.588	2.130	2.753	4.219	5.988

4. De acuerdo con USACE (1980) el coeficiente de pérdidas para una ampliación súbita se estima con el uso de la Figura 16, en la que se encuentra gobernado por la relación de áreas  $A_1/A_2$ , donde  $A_1$  es el área del conducto menor y  $A_2$  es el área del conducto ampliado.

Figura 16. Coeficiente  $K$  para ampliación y reducción brusca del diámetro, (USACE, 1980)

**b) Ampliación gradual**

1. En base a Sotelo (1998), *el coeficiente K* de este tipo de ampliación se determina con la siguiente ecuación:

$$K = C_a \left( \frac{A_1}{A_2} - 1 \right)^2 \quad (25)$$

Dónde:  $K$  es el coeficiente de pérdidas del accesorio;  $C_a$  es un factor del accesorio que depende del ángulo de la ampliación ( $\theta$ );  $A_2$  es el área del conducto mayor;  $A_1$  es el área del conducto menor.

El factor  $C_a$  se estima mediante el gráfico de la Figura 17, donde es regido por el ángulo de dilatación ( $\theta^\circ$ ) y por la relación del diámetro mayor con respecto al menor ( $D_2/D_1$ ).

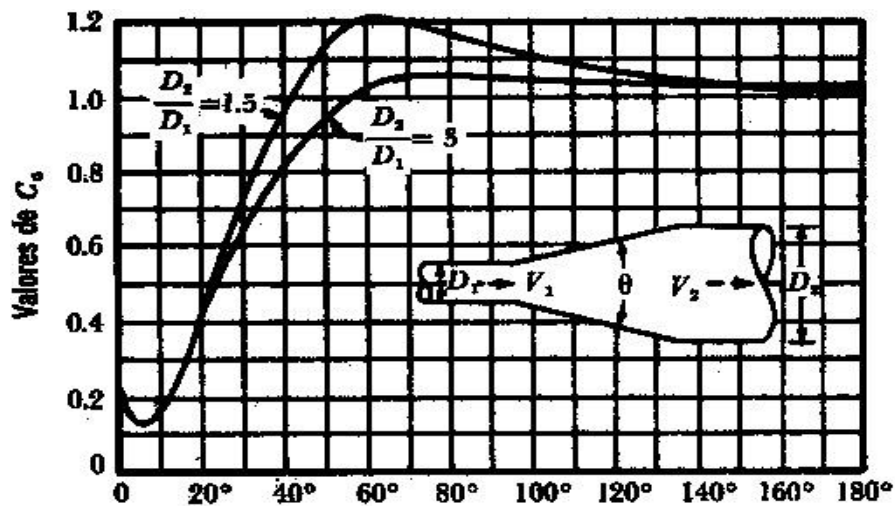


Figura 17. Coeficiente  $C_a$  para ampliación gradual del diámetro, (Sotelo, 1998)

2. El manual de CFE (1983) aborda que para esta pieza, cuando se encuentre a una distancia de al menos tres diámetros aguas arriba y a cuatro diámetros aguas debajo de un dispositivo que causa pérdidas de energía, *el coeficiente* se estima a través de la Figura 18, donde está gobernado por la relación de áreas  $A_2/A_1$  y la relación  $N/R_1$ . Se

tiene que  $A_2$  es el área mayor,  $A_1$  el área del conducto menor,  $N$  es la distancia del cono y  $R_1$  es el radio del conducto menor.

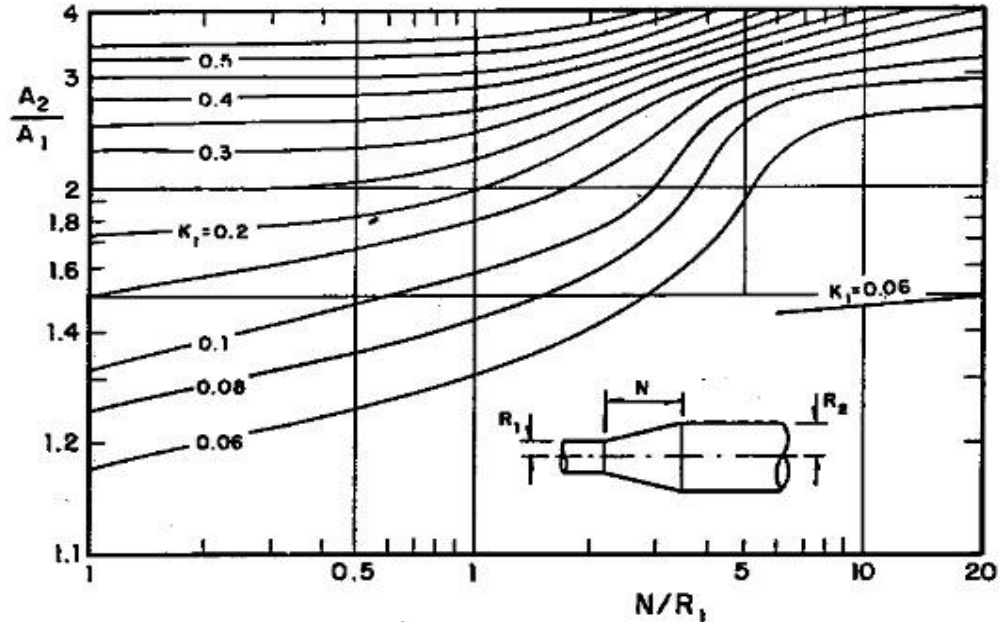


Figura 18. Coeficiente  $K$  para ampliación gradual del diámetro, (CFE, 1983)

3. En Mataix (2010) se dice que *el coeficiente de pérdidas* se obtiene con la siguiente ecuación:

$$K = m \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right]^2 \quad (26)$$

Dónde:  $K$  es el coeficiente de pérdidas;  $m$  es un factor del accesorio;  $d$  es el diámetro menor;  $D$  es el diámetro del conducto mayor. El factor  $m$  se estima de la Tabla siguiente, donde depende del ángulo de la ampliación ( $\alpha$ ).

Tabla IV. Factor  $m$  para estimar el coeficiente  $K$  de una ampliación gradual, (Mataix, 2010)

$\theta^\circ$	2.2	5	7.5	10	15	20	25	30
$m$	0.18	0.13	0.14	0.16	0.27	0.43	0.62	0.81

4. Acorde con White (2008), *el coeficiente de pérdidas* de este tipo de ampliación se obtiene del gráfico ilustrado en la Figura 19, donde está gobernado por el ángulo difusor  $\theta^\circ$  y la relación de diámetros  $d_1/d_2$ , en la cual  $d_1$  es el diámetro por ampliar y  $d_2$  es el ángulo más amplio.

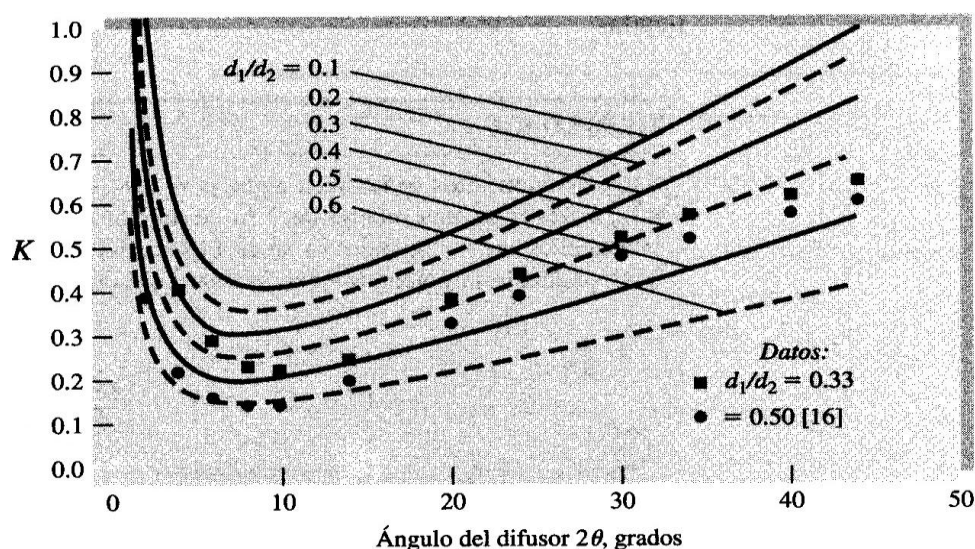


Figura 19. Coeficiente  $K$  para ampliación gradual del diámetro, (White, 2008)

5. Brater et al. (1996), Trueba (1986) y King et al. (1981) recomiendan tabulaciones con valores similares del *coeficiente de pérdidas*  $K$  que se deducen de las pérdidas de energía computadas por la siguiente expresión:

$$H_s = f \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \quad (27)$$

Dónde:  $H_s$  es la pérdida de energía;  $f$  es un coeficiente empírico que se estima de la Tabla V;  $v_1$  es la velocidad en el conducto menor;  $v_2$  es la velocidad en el conducto ampliado;  $g$  es la gravedad.

Tabla V. Coeficiente empírico  $f$  para la ampliación gradual del diámetro, (King, 1981)

$\theta^\circ$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$f$	0.033	0.036	0.039	0.042	0.046	0.05	0.055	0.066	0.078	0.09	0.1
$\theta^\circ$	15	20	25	30	35	40	45	50	60	75	90
$f$	0.16	0.31	0.4	0.49	0.55	0.6	0.64	0.67	0.72	0.72	0.67

6. El manual de USACE (1980) sugiere para este fin el gráfico de la Figura 20, el cual contiene experiencias de varios autores. Ahí *el factor K* se encuentra regido por la relación del diámetro mayor con respecto al menor y por el ángulo de dilatación.

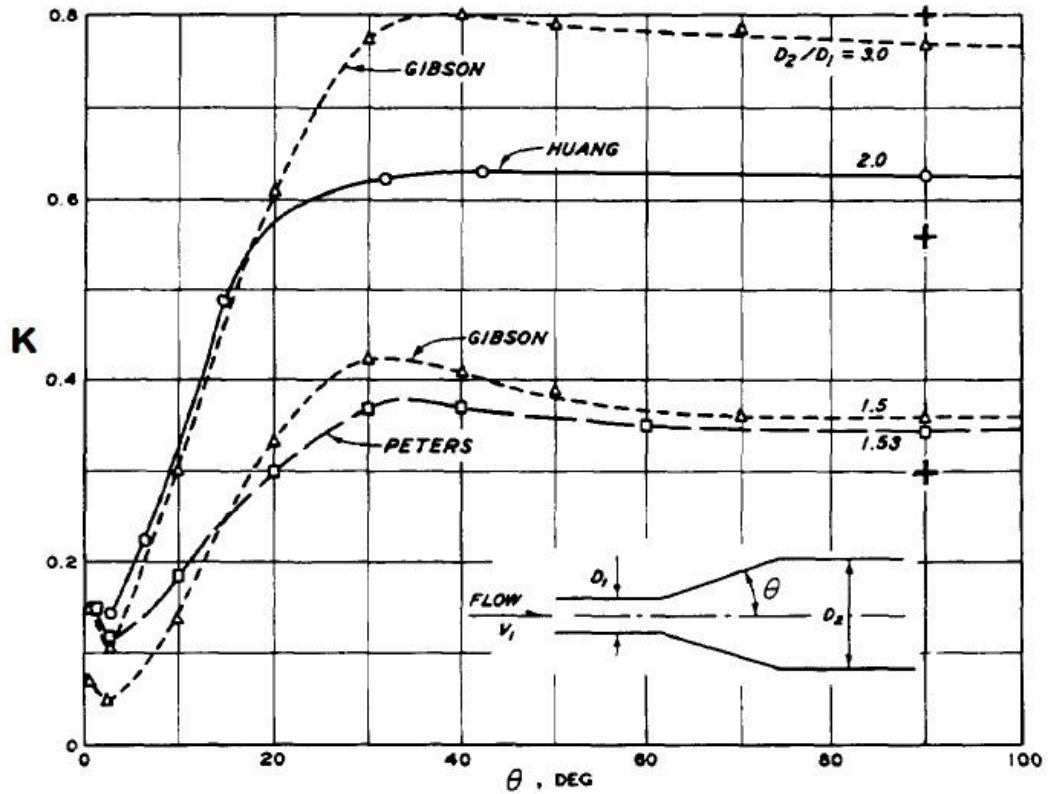


Figura 20. Coeficiente de pérdidas para ampliación gradual del diámetro, (USACE, 1980)

7. Por último, en acuerdo con Sabersky et al, (1999), *el coeficiente* de esta pieza se estima mediante ecuación siguiente:

$$K = K_2 \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (28)$$

Dónde:  $K$  es el coeficiente de pérdidas;  $K_2$  es un factor que se determina con el uso de la Figura 21;  $A_1$  es el área menor;  $A_2$  es el área expandida.

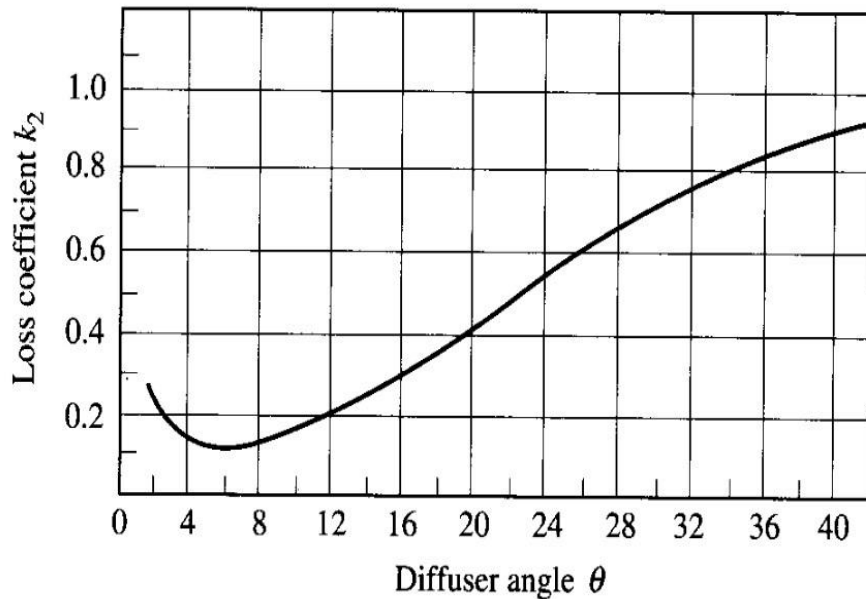


Figura 21. Factor  $K_2$  para estimar el coeficiente  $K$  de la ampliación gradual del diámetro, (Sabersky et al, 1999)

### III.3.2.3 Reducción del diámetro

Al igual que una ampliación, el caso de la reducción del diámetro se separa en brusca y gradual. En este accesorio la velocidad que se utiliza en la ecuación 1, es la circulante en el conducto reducido.

#### a) Reducción brusca

1. Sotelo (1998) expresa que *el coeficiente  $K$*  se estima mediante el gráfico ilustrado en la Figura 22, que contiene datos propuestos por Weisbach y también otros sugeridos por Kisieliev, que son valores mediados de varios autores que han investigado éste tema. Para efecto de éste trabajo se consideran los datos de Weisbach, mismos que se rigen por la relación de diámetros  $D_2/D_1$ , donde  $D_2$  es el diámetro reducido y  $D_1$  el diámetro por reducir.
2. El manual de CFE (1983) para conductos a presión, sugiere que *el coeficiente de pérdidas* de esta pieza se estime a través de un gráfico de la Figura 23, donde está

supeditado por la relación de áreas  $A_2/A_1$  y en tal relación  $A_2$  es el área reducida y  $A_1$  es el área mayor.

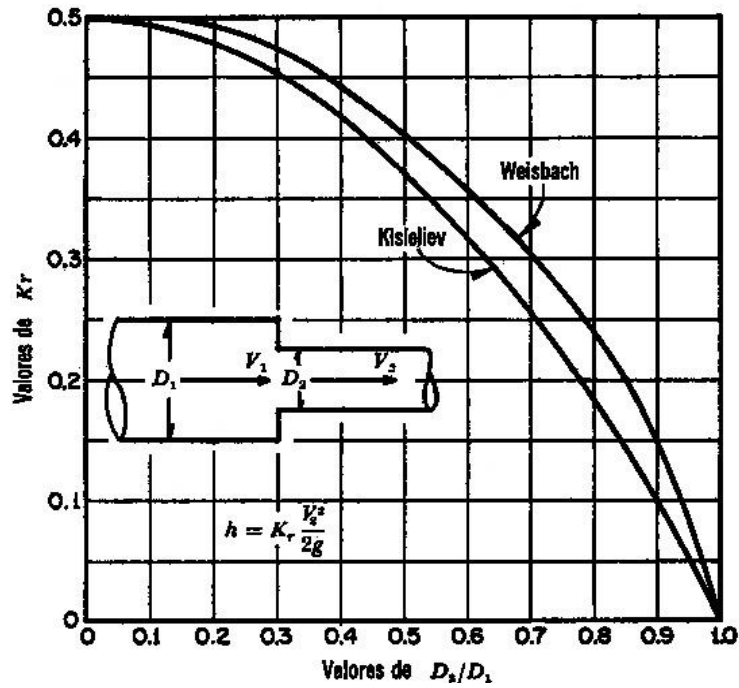


Figura 22. Coeficiente de pérdidas para reducción brusca del diámetro, (Sotelo, 1998)

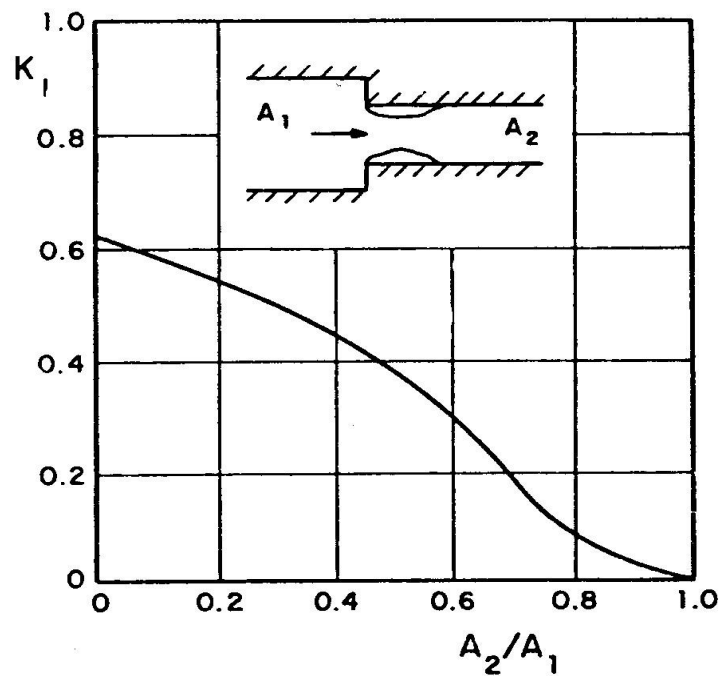


Figura 23. Coeficiente de pérdidas para reducción brusca del diámetro, (CFE, 1983)

3. En Cengel et al. (2006) se establece que *el coeficiente K* para una reducción brusca se determina con el uso de la Figura 24, en la cual se encuentra regido por la relación  $d^2/D^2$ , donde  $d$  es el diámetro menor y  $D$  el diámetro mayor.

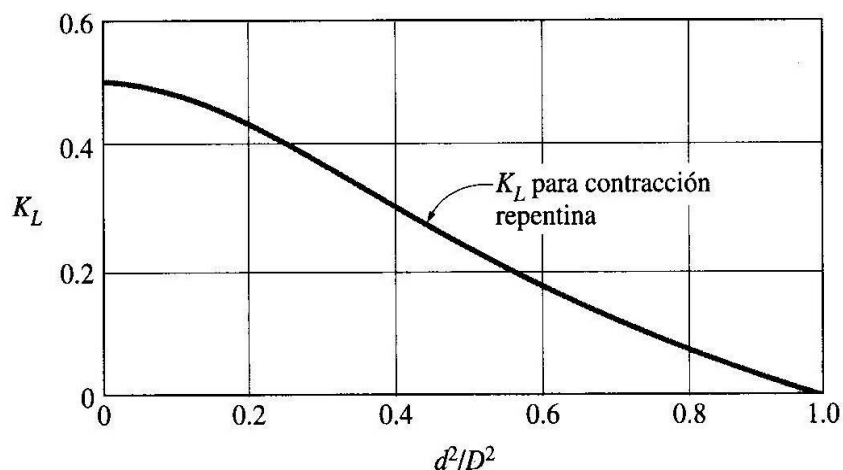


Figura 24. Coeficiente  $K$  de reducción brusca del diámetro, (Cengel et al., 2006)

4. Mott (2006) y Brater et al. (1996) sugieren los datos contenidos en la Tabla VI, para obtener *el coeficiente* de esta reducción, mismo que se encuentra en función de la velocidad del conducto reducido ( $V_2$ ) y de la relación de del diámetro menor con respecto al mayor ( $d_2/d_1$ ).

Tabla VI. Coeficiente de reducción brusca del diámetro, (Brater et al., 1996)

$d_2/d_1^*$	Velocity $V_2$ , m/s										
	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
1.1	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
1.2	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10
1.4	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19
1.6	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24
1.8	0.34	0.34	0.34	0.33	0.32	0.31	0.31	0.30	0.29	0.29	0.28
2.0	0.38	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34	0.33	0.33	0.32	0.31	0.30
2.2	0.40	0.40	0.39	0.38	0.37	0.36	0.35	0.35	0.34	0.33	0.32
2.5	0.42	0.42	0.41	0.40	0.39	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34	0.33
3.0	0.44	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39	0.38	0.37	0.36	0.35
4.0	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.38	0.37	0.36
5.0	0.48	0.48	0.46	0.45	0.45	0.44	0.42	0.41	0.39	0.38	0.37
10.0	0.49	0.48	0.47	0.46	0.46	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39
$\infty$	0.49	0.49	0.47	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40

\* $d_2/d_1$ —ratio of diameter of larger pipe to diameter of smaller pipe;  $V_2$ —velocity in smaller pipe.

5. Acorde con Munson et al. (1998) el *coeficiente de pérdidas* para esta pieza se estima con el uso del gráfico mostrado en la Figura 25, donde está gobernado por la relación del área menor con respecto a la mayor ( $A_2/A_1$ ).

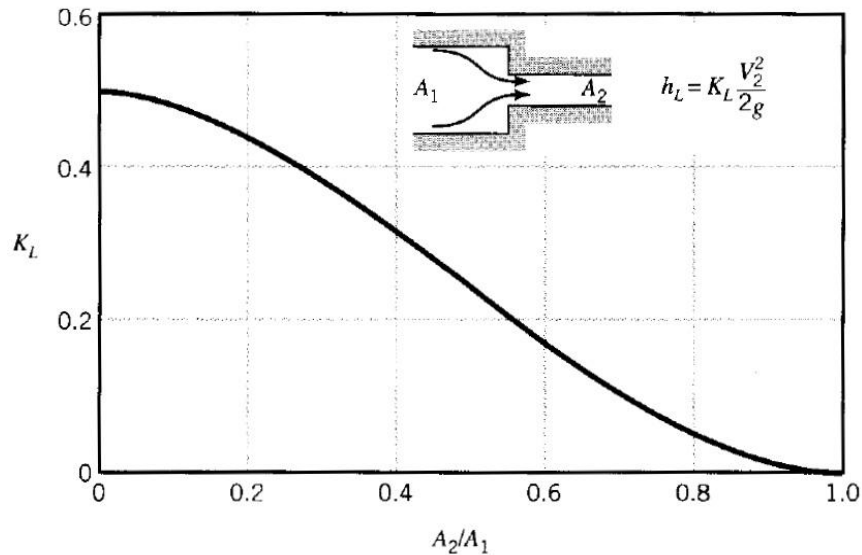


Figura 25. Coeficiente  $K$  de reducción brusca del diámetro, (Munson et al., 1998)

6. Según USACE (1980) el *coeficiente  $K$*  de una reducción brusca se obtiene de la Figura 16, donde se rige por la relación de áreas  $A_2/A_1$ .  $A_2$  es el área del conducto reducido y  $A_1$  el área del conducto por reducir.
7. Por último, de acuerdo con Daugherty et al. (1965), *el coeficiente de pérdidas* se determina con el uso de la Tabla VII, donde se encuentra en función de la relación del diámetro menor con respecto al diámetro del conducto mayor ( $D_2/D_1$ ).

Tabla VII. Coeficiente de reducción brusca del diámetro, (Daugherty et al., 1965)

$D_2/D_1$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$k_c$	0.50	0.45	0.42	0.39	0.36	0.33	0.28	0.22	0.15	0.06	0.00

**b) Reducción gradual**

1. En Sotelo (1998), SARH (1984) y en CFE (1983), se establece que *el coeficiente* de una reducción gradual se estima con datos proporcionados en la Tabla VIII, donde depende de la magnitud del ángulo de reducción ( $\theta^\circ$ ).

Tabla VIII. Coeficiente de pérdida de energía para reducción gradual del diámetro, (CFE, 1983)

$\theta$	4 a 5°	7°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	80°	
$K_e$	0.060	0.005	0.16	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.35

2. Acorde con Mataix (2010), *el coeficiente de pérdidas* de esta pieza se determina con la utilización del gráfico presentado en la Figura 26, en la que está gobernado por el ángulo de estrechamiento ( $\alpha^\circ$ ) y de la relación de diámetros  $D/d$ , donde  $D$  es el diámetro mayor y  $d$  es el diámetro menor.

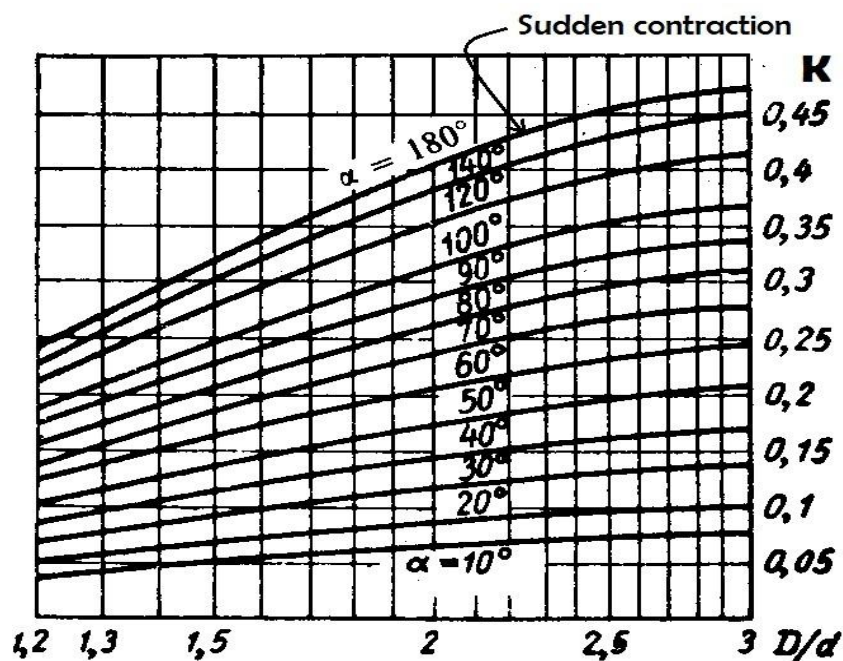
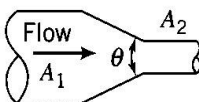


Figura 26. Coeficiente  $K$  para reducción gradual del diámetro, (Mataix, 2010)

3. Fox et al. (2006) expone que *el coeficiente* de esta reducción se obtiene de valores embebidos en la Tabla IX, donde se encuentra en función del ángulo de contracción y

de la relación de áreas  $A_2/A_1$ , en la cual  $A_2$  es el área del conducto reducido y  $A_1$  el área del conducto mayor.

Tabla IX. Coeficiente  $K$  para reducción gradual, (Fox et al., 2006)

	Included Angle, $\theta$ , Degrees							
	$A_2/A_1$	10	15-40	50-60	90	120	150	180
	0.50	0.05	0.05	0.06	0.12	0.18	0.24	0.26
	0.25	0.05	0.04	0.07	0.17	0.27	0.35	0.41
	0.10	0.05	0.05	0.08	0.19	0.29	0.37	0.43

Note: Coefficients are based on  $h_{l_m} = K(\bar{V}_2^2/2)$ .

4. En Mott (2006) se proporcionan dos gráficos que abarcan el caso para estimar *el coeficiente de pérdidas* de este accesorio (Figura 27 y 28), donde depende del ángulo reductor ( $\theta^\circ$ ) y de la relación del diámetro mayor con respecto al diámetro menor ( $D_1/D_2$ ).

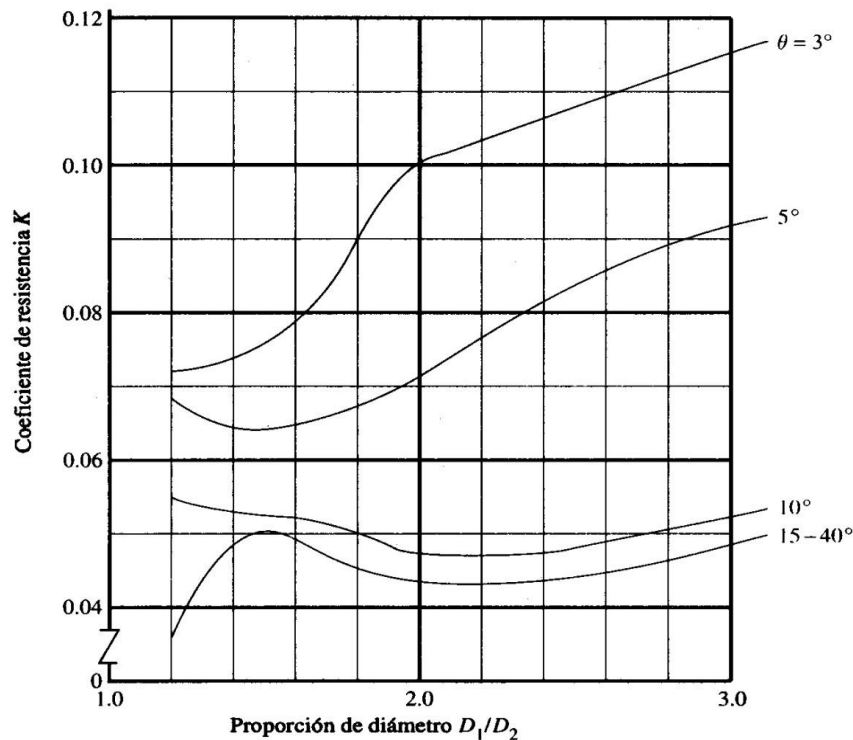


Figura 27. Coeficiente  $K$  para reducción gradual del diámetro con ángulos de 3 a  $40^\circ$ , (Mott, 2006)

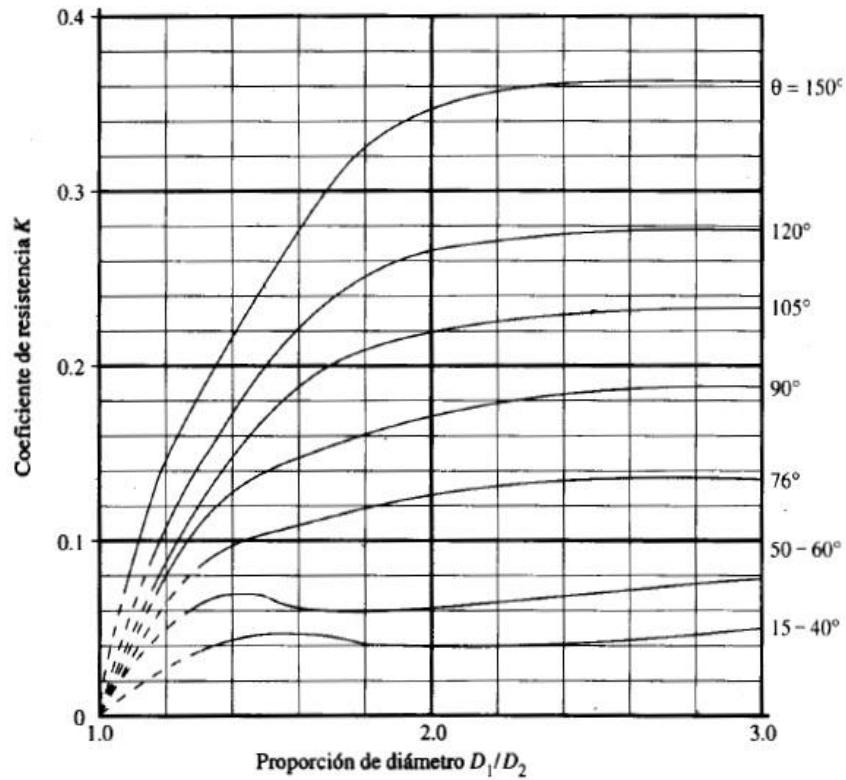


Figura 28. Coeficiente  $K$  para reducción gradual del diámetro, con ángulo estrechamiento de 15 a  $150^\circ$ , (Mott, 2006)

5. El manual de USACE sugiere el explorar el gráfico de la Figura 29 para obtener el valor del *factor*  $K$ , para una relación de  $D_2/D_1$  de 1.2 a 2.1 y para un ángulo de reducción de 0 a  $180^\circ$

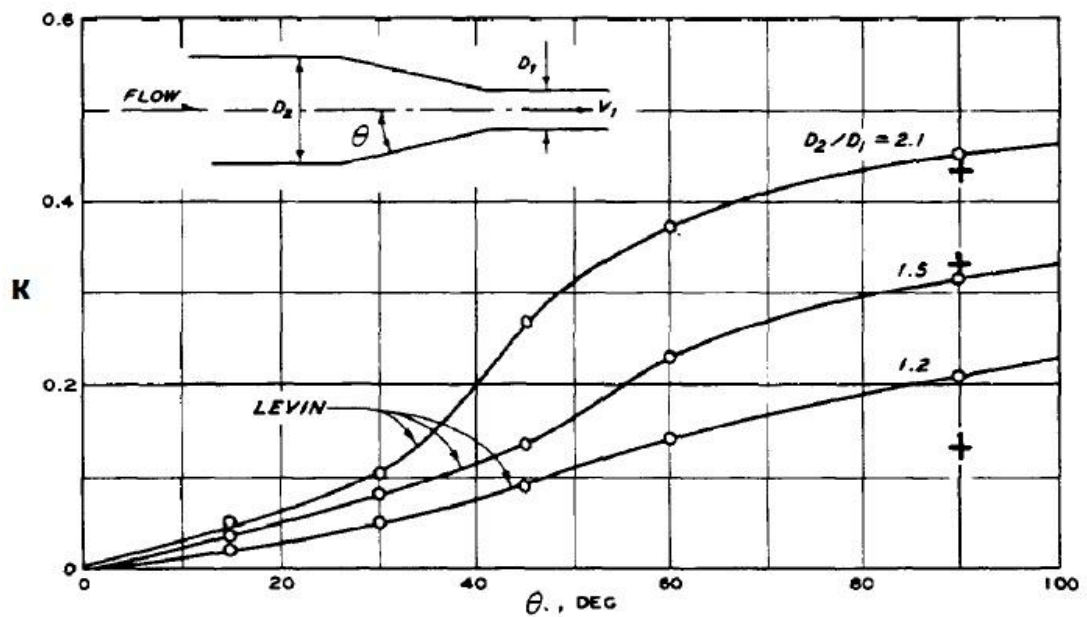


Figura 29. Coeficiente  $K$  para reducción gradual del diámetro, (USACE, 1980)

## **CAPÍTULO IV**

### **PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

#### **IV.1 INTRODUCCIÓN**

La información clasificada y analizada en el apartado III.3.2.1 para cada caso bajo estudio, fue trabajada y procesada con la utilidad de Autocad y Excel, hasta obtener los valores medios del coeficiente  $K$  y la curva que describe su comportamiento. En éste capítulo se aborda de manera general la metodología de su tratamiento y los hallazgos de éste proceso.

#### **IV.2 CAMBIOS DE DIRECCIÓN**

El coeficiente de pérdidas propuesto por el autor es  $K_{CB}$  para un cambio brusco y  $K_{CG}$  cuando éste es gradual. El fundamento de estas circunstancias es detallado en los siguientes puntos:

##### **IV.2.1 Cambio brusco**

El gráfico sugerido por Sotelo (1998) y USACE (1980) para estimar el coeficiente  $K$  fue trabajado en detalle en Autocad, donde se obtuvieron coordenadas (x,y) de puntuaciones que conforman la curva para Número de Reynolds ( $Re$ ) igual a 20000 y cuando el ángulo de deflexión se presenta de 0 a 90°. Con la información recabada se estimaron los valores de  $K$  que se ilustran en la tabulación siguiente.

Tabla X. Coeficiente  $K$  de un cambio de dirección brusco con  $Re = 20000$ , (Sotelo, 1998), (USACE, 1980)

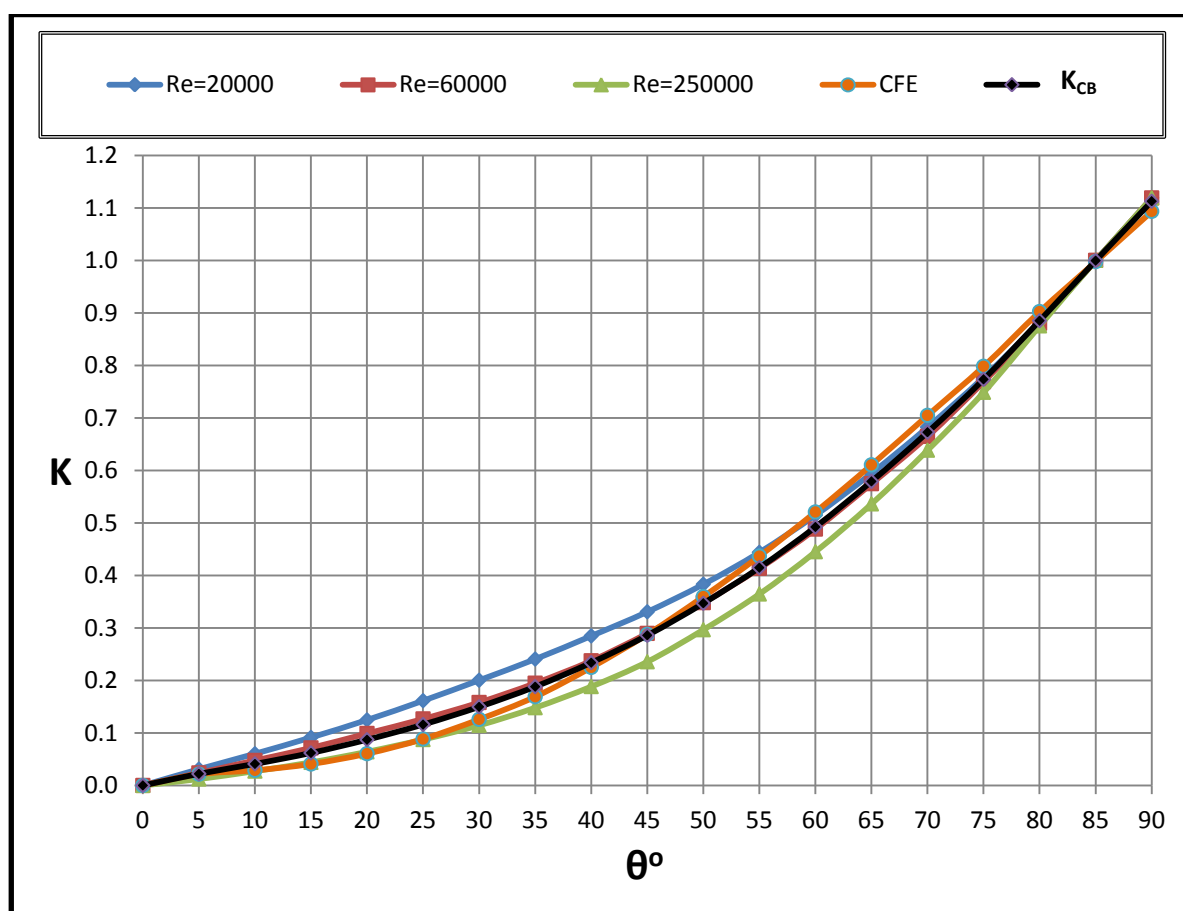
Coordenadas de Autocad		Coordenadas Reales	
X ( $\theta^\circ$ )	Y (K)	$\theta^\circ$	K
0.0000	0.0000	0	<b>0.0000</b>
4.6306	2.8683	5	<b>0.0310</b>
9.2612	5.5867	10	<b>0.0604</b>
13.8918	8.455	15	<b>0.0914</b>
18.5225	11.5426	20	<b>0.1248</b>
23.1531	14.9302	25	<b>0.1614</b>
27.7837	18.5361	30	<b>0.2004</b>
32.4143	22.2618	35	<b>0.2407</b>
37.045	26.3403	40	<b>0.2848</b>
41.6756	30.5902	45	<b>0.3307</b>
46.3062	35.4405	50	<b>0.3831</b>
50.9368	41.064	55	<b>0.4439</b>
55.5675	47.6158	60	<b>0.5148</b>
60.1981	54.9918	65	<b>0.5945</b>
64.8287	63.1114	70	<b>0.6823</b>
69.4593	71.9149	75	<b>0.7774</b>
74.0900	81.6295	80	<b>0.8825</b>
78.7206	92.5024	85	<b>1.0000</b>
83.3512	103.4968	90	<b>1.1189</b>

De una forma similar se trabajo en el mismo gráfico, pero con la curva correspondiente a Número de Reynolds igual a 60000 y a 250000, así como también con el gráfico el sugerido por el manual de CFE (1983). Los valores resultantes del coeficiente de pérdidas fueron encontrados para variaciones del ángulo de deflexión de 0 a 90° (apéndice I.A).

Con base al conjunto de resultados encontrados para el coeficiente de pérdidas y que provienen de diferentes autores, se dedujeron *los valores medios* que se presentan en la Tabla XI y que se proponen para el coeficiente  $K_{CB}$ . En la Figura 30 se representa en forma gráfica el comportamiento de éstos datos.

Tabla XI. Valores del coeficiente  $K$  para un cambio de dirección brusco

Deflexión	Sotelo y USACE ( $Re$ )			CFE	$K_{CB}$
	$2 \times 10^4$	$6 \times 10^4$	$2.5 \times 10^5$		
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	<b>0.0000</b>
5	0.0310	0.0238	0.0123	0.0215	<b>0.0222</b>
10	0.0604	0.0477	0.0273	0.0288	<b>0.0410</b>
15	0.0914	0.0715	0.0440	0.0409	<b>0.0619</b>
20	0.1248	0.0990	0.0641	0.0606	<b>0.0871</b>
25	0.1614	0.1267	0.0875	0.0885	<b>0.1160</b>
30	0.2004	0.1580	0.1146	0.1259	<b>0.1497</b>
35	0.2407	0.1947	0.1481	0.1690	<b>0.1881</b>
40	0.2848	0.2374	0.1883	0.2249	<b>0.2338</b>
45	0.3307	0.2896	0.2356	0.2877	<b>0.2859</b>
50	0.3831	0.3482	0.2966	0.3597	<b>0.3469</b>
55	0.4439	0.4135	0.3646	0.4368	<b>0.4147</b>
60	0.5148	0.4883	0.4451	0.5208	<b>0.4922</b>
65	0.5945	0.5747	0.5362	0.6106	<b>0.5790</b>
70	0.6823	0.6648	0.6385	0.7048	<b>0.6726</b>
75	0.7774	0.7688	0.7487	0.7982	<b>0.7733</b>
80	0.8825	0.8802	0.8752	0.9024	<b>0.8851</b>
85	1.0000	1.0000	1.0000	0.9976	<b>0.9994</b>
90	1.1189	1.1189	1.1189	1.0933	<b>1.1125</b>

Figura 30. Curva del coeficiente  $K$  para un cambio de dirección brusco

## IV.2.2 Cambio gradual

El gráfico que propone USACE (1980) fue trabajado con la utilidad de Autocad hasta obtenerse coordenadas ortogonales del comportamiento del coeficiente  $K$ , cuando se tiene un ángulo de deflexión de 5 a 90° y distintas relaciones de  $r/D$ . Con los datos estimados se dedujeron los resultados contenidos en la Tabla que se presenta a continuación.

Tabla XII. Coeficiente  $K$  de un cambio de dirección gradual, (USACE, 1980)

Deflexión $\theta^\circ$	r/D					
	1	1.5	2	4	6	10
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0527	0.0321	0.0199	0.0102	0.0079	0.0065
10	0.0787	0.0542	0.0368	0.0201	0.0154	0.0126
15	0.0973	0.0731	0.0522	0.0300	0.0235	0.0191
20	0.1123	0.0892	0.0653	0.0387	0.0308	0.0250
25	0.1245	0.1028	0.0766	0.0477	0.0381	0.0310
30	0.1345	0.1128	0.0858	0.0550	0.0446	0.0364
35	0.1430	0.1215	0.0939	0.0618	0.0510	0.0418
40	0.1503	0.1283	0.1009	0.0678	0.0566	0.0470
45	0.1558	0.1337	0.1074	0.0733	0.0617	0.0520
50	0.1606	0.1384	0.1127	0.0777	0.0661	0.0563
55	0.1650	0.1425	0.1176	0.0828	0.0707	0.0604
60	0.1686	0.1459	0.1221	0.0873	0.0753	0.0641
65	0.1718	0.1490	0.1260	0.0913	0.0793	0.0676
70	0.1747	0.1520	0.1298	0.0953	0.0835	0.0710
75	0.1768	0.1541	0.1337	0.0991	0.0869	0.0741
80	0.1783	0.1564	0.1373	0.1026	0.0905	0.0770
85	0.1796	0.1586	0.1395	0.1055	0.0928	0.0798
90	0.1804	0.1608	0.1417	0.1085	0.0950	0.0823

De igual forma se trató la teoría propuesta por el USBR (1985), Sotelo (1998), CFE (1983) y la de SARH (1984) para obtener valores del coeficiente  $K$ , cuando se tiene un ángulo de deflexión de 5 a 90° y una relación de  $r/D$  de 1 a 10 (apéndice I.B).

A partir de todo el conjunto de valores encontrados para el coeficiente de éste accesorio, se propusieron valores medios para el coeficiente  $K_{CG}$ , que de acuerdo a la relación  $r/D$  se clasificó de la siguiente manera:

- a)  $K_{CG1}$  para  $r/D = 1$
- b)  $K_{CG2}$  para  $r/D = 1.5$
- c)  $K_{CG3}$  para  $r/D = 2$
- d)  $K_{CG4}$  para  $r/D = 4$
- e)  $K_{CG5}$  para  $r/D = 6$
- f)  $K_{CG6}$  para  $r/D = 10$

En el caso a), b), c) y d), *no se consideraron* los datos sugeridos por SARH (1984) para obtener los valores medios, debido a que son muy dispares con los demás.

El conjunto de *valores propuestos para el coeficiente  $K_{CG}$*  se ilustran en la Tabla XIII, seguido de la Figura 31 que representa en el plano el comportamiento de los datos.

Tabla XIII. Valores del coeficiente  $K_{CG}$  para distintos valores de  $r/D$

Deflexión	$r/D$					
	1 ( $K_{CG1}$ )	1.5 ( $K_{CG2}$ )	2 ( $K_{CG3}$ )	4 ( $K_{CG4}$ )	6 ( $K_{CG5}$ )	10 ( $K_{CG6}$ )
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0300	0.0224	0.0171	0.0141	0.0130	0.0142
10	0.0568	0.0427	0.0333	0.0267	0.0240	0.0259
15	0.0808	0.0624	0.0494	0.0393	0.0349	0.0370
20	0.1039	0.0816	0.0648	0.0510	0.0446	0.0481
25	0.1237	0.0981	0.0783	0.0620	0.0541	0.0581
30	0.1432	0.1140	0.0912	0.0718	0.0625	0.0676
35	0.1621	0.1278	0.1026	0.0810	0.0707	0.0764
40	0.1805	0.1410	0.1126	0.0893	0.0783	0.0849
45	0.1961	0.1527	0.1226	0.0971	0.0855	0.0927
50	0.2103	0.1629	0.1309	0.1040	0.0922	0.1000
55	0.2248	0.1735	0.1393	0.1112	0.0986	0.1066
60	0.2384	0.1834	0.1477	0.1177	0.1045	0.1130
65	0.2508	0.1921	0.1549	0.1234	0.1100	0.1188
70	0.2632	0.2007	0.1621	0.1290	0.1156	0.1242
75	0.2750	0.2090	0.1689	0.1345	0.1208	0.1297
80	0.2867	0.2173	0.1757	0.1399	0.1261	0.1353
85	0.2980	0.2256	0.1824	0.1451	0.1314	0.1404
90	0.3085	0.2336	0.1890	0.1506	0.1366	0.1456

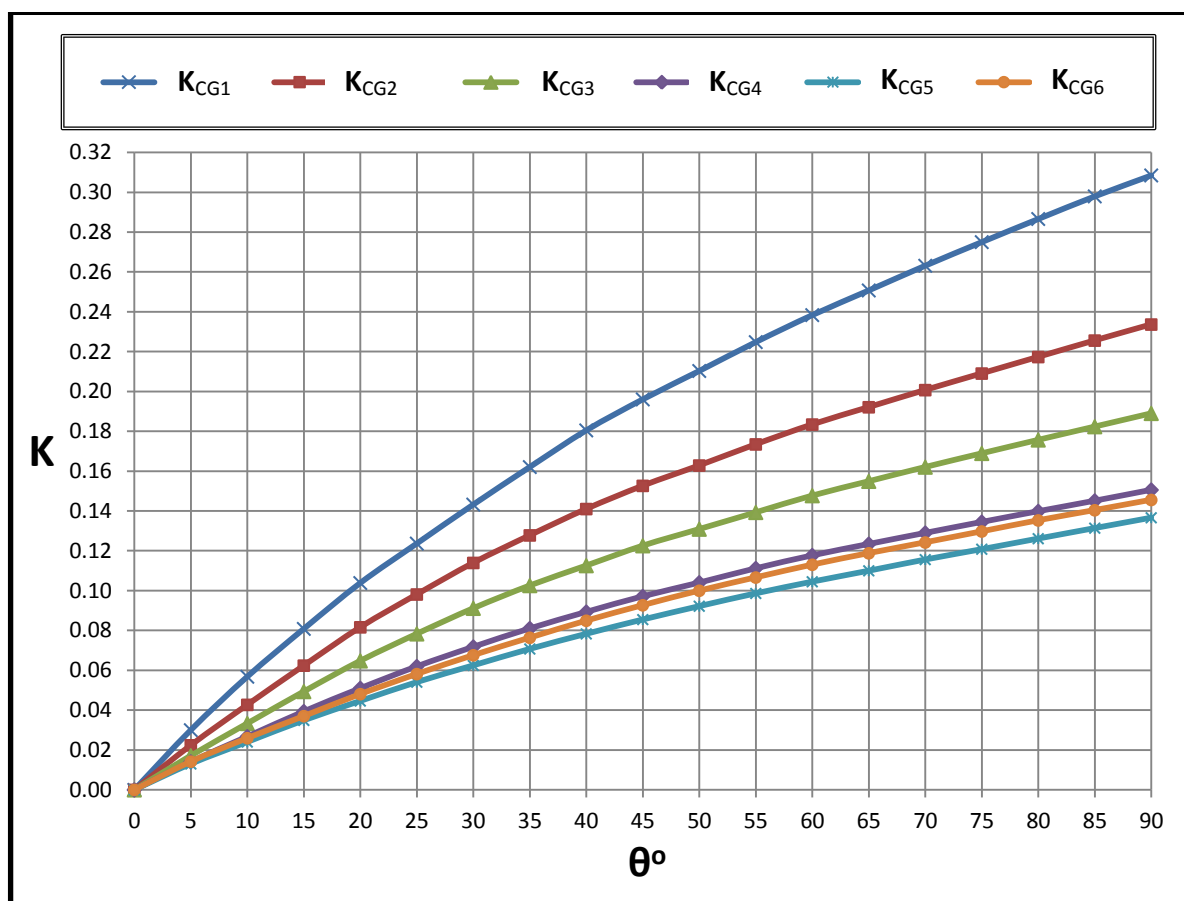


Figura 31. Curvas del coeficiente  $K_{CG}$  para distintos valores de  $r/D$

### IV.3 AMPLIACIÓN DEL DIAMETRO

Para este caso, el coeficiente de pérdidas propuesto por el autor es  $K_{AB}$  cuando la ampliación es brusca y  $K_{AG}$  cuando ésta es gradual.

#### IV.3.1 Ampliación brusca

El gráfico proporcionado por CFE (1983) para obtener el coeficiente  $K$  de éste accesorio, fue estudiado mediante Autocad para obtener coordenadas precisas (x,y) de su comportamiento en el plano, con las cuales se calcularon los valores de éste coeficiente que se exponen en la siguiente Tabla.

Tabla XIV. Valores de  $K$  para una ampliación brusca, (CFE, 1983)

Coordenadas de Autocad		Coordenadas reales	
X ( $A_1/A_2$ )	Y ( $K$ )	$A_1/A_2$	$K$
0.0000	99.3290	0.00	<b>1.000</b>
5.0175	94.3952	0.05	<b>0.950</b>
10.0350	84.0481	0.10	<b>0.846</b>
20.0700	65.5811	0.20	<b>0.660</b>
30.1050	50.0921	0.30	<b>0.504</b>
40.1400	37.4369	0.40	<b>0.377</b>
50.1750	27.3128	0.50	<b>0.275</b>
60.2100	18.9714	0.60	<b>0.191</b>
70.2450	12.5491	0.70	<b>0.126</b>
80.2800	7.5539	0.80	<b>0.076</b>
90.3150	4.0091	0.90	<b>0.040</b>
95.3325	2.2251	0.95	<b>0.022</b>
100.3500	0.0000	1.00	<b>0.000</b>

\* $A_1/A_2$  es la relación del área menor con respecto a la mayor

De igual forma se trabajó con el gráfico dado por Munson et al. (1998) y con el sugerido por USACE (1980) para estimar el coeficiente de interés, cuando se presenta una relación de  $A_1/A_2$  de cero hasta la unidad (apéndice I.C).

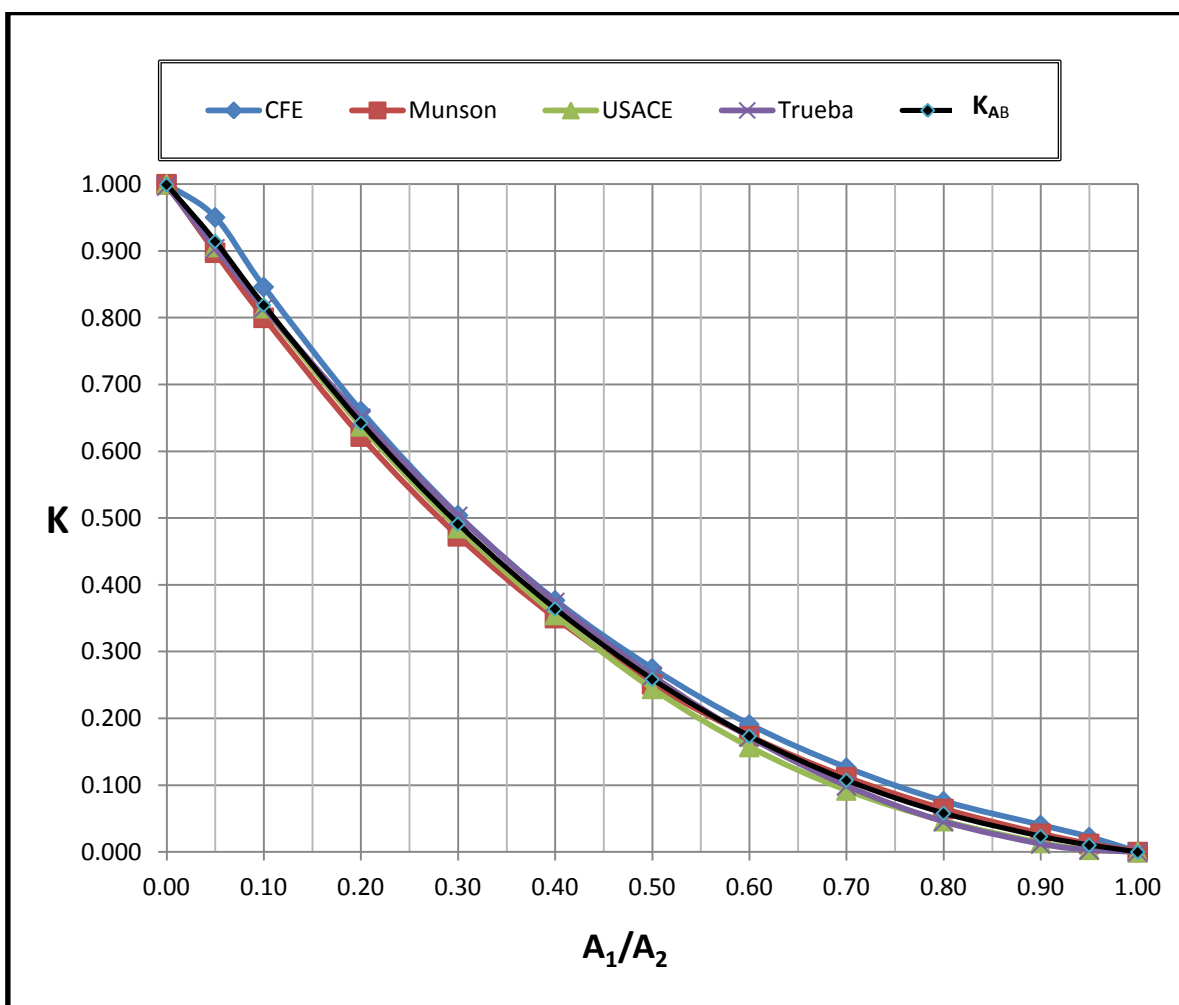
Por otra parte, de la tabla que recomienda Trueba (1986) para estimar las pérdidas de energía que ocurren en esta pieza, se consideraron los valores referentes a la velocidad de 1  $m/s$  por la semejanza de valores con respecto a los dados por los demás autores. De ahí se dedujeron los valores necesarios del coeficiente  $K$  para una relación de  $A_1/A_2$  de 0 a 1 y son los correspondientes a la teoría establecida por éste autor (apéndice I.C).

En la Tabla XV se ilustra un resumen de los resultados que recomiendan las teorías estudiadas, así como los *valores del coeficiente propuesto*  $K_{AB}$ , que surgen de la media entre ellos. La Figura que le sigue demuestra de forma gráfica la trayectoria de éstos valores.

Tabla XV. Valores del coeficiente  $K$  para una ampliación brusca del diámetro

$A_1/A_2$	CFE	Munson	USACE	Trueba	$K_{AB}$
<b>0.00</b>	1.000	1.000	1.000	0.997	<b>0.999</b>
<b>0.05</b>	0.950	0.897	0.906	0.904	<b>0.914</b>
<b>0.10</b>	0.846	0.800	0.814	0.814	<b>0.819</b>
<b>0.20</b>	0.660	0.622	0.637	0.650	<b>0.642</b>
<b>0.30</b>	0.504	0.473	0.485	0.503	<b>0.491</b>
<b>0.40</b>	0.377	0.350	0.355	0.374	<b>0.364</b>
<b>0.50</b>	0.275	0.251	0.244	0.264	<b>0.259</b>
<b>0.60</b>	0.191	0.174	0.157	0.172	<b>0.173</b>
<b>0.70</b>	0.126	0.112	0.092	0.099	<b>0.107</b>
<b>0.80</b>	0.076	0.064	0.046	0.045	<b>0.058</b>
<b>0.90</b>	0.040	0.027	0.014	0.012	<b>0.023</b>
<b>0.95</b>	0.022	0.012	0.003	0.003	<b>0.010</b>
<b>1.00</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	<b>0.000</b>

\* $A_1/A_2$  es la relación del área menor con respecto a la mayor

Figura 32. Curvas del coeficiente  $K$  para una ampliación brusca del diámetro

### IV.3.2 Ampliación gradual

En Autocad se estudió en detalle el gráfico sugerido por Sotelo (1998) para obtener valores del factor  $C_a$ , donde se consideró la curva de  $d_2/d_1=1.5$  para valores menores a él y la curva de 3 para valores mayores a éste. Los datos resultantes fueron empleados en la ecuación 25, de donde se obtuvo la información del coeficiente de pérdidas que se expone en la Tabla siguiente.

Tabla XVI. Valores de  $K$  para una ampliación gradual, (Sotelo, 1998)

$d_2/d_1$	Angulo de la ampliación $\theta^\circ$							
	5	10	20	30	40	60	80	90
1.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.05	0.0012	0.0015	0.0036	0.0063	0.0083	0.0105	0.0101	0.0098
1.10	0.0040	0.0051	0.0126	0.0219	0.0289	0.0365	0.0352	0.0343
1.20	0.0125	0.0157	0.0391	0.0677	0.0896	0.1131	0.1091	0.1062
1.30	0.0224	0.0280	0.0699	0.1209	0.1599	0.2019	0.1948	0.1896
1.40	0.0322	0.0403	0.1006	0.1741	0.2302	0.2906	0.2804	0.2729
1.50	0.0414	0.0518	0.1294	0.2239	0.2961	0.3738	0.3607	0.3511
1.60	0.0498	0.0623	0.1556	0.2674	0.3527	0.4451	0.4313	0.4203
1.80	0.0641	0.0802	0.2003	0.3388	0.4447	0.5609	0.5480	0.5355
2.00	0.0754	0.0944	0.2358	0.3925	0.5125	0.6459	0.6366	0.6237
2.25	0.0864	0.1081	0.2699	0.4404	0.5711	0.7191	0.7169	0.7049
2.50	0.0946	0.1185	0.2957	0.4727	0.6087	0.7657	0.7724	0.7622
2.75	0.1010	0.1264	0.3156	0.4940	0.6314	0.7934	0.8104	0.8027
3.00	0.1060	0.1327	0.3312	0.5074	0.6434	0.8076	0.8357	0.8309
3.25	0.1099	0.1376	0.3435	0.5263	0.6674	0.8377	0.8668	0.8619
3.50	0.1131	0.1416	0.3535	0.5416	0.6868	0.8620	0.8920	0.8870
3.75	0.1157	0.1449	0.3616	0.5541	0.7026	0.8819	0.9126	0.9074
4.00	0.1179	0.1476	0.3684	0.5644	0.7157	0.8983	0.9296	0.9243
4.50	0.1212	0.1517	0.3788	0.5803	0.7359	0.9236	0.9557	0.9503
5.00	0.1236	0.1547	0.3863	0.5918	0.7505	0.9420	0.9747	0.9692
6.00	0.1268	0.1587	0.3962	0.6070	0.7697	0.9661	0.9997	0.9940
8.00	0.1300	0.1627	0.4061	0.6222	0.7891	0.9904	1.0248	1.0190
10.00	0.1314	0.1646	0.4108	0.6294	0.7981	1.0017	1.0366	1.0307

\* $d_2/d_1$  es la relación del diámetro mayor con respecto al menor

Por otro lado, la información propuesta por CFE (1983), Mataix (2010), White (2008), USACE (1980), Sabersky et al, (1999) y en la que coincide Brater et al. (1996), Trueba (1986) y King et al. (1981), fue tratada para obtener valores del coeficiente  $K$  cuando el ángulo difusor se presenta de 5 a  $90^\circ$  y una relación  $d_2/d_1$  de 1 a 10 (apéndice I.D).

De acuerdo a las características que presenta la información recabada para  $K_{AG}$ , éste coeficiente se clasificó de la siguiente manera:

- a).  $K_{AG1}$  cuando  $\theta = 5^\circ$**
- b).  $K_{AG2}$  cuando  $\theta = 10^\circ$**
- c).  $K_{AG3}$  cuando  $\theta = 20^\circ$**
- d).  $K_{AG4}$  cuando  $\theta = 30^\circ$**
- e).  $K_{AG5}$  cuando  $\theta = 40^\circ$**
- f).  $K_{AG6}$  cuando  $\theta = 60^\circ$**
- g).  $K_{AG7}$  cuando  $\theta = 80^\circ$**
- h).  $K_{AG8}$  cuando  $\theta = 90^\circ$**

Después de obtener todos los resultados mencionados para el coeficiente de pérdidas de ésta pieza, se estimaron valores medios para cada clasificación mencionada. El conjunto de *valores propuestos para el coeficiente  $K_{AG}$*  que se exponen en la Tabla siguiente y el comportamiento de la información contenida se representa en la Figura 33.

Tabla XVII. Valores del coeficiente  $K_{AG}$  para diferentes valores de  $\theta^\circ$ 

$d_2/d_1$	Ángulo de la ampliación $\theta^\circ$							
	5	10	20	30	40	60	80	90
	$K_{AG1}$	$K_{AG2}$	$K_{AG3}$	$K_{AG4}$	$K_{AG5}$	$K_{AG6}$	$K_{AG7}$	$K_{AG8}$
<b>1.00</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>1.05</b>	0.005	0.008	0.018	0.027	0.038	0.056	0.056	0.055
<b>1.10</b>	0.010	0.016	0.037	0.055	0.075	0.108	0.108	0.106
<b>1.20</b>	0.019	0.029	0.071	0.110	0.144	0.196	0.197	0.191
<b>1.30</b>	0.027	0.040	0.102	0.163	0.208	0.274	0.274	0.266
<b>1.40</b>	0.034	0.050	0.131	0.212	0.268	0.347	0.344	0.336
<b>1.50</b>	0.046	0.063	0.157	0.255	0.320	0.406	0.401	0.391
<b>1.60</b>	0.057	0.075	0.182	0.295	0.367	0.458	0.454	0.443
<b>1.80</b>	0.082	0.104	0.232	0.375	0.466	0.553	0.552	0.542
<b>2.00</b>	0.100	0.123	0.269	0.434	0.535	0.623	0.634	0.614
<b>2.25</b>	0.111	0.134	0.296	0.473	0.581	0.679	0.688	0.663
<b>2.50</b>	0.119	0.143	0.314	0.503	0.615	0.713	0.723	0.697
<b>2.75</b>	0.127	0.150	0.329	0.526	0.641	0.739	0.748	0.726
<b>3.00</b>	0.133	0.154	0.342	0.546	0.662	0.759	0.767	0.747
<b>3.25</b>	0.138	0.159	0.354	0.565	0.685	0.776	0.783	0.763
<b>3.50</b>	0.144	0.163	0.363	0.582	0.702	0.789	0.796	0.776
<b>3.75</b>	0.148	0.167	0.370	0.596	0.717	0.799	0.806	0.787
<b>4.00</b>	0.152	0.170	0.377	0.606	0.729	0.808	0.815	0.796
<b>4.50</b>	0.157	0.176	0.387	0.620	0.747	0.821	0.829	0.809
<b>5.00</b>	0.162	0.179	0.394	0.631	0.760	0.830	0.838	0.819
<b>6.00</b>	0.169	0.185	0.403	0.645	0.776	0.843	0.851	0.832
<b>8.00</b>	0.178	0.191	0.413	0.659	0.792	0.855	0.864	0.844
<b>10.00</b>	0.183	0.195	0.418	0.666	0.800	0.861	0.870	0.850

\* $d_2/d_1$  es la relación del diámetro mayor con respecto al menor

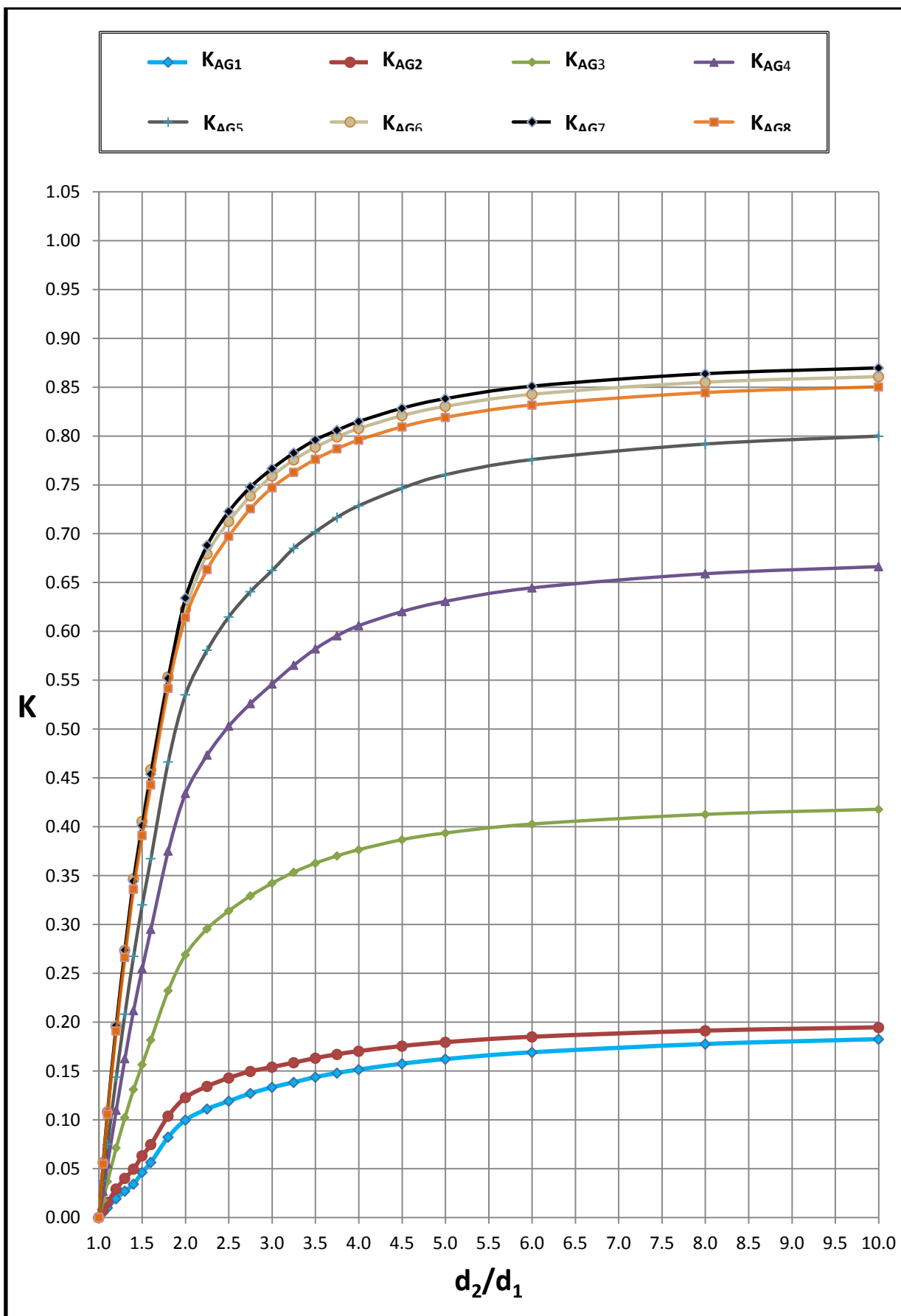


Figura 33. Curvas del coeficiente  $K_{AG}$  para distintos valores de  $\theta'$

## IV.4 REDUCCIÓN DEL DIAMETRO

El coeficiente de pérdidas que se propone para *una reducción brusca* se denota por  $K_{RB}$  y *cuando ésta es gradual*, por  $K_{RG}$ .

### IV.4.1 Reducción brusca

El gráfico que recomienda Sotelo (1998) fue trabajado mediante Autocad para obtener coordenadas ortogonales de valores puntuales del coeficiente de pérdidas. Estos datos sirvieron para estimar los valores reales de éste coeficiente y son los que se ilustran a continuación.

Tabla XVIII. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción brusca, (Sotelo, 1998)

Coordenadas de Autocad		Coordenadas reales		
X ( $D_2/D_1$ )	Y (K)	$D_2/D_1$	$A_2/A_1$	K
0.0000	122.3355	0.0000	0.00	<b>0.500</b>
27.9201	120.2389	0.2236	0.05	<b>0.491</b>
39.4850	115.4216	0.3162	0.10	<b>0.472</b>
55.8402	104.2487	0.4472	0.20	<b>0.426</b>
68.3900	93.7382	0.5477	0.30	<b>0.383</b>
78.9700	83.3230	0.6325	0.40	<b>0.341</b>
88.2911	73.1384	0.7071	0.50	<b>0.299</b>
96.7181	62.5614	0.7746	0.60	<b>0.256</b>
104.4675	51.0208	0.8367	0.70	<b>0.209</b>
111.6804	36.9950	0.8944	0.80	<b>0.151</b>
118.4550	19.4031	0.9487	0.90	<b>0.079</b>
121.7009	9.0509	0.9747	0.95	<b>0.037</b>
124.8625	0.0000	1.0000	1.00	<b>0.000</b>

\* $A_2/A_1$  es la relación del área menor con respecto a la mayor

De una manera similar se estudiaron los gráficos sugeridos por CFE (1983), Cengel et al. (2006), Munson et al. (1998) y USACE (1980), donde se obtuvieron valores del coeficiente de interés para una relación  $A_2/A_1$  de 0 a 1 (apéndice I.E).

Por otra parte, de la Tabla que propone Brater et al. (1996) y de la recomendación Daugherty et al. (1965) para obtener el coeficiente de esta pieza, se estimaron también los valores necesarios de factor  $K$  para una relación de áreas de 0 a 1 (apéndice I.E).

A partir de la información resultante del tratamiento de las teorías mencionadas, se propusieron valores medios para el coeficiente de interés.

En la siguiente Tabla se expone una relación de los valores encontrados, de acuerdo con cada autor y también del *coeficiente propuesto*  $K_{RB}$ . En la Figura 34 se demuestra la trayectoria que describen los datos ilustrados.

Tabla XIX. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción brusca del diámetro

$A_2/A_1$	Sotelo	CFE	Cengel	Brater	Munson	USACE	Daugherty	$K_{RB}$
<b>0.00</b>	0.500	0.621	0.500	0.491	0.497	0.501	0.500	<b>0.509</b>
<b>0.05</b>	0.491	0.602	0.493	0.466	0.492	0.496	0.421	<b>0.495</b>
<b>0.10</b>	0.472	0.584	0.479	0.447	0.479	0.486	0.383	<b>0.477</b>
<b>0.20</b>	0.426	0.543	0.433	0.405	0.437	0.452	0.339	<b>0.434</b>
<b>0.30</b>	0.383	0.499	0.369	0.340	0.381	0.408	0.308	<b>0.384</b>
<b>0.40</b>	0.341	0.445	0.302	0.259	0.314	0.355	0.270	<b>0.326</b>
<b>0.50</b>	0.299	0.377	0.235	0.177	0.242	0.287	0.220	<b>0.262</b>
<b>0.60</b>	0.256	0.292	0.176	0.110	0.168	0.207	0.164	<b>0.196</b>
<b>0.70</b>	0.209	0.181	0.123	0.068	0.104	0.124	0.111	<b>0.131</b>
<b>0.80</b>	0.151	0.086	0.076	0.045	0.051	0.057	0.067	<b>0.076</b>
<b>0.90</b>	0.079	0.034	0.034	0.028	0.015	0.015	0.034	<b>0.034</b>
<b>0.95</b>	0.037	0.018	0.016	0.016	0.003	0.003	0.019	<b>0.016</b>
<b>1.00</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	<b>0.000</b>

\* $A_2/A_1$  es la relación del área menor con respecto a la mayor

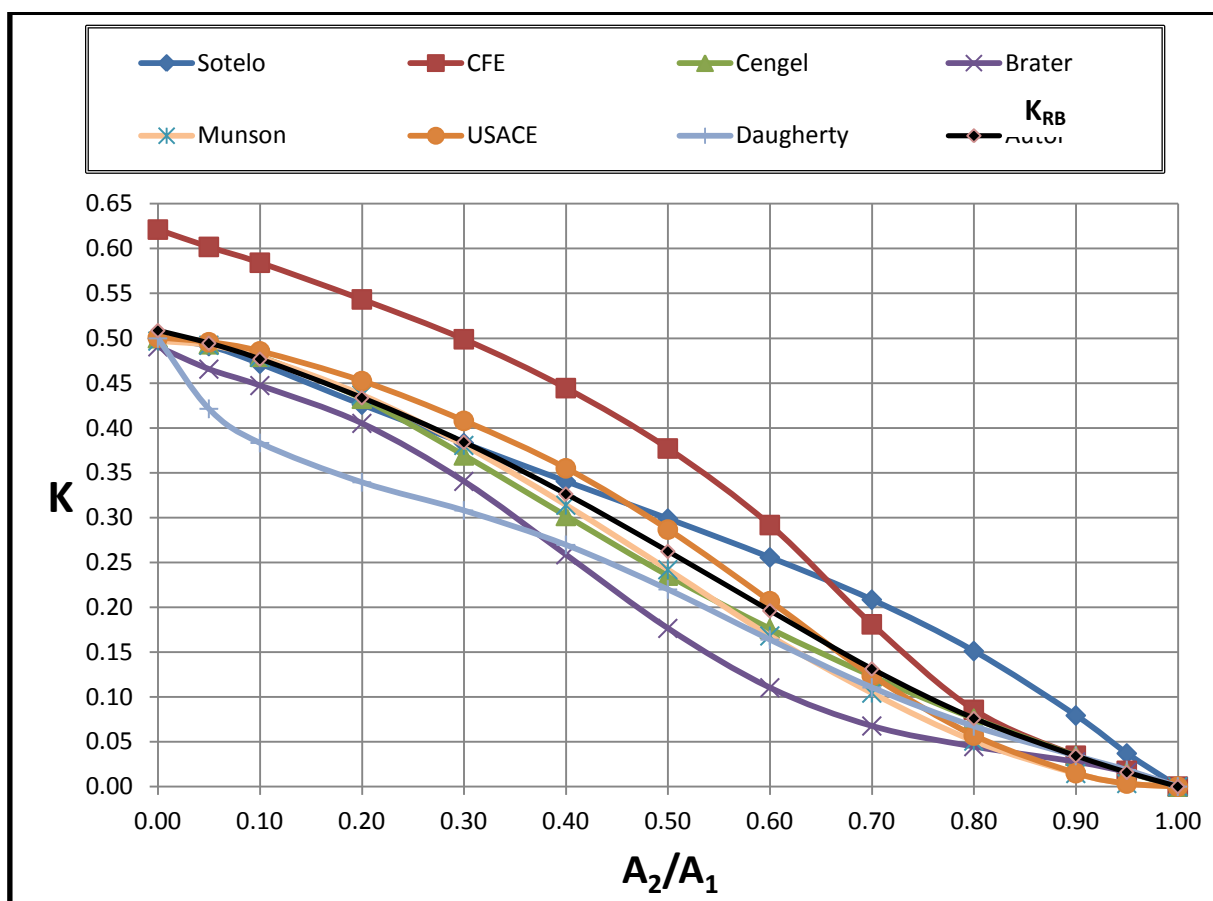


Figura 34. Curvas del coeficiente  $K$  para una reducción brusca del diámetro

#### IV.4.2 Reducción gradual

El gráfico recomendado por Mataix (2010) para obtener el coeficiente de pérdidas de éste accesorio, fue trabajado en detalle en Autocad hasta encontrar coordenadas (x,y) de puntos que comprenden el comportamiento de éste coeficiente, cuando se tiene una relación  $D/d$  de 1 a 3 y variaciones en el ángulo de reducción  $\theta$ . A partir de la información recabada se estimaron las coordenadas reales que se presentan en la Tabla XX.

De la misma forma se le dio tratamiento a los gráficos que envuelven la teoría de Mott (2006), así como también al sugerido por USACE (1980), para obtener datos reales del factor  $K$ , cuando se tiene una relación  $D/d$  de 1 a 3 y valores del ángulo  $\theta$  de 10 a 180° (apéndice I.F).

Tabla XX. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción gradual, (Mataix, 2010)

D/d	Angulo de reducción $\theta^\circ$									
	10	20	30	40	60	80	90	120	150	180
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.037	0.052	0.069	0.086	0.124	0.156	0.175	0.212	0.232	0.243
1.30	0.043	0.058	0.078	0.097	0.139	0.175	0.195	0.238	0.261	0.271
1.50	0.051	0.068	0.092	0.114	0.163	0.206	0.228	0.280	0.307	0.319
1.70	0.058	0.077	0.104	0.128	0.183	0.232	0.255	0.313	0.345	0.359
2.00	0.065	0.086	0.117	0.143	0.205	0.261	0.286	0.352	0.388	0.404
2.30	0.070	0.093	0.126	0.156	0.223	0.286	0.313	0.383	0.422	0.439
2.50	0.073	0.097	0.131	0.161	0.232	0.297	0.324	0.396	0.436	0.454
2.80	0.076	0.100	0.136	0.168	0.241	0.308	0.334	0.410	0.451	0.468
3.00	0.077	0.101	0.138	0.169	0.244	0.310	0.337	0.415	0.457	0.473

\*D/d es la relación del diámetro mayor con respecto al menor

Por otra parte, de la Tabla propuesta por Fox et al. (2006), también se obtuvieron valores del coeficiente bajo estudio, cuando ocurre una relación de D/d de 1 a 3 y valores del ángulo  $\theta$  de 10 a 180° (apéndice I.F). De forma similar se trabajo con la tabla que propone en Sotelo (1998), SARH (1984) y en CFE (1983), pero la información resultante no se consideran para obtener el coeficiente  $K_{RG}$ , dado que estos autores no consideran la variación de  $D/d$ .

Una vez recolectada la información procedente de las teorías estudiadas, se estimaron valores medios del coeficiente de pérdidas y que en acuerdo a las características que posee la información conjuntada, éste se clasifico de la forma siguiente:

a).  $K_{RG1}$  cuando  $\theta = 10^\circ$

b).  $K_{RG2}$  cuando  $\theta = 20^\circ$

c).  $K_{RG3}$  cuando  $\theta = 30^\circ$

d).  $K_{RG4}$  cuando  $\theta = 40^\circ$

e).  $K_{RG5}$  cuando  $\theta = 60^\circ$

f).  $K_{RG6}$  cuando  $\theta = 80^\circ$

g).  $K_{RG7}$  cuando  $\theta = 90^\circ$

h).  $K_{RG8}$  cuando  $\theta = 120^\circ$

i).  $K_{RG9}$  cuando  $\theta = 150^\circ$

j).  $K_{RG10}$  cuando  $\theta = 180^\circ$

En la Tabla que se ilustra a continuación, están contenidos los valores asignados a los coeficientes propuestos y después se presenta la Figura 35, que expresa gráficamente la trayectoria que siguen sus valores.

Tabla XXI. Valores del coeficiente  $K_{RG}$  para una reducción gradual

D/d	Ángulo de reducción $\theta^\circ$									
	10 $K_{RG1}$	20 $K_{RG2}$	30 $K_{RG3}$	40 $K_{RG4}$	60 $K_{RG5}$	80 $K_{RG6}$	90 $K_{RG7}$	120 $K_{RG8}$	150 $K_{RG9}$	180 $K_{RG10}$
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.026	0.028	0.033	0.040	0.059	0.087	0.100	0.136	0.170	0.194
1.30	0.034	0.036	0.043	0.051	0.075	0.108	0.125	0.173	0.212	0.239
1.50	0.042	0.044	0.055	0.064	0.094	0.136	0.158	0.226	0.275	0.307
1.70	0.046	0.049	0.060	0.071	0.106	0.156	0.184	0.262	0.320	0.354
2.00	0.051	0.055	0.066	0.078	0.118	0.176	0.208	0.294	0.360	0.403
2.30	0.055	0.059	0.072	0.083	0.127	0.191	0.223	0.311	0.379	0.432
2.50	0.057	0.062	0.074	0.086	0.131	0.199	0.230	0.318	0.386	0.445
2.80	0.059	0.064	0.077	0.089	0.135	0.206	0.236	0.325	0.394	0.459
3.00	0.060	0.065	0.078	0.090	0.137	0.207	0.238	0.327	0.396	0.467

\*D/d es la relación del diámetro mayor con respecto al menor

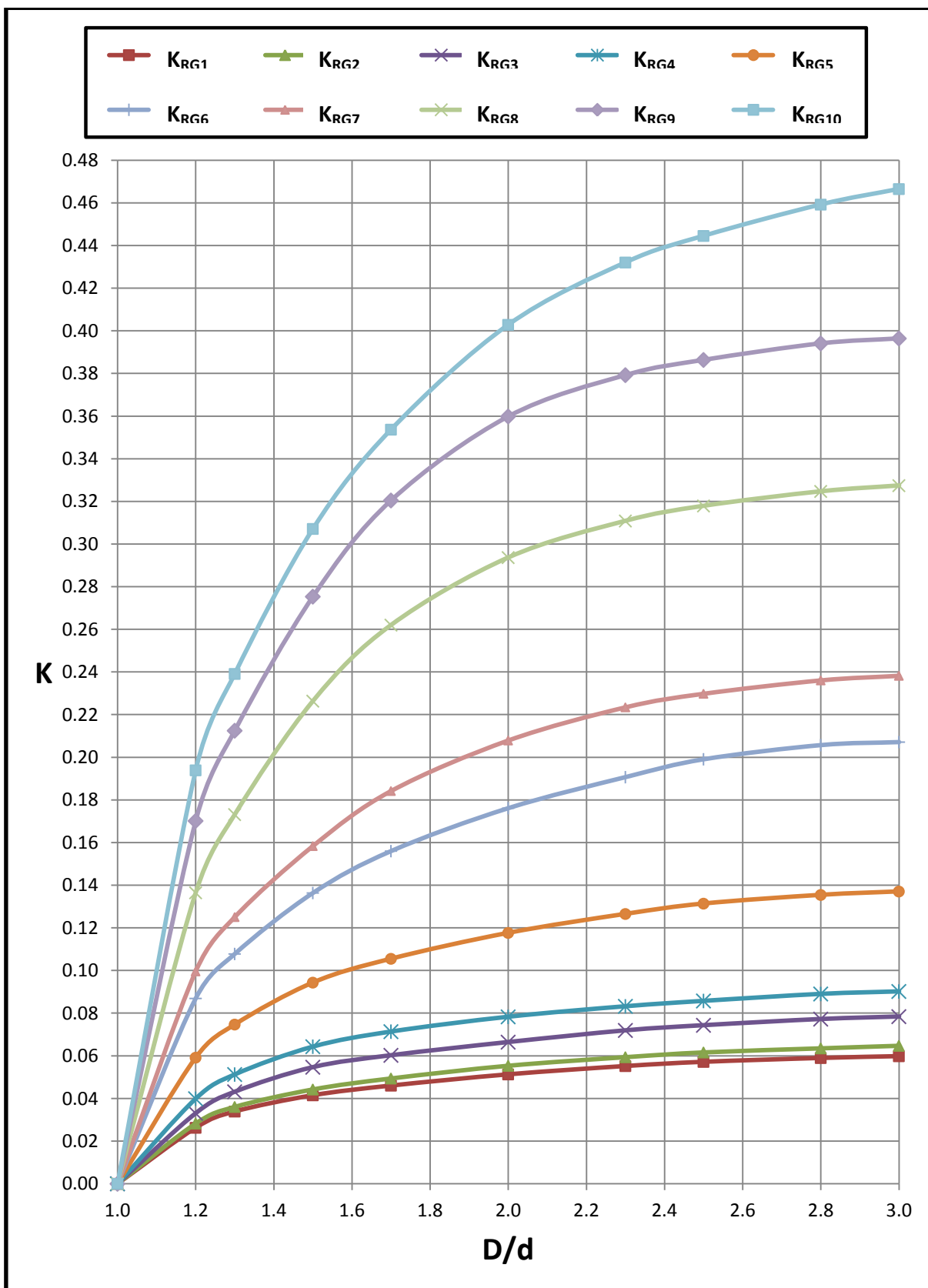


Figura 35. Curvas del coeficiente  $K_{RG}$  de acuerdo a la relación  $D/d$

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### V.1 RESULTADOS

##### V.1.1 ECUACIONES

Con el uso de los valores medios que se propusieron en el capítulo anterior, para el coeficiente de pérdidas  $K$  de cada accesorio bajo estudio y que fueron representados gráficamente por medio de curvas, se dió paso buscar una ecuación que modele fielmente el comportamiento estos datos (curvas) al considerar las variantes que los rigen (variables independientes).

Bajo el empleo de un método de ajuste para curvas (software *TableCurve-2D*), se ensayaron los datos propuestos en esta investigación (valores medios de  $K$ ) y se *determinó la curva* que representa gráficamente el comportamiento de la información y *la ecuación de la misma* que computa *el coeficiente de pérdidas* de cada accesorio. A continuación se expone más en detalle lo dicho en este párrafo en relación con cada caso.

##### V.1.1.1 Cambio de dirección brusco

Con los valores del coeficiente propuesto para ésta pieza ( $K_{CB}$ ), se procedió a ensayar varias curvas de ajuste, de las cuales se seleccionó la que se ilustra en la Figura 36. Ahí, también se incluye la ecuación que la representa con una correlación de 0.99998 y que al hacer sustitución de variables reales, ésta expresión se escribe de la forma siguiente:

$$K_{CB} = \frac{0.0031960558 + 0.0030444516(\theta^\circ)}{1 - 0.01439831(\theta^\circ) + 0.0000671934(\theta^\circ)^2} \quad (29)$$

Dónde:  $K_{CB}$  es el coeficiente para un cambio de dirección brusco;  $\theta^\circ$  es el ángulo de deflexión.

Esta ecuación *es válida* para el siguiente intervalo:  $0 < \theta^\circ \leq 90$ .

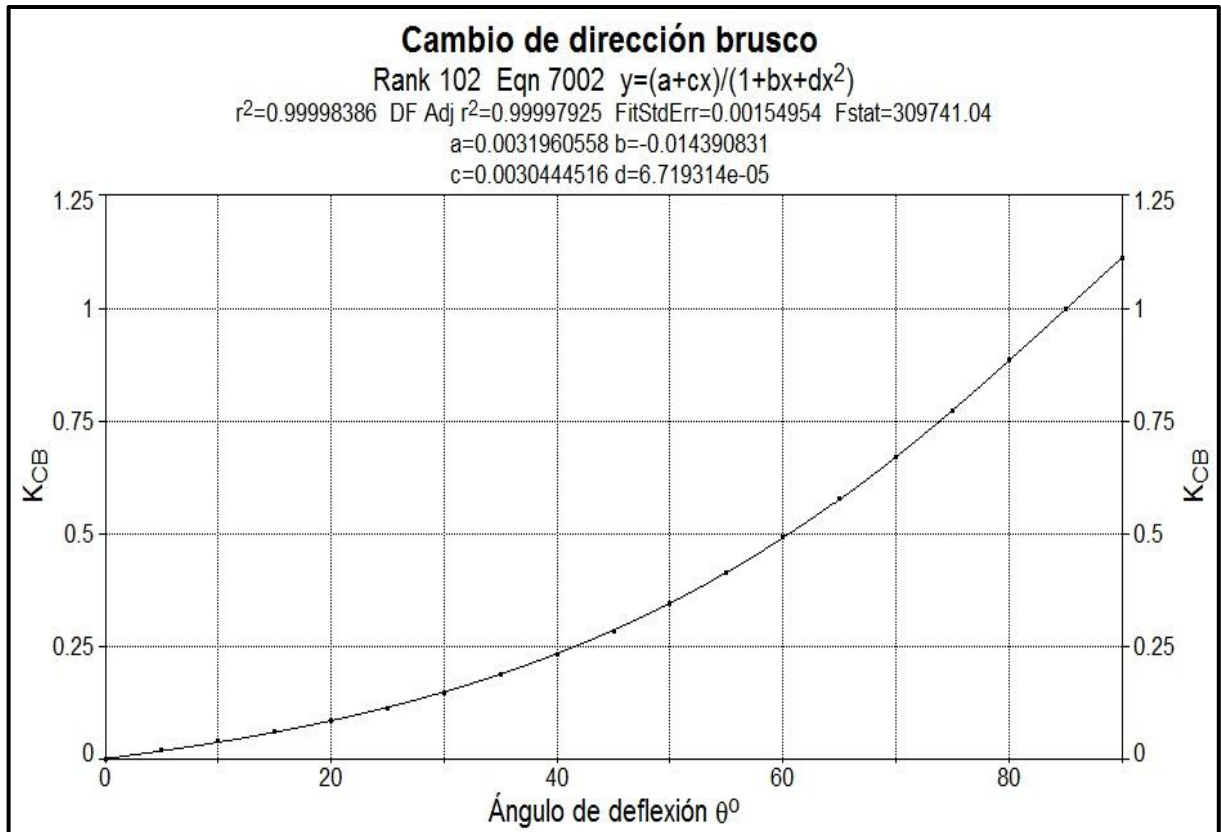


Figura 36. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{CB}$

Al utilizar la ecuación 29 en conjunto con la ecuación 1, además de las teorías que se consideraron para esta parte, cuando se origina una velocidad de 2.5 m/s antes de la curva y valores puntuales del ángulo de deflexión de 0 a 90 grados, dieron por resultado los valores de pérdidas de energía que se muestran en la Tabla XXII. En la Figura 37 se ilustra gráficamente el comportamiento de las pérdidas de energía calculadas.

Tabla XXII. Pérdidas de energía (m) en un cambio de dirección brusco, cuando la velocidad antes de la curva es de 2.5m/s.

Deflexión $\theta^\circ$	Sotelo (1998) y USACE (1980)			CFE (1983)	Propuesta
	$Re = 2 \times 10^4$	$Re = 6 \times 10^4$	$Re = 2.5 \times 10^5$		
5	0.0099	0.0076	0.0039	0.0069	0.0063
10	0.0192	0.0152	0.0087	0.0092	0.0124
15	0.0291	0.0228	0.0140	0.0130	0.0195
20	0.0398	0.0316	0.0204	0.0193	0.0276
25	0.0514	0.0404	0.0279	0.0282	0.0370
30	0.0639	0.0504	0.0365	0.0401	0.0479
35	0.0767	0.0621	0.0472	0.0539	0.0605
40	0.0907	0.0757	0.0600	0.0717	0.0749
45	0.1054	0.0923	0.0751	0.0917	0.0915
50	0.1221	0.1110	0.0945	0.1146	0.1105
55	0.1415	0.1318	0.1162	0.1392	0.1321
60	0.1640	0.1556	0.1418	0.1660	0.1565
65	0.1895	0.1832	0.1709	0.1946	0.1839
70	0.2174	0.2118	0.2035	0.2246	0.2142
75	0.2478	0.2450	0.2386	0.2544	0.2471
80	0.2812	0.2805	0.2789	0.2876	0.2821
85	0.3187	0.3187	0.3187	0.3179	0.3184
90	0.3566	0.3566	0.3566	0.3484	0.3546

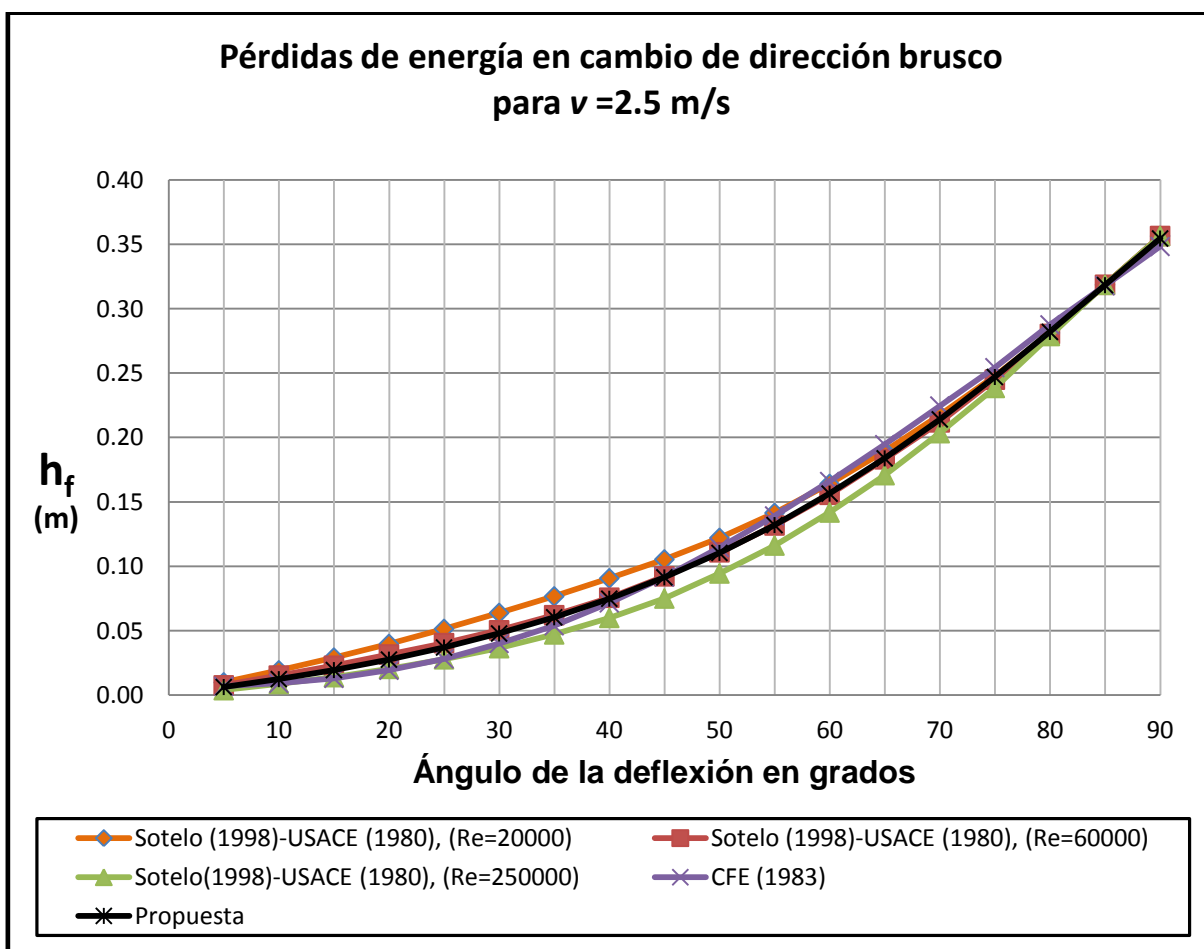


Figura 37. Pérdidas de energía en un cambio de dirección brusco

En la Figura anterior se observa que cuando el ángulo de deflexión es de  $5^\circ$  y  $90^\circ$ , los autores involucrados proporcionan una magnitud de pérdida de energía muy similar, que solo se diferencia numéricamente en la Tabla de valores. Si  $\theta$  es igual a  $5^\circ$ , las pérdidas propuestas difieren de  $0.0036\text{ m}$  por debajo del resultado dado por Sotelo (1998) y USACE (1980) con  $Re = 20000$ , y con  $0.0024\text{ m}$  por encima de Sotelo (1998) y USACE (1980) cuando  $Re = 250000$ . Mientras tanto, cuando  $\theta$  es igual a  $90^\circ$  el método que se propone arroja pérdidas de  $0.0062\text{ m}$  más que CFE (1983) y  $0.002\text{ m}$  menos que los demás autores.

Por otra parte, para valores del ángulo  $\theta$  entre  $5^\circ$  y  $90^\circ$ , la intensidad de las pérdidas de energía son más dispares entre los autores y las pérdidas del método propuesto siguen valores medios entre ellos. La mayor discrepancia (con respecto a la curva propuesta) ocurre cuando el ángulo de deflexión es de  $40^\circ$  y corresponde a  $0.0158\text{ m}$  debajo de Sotelo (1998) y USACE (1980) con  $Re = 20000$ , y cuando  $\theta$  es igual a  $45^\circ$  se produce de  $0.0164\text{ m}$  por encima de Sotelo (1998) y USACE (1980) con  $Re = 250000$ .

En ésta aplicación de la ecuación propuesta (29), sus resultados nos dicen que puede ser confiable para su uso, porque las pérdidas de energía quedan dentro de lo sugerido por los autores que se tomaron en cuenta para su hallazgo. Aunque cabe mencionar que en esta comparación, las pérdidas de energía no es muy notoria y que puede ser por la velocidad utilizó.

### **V.1.1.2 Cambio de dirección gradual**

Para éste tipo de accesorio se trabajo en lo siguiente:

1. Primero se realizaron múltiples ensayos de ajuste de curvas con los valores propuestos para las 6 clasificaciones de  $K_{CG}$  ( $K_{CG1}$ ,  $K_{CG2}$ ,  $K_{CG3}$ ,  $K_{CG4}$ ,  $K_{CG5}$  y  $K_{CG6}$ ), donde se selecciono la curva que mejor se ajusta a todos casos (apéndice II.A). En la Figura siguiente se ilustra la curva ajustada a los valores de  $K_{CG1}$  y también se incluye la ecuación que la representa con una correlación de 0.99982.

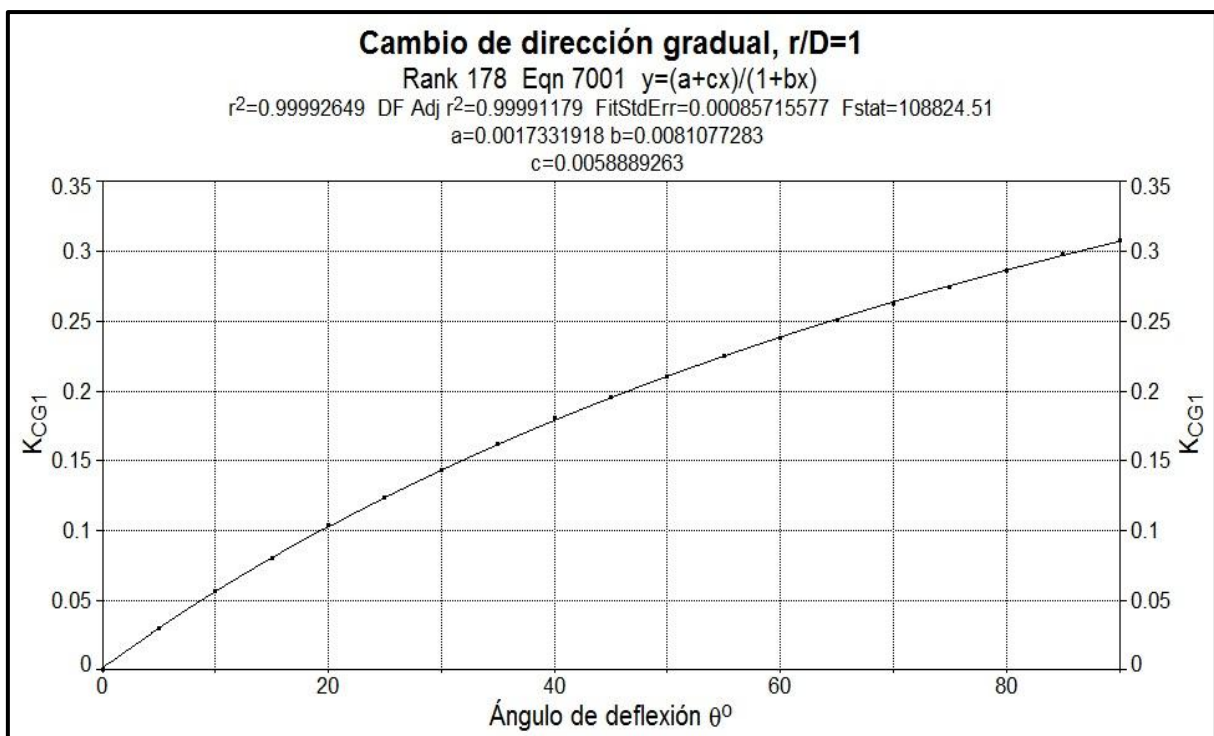


Figura 38. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{CG1}$

Al sustituir las variables reales, la ecuación para el coeficiente de esta pieza se escribe de la siguiente forma:

$$K_{CG} = \frac{(a+c\theta)}{(1+b\theta)} \quad (30)$$

Dónde:  $K_{CG}$  es el coeficiente de pérdidas para la relación  $r/D$ ;  $a$ ,  $b$  y  $c$  son constantes que varían con  $r/D$ ;  $\theta$  es el valor del ángulo de deflexión en grados.

2. En consecuencia de la variación en los valores para las constantes ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) en cada clasificación de coeficiente  $K_{CG}$ , en un segundo paso se encontró una curva que mejor se ajusta a cada una de ellas, con respecto a la relación  $r/D$  (apéndice II.A).

En la Figura siguiente se expone la curva ajustada a los valores de la constante “ $a$ ”, donde también está contenida la ecuación que determina su valor con una confiabilidad de 0.99949.

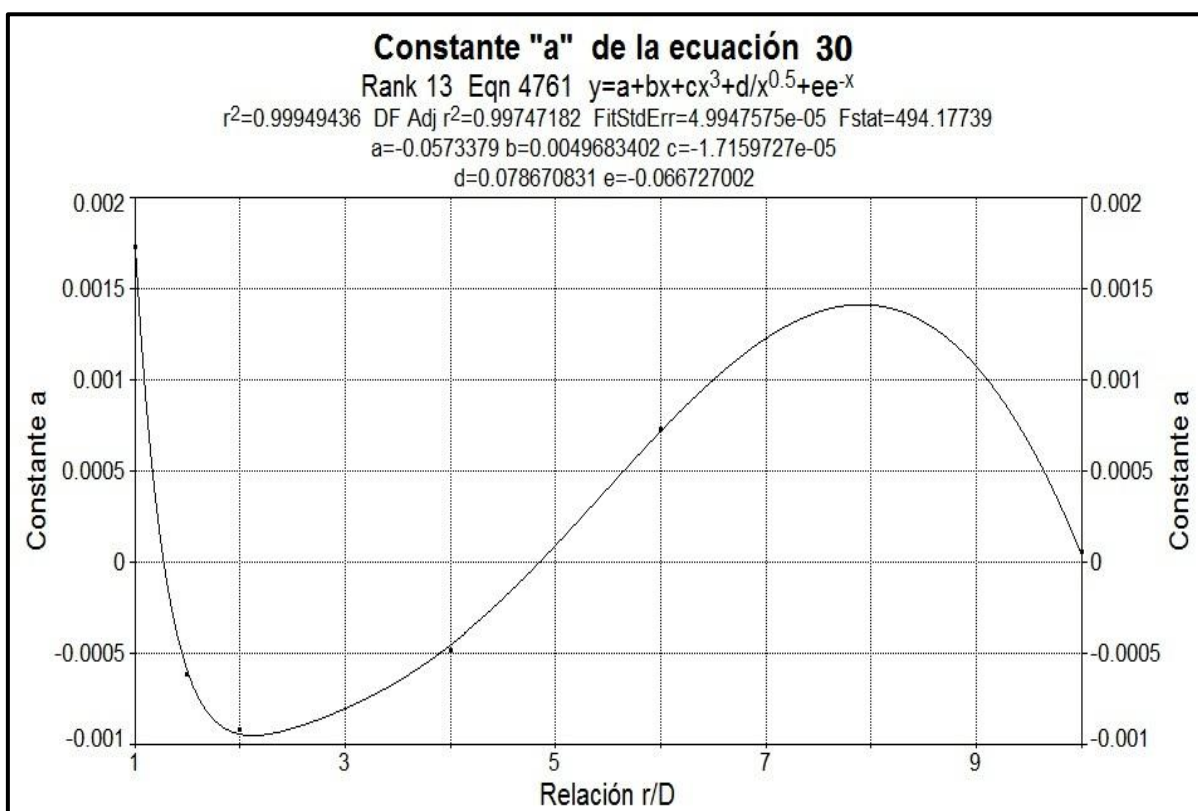


Figura 39. Curva de ajuste y ecuación para constante “ $a$ ” de la ecuación 30

De la misma manera se trabajó con los valores de la constante  $b$  y  $c$  de la ecuación 30 y el conjunto de las ecuaciones resultantes y correspondientes a cada una de ellas se presentan en la Tabla siguiente.

Tabla XXIII. Ecuaciones de las constantes contenidas en la ecuación 30

Constante primaria	Ecuación de la constante primaria	Constantes secundarias				
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
<i>a</i>	(31) $y = a + bx + cx^3 + d/x^{0.5} + ee^{-x}$	-0.05733790	0.00496834	-0.00001716	0.07867083	-0.06672700
<i>b</i>	(32) $y = a + bx + cx^{0.5} \ln x + d \ln x / x + e / x^2$	0.20495202	0.05446522	-0.08723377	-0.45002930	-0.25130468
<i>c</i>	(33) $y = a + bx + cx^2 + d \ln x + ee^{-x}$	-0.01383436	-0.01385106	0.00051449	0.04504019	0.08991395

\**x* es el valor de la relación *r/D*; *y* corresponde a cada constante primaria

3. Por último, al considerar las ecuaciones obtenidas para cada constante y las variables reales que intervienen para definir el coeficiente de pérdidas de éste accesorio, la ecuación 30 queda de la siguiente manera:

$$K_{CG} = \left\{ -0.0573379 + 0.00496834(r/D) - 0.00001716(r/D)^3 + \frac{0.07867083}{(r/D)^{0.5}} - \frac{0.066727}{e^{(r/D)}} \right\} +$$

$$-0.01383436 - 0.01385106rD + 0.00051449rD^2 + 0.04504019 \ln rD + 0.08991395erD\theta / 1 + 0.20495202 + 0.05446522rD - 0.08723377rD^{0.5} \ln rD + 0.04504019 + 0.08991395rD^{2\theta}$$

(30')

Dónde:  $K_{CG}$  es el coeficiente de pérdidas para un cambio de dirección gradual;  $r/D$  es la relación del radio de curvatura con respecto al diámetro del conducto;  $\theta$  es el ángulo de la deflexión en grados. Esta ecuación es válida si cumple con los siguientes intervalos:  $1 \leq r/D \leq 10$  y  $5 \leq \theta \leq 90$ .

Al emplear la ecuación anterior en conjunto con la ecuación 1, además de las metodologías que recomiendan los autores contemplados, se obtuvieron las pérdidas de energía que se contienen en la Tabla XXIV, donde se consideró una velocidad de 3 m/s antes de la curva, un valor de 6 para  $r/D$  y variaciones del ángulo de deflexión de 0 a 90 grados. El comportamiento de estos valores en el plano, se ilustran en la Figura 40.

Tabla XXIV. Pérdidas de energía (m) en un cambio de dirección gradual, cuando la velocidad antes de la curva es de 3 m/s y  $r/D$  igual a 6

Ángulo $\theta^\circ$	USACE (1980)	USBR (1985)	Sotelo (1998)	CFE (1983)	SARH (1984)	Propuesta
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0036	0.0031	0.0034	0.0115	0.0083	0.0059
10	0.0071	0.0063	0.0069	0.0184	0.0165	0.0110
15	0.0108	0.0094	0.0103	0.0248	0.0248	0.0158
20	0.0141	0.0122	0.0137	0.0292	0.0330	0.0203
25	0.0175	0.0148	0.0172	0.0351	0.0372	0.0245
30	0.0204	0.0172	0.0206	0.0402	0.0413	0.0284
35	0.0234	0.0194	0.0240	0.0447	0.0496	0.0321
40	0.0260	0.0214	0.0275	0.0493	0.0578	0.0356
45	0.0283	0.0233	0.0309	0.0539	0.0609	0.0389
50	0.0303	0.0248	0.0343	0.0581	0.0640	0.0420
55	0.0324	0.0263	0.0378	0.0626	0.0671	0.0450
60	0.0346	0.0277	0.0412	0.0661	0.0702	0.0478
65	0.0364	0.0289	0.0446	0.0702	0.0723	0.0504
70	0.0383	0.0300	0.0481	0.0746	0.0743	0.0530
75	0.0399	0.0310	0.0515	0.0785	0.0764	0.0553
80	0.0415	0.0319	0.0549	0.0826	0.0785	0.0576
85	0.0426	0.0328	0.0584	0.0872	0.0805	0.0598
90	0.0436	0.0337	0.0618	0.0918	0.0826	0.0619

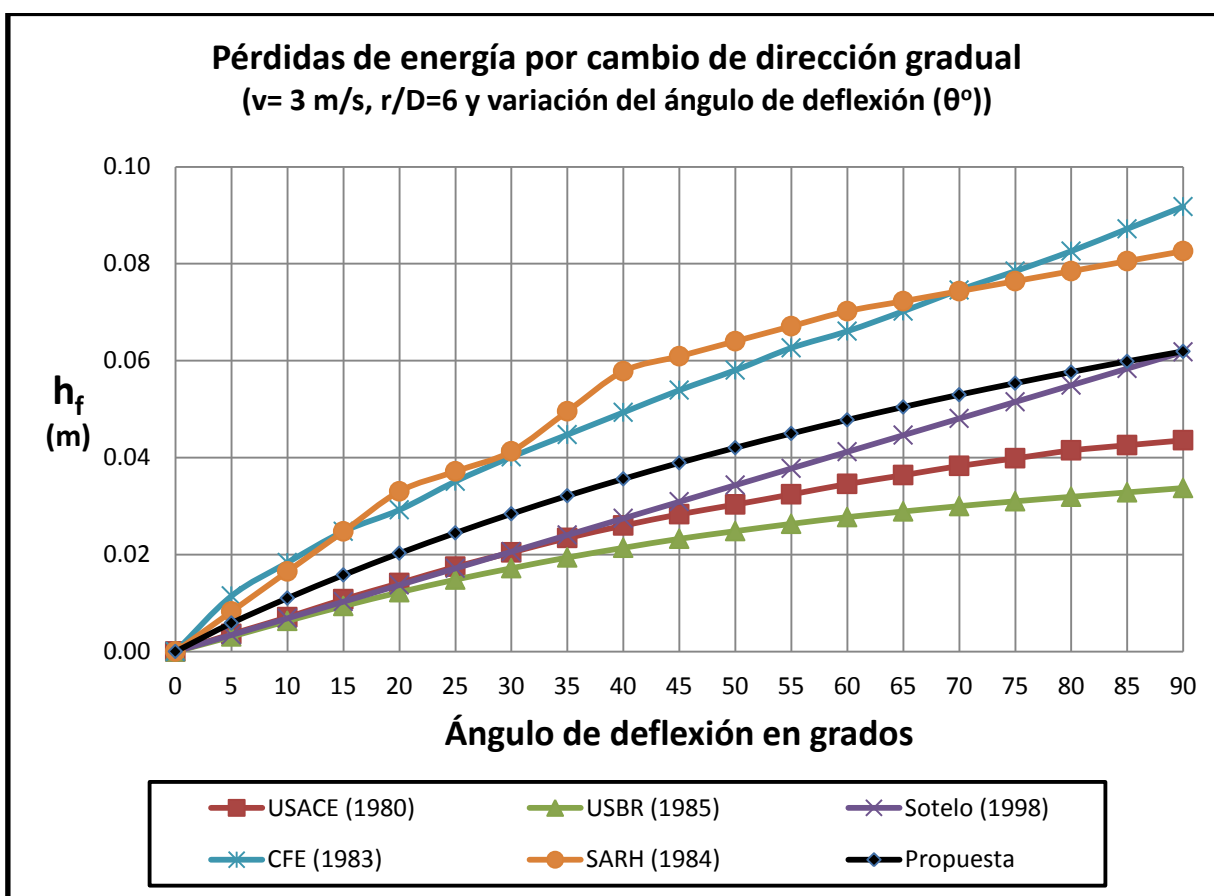


Figura 40. Pérdidas de energía en un cambio de dirección gradual

Las pérdidas de energía plasmadas en la Figura anterior, nos dan una idea de lo variante que pueden ser nuestros resultados al seleccionar una metodología u otra. La magnitud de éstas sigue un orden creciente a medida que aumenta en ángulo de la deflexión, de acuerdo con todos los autores. El USBR (1985) es el más conservador en este caso, mientras que CFE (1983) y SARH (1984) proveen de pérdidas más elevadas. Con números, SARH (1984) esta 0.0318 m por encima de USBR (1985) cuando esta  $\theta$  es de  $40^\circ$  y CFE (1983) con 0.0581m cuando el ángulo de deflexión es de 90 grados.

Por otra parte, Sotelo (1998) es el autor más mediano entre ellos cuando el ángulo de deflexión va de  $40^\circ$  a  $90^\circ$ . Sin embargo al considerar todas estas experiencias, la curva propuesta se apega a la media entre ellas, con 0.022 m por debajo de SARH (1984) y con 0.0156 m por encima de USBR (1985), esto cuando  $\theta$  es de 45 grados.

En base a lo anterior, el empleo de la ecuación 30' genera pérdidas confiables para este tipo de accesorio, ni muy pequeñas o elevadas como resulta con algunos autores. La ecuación propuesta puede verse poco práctica, pero no demerita su eficiencia y además se puede programar en hoja de cálculo u otro software.

### **V.1.1.3 Ampliación brusca del diámetro**

Con el uso de los valores propuestos para el coeficiente de pérdidas de éste dispositivo ( $K_{AB}$ ), se trabajó con curvas de ajuste, de las cuales se selecciono la postrada en la Figura siguiente, donde también se incluye la expresión numérica que la representa con una correlación de 0.999998.

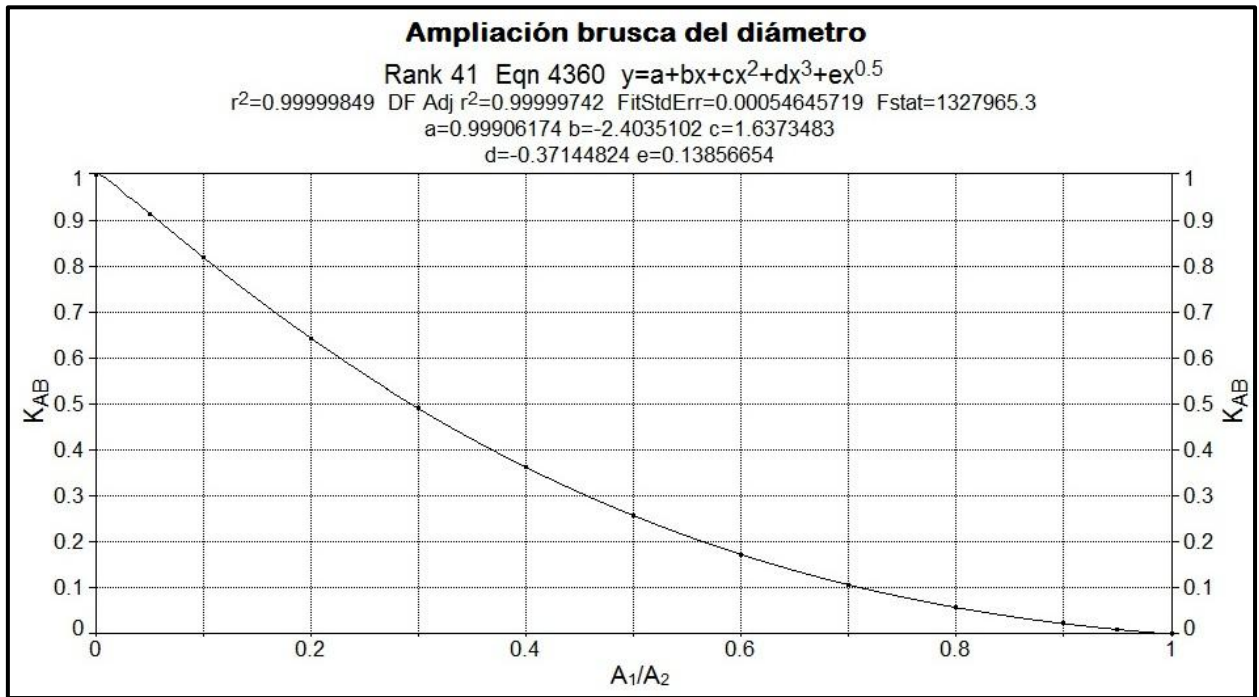


Figura 41. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{AB}$

Al contemplar las variables reales y el valor de las constantes, la ecuación para determinar el coeficiente de pérdidas de éste accesorio se escribe como sigue:

$$K_{AB} = 0.99906174 - 2.4035102 \left(\frac{A_1}{A_2}\right) + 1.6373483 \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 0.37144824 \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^3 + 0.13856654 \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^{0.5} \quad (34)$$

Dónde:  $K_{AB}$  es el coeficiente para una ampliación brusca;  $A_1/A_2$  es la relación del área menor con respecto al área ampliada. La ecuación *es válida* para valores de  $A_1/A_2$  de 0 a 1.

Después de utilizar las ecuaciones 1 y 34 y también las teorías de algunos autores para estimar las pérdidas de energía en esta pieza, se construyó la Tabla XXV, donde se indican los valores obtenidos y los parámetros considerados. De manera gráfica, ésta información se ilustra en la Figura 42.

Tabla XXV. Pérdidas de energía (m) en una ampliación brusca del diámetro, cuando la velocidad es de 2.75 m/s

$A_1/A_2$	CFE (1983)	Munson et al. (1998)	USACE (1980)	Trueba (1986)	Propuesta
0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.05	0.950	0.897	0.906	0.904	0.914
0.10	0.846	0.800	0.814	0.814	0.819
0.20	0.660	0.622	0.637	0.650	0.642
0.30	0.504	0.473	0.485	0.503	0.491
0.40	0.377	0.350	0.355	0.374	0.364
0.50	0.275	0.251	0.244	0.264	0.259
0.60	0.191	0.174	0.157	0.172	0.173
0.70	0.126	0.112	0.092	0.099	0.107
0.80	0.076	0.064	0.046	0.045	0.058
0.90	0.040	0.027	0.014	0.012	0.023
0.95	0.022	0.012	0.003	0.003	0.010
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

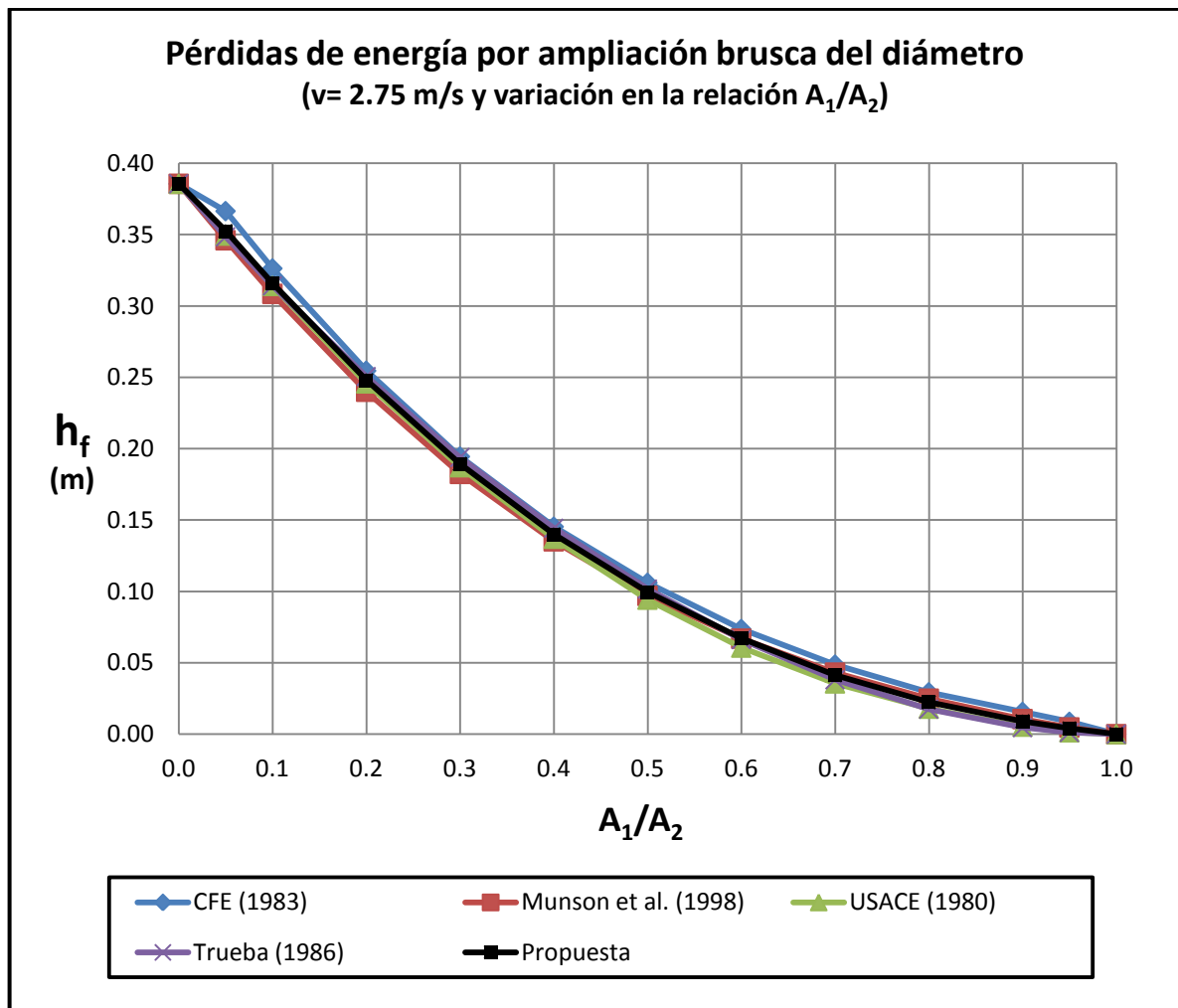


Figura 42. Pérdidas de energía en una ampliación brusca del diámetro

Los investigadores que se tomaron en consideración para obtener la ecuación de esta pieza, proveen metodologías que generan pérdidas de energía no muy dispersas entre sí, como se observa en las curvas de la Figura anterior. Por lo tanto, la curva propuesta que sigue una trayectoria media entre ellas, no demuestra mucha discrepancia con las más alejadas. Esto se puede asimilar mejor en la Tabla XXV, donde con una relación de áreas ( $A_1/A_2$ ) de 0.2, CFE (1983) está 0.018m por encima del valor propuesto, mientras que Munson et al. (1998) está 0.02 m por debajo del mismo. Y cuando  $A_1/A_2$  es de 0.8, CFE (1983) también está 0.018m arriba, pero Trueba quien da el valor más bajo, es inferior 0.013m a lo que se propone.

Entonces podemos intuir que la ecuación 34 aplicada con la ecuación 1, provee resultados satisfactorios para su finalidad, de una manera rápida, donde se toma en consideración el conjunto de metodologías citadas.

#### **V.1.1.4 Ampliación gradual del diámetro**

Para éste accesorio se trabajo en lo sucesivo:

1. De inicio, se ensayaron múltiples curvas de ajuste con los valores propuestos para las clasificaciones del coeficiente  $K_{AG}$  ( $K_{AG1}$ ,  $K_{AG2}$ ,  $K_{AG3}$ ,  $K_{AG4}$ ,  $K_{AG5}$ ,  $K_{AG6}$ ,  $K_{AG7}$  y  $K_{AG8}$ ) y en el proceso se encontró la curva que mejor se ajusta a todos los casos (apéndice II.B).

En la Figura 43 se presenta la curva ajustada a los valores de  $K_{AG1}$  y también la ecuación que determina su valor con una fiabilidad de 0.9974. Para las clasificaciones restantes, ésta curva se ajusta con una correlación distinta, lo que produce valores diferentes en las constantes de la expresión numérica que las representa. Ésta ecuación se denota como sigue:

$$K_{AG} = a + \frac{b}{x} + \frac{c}{x^2} + \frac{d}{x^3} \quad (35)$$

Dónde:  $K_{AG}$  es el coeficiente de pérdidas de la ampliación gradual;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  son constantes que varían con el ángulo de la ampliación ( $\theta^\circ$ );  $x$  es el valor la relación  $d_2/d_1$ .

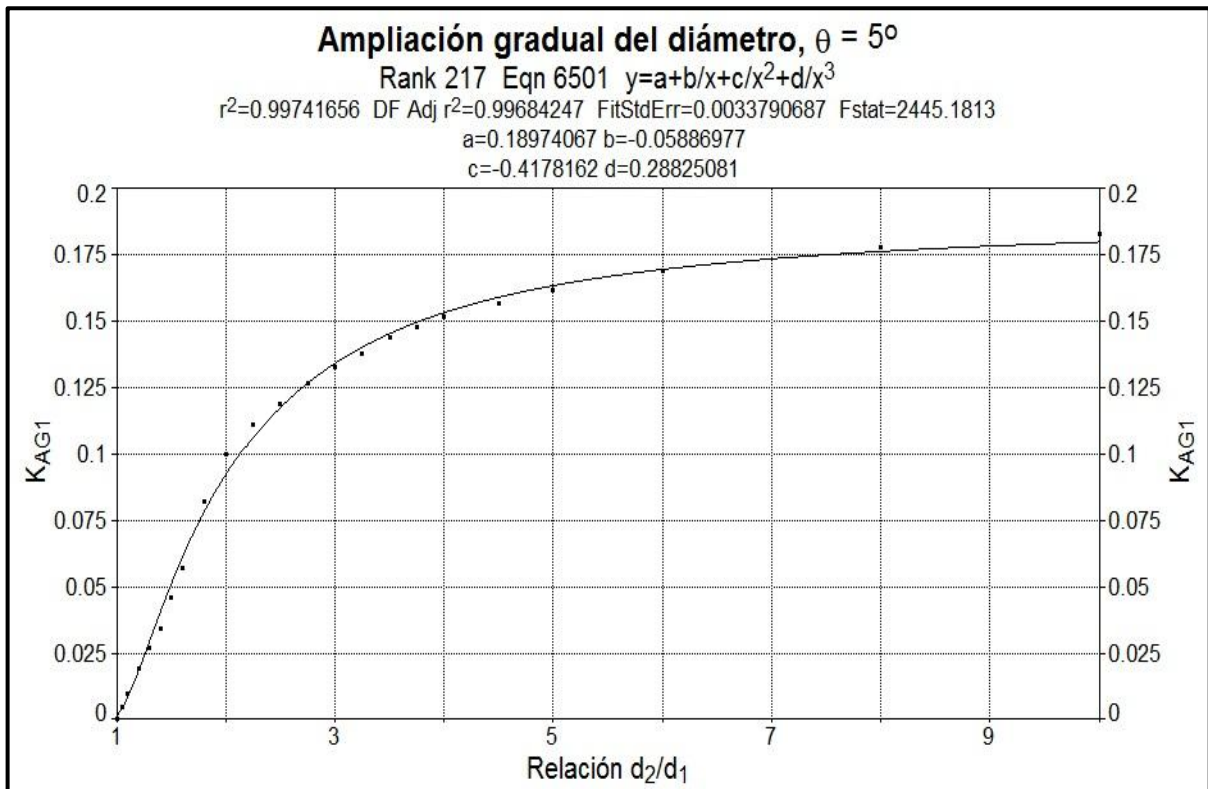


Figura 43. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{AG1}$

- Un segundo trabajo se realizó para obtener una curva de ajuste para la constante  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  de la ecuación anterior, a consecuencia que son diferentes sus valores conforme varía el ángulo de la ampliación ( $\theta$ ) (apéndice II.B)

En la Figura 44 se ilustra la curva ajustada a los valores de la constante  $a$  y la ecuación que sirve para encontrar su valor, según sea la magnitud del ángulo  $\theta$ . Información similar se obtuvo para las demás constantes y el conjunto de ecuaciones resultantes se contienen en la Tabla XXVI.

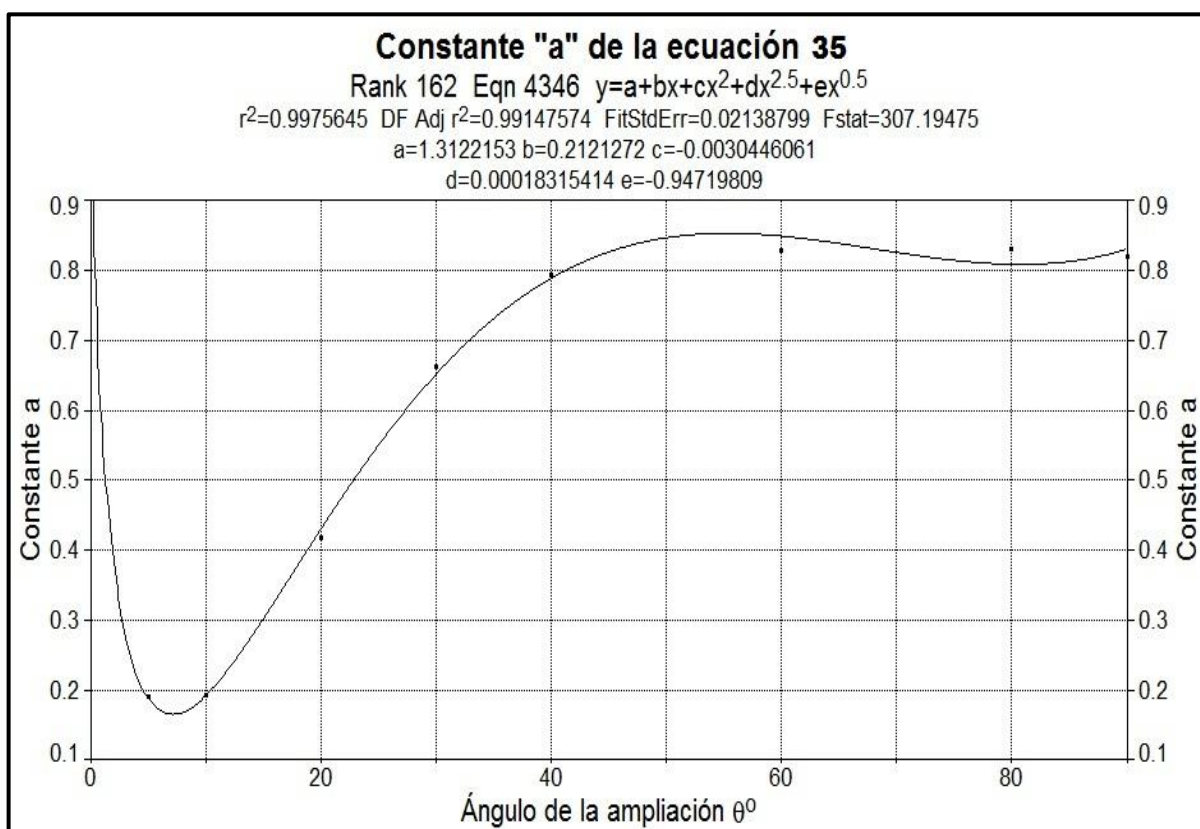


Figura 44. Curva de ajuste y ecuación para la constante "a" de la ecuación 35

Tabla XXVI. Ecuaciones de las constantes contenidas en la ecuación 35

Constantes primarias	Ecuación de la constante primaria	Constantes secundarias				
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>E</i>
<i>a</i>	(36) $y = a+bx+cx^2+dx^{2.5}+ex^{0.5}$	1.31221530	0.21212720	-0.00304461	0.00018315	-0.94719809
<i>b</i>	(37) $y = a+bx+cx^2+dx^{2.5}+ex^{0.5}$	-0.92042755	-0.12629261	0.00233113	-0.00015997	0.64549086
<i>c</i>	(38) $y = a+bx+cx^2+dx^{2.5}+ex^{0.5}$	-1.91863640	-0.34315859	0.00466959	-0.00026776	1.39516460
<i>d</i>	(39) $y = a+bx+cx^2+dx^{2.5}+ex^{0.5}$	1.51712240	0.25534820	-0.00392553	0.00024268	-1.08444060

\**x* es el valor del ángulo de la ampliación ( $\theta^\circ$ ); y corresponde a cada constante primaria

- Por último, tras considerar las ecuaciones de las constantes y las variables reales en la ecuación 35, la ecuación que determina el coeficiente de pérdidas propuesto para una ampliación gradual, se escribe de la siguiente manera:

$K_{AG} =$

$$\begin{aligned}
 & [1.31221530 + 0.21212720(\theta^\circ) - 0.00304461(\theta^\circ)^2 + 0.00018315(\theta^\circ)^{2.5} - 0.94719809(\theta^\circ)^{0.5}] + \\
 & [-0.92042755 - 0.12629261(\theta^\circ) + 0.00233113(\theta^\circ)^2 - 0.00015997(\theta^\circ)^{2.5} + 0.64549086(\theta^\circ)^{0.5} / \left(\frac{d_2}{d_1}\right)] + \\
 & [-1.91863640 - 0.34315859(\theta^\circ) + 0.00466959(\theta^\circ)^2 - 0.00026776(\theta^\circ)^{2.5} + 1.39516460(\theta^\circ)^{0.5} / \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2] + \\
 & [1.51712240 + 0.25534820(\theta^\circ) - 0.00392553(\theta^\circ)^2 + 0.00024268(\theta^\circ)^{2.5} - 1.08444060(\theta^\circ)^{0.5} / \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^3]
 \end{aligned}
 \tag{35'}$$

Dónde:  $K_{AG}$  es el coeficiente de pérdidas para una ampliación gradual del diámetro;  $\theta^\circ$  es el ángulo de la ampliación;  $d_2/d_1$  es la relación del diámetro mayor con respecto al menor. Esta ecuación *es válida* si cumple lo siguiente:  $1 \leq d_2/d_1 \leq 10$  y  $5 \leq \theta^\circ \leq 90$ .

En la Tabla XXVII se exponen valores de pérdidas de energía que fueron determinados a través de la ecuación 1 y 35' y mediante los métodos sugeridos por los autores ahí indicados. Para esto, se consideró una velocidad de 2.9 m/s y un ángulo de la ampliación de 30 grados, para varios valores de  $d_2/d_1$ . De forma gráfica, el comportamiento de éstos valores se ilustran en la Figura 45.

Al observar los resultados de la Figura 45, cuando  $d_2/d_1$  va de 1 a 1.6, la mayoría de los autores proporcionan pérdidas de energía similares, excepto King et al. (1981). Bajo la teoría de éste autor, se obtienen los valores más elevados hasta cuando la relación de diámetros asciende a 2. Al comparar con los valores dados por método de Sabersky et al. (1999) (quien da las pérdidas más bajas), está por encima con 0.074 m, cuando  $d_2/d_1$  toma el valor de 1.5. Sin embargo, a partir 2.75 en la relación de diámetros, King et al. (1981) sugiere las pérdidas más bajas entre todas metodologías estudiadas.

Tabla XXVII. Pérdidas de energía (m) en una ampliación gradual del diámetro, cuando la velocidad es de 2.9 m/s y el ángulo  $\theta$  es de  $30^\circ$

$d_2/d_1$	Sotelo (1998)	Mataix (2010)	White (2008)	King et al. (1981)	Sabersky et al. (1999)	Propuesta
1.05	0.003	0.003	---	0.037	0.003	0.011
1.10	0.009	0.010	---	0.067	0.009	0.024
1.20	0.029	0.032	---	0.109	0.029	0.048
1.30	0.052	0.058	---	0.137	0.051	0.071
1.40	0.075	0.083	---	0.155	0.074	0.092
1.50	0.096	0.107	---	0.169	0.095	0.111
1.60	0.114	0.129	---	0.178	0.114	0.127
1.80	0.145	0.166	0.148	0.190	0.147	0.154
2.00	0.168	0.195	0.173	0.197	0.173	0.175
2.25	0.189	0.224	0.199	0.202	0.198	0.196
2.50	0.203	0.245	0.218	0.205	0.217	0.211
2.75	0.212	0.262	0.233	0.206	0.231	0.223
3.00	0.218	0.274	0.245	0.208	0.243	0.232
3.25	0.226	0.285	0.254	0.208	0.252	0.240
3.50	0.232	0.293	0.262	0.209	0.259	0.246
3.75	0.238	0.300	0.268	0.209	0.265	0.250
4.00	0.242	0.305	0.273	0.209	0.270	0.254
4.50	0.249	0.314	0.280	0.210	0.277	0.260
5.00	0.254	0.320	0.286	0.210	0.283	0.265
6.00	0.260	0.328	0.293	0.210	0.290	0.271
8.00	0.267	0.337	0.302	0.210	0.298	0.276
10.00	0.270	0.340	0.307	0.210	0.301	0.278

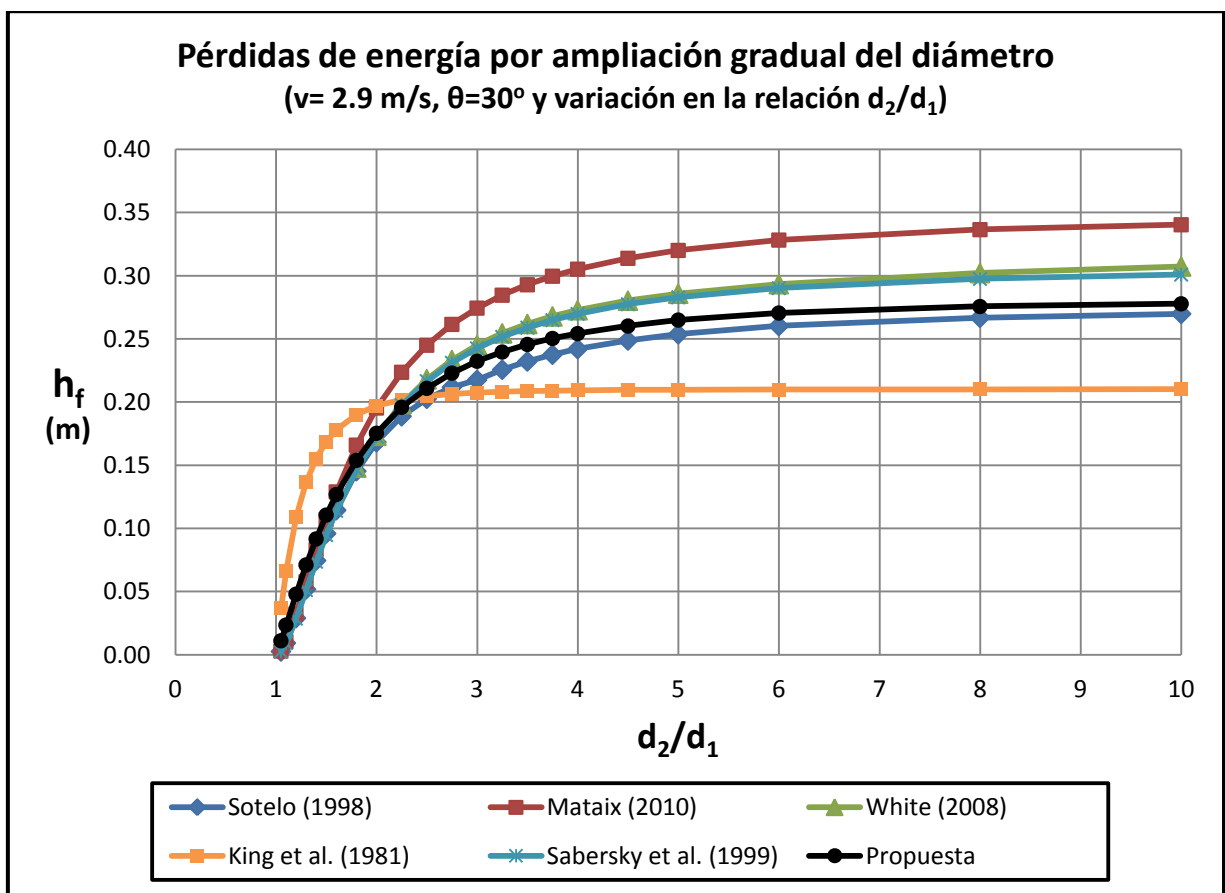


Figura 45. Pérdidas de energía en una ampliación gradual del diámetro

Por otra parte, si la relación de diámetros es mayor a 1.6, aumenta la discrepancia entre un autor y otro. Si la relación  $d_2/d_1$  es igual a 5, Mataix (2010) sugiere 0.11m más que King et al. (1981) en las pérdidas que se originan y cuando  $d_2/d_1$  es de 10, se eleva a 0.13m las diferencia entre los dos autores. En contraste con el valor resultante del método propuesto, Mataix (2010) solo tiene una diferencia mayor de 0.055m para la primera relación  $d_2/d_1$ ; y para la segunda, la discrepancia solo crece a 0.062m.

Por lo tanto, se puede asumir que la expresión que se propone para calcular las pérdidas de energía en el accesorio en cuestión, es confiable para su objetivo. Lo avalan los resultados presentados en la figura anterior, donde la curva adquiere una similitud a los valores medios entre los autores considerados y además, ninguno de ellos recomienda una opción de cálculo con las características del presente trabajo.

### V.1.1.5 Reducción brusca del diámetro

Con la utilidad de los valores propuestos para el coeficiente de pérdidas de éste dispositivo ( $K_{RB}$ ), se trabajó con una variedad de curvas de ajuste, donde la elegida se ilustra en la Figura 46. También se incluye la ecuación que la representa en forma numérica, con una correlación de 0.99995. Al considerar el valor de las constantes y las variables reales, el coeficiente propuesto se determina con la formulación siguiente:

$$K_{RB} = 0.50926435 - 0.28767429 \left(\frac{A_2}{A_1}\right) - 1.4840581 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{2.5} + 1.2643591 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^3 \quad (40)$$

Dónde:  $K_{RB}$  es el coeficiente de pérdidas para una reducción brusca del diámetro;  $A_2/A_1$  es la relación del área menor con respecto a la mayor. La ecuación *es válida* para una relación de áreas de 0 a 1.

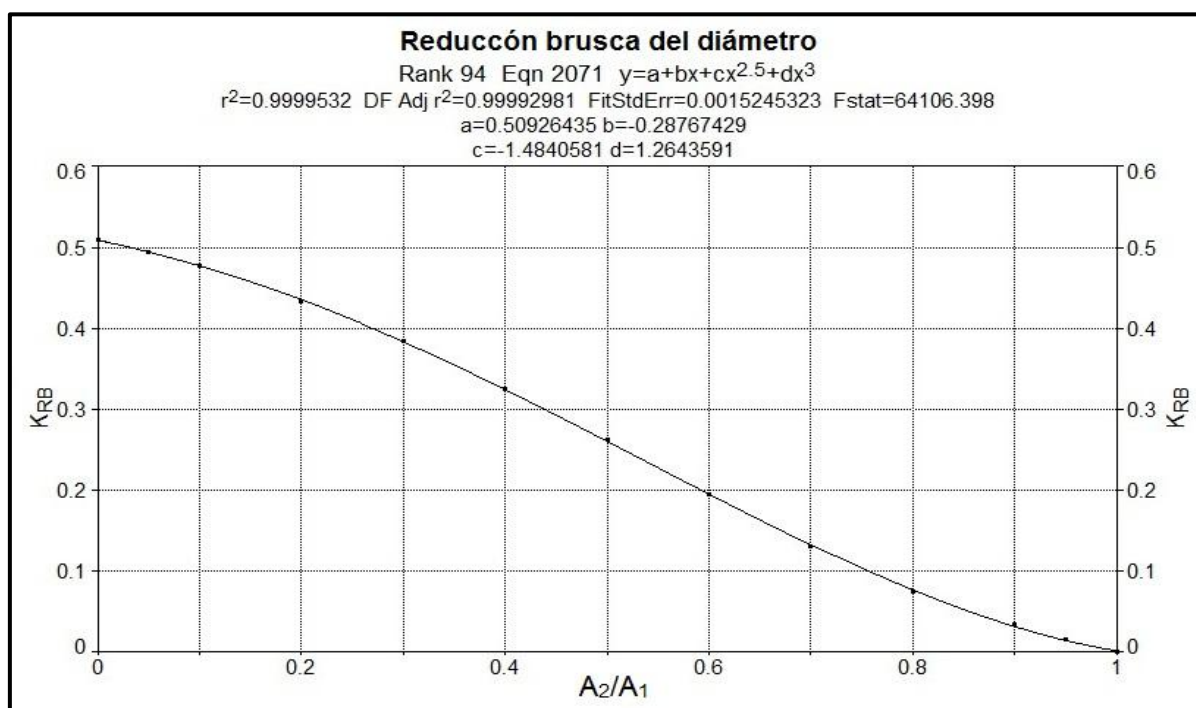


Figura 46. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{RB}$

Al tomar en cuenta una velocidad de 2.8 m/s y variaciones en la relación de áreas ( $A_2/A_1$ ) de 0 a 1, la ecuación propuesta para el coeficiente  $K_{RB}$  aplicada en la 1, produce los datos postrados en la Tabla XXVIII, donde también se incluyen los valores obtenidos por medio de las metodologías tratadas para éste dispositivo. La trayectoria en el plano que sigue el conjunto de resultados, se expone en la Figura 47.

De forma gráfica se puede contemplar mejor la diferencia entre las pérdidas generadas con una metodología y otra, donde los resultados de Cengel et al. (2006) y Munson et al. (1998) son los más similares entre sí.

Por otro lado, se observa que la mayoría de los métodos (incluyendo el propuesto) se acercan a 0.2 m (en las pérdidas) cuando la relación  $A_2/A_1$  es igual a cero, excepto, el de CFE (1983) que resulto de 0.248 m.

Tabla XXVIII. Pérdidas de energía (m) en una reducción brusca del diámetro, cuando la velocidad es de 2.8 m/s

$A_2/A_1$	Sotelo 1998	CFE 1983	Cengel et al. 2006	Brater et al. 1996	Munson et al. 1998	USACE 1980	Daugherty et al. 1965	Propuesta
0.00	0.200	0.248	0.200	0.196	0.199	0.200	0.200	0.203
0.05	0.196	0.241	0.197	0.186	0.197	0.198	0.168	0.197
0.10	0.189	0.234	0.192	0.179	0.191	0.194	0.153	0.191
0.20	0.170	0.217	0.173	0.162	0.175	0.181	0.136	0.174
0.30	0.153	0.199	0.148	0.136	0.152	0.163	0.123	0.154
0.40	0.136	0.178	0.121	0.103	0.125	0.142	0.108	0.130
0.50	0.119	0.151	0.094	0.071	0.097	0.115	0.088	0.104
0.60	0.102	0.117	0.070	0.044	0.067	0.083	0.066	0.078
0.70	0.083	0.072	0.049	0.027	0.042	0.049	0.044	0.053
0.80	0.060	0.034	0.030	0.018	0.020	0.023	0.027	0.031
0.90	0.032	0.014	0.014	0.011	0.006	0.006	0.014	0.013
0.95	0.015	0.007	0.006	0.006	0.001	0.001	0.007	0.006
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

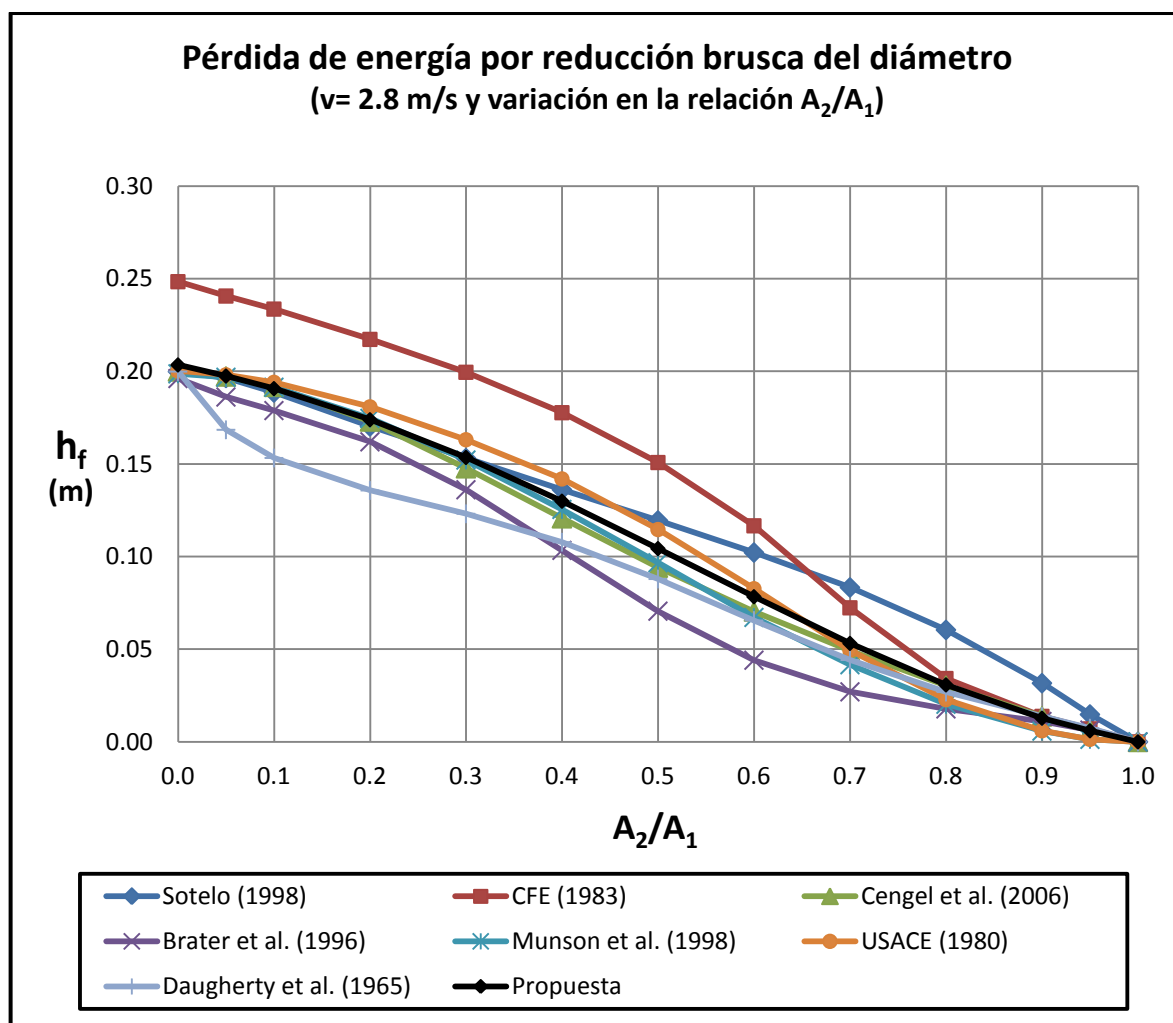


Figura 47. Pérdidas de energía en una reducción brusca del diámetro

Por otra parte, existe gran discrepancia de pérdidas de energía entre algunos autores, con respecto a una misma relación de áreas. Cuando  $A_2/A_1$  toma el valor de 0.2, CFE (1983) proporciona 0.081m más de pérdidas que Daugherty et al. (1965), y cuando la relación de áreas es de 0.6, Brater et al (1996) sugiere 0.073 metros menos que CFE (1983). Sin embargo, para la primera relación de áreas CFE (1983) está 0.043m arriba *del valor propuesto* y para la segunda, *la pérdida propuesta* está 0.039m debajo de la estimada con ese autor.

En acuerdo con lo tratado, se puede asimilar la eficacia que representa utilizar de la ecuación 40 en conjunción con la número 1, para determinar las pérdidas de energía en el accesorio en cuestión. A pesar de la incongruencia en los resultados obtenidos por diferentes metodologías, la curva de valores generados con la formulación propuesta tiende a mediar entre ellos, lo que refleja confianza para su uso.

### **V.1.1.6 Reducción gradual del diámetro**

En lo trabajado con éste dispositivo se acató lo que sigue:

1. Mediante el empleo de los valores propuestos para las 10 clasificaciones en que se dividió el coeficiente  $K_{RG}$ , se probaron múltiples curvas para encontrar la que mejor se ajusta a todas éstas clasificaciones (apéndice II.C).

En la Figura 48, se expone la curva ajustada a los valores de  $K_{RG1}$ , así como también la expresión que determina su valor con una correlación de 0.9991.

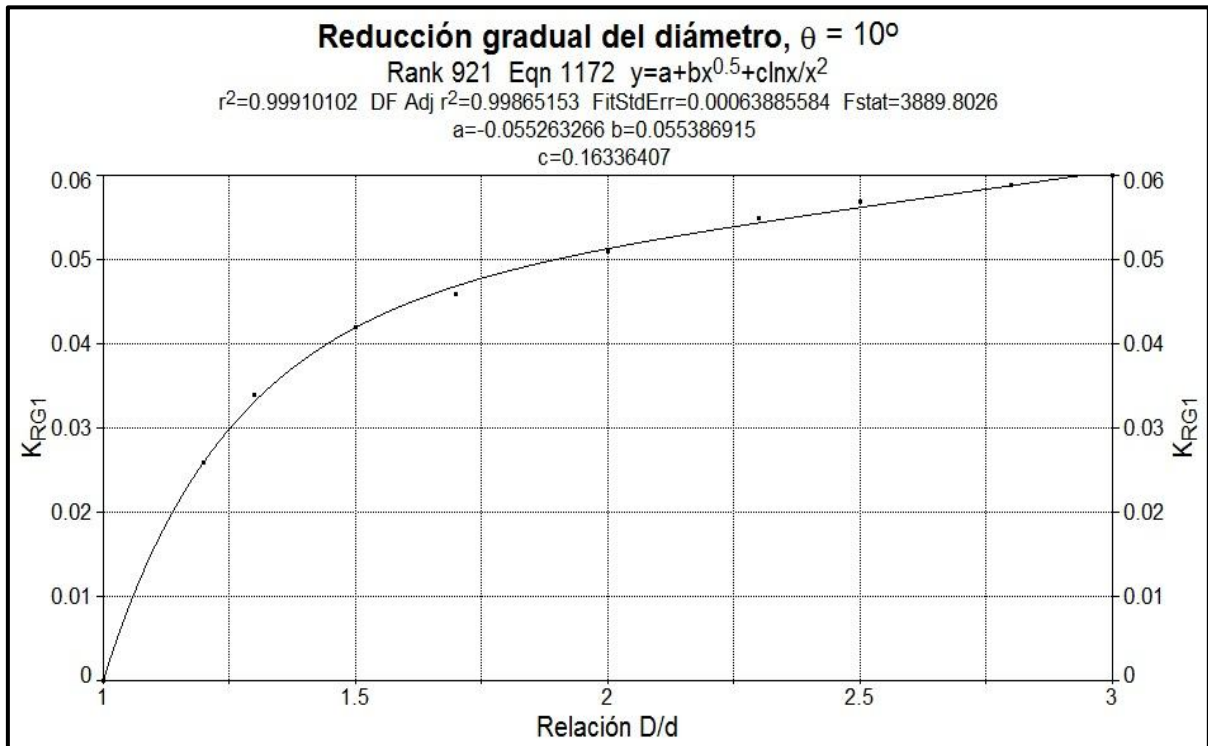


Figura 48. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{RG1}$

De la misma forma se ajustó ésta curva a los valores de las otras nueve clasificaciones, donde difiere el valor de las constantes ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) que contiene su ecuación y en consecuencia la fiabilidad con que se determina el coeficiente. Entonces la formulación que representa al conjunto de clasificaciones de  $K_{RG}$  es la siguiente:

$$K_{RG} = a + bx^{0.5} + c\ln x/x^2 \quad (41)$$

Dónde:  $K_{RG}$  es el coeficiente de pérdidas de la reducción gradual;  $x$  es el valor de la relación  $D/d$ ;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  son constantes que depende del ángulo de la reducción ( $\theta^\circ$ ).

2. A causa que la constante  $a$ ,  $b$  y  $c$  varían de acuerdo a la magnitud del ángulo  $\theta$ , se encontró una curva de ajuste para los valores de cada una de ellas (apéndice II.C). En la Figura siguiente se presenta la curva ajustada para la constante  $a$  de la ecuación 41 y también la ecuación que determina su valor.

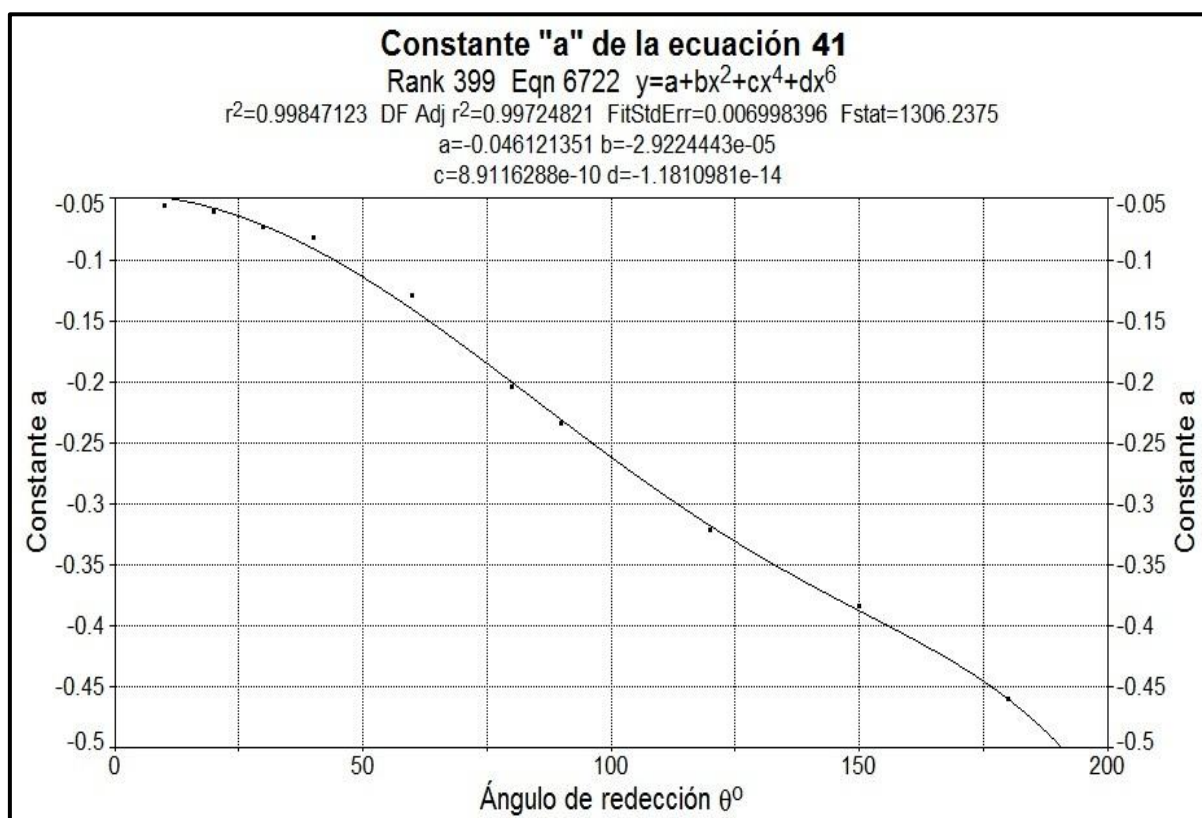


Figura 49. Curva de ajuste y ecuación para la constante “a” de la ecuación 41

Información similar se recabó para cada constante y la ecuación de la curva ajustada a los valores de cada una de éstas, se muestra en la siguiente Tabla.

Tabla XXIX. Ecuaciones de las constantes contenidas en la ecuación 41

Constantes primarias	Ecuación de la constante	Constantes secundarias			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
<b><i>a</i></b>	(42) $y=a+bx^2+cx^4+dx^6$	-0.046121351	-0.000029224	8.9116E-10	-1.1811E-14
<b><i>b</i></b>	(43) $y=a+bx^2+cx^4+dx^6$	0.046264338	0.000029251	-9.2469E-10	1.2761E-14
<b><i>c</i></b>	(44) $y=a+bx^2+cx^4+dx^6$	0.1503115	0.000064686	-7.7480E-10	-7.2780E-15

\**x* es el valor del ángulo de la reducción ( $\theta^\circ$ ); y corresponde a cada constante primaria

- En un último paso, al considerar las ecuaciones obtenidas para las constantes y las variables reales que rigen al coeficiente de éste accesorio, la ecuación 41 toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
K_{RG} = & [-0.046121351 - 0.000029224(\theta^\circ)^2 + (8.9116E - 10)(\theta^\circ)^4 - (1.1811E - 14)(\theta^\circ)^6] + \\
& [0.046264338 + 0.000029251(\theta^\circ)^2 - (9.2469E - 10)(\theta^\circ)^4 + (1.2761E - 14)(\theta^\circ)^6] \left(\frac{D}{d}\right)^{0.5} + \\
& [0.1503115 + 0.000064686(\theta^\circ)^2 - (7.7480E - 10)(\theta^\circ)^4 - (7.2780E - 15)(\theta^\circ)^6] \left[\ln\left(\frac{D}{d}\right)\right] / \left(\frac{D}{d}\right)^2
\end{aligned}
\tag{41'}$$

Dónde:  $K_{RG}$  es el coeficiente de pérdidas de la reducción gradual del diámetro;  $\theta^\circ$  es el ángulo de la reducción;  $D/d$  es la relación del diámetro mayor con respecto al menor. La ecuación es validada si cumple con los siguientes intervalos:  $1 \leq D/d \leq 3$  y  $10 \leq \theta^\circ \leq 180$ .

Después de utilizar las ecuaciones 1 y 41', además de los métodos trabajados para éste dispositivo, se obtuvieron los valores de pérdidas de energía embebidos en la Tabla XXX, donde se considero una velocidad de 3.2 m/s, un ángulo de reducción de  $30^\circ$  y variaciones en la relación  $D/d$ . En el plano, el comportamiento de éste conjunto de los resultados se visualiza en la Figura 50.

Tabla XXX. Pérdidas de energía (m) en una reducción gradual del diámetro, cuando la velocidad es de 3.2 m/s y el ángulo reductor de  $30^\circ$

D/d	Mataix 2010	Mott 2006	Fox 2006	USACE 1980	Propuesta
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.091	0.042	0.031	0.048	0.052
1.30	0.102	0.057	0.047	0.056	0.066
1.50	0.119	0.073	0.068	0.071	0.085
1.70	0.133	0.081	0.077	0.094	0.095
2.00	0.150	0.089	0.089	0.127	0.105
2.30	0.163	0.095	0.092	---	0.112
2.50	0.169	0.097	0.094	---	0.116
2.80	0.174	0.098	0.097	---	0.122
3.00	0.176	0.098	0.099	---	0.126

\* $D/d$  es la relación del diámetro mayor con respecto al menor

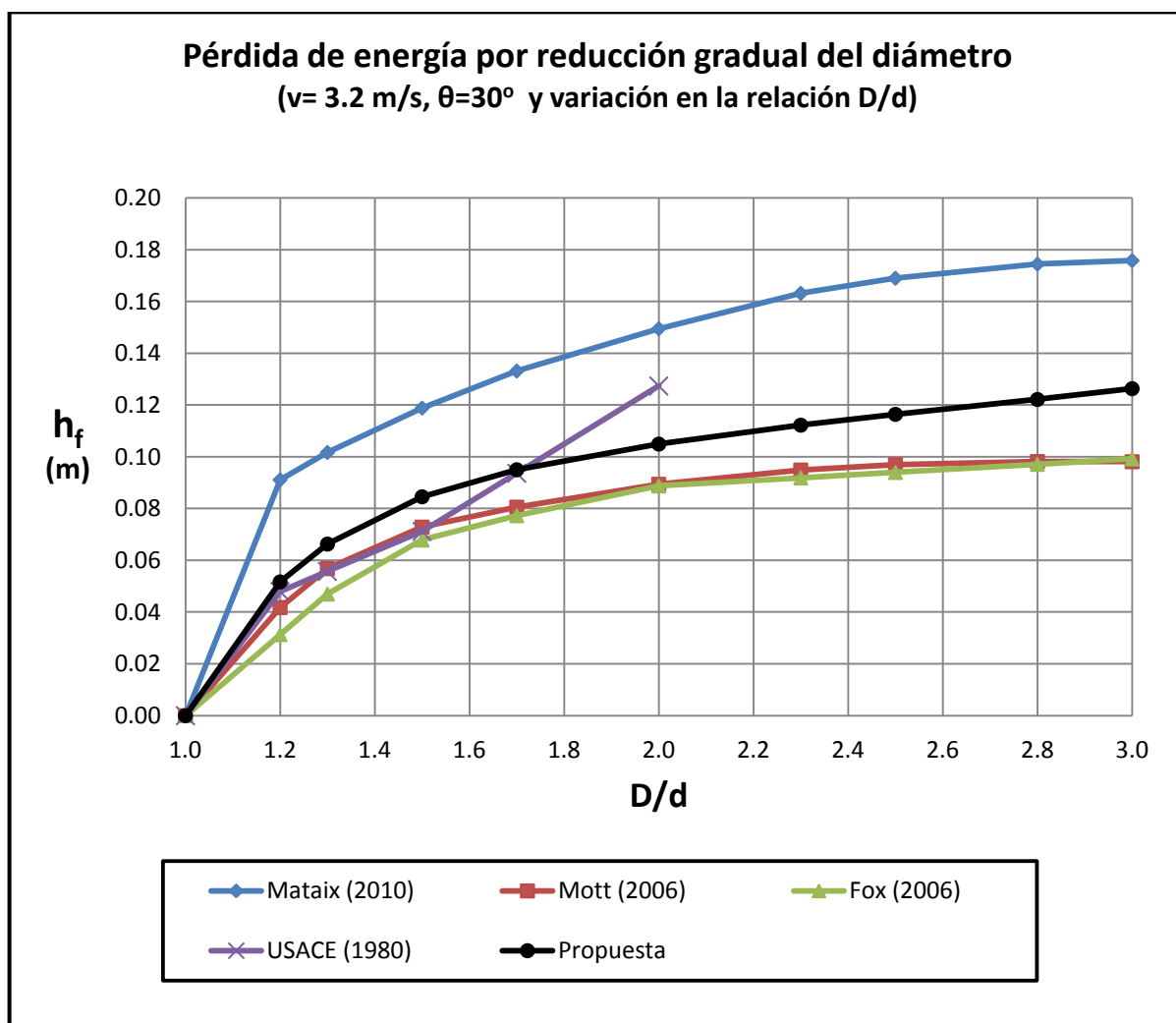


Figura 50. Pérdidas de energía en una reducción gradual del diámetro

La Figura anterior refleja la distribución de las pérdidas de energía estimadas con diferentes métodos, donde los valores ilustrados son crecientes a medida que aumenta la relación  $D/d$ . Podemos observar, que las teorías de Fox (2006) y Mott (2006) proveen pérdidas de energía muy similares para ciertas relaciones de  $D/d$ . Si la relación de diámetros toma el valor de 2, los dos autores proporcionan el valor de 0.089m y cuando ésta relación es de 3, Fox (2006) sugiere 0.001m más de pérdidas que Mott (2006).

Por otra parte, Mataix (2010) recomienda los valores de pérdidas de energía más altos para cualquier relación de diámetros distinta a 1. Si  $D/d$  es de 2, Mataix (2010) está 0.061m arriba de Fox (2006) y Mott (2006), y cuando ésta relación aumenta a 3, Mott (quien está más bajo)

sugiere 0.078 m menos que Mataix. Sin embargo, para la primera relación de diámetros, la curva de valores propuestos se sitúa 0.045m debajo de Mataix y para la segunda relación, éste autor demanda 0.05m más que lo propuesto.

De acuerdo a la exposición de resultados y lo dicho en los párrafos anteriores, los valores dados por Mataix (2010) incurren a que la curva de valores propuestos se desplace por encima de Fox (2006) y Mataix (2006), pero en ocasiones se acerque a lo sugerido por USACE (1980). Aquí se percata que la ecuación propuesta (41') contribuye a generar pérdidas de energía dentro del marco que generan los métodos existentes, lo que valida su ejecución con alta confianza.

### **V.1.2 ALGORITMO**

Con la utilidad de la ecuación 1 y las expresiones definidas en éste trabajo para estimar el coeficiente  $K$  de los accesorios estudiados, se propone el algoritmo presentado en la Figura 51 para ser utilizado en programas de cómputo y obtener información rápida de las pérdidas de energía que se producen en estos dispositivos.

En el algoritmo propuesto en esta investigación, se visualiza claramente la trayectoria a seguir para la ejecución de la ecuación general (ecuación 1), donde forman parte del proceso las ecuaciones encontradas para determinar el coeficiente de pérdidas ( $K$ ) de los accesorios estudiados. Ésta herramienta es única en el ramo y su empleo en un paquete computacional generará información temprana de las pérdidas de energía, sin necesidad de explorar los documentos que existen y que fueron contemplados para este fin, con resultados apegados a la media de lo que en ellos se sugiere.

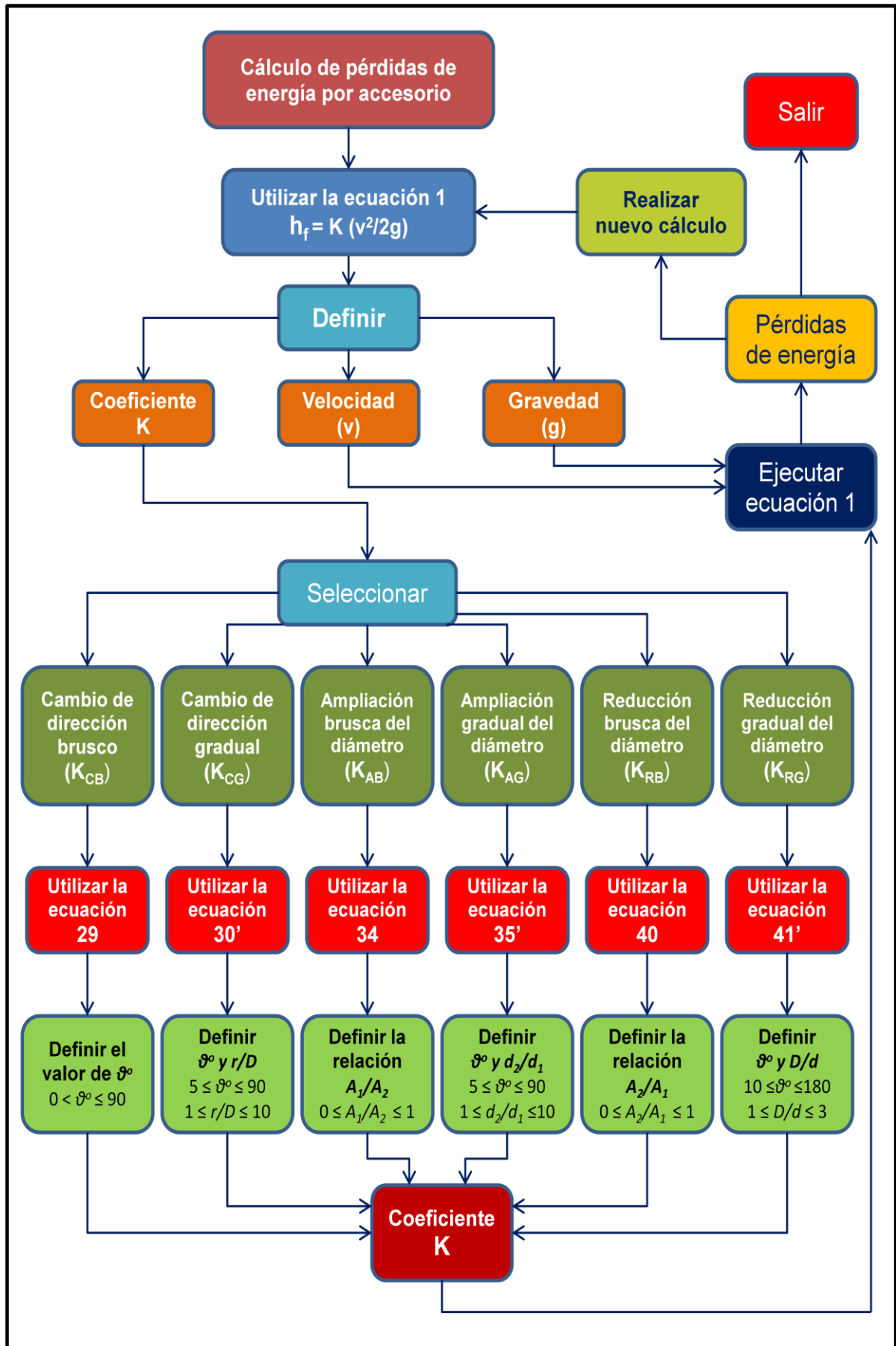


Figura 51. Algoritmo propuesto para calcular pérdidas por accesorios

## V.2 DISCUSIÓN

- ❖ A partir de la información presentada (tablas, figuras y ecuaciones) sugerida por los investigadores citados en el presente trabajo, se contrastó, analizó, uniformizó y procesó, a tal grado de obtener *una expresión numérica para cada caso estudiado*, que determina su coeficiente de pérdidas ( $K$ ). Éstas ecuaciones aplicadas en la ecuación 1, reflejaron efectividad y confianza para su uso en los resultados mostrados en la Figura 37, 40, 42, 45, 47, y 50 donde los valores generados para cada accesorio tienden a mediar entre las diversas teorías que les dieron fruto.
  
- ❖ *El algoritmo* de diseño ilustrado en la Figura 51, es el aporte más innovador de este trabajo de tesis, al contener implícitas entre sus ecuaciones, 29 valiosas teorías que fueron contrastadas y agrupadas y que son consideradas para obtener resultados con una tendencia a sus valores medios, de una forma rápida y segura.
  
- ❖ En la práctica las conducciones bajo régimen forzado requieren hacer cambios en la dirección del flujo, así como ampliar o reducir el diámetro del conducto, lo que implica que en el diseño o revisión de estas obras se requiera la consulta de distintos manuales o documentos para estimar las pérdidas que originan estas partes y obtener el diseño hidráulico más óptimo. Ésta exploración requiere de tiempo para seleccionar una metodología y calcular las pérdidas necesarias, sin embargo, el algoritmo propuesto agiliza la determinación, considera lo sugerido por varios autores, de una forma segura y exacta.

- ❖ Sería una herramienta de gran ventaja para este fin, la programación del algoritmo de diseño con sus respectivas ecuaciones, en un paquete computacional para que procese la información propuesta y a la vez sea amigable.

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSIONES**

- Las ecuaciones encontradas en el presente documento, demostraron ser efectivas al generar valores con tendencia a la media entre los autores considerados para obtener cada una ellas, con una correlación de 0.99998 para el cambio de dirección brusco, 0.99982 en el cambio de dirección gradual, 0.99999 para la ampliación brusca del diámetro, 0.9968 en la ampliación gradual del diámetro, 0.99995 para la reducción brusca y una correlación de 0.9949 para la reducción gradual.
  
- El algoritmo propuesto para calcular las pérdidas de energía que ocasionan los dispositivos estudiados, incluyó las ecuaciones que no requiere explorar documentos, para determinar el factor de pérdidas de cada uno de ellos, de forma sencilla y clara para ser utilizado en un paquete computacional.
  
- Una herramienta de gran ventaja para toda la comunidad hidráulica que demanda las pérdidas de energía en accesorios, podría ser un software amigable que procese la información envuelta en el algoritmo propuesto, para obtener los resultados deseados de manera sencilla, rápida y exacta

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Torres H., F.**, *Obras Hidráulicas*. Editorial LIMUSA S. A., México DF, 1983.
2. **Morales N., J. G., et al.**, “Ecuaciones analíticas para pérdidas de energía en bifurcaciones comunes en conductos hidráulicos de conducción forzada.” *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. XXX, No. 3, pag. 39–50, 2009. Disponible en línea en: <http://revistascientificas.cujae.edu.cu/RHidraulica.asp>.
3. **CRANE**, *Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías*. Editorial Mc Graw-Hill, México DF, 1987.
4. **De Azevedo N., J.M. y Acosta A., G.**, *Manual de Hidráulica*, Sexta Edición. Editorial Harla SA de CV, México, DF, 1976.
5. **Sotelo A., G.**, *Hidráulica General*, Volumen 1. Editorial LIMUSA, México DF, 1998.
6. **CFE**, *Conducciones a Presión*, tomo 2.3, Hidrotecnia Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Manual de Obras Civiles. México DF, 1983.
7. **Sabersky, R. H., et al.**, *Fluid Flow, a first course in fluid mechanics*, Fourth Edition. Editorial Prentice-Hall, Inc. USA, 1999.
8. **Morales N., J.G.**, *Diseño hidráulico óptimo y diseño estructural de obras de toma con galería y circulación forzada*. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Volumen XXIX, No. 2, 2008. Disponible en línea en: <http://revistascientificas.cujae.edu.cu/RHidraulica.asp>.
9. **Mataix, C.**, *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*, Segunda edición. Editorial Alfaomega, México, 2010.
10. **Kim, S., et al.**, *Two-phase minor loss in horizontal bubbly flow with elbows: 45° and 90° elbows*. *Journal of Nuclear Engineering and Design*, Volume 240, Issue 2, pages 284-289, February 2010. Available online at: <http://www.sciencedirect.com>.
11. **Yoo, D. H., and Singh, V. P.**, *Explicit Design of commercial pipes with secondary losses*. *Journal of Hydro-environment Research*, Volume 4, Issue 1, pages 37-45, April 2010. Available online at: <http://www.sciencedirect.com>.
12. **Morales N., J.G.**, *Cálculo para el diseño estructural e hidráulico de obras de toma en presas con galería en régimen de circulación forzado*. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Volumen XXVII, No. 2-3, pag. 11-18, 2006. Disponible en línea en: <http://revistascientificas.cujae.edu.cu/RHidraulica.asp>.

13. **White, F. M.**, *Mecánica de Fluidos*, Sexta Edición. Editorial Mc Graw-Hill International, Madrid, España, 2008.
14. **Cengel Y. A., y Cimbala, J. M.**, *Mecánica de fluidos, Fundamentos y Aplicaciones*. Editorial Mc Graw-Hill, Interamericana, México DF, 2006.
15. **Fox, R. W., et al.**, *Introduction To Fluid Mechanics*, Sixth Edition. Published by John Wiley & Son Inc., USA, 2006.
16. **Morales N., J.G., et al.** *Formulaciones matemáticas para el diseño hidráulico de la obra de toma de presas con galería y circulación forzada*. Memorias publicadas en extenso, 13 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Edit. CUJAE-Ministerio de Educación Superior, La Habana, Cuba, 2006.
17. **Mott, R. L.**, *Mecánica de Fluidos*, Sexta Edición. Editorial Pearson Educación, México, 2006.
18. **Fuentes M, O. A., Rosales P., I. L.**, *Estimación de pérdidas locales de energía en tomas domiciliarias de agua potable*, Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XIX, Núm. 1, Pag. 65-73. 2004. Disponible en línea en: [http://www.imta.gob.mx/tyca/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=460&category\\_id=84&option=com\\_virtuemart&Itemid=88&lang=es](http://www.imta.gob.mx/tyca/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=460&category_id=84&option=com_virtuemart&Itemid=88&lang=es).
19. **Rodríguez S., L., et al.**, *Pérdidas de Carga localizadas en inserciones de ramales de goteo*. Ingeniería del Agua, Vol. 11, No. 3, Pag. 289-296. Septiembre 2004. Disponible en línea en: [http://www.ingenieriadelagua.com/2004/rev\\_1.asp](http://www.ingenieriadelagua.com/2004/rev_1.asp).
20. **Smits, A. J.**, *Mecánica de fluidos, una introducción física*. Editorial Alfaomega, México DF, 2003.
21. **Potter M. C. and Wiggert, D. C.**, *Mecánica de fluidos*, Tercera Edición. Editorial International Thomson Editores, México, 2002.
22. **Pérez F., D.**, *"Evolución histórica de las fórmulas para expresar las pérdidas de carga en tuberías. Primera parte: Desde los experimentos de Couplet hasta los de Darcy"*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXII, No. 2, 2001. Disponible en línea en: <http://revistascientificas.cujae.edu.cu/RHidraulica.asp>.
23. **Pérez F., D.**, *"Evolución histórica de las fórmulas para expresar las pérdidas de carga en tuberías. Segunda parte: Desde los trabajos de Darcy hasta los de Stanton"*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXII, No. 3, 2002. Disponible en línea en: <http://revistascientificas.cujae.edu.cu/RHidraulica.asp>.

24. **Larock, B., et al.**, *Hydraulics of Pipeline Systems*. Published by CRC Pres, USA, 2000.
25. **Streeter, V. L., et al.**, *Mecánica de fluidos*, Novena Edición. Editorial Mc Graw-Hill Internacional SA, Bogotá, Colombia, 2000.
26. **Fernández, B.**, *Introducción a la Mecánica de fluidos*, Segunda Edición. Editorial Alfaomega, grupo editor SA de CV, México DF, 1999.
27. **Franzini, J. B.**, *Mecánica de fluidos*, con aplicaciones en ingeniería. Editorial Mc Graw-Hill, Inc., España, 1999.
28. **Chadwick, A., and Morfett, J.**, *Hydraulics in Civil and Environmental Engineering*, third edition. Published by E & FN Spon, New York, USA, 1998.
29. **Munson, B. R., et al.**, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Third Edition. Published by John Wiley & Son, Canada, 1998.
30. **Brater, E. F., et al.**, *Handbook of Hydraulics*, Seventh Edition. Published by Mc Graw-Hill, USA, 1996.
31. **Hauser, B. A.**, *Practical Hydraulics Handbook*. Published by LEWIS Publishers, USA, 1996.
32. **Levi, E.**, *Tratado Elemental de Hidráulica*. Editorial IMTA, Morelos, México, 1996.
33. **USBR**, *Diseño de Presas Pequeñas*, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Decimotercera edición en español. Editorial Compañía Editorial Continental, SA de CV, México, DF, 1985.
34. **Guaycochea, D. E.**, *Fórmulas sencillas para el cálculo de longitudes equivalentes de accesorios teniendo en cuenta la rugosidad de la tubería*. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. X, Núm. 2, Mayo-Agosto de 1995, Pag. 53-58 Disponible en línea: [http://www.imta.gob.mx/tyca/index.php?option=com\\_virtuemart&page=shop.brows&category\\_id=46&Itemid=88&lang=es](http://www.imta.gob.mx/tyca/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.brows&category_id=46&Itemid=88&lang=es).
35. **Shames, I. H.**, *Mecánica de fluidos*, Tercera Edición. Editorial Mc Graw-Hill Book Interamericana, Bogota, Colombia, 1995.
36. **Giles, R. V., et al.**, *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*, Tercera Edición. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana de España, Madrid, España, 1994.
37. **Bertín, J. J.**, *Mecánica de Fluidos para Ingenieros*. Editorial Printice-Hall Hispanoamericana, México, 1986.

38. **Trueba C., S.**, *Hidráulica*, vigesimotercera edición. Editorial Cia. Editorial Continental SA de CV, México, 1986.
39. **Simon, A. L.**, *Hidráulica práctica*, primera edición. Editorial LIMUSA SA de CV, México DF, 1986.
40. **King, W. H., and Brater E, F.**, *Manual de Hidráulica*. Editorial UTEHA, México DF, 1981.
41. **USACE**, *Engineering and Design, Hydraulic Design of Reservoir Outlet Works* [en línea]. Texto analizado de: Engineer Manual No. 1110-2-1602, 15 octubre de 1980, Department of the Army, Corps of Engineers, U.S.A., disponible en World WideWeb:[http://publications.usace.army.mil/publications/eng-manuals/EM\\_111021602\\_sec/EM\\_1110-2-1602.pdf](http://publications.usace.army.mil/publications/eng-manuals/EM_111021602_sec/EM_1110-2-1602.pdf).
42. **King, W. H., et al.**, *Hidráulica*, Traducción de la Quinta Edición en Ingles. Editorial Trillas SA de CV, México DF, 1980.
43. **Shames, I. H.**, *Mecánica de los fluidos*. Editorial Mc Graw-Hill Book Company, Madrid, España, 1967.
44. **Daugherty, R. L., and Me A. B.**, *Fluid Mechanics, With Engineering Applications*, Sixth Edition. Published by Mc Graw-Hill, USA, 1965.
45. **Gibson A. H.**, *Hydraulics and Its Applications*, Fourth Edition. Published by D. Van Nostrand Company, Inc., New York, USA, 1930.
46. **Merriman, M.**, *A Tratice On Hydraulics*, Seventh Edition. Published by John Wiley & Son, New York, USA, 1902.
47. **SARH**, *Obras de Toma para Presas de Almacenamiento*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección General de Obras Hidráulicas y de Ingeniería Agrícola para el Desarrollo Rural, México, DF, 1984.

## APÉNDICE I.A

### DATOS DEL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA CAMBIO DE DIRECCIÓN BRUSCO

Tabla I.A.1. Coeficiente  $K$  de un cambio de dirección brusco y  $Re = 60000$ , (Sotelo, 1998)

Coordenadas de Autocad		Coordenadas Reales	
X ( $\theta^\circ$ )	Y (K)	X ( $\theta^\circ$ )	Y (K)
0.0000	0.0000	0	0.0000
4.6306	2.2047	5	0.0238
9.2612	4.4095	10	0.0477
13.8918	6.6142	15	0.0715
18.5225	9.1614	20	0.0990
23.1531	11.7195	25	0.1267
27.7837	14.6153	30	0.1580
32.4143	18.0142	35	0.1947
37.045	21.962	40	0.2374
41.6756	26.7892	45	0.2896
46.3062	32.2058	50	0.3482
50.9368	38.254	55	0.4135
55.5675	45.1653	60	0.4883
60.1981	53.1621	65	0.5747
64.8287	61.4919	70	0.6648
69.4593	71.1159	75	0.7688
74.09	81.4219	80	0.8802
78.7206	92.5024	85	1.0000
83.3512	103.4968	90	1.1189

Tabla I.A.2. Coeficiente  $K$  de un cambio de dirección brusco y  $Re = 250000$ , (Sotelo, 1998)

Coordenadas de Autocad		Coordenadas Reales	
X ( $\theta^\circ$ )	Y (K)	X ( $\theta^\circ$ )	Y (K)
0.0000	0.0000	0	0.0000
4.6306	1.1345	5	0.0123
9.2612	2.5258	10	0.0273
13.8918	4.067	15	0.0440
18.5225	5.9292	20	0.0641
23.1531	8.0911	25	0.0875
27.7837	10.5964	30	0.1146
32.4143	13.7013	35	0.1481
37.045	17.4204	40	0.1883
41.6756	21.7901	45	0.2356
46.3062	27.4355	50	0.2966
50.9368	33.7292	55	0.3646
55.5675	41.1735	60	0.4451
60.1981	49.6006	65	0.5362
64.8287	59.0627	70	0.6385
69.4593	69.2573	75	0.7487
74.09	80.9586	80	0.8752
78.7206	92.5024	85	1.0000
83.3512	103.4968	90	1.1189

Tabla I.A.3. Coeficiente  $K$  de un cambio de dirección brusco, (CFE, 1983)

Coordenadas de Autocad		Coordenadas Reales	
X ( $\theta^\circ$ )	Y (K)	X ( $\theta^\circ$ )	Y (K)
0.0000	0.0000	0	0.0000
7.7142	34.2011	5	0.0215
15.4284	47.2539	10	0.0288
23.1426	62.8907	15	0.0409
30.8568	80.4648	20	0.0606
38.571	97.3526	25	0.0885
46.2852	113.0693	30	0.1259
53.9994	126.2275	35	0.1690
61.7139	138.9676	40	0.2249
69.4281	149.9768	45	0.2877
77.1423	159.9357	50	0.3597
84.8565	168.6139	55	0.4368
92.5707	176.4621	60	0.5208
100.2849	183.5624	65	0.6106
107.9991	189.968	70	0.7048
115.7133	195.5248	75	0.7982
123.4279	201.0043	80	0.9024
131.1421	205.4806	85	0.9976
138.8563	209.5709	90	1.0933

## APÉNDICE I.B

### DATOS DEL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA CAMBIO DE DIRECCIÓN GRADUAL

En base a la información sugerida por cada autor, se realizó lo siguiente:

- USBR (1985)

En este caso la Figura 10 y 11, fueron estudiadas en Autocad y se obtuvieron coordenadas (x,y) de cada una de ellas. Al utilizar en conjunta esta información se encontró los valores de  $K$  que se ilustran en la Tabla I.B.1.

- Sotelo (1998)

Se trató en Autocad la Figura 12, donde se consideró la curva media para obtener los valores necesarios del factor  $C_c$ . Estos valores fueron utilizados en la ecuación 23 y se estimaron los valores del coeficiente en estudio que se presentan en la Tabla I.B.2.

- CFE (1983)

El gráfico logarítmico de la Figura 13, se estudió a fondo en Autocad para encontrar los valores de interés de coeficiente  $K$ . Algunos de ellos fueron estimados dando continuación a las curvas del mismo. Estos datos fueron homogenizados a la escala lineal y se muestran en la Tabla I.B.3.

- SARH (1984)

A partir de los datos contenidos en la Tabla I y II, se estimaron los faltantes para obtener todos los valores necesarios de  $K$ , tal como se exponen en la Tabla I.B.4.

Tabla I.B.1. Coeficiente  $K$  de un cambio de dirección gradual, (USBR, 1985)

Deflexión $\theta^\circ$	Relación $r/D$					
	1	1.5	2	4	6	10
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0210	0.0152	0.0121	0.0078	0.0068	0.0065
10	0.0428	0.0310	0.0246	0.0158	0.0138	0.0133
15	0.0636	0.0460	0.0366	0.0235	0.0205	0.0197
20	0.0828	0.0600	0.0477	0.0307	0.0267	0.0257
25	0.1004	0.0727	0.0578	0.0372	0.0323	0.0311
30	0.1163	0.0842	0.0670	0.0431	0.0375	0.0361
35	0.1313	0.0951	0.0757	0.0486	0.0423	0.0407
40	0.1448	0.1049	0.0834	0.0536	0.0466	0.0449
45	0.1574	0.1140	0.0907	0.0583	0.0507	0.0488
50	0.1681	0.1217	0.0968	0.0622	0.0541	0.0521
55	0.1783	0.1291	0.1027	0.0660	0.0574	0.0553
60	0.1877	0.1359	0.1081	0.0695	0.0604	0.0582
65	0.1956	0.1416	0.1127	0.0724	0.0630	0.0607
70	0.2031	0.1470	0.1170	0.0752	0.0654	0.0630
75	0.2098	0.1519	0.1209	0.0777	0.0675	0.0651
80	0.2161	0.1564	0.1245	0.0800	0.0696	0.0670
85	0.2222	0.1609	0.1280	0.0823	0.0716	0.0689
90	0.2283	0.1653	0.1315	0.0845	0.0735	0.0708

Tabla I.B.2. Coeficiente  $K$  de un cambio de dirección gradual, (Sotelo, 1998)

Deflexión $\theta^\circ$	Relación $r/D$					
	1	1.5	2	4	6	10
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0203	0.0146	0.0123	0.0094	0.0075	0.0079
10	0.0406	0.0292	0.0247	0.0188	0.0150	0.0158
15	0.0609	0.0439	0.0370	0.0282	0.0225	0.0237
20	0.0812	0.0585	0.0493	0.0376	0.0299	0.0316
25	0.1015	0.0731	0.0616	0.0469	0.0374	0.0395
30	0.1218	0.0877	0.0740	0.0563	0.0449	0.0474
35	0.1421	0.1023	0.0863	0.0657	0.0524	0.0553
40	0.1624	0.1169	0.0986	0.0751	0.0599	0.0632
45	0.1828	0.1316	0.1110	0.0845	0.0674	0.0711
50	0.2031	0.1462	0.1233	0.0939	0.0748	0.0790
55	0.2234	0.1608	0.1356	0.1033	0.0823	0.0869
60	0.2437	0.1754	0.1479	0.1127	0.0898	0.0948
65	0.2640	0.1900	0.1603	0.1221	0.0973	0.1027
70	0.2843	0.2046	0.1726	0.1314	0.1048	0.1106
75	0.3046	0.2193	0.1849	0.1408	0.1123	0.1185
80	0.3249	0.2339	0.1972	0.1502	0.1197	0.1264
85	0.3452	0.2485	0.2096	0.1596	0.1272	0.1343
90	0.3655	0.2631	0.2219	0.1690	0.1347	0.1422

Tabla I.B.3. Coeficiente  $K$  de un cambio de dirección gradual, (CFE, 1983)

Deflexión $\theta^\circ$	Relación $r/D$					
	1	1.5	2	4	6	10
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0090	0.0100	0.0124	0.0200	0.0250	0.0300
10	0.0180	0.0190	0.0225	0.0330	0.0400	0.0470
15	0.0265	0.0290	0.0340	0.0460	0.0540	0.0610
20	0.0350	0.0405	0.0455	0.0560	0.0637	0.0780
25	0.0470	0.0510	0.0550	0.0670	0.0765	0.0940
30	0.0585	0.0600	0.0640	0.0770	0.0875	0.1080
35	0.0720	0.0700	0.0730	0.0850	0.0975	0.1225
40	0.0860	0.0800	0.0820	0.0930	0.1075	0.1340
45	0.1010	0.0890	0.0900	0.1000	0.1175	0.1460
50	0.1170	0.0980	0.0970	0.1080	0.1265	0.1590
55	0.1350	0.1100	0.1050	0.1170	0.1365	0.1680
60	0.1500	0.1200	0.1140	0.1235	0.1440	0.1780
65	0.1660	0.1300	0.1220	0.1300	0.1530	0.1880
70	0.1860	0.1400	0.1300	0.1360	0.1625	0.2000
75	0.2030	0.1500	0.1370	0.1425	0.1710	0.2100
80	0.2200	0.1600	0.1440	0.1500	0.1800	0.2200
85	0.2360	0.1740	0.1520	0.1590	0.1900	0.2300
90	0.2450	0.1840	0.1600	0.1680	0.2000	0.2400

Tabla I.B.4. Coeficiente  $K$  de un cambio de dirección gradual, (SARH, 1984)

Deflexión $\theta^\circ$	Relación $r/D$					
	1	1.5	2	4	6	10
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.052	0.040	0.029	0.023	0.018	0.020
10	0.104	0.080	0.058	0.046	0.036	0.040
15	0.156	0.120	0.087	0.069	0.054	0.060
20	0.208	0.160	0.116	0.092	0.072	0.080
25	0.234	0.180	0.131	0.104	0.081	0.090
30	0.260	0.200	0.145	0.115	0.090	0.100
35	0.312	0.240	0.174	0.138	0.108	0.120
40	0.364	0.280	0.203	0.161	0.126	0.140
45	0.384	0.295	0.214	0.170	0.133	0.148
50	0.403	0.310	0.225	0.178	0.140	0.155
55	0.423	0.325	0.236	0.187	0.146	0.163
60	0.442	0.340	0.247	0.196	0.153	0.170
65	0.455	0.350	0.254	0.201	0.158	0.175
70	0.468	0.360	0.261	0.207	0.162	0.180
75	0.481	0.370	0.268	0.213	0.167	0.185
80	0.494	0.380	0.276	0.219	0.171	0.190
85	0.507	0.390	0.283	0.224	0.176	0.195
90	0.520	0.400	0.290	0.230	0.180	0.200

Tabla I.B.5. Coeficiente de pérdidas propuesto para un cambio de dirección gradual ( $K_{CG1}$ )

Deflexión $\theta^\circ$	K					
	USACE	USBR	Sotelo	CFE	SARH	$K_{CG1}$
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0527	0.0210	0.0203	0.0090	0.0520	0.0300
10	0.0787	0.0428	0.0406	0.0180	0.1040	0.0568
15	0.0973	0.0636	0.0609	0.0265	0.1560	0.0808
20	0.1123	0.0828	0.0812	0.0350	0.2080	0.1039
25	0.1245	0.1004	0.1015	0.0470	0.2340	0.1237
30	0.1345	0.1163	0.1218	0.0585	0.2600	0.1432
35	0.1430	0.1313	0.1421	0.0720	0.3120	0.1621
40	0.1503	0.1448	0.1624	0.0860	0.3640	0.1805
45	0.1558	0.1574	0.1828	0.1010	0.3835	0.1961
50	0.1606	0.1681	0.2031	0.1170	0.4030	0.2103
55	0.1650	0.1783	0.2234	0.1350	0.4225	0.2248
60	0.1686	0.1877	0.2437	0.1500	0.4420	0.2384
65	0.1718	0.1956	0.2640	0.1660	0.4550	0.2508
70	0.1747	0.2031	0.2843	0.1860	0.4680	0.2632
75	0.1768	0.2098	0.3046	0.2030	0.4810	0.2750
80	0.1783	0.2161	0.3249	0.2200	0.4940	0.2867
85	0.1796	0.2222	0.3452	0.2360	0.5070	0.2980
90	0.1804	0.2283	0.3655	0.2450	0.5200	0.3085

Tabla I.B.6. Coeficiente de pérdidas propuesto para un cambio de dirección gradual ( $K_{CG2}$ )

Deflexión $\theta^\circ$	K					
	USACE	USBR	Sotelo	CFE	SARH	$K_{CG2}$
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0321	0.0152	0.0146	0.0100	0.0400	0.0224
10	0.0542	0.0310	0.0292	0.0190	0.0800	0.0427
15	0.0731	0.0460	0.0439	0.0290	0.1200	0.0624
20	0.0892	0.0600	0.0585	0.0405	0.1600	0.0816
25	0.1028	0.0727	0.0731	0.0510	0.1800	0.0981
30	0.1128	0.0842	0.0877	0.0600	0.2000	0.1140
35	0.1215	0.0951	0.1023	0.0700	0.2400	0.1278
40	0.1283	0.1049	0.1169	0.0800	0.2800	0.1410
45	0.1337	0.1140	0.1316	0.0890	0.2950	0.1527
50	0.1384	0.1217	0.1462	0.0980	0.3100	0.1629
55	0.1425	0.1291	0.1608	0.1100	0.3250	0.1735
60	0.1459	0.1359	0.1754	0.1200	0.3400	0.1834
65	0.1490	0.1416	0.1900	0.1300	0.3500	0.1921
70	0.1520	0.1470	0.2046	0.1400	0.3600	0.2007
75	0.1541	0.1519	0.2193	0.1500	0.3700	0.2090
80	0.1564	0.1564	0.2339	0.1600	0.3800	0.2173
85	0.1586	0.1609	0.2485	0.1740	0.3900	0.2256
90	0.1608	0.1653	0.2631	0.1840	0.4000	0.2336

Tabla I.B.7. Coeficiente de pérdidas propuesto para un cambio de dirección gradual ( $K_{CG3}$ )

Deflexión $\theta^\circ$	K					
	USACE	USBR	Sotelo	CFE	SARH	$K_{CG3}$
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0199	0.0121	0.0123	0.0124	0.0290	0.0171
10	0.0368	0.0246	0.0247	0.0225	0.0580	0.0333
15	0.0522	0.0366	0.0370	0.0340	0.0870	0.0494
20	0.0653	0.0477	0.0493	0.0455	0.1160	0.0648
25	0.0766	0.0578	0.0616	0.0550	0.1305	0.0783
30	0.0858	0.0670	0.0740	0.0640	0.1450	0.0912
35	0.0939	0.0757	0.0863	0.0730	0.1740	0.1026
40	0.1009	0.0834	0.0986	0.0820	0.2030	0.1126
45	0.1074	0.0907	0.1110	0.0900	0.2139	0.1226
50	0.1127	0.0968	0.1233	0.0970	0.2248	0.1309
55	0.1176	0.1027	0.1356	0.1050	0.2356	0.1393
60	0.1221	0.1081	0.1479	0.1140	0.2465	0.1477
65	0.1260	0.1127	0.1603	0.1220	0.2538	0.1549
70	0.1298	0.1170	0.1726	0.1300	0.2610	0.1621
75	0.1337	0.1209	0.1849	0.1370	0.2683	0.1689
80	0.1373	0.1245	0.1972	0.1440	0.2755	0.1757
85	0.1395	0.1280	0.2096	0.1520	0.2828	0.1824
90	0.1417	0.1315	0.2219	0.1600	0.2900	0.1890

Tabla I.B.8. Coeficiente de pérdidas propuesto para un cambio de dirección gradual ( $K_{CG4}$ )

Deflexión $\theta^\circ$	K					
	USACE	USBR	Sotelo	CFE	SARH	$K_{CG4}$
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0102	0.0078	0.0094	0.0200	0.0230	0.0141
10	0.0201	0.0158	0.0188	0.0330	0.0460	0.0267
15	0.0300	0.0235	0.0282	0.0460	0.0690	0.0393
20	0.0387	0.0307	0.0376	0.0560	0.0920	0.0510
25	0.0477	0.0372	0.0469	0.0670	0.1035	0.0620
30	0.0550	0.0431	0.0563	0.0770	0.1150	0.0718
35	0.0618	0.0486	0.0657	0.0850	0.1380	0.0810
40	0.0678	0.0536	0.0751	0.0930	0.1610	0.0893
45	0.0733	0.0583	0.0845	0.1000	0.1696	0.0971
50	0.0777	0.0622	0.0939	0.1080	0.1783	0.1040
55	0.0828	0.0660	0.1033	0.1170	0.1869	0.1112
60	0.0873	0.0695	0.1127	0.1235	0.1955	0.1177
65	0.0913	0.0724	0.1221	0.1300	0.2013	0.1234
70	0.0953	0.0752	0.1314	0.1360	0.2070	0.1290
75	0.0991	0.0777	0.1408	0.1425	0.2128	0.1346
80	0.1026	0.0800	0.1502	0.1500	0.2185	0.1403
85	0.1055	0.0823	0.1596	0.1590	0.2243	0.1461
90	0.1085	0.0845	0.1690	0.1680	0.2300	0.1520

Tabla I.B.9. Coeficiente de pérdidas propuesto para un cambio de dirección gradual ( $K_{CG5}$ )

Deflexión $\theta^\circ$	K					
	USACE	USBR	Sotelo	CFE	SARH	$K_{CG5}$
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0079	0.0068	0.0075	0.0250	0.0180	0.0130
10	0.0154	0.0138	0.0150	0.0400	0.0360	0.0240
15	0.0235	0.0205	0.0225	0.0540	0.0540	0.0349
20	0.0308	0.0267	0.0299	0.0637	0.0720	0.0446
25	0.0381	0.0323	0.0374	0.0765	0.0810	0.0541
30	0.0446	0.0375	0.0449	0.0875	0.0900	0.0625
35	0.0510	0.0423	0.0524	0.0975	0.1080	0.0707
40	0.0566	0.0466	0.0599	0.1075	0.1260	0.0783
45	0.0617	0.0507	0.0674	0.1175	0.1328	0.0855
50	0.0661	0.0541	0.0748	0.1265	0.1395	0.0922
55	0.0707	0.0574	0.0823	0.1365	0.1463	0.0986
60	0.0753	0.0604	0.0898	0.1440	0.1530	0.1045
65	0.0793	0.0630	0.0973	0.1530	0.1575	0.1100
70	0.0835	0.0654	0.1048	0.1625	0.1620	0.1156
75	0.0869	0.0675	0.1123	0.1710	0.1665	0.1208
80	0.0905	0.0696	0.1197	0.1800	0.1710	0.1261
85	0.0928	0.0716	0.1272	0.1900	0.1755	0.1314
90	0.0950	0.0735	0.1347	0.2000	0.1800	0.1366

Tabla I.B.10. Coeficiente de pérdidas propuesto para un cambio de dirección gradual ( $K_{CG6}$ )

Deflexión $\theta^\circ$	K					
	USACE	USBR	Sotelo	CFE	SARH	$K_{CG6}$
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0065	0.0065	0.0079	0.0300	0.0200	0.0142
10	0.0126	0.0133	0.0158	0.0470	0.0400	0.0259
15	0.0191	0.0197	0.0237	0.0610	0.0600	0.0370
20	0.0250	0.0257	0.0316	0.0780	0.0800	0.0481
25	0.0310	0.0311	0.0395	0.0940	0.0900	0.0581
30	0.0364	0.0361	0.0474	0.1080	0.1000	0.0676
35	0.0418	0.0407	0.0553	0.1225	0.1200	0.0764
40	0.0470	0.0449	0.0632	0.1340	0.1400	0.0849
45	0.0520	0.0488	0.0711	0.1460	0.1475	0.0927
50	0.0563	0.0521	0.0790	0.1590	0.1550	0.1000
55	0.0604	0.0553	0.0869	0.1680	0.1625	0.1066
60	0.0641	0.0582	0.0948	0.1780	0.1700	0.1130
65	0.0676	0.0607	0.1027	0.1880	0.1750	0.1188
70	0.0710	0.0630	0.1106	0.2000	0.1800	0.1242
75	0.0741	0.0651	0.1185	0.2100	0.1850	0.1297
80	0.0770	0.0670	0.1264	0.2200	0.1900	0.1353
85	0.0798	0.0689	0.1343	0.2300	0.1950	0.1404
90	0.0823	0.0708	0.1422	0.2400	0.2000	0.1456

## APÉNDICE I.C

### DATOS DEL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA AMPLIACIÓN BRUSCA DEL DIÁMETRO

Tabla I.C.1. Valores de  $K$  para una ampliación brusca del diámetro, (Munson et al., 1998)

Coordenadas de Autocad		Coordenadas reales	
X ( $A_1/A_2$ )	Y (K)	$A_1/A_2$	K
0.0	405820.0	0.00	1.000
41121.5	364190.0	0.05	0.897
82243.0	324656.0	0.10	0.800
164486.0	252480.0	0.20	0.622
246729.0	191890.0	0.30	0.473
328972.0	142190.0	0.40	0.350
411215.0	101970.0	0.50	0.251
493458.0	70410.0	0.60	0.174
575701.0	45380.0	0.70	0.112
657944.0	26150.0	0.80	0.064
740187.0	11130.0	0.90	0.027
781308.5	4960.0	0.95	0.012
822430.0	0.0	1.00	0.000

Tabla I.C.2. Valores de  $K$  para una ampliación brusca del diámetro, (USACE, 1980)

Coordenadas de Autocad		Coordenadas reales	
X ( $A_1/A_2$ )	Y (K)	$A_1/A_2$	K
0.0000	110.4005	0.00	1.000
5.6637	100.0080	0.05	0.906
11.3275	89.9079	0.10	0.814
22.6550	70.3632	0.20	0.637
33.9825	53.5450	0.30	0.485
45.3100	39.2002	0.40	0.355
56.6375	26.9803	0.50	0.244
67.9650	17.3696	0.60	0.157
79.2925	10.1814	0.70	0.092
90.6200	5.1132	0.80	0.046
101.9475	1.5118	0.90	0.014
107.6113	0.3830	0.95	0.003
113.2750	0.0000	1.00	0.000

Tabla I.C.3. Valores de  $K$  para una ampliación brusca del diámetro, (Trueba, 1986)

$A_1/A_2$	$D_1/D_2$	$D_2/D_1$	h	K
0.00	0.000	0.000	0.0508	0.997
0.05	0.224	4.472	0.0461	0.904
0.10	0.316	3.162	0.0415	0.814
0.20	0.447	2.236	0.0331	0.650
0.30	0.548	1.826	0.0256	0.503
0.40	0.632	1.581	0.0191	0.374
0.50	0.707	1.414	0.0134	0.264
0.60	0.775	1.291	0.0088	0.172
0.70	0.837	1.195	0.0050	0.099
0.80	0.894	1.118	0.0023	0.045
0.90	0.949	1.054	0.0006	0.012
0.95	0.975	1.026	0.0002	0.003
1.00	1.000	1.000	0.0000	0.000

## APÉNDICE I.D

### DATOS DEL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA AMPLIACIÓN GRADUAL DEL DIÁMETRO

En apego a la información propuesta por cada autor, se realizó lo siguiente:

- CFE (1983)

El gráfico logarítmico de la Figura 18, fue trabajado en Autocad y la información extraída se adecuó a la forma lineal. Algunos valores fueron estimados con la prolongación de las curvas de  $K$  y los ejes de las coordenadas de interés. Los datos recabados se contienen en la Tabla I.D.1.

- Mataix (2010)

Los datos de la Tabla IV se utilizaron la ecuación 26 se utilizaron en conjunto para obtener los valores de  $K$  que se ilustran en la Tabla I.D.2.

- White (2008)

La Figura 19 que sugiere este autor para estimar el factor  $K$ , fue estudiada en Autocad donde se obtuvieron datos precisos del mismo que se presentan en la Tabla I.D.3.

- Brater et al. (1996), Trueba (1986) y King et al. (1981)

Los datos de la Tabla V fueron utilizados en la ecuación 27, para obtener los valores de interés del coeficiente  $K$  que se ilustran en la Tabla I.D.4.

- USACE (1980)

El gráfico de la Figura 20 fue trabajado en Autocad, donde se obtuvieron coordenadas ortogonales que sirvieron para obtener la información que se contiene en la Tabla I.D.5. Cabe mencionar que se promedió la curva dada por Gibson y Peters para obtener la de  $d_2/d_1=1.5$ .

- Sabersky et al, (1999)

En Autocad fue estudiada detalladamente la Figura 21, donde extrajeron coordenadas del factor  $K_2$ , mismos que fueron computados en la ecuación 28. Los valores arrojados del coeficiente de interés son expuestos en la Tabla I.D.6.

Un resumen de los resultados se encuentra de la Tabla I.D.7 a la I.D.14, donde se incluye el valor medio propuesto para cada clasificación del coeficiente de pérdidas de este dispositivo ( $K_{AG}$ ).

Tabla I.D.1. Valores de  $K$  para una ampliación gradual del diámetro, (CFE, 1983)

$d_2/d_1$	Ángulo de la ampliación $\theta^\circ$							
	5	10	20	30	40	60	80	90
1.05	0.015	0.020	0.024	0.028	0.029	0.031	0.033	0.036
1.10	0.025	0.038	0.048	0.052	0.054	0.060	0.067	0.071
1.20	0.039	0.060	0.078	0.086	0.091	0.102	0.117	0.120
1.30	0.039	0.068	0.099	0.120	0.133	0.151	0.170	0.174
1.40	0.038	0.067	0.122	0.157	0.180	0.217	0.233	0.240
1.50	0.042	0.064	0.133	0.193	0.230	0.275	0.290	0.297
1.60	0.059	0.071	0.150	0.225	0.275	0.338	0.351	0.355
1.80	0.100	0.140	0.250	0.320	0.410	0.472	0.490	0.496
2.00	0.180	0.270	0.400	0.480	0.540	0.580	0.620	0.640

Tabla I.D.2. Valores de  $K$  para una ampliación gradual del diámetro, (Mataix, 2010)

$d_2/d_1$	$\theta^\circ$			
	5	10	20	30
1.05	0.001	0.001	0.004	0.007
1.10	0.004	0.005	0.013	0.024
1.20	0.012	0.015	0.040	0.076
1.30	0.022	0.027	0.072	0.135
1.40	0.031	0.038	0.103	0.194
1.50	0.040	0.049	0.133	0.250
1.60	0.048	0.059	0.160	0.301
1.80	0.062	0.076	0.206	0.387
2.00	0.073	0.090	0.242	0.456
2.25	0.084	0.103	0.277	0.522
2.50	0.092	0.113	0.303	0.572
2.75	0.098	0.120	0.324	0.610
3.00	0.103	0.126	0.340	0.640
3.25	0.107	0.131	0.352	0.664
3.50	0.110	0.135	0.363	0.683
3.75	0.112	0.138	0.371	0.699
4.00	0.114	0.141	0.378	0.712
4.50	0.117	0.145	0.389	0.732
5.00	0.120	0.147	0.396	0.746
6.00	0.123	0.151	0.406	0.766
8.00	0.126	0.155	0.417	0.785
10.00	0.127	0.157	0.421	0.794

Tabla I.D.3. Valores de  $K$  para una ampliación gradual del diámetro, (White, 2008)

$d_2/d_1$	Ángulo de la ampliación $\theta^\circ$				
	5	10	20	30	40
1.80	0.189	0.178	0.253	0.346	0.445
2.00	0.221	0.209	0.296	0.404	0.522
2.25	0.253	0.239	0.337	0.463	0.597
2.50	0.280	0.263	0.369	0.509	0.655
2.75	0.302	0.282	0.395	0.544	0.699
3.00	0.322	0.298	0.415	0.572	0.735
3.25	0.338	0.311	0.431	0.593	0.763
3.50	0.353	0.323	0.444	0.611	0.786
3.75	0.367	0.332	0.455	0.625	0.805
4.00	0.378	0.341	0.464	0.636	0.820
4.50	0.399	0.354	0.479	0.654	0.844
5.00	0.415	0.365	0.490	0.667	0.860
6.00	0.441	0.381	0.505	0.684	0.881
8.00	0.474	0.400	0.524	0.705	0.904
10.00	0.495	0.412	0.536	0.717	0.917

Tabla I.D.4. Valores de  $K$  para una ampliación gradual, (Brater et al., 1996), (Trueba, 1986), (King et al., 1981)

$d_2/d_1$	$\theta$							
	5	10	20	30	40	60	80	90
1.05	0.007	0.014	0.055	0.087	0.106	0.128	0.125	0.119
1.10	0.013	0.025	0.098	0.155	0.190	0.228	0.223	0.212
1.20	0.022	0.040	0.161	0.254	0.311	0.373	0.364	0.347
1.30	0.027	0.051	0.201	0.318	0.390	0.468	0.457	0.435
1.40	0.031	0.058	0.229	0.362	0.444	0.533	0.520	0.496
1.50	0.034	0.063	0.249	0.393	0.481	0.578	0.564	0.538
1.60	0.036	0.066	0.263	0.415	0.508	0.610	0.596	0.568
1.80	0.038	0.071	0.280	0.443	0.543	0.651	0.636	0.606
2.00	0.039	0.073	0.291	0.459	0.563	0.675	0.659	0.628
2.25	0.040	0.075	0.298	0.471	0.577	0.692	0.676	0.644
2.50	0.041	0.076	0.302	0.477	0.585	0.702	0.685	0.653
2.75	0.041	0.077	0.305	0.481	0.590	0.707	0.691	0.658
3.00	0.041	0.077	0.306	0.484	0.593	0.711	0.694	0.662
3.25	0.042	0.077	0.307	0.486	0.595	0.714	0.697	0.664
3.50	0.042	0.077	0.308	0.487	0.596	0.715	0.698	0.666
3.75	0.042	0.078	0.308	0.488	0.597	0.716	0.699	0.667
4.00	0.042	0.078	0.309	0.488	0.598	0.717	0.700	0.667
4.50	0.042	0.078	0.309	0.489	0.599	0.718	0.701	0.668
5.00	0.042	0.078	0.310	0.489	0.599	0.719	0.702	0.669
6.00	0.042	0.078	0.310	0.490	0.600	0.719	0.702	0.669
8.00	0.042	0.078	0.310	0.490	0.600	0.720	0.703	0.670
10.00	0.042	0.078	0.310	0.490	0.600	0.720	0.703	0.670

Tabla I.D.5. Valores de  $K$  para una ampliación gradual, (USACE, 1980)

$d_2/d_1$	Ángulo de la ampliación $\theta^\circ$							
	5	10	20	30	40	60	80	90
1.50	0.084	0.101	0.166	0.248	0.315	0.396	0.390	0.379
1.60	0.096	0.119	0.198	0.297	0.366	0.440	0.438	0.429
1.80	0.120	0.157	0.263	0.394	0.469	0.529	0.534	0.529
2.00	0.144	0.194	0.327	0.491	0.571	0.618	0.629	0.630
2.25	0.135	0.186	0.322	0.484	0.578	0.657	0.672	0.672
2.50	0.127	0.178	0.317	0.477	0.585	0.696	0.715	0.713
2.75	0.118	0.170	0.313	0.470	0.592	0.735	0.758	0.755
3.00	0.110	0.162	0.308	0.464	0.599	0.774	0.800	0.797

Tabla I.D.6. Valores de  $K$  para una ampliación gradual, (Sabersky et al, 1999)

$d_2/d_1$	Ángulo de la ampliación $\theta^\circ$				
	5	10	20	30	40
1.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.05	0.0010	0.0014	0.0036	0.0062	0.0078
1.10	0.0036	0.0050	0.0126	0.0216	0.0272
1.20	0.0112	0.0154	0.0392	0.0669	0.0842
1.30	0.0199	0.0275	0.0699	0.1194	0.1503
1.40	0.0287	0.0396	0.1006	0.1718	0.2164
1.50	0.0369	0.0510	0.1294	0.2210	0.2784
1.60	0.0444	0.0613	0.1557	0.2659	0.3349
1.80	0.0572	0.0789	0.2004	0.3423	0.4311
2.00	0.0673	0.0929	0.2359	0.4028	0.5073
2.25	0.0770	0.1063	0.2700	0.4611	0.5808
2.50	0.0844	0.1165	0.2959	0.5053	0.6364
2.75	0.0901	0.1243	0.3158	0.5392	0.6792
3.00	0.0945	0.1305	0.3313	0.5658	0.7126
3.25	0.0981	0.1353	0.3437	0.5869	0.7392
3.50	0.1009	0.1392	0.3537	0.6039	0.7607
3.75	0.1032	0.1425	0.3618	0.6179	0.7782
4.00	0.1052	0.1451	0.3686	0.6294	0.7927
4.50	0.1081	0.1492	0.3789	0.6471	0.8150
5.00	0.1103	0.1522	0.3865	0.6599	0.8312
6.00	0.1131	0.1561	0.3964	0.6769	0.8525
8.00	0.1159	0.1600	0.4063	0.6939	0.8740
10.00	0.1173	0.1618	0.4110	0.7018	0.8840

Tabla I.D.7. Valores del coeficiente  $K_{AG1}$ 

Para $\theta = 5^\circ$								
$d_2/d_1$	Sotelo	Mataix	White	CFE	King	USACE	Sabersky	$K_{AG1}$
1.00	0.000	0.000	---	0.000	0.000	---	0.000	0.000
1.05	0.001	0.001	---	0.015	0.007	---	0.001	0.005
1.10	0.004	0.004	---	0.025	0.013	---	0.004	0.010
1.20	0.013	0.012	---	0.039	0.022	---	0.011	0.019
1.30	0.022	0.022	---	0.039	0.027	---	0.020	0.027
1.40	0.032	0.031	---	0.038	0.031	---	0.029	0.034
1.50	0.041	0.040	---	0.042	0.034	0.084	0.037	0.046
1.60	0.050	0.048	---	0.059	0.036	0.096	0.044	0.057
1.80	0.064	0.062	0.189	---	0.038	0.120	0.057	0.082
2.00	0.075	0.073	0.221	---	0.039	0.144	0.067	0.100
2.25	0.086	0.084	0.253	---	0.040	0.135	0.077	0.111
2.50	0.095	0.092	0.280	---	0.041	0.127	0.084	0.119
2.75	0.101	0.098	0.302	---	0.041	0.118	0.090	0.127
3.00	0.106	0.103	0.322	---	0.041	0.110	0.095	0.133
3.25	0.110	0.107	0.338	---	0.042	---	0.098	0.138
3.50	0.113	0.110	0.353	---	0.042	---	0.101	0.144
3.75	0.116	0.112	0.367	---	0.042	---	0.103	0.148
4.00	0.118	0.114	0.378	---	0.042	---	0.105	0.152
4.50	0.121	0.117	0.399	---	0.042	---	0.108	0.157
5.00	0.124	0.120	0.415	---	0.042	---	0.110	0.162
6.00	0.127	0.123	0.441	---	0.042	---	0.113	0.169
8.00	0.130	0.126	0.474	---	0.042	---	0.116	0.178
10.00	0.131	0.127	0.495	---	0.042	---	0.117	0.183

Tabla I.D.8. Valores del coeficiente  $K_{AG2}$ 

Para $\theta = 10^\circ$								
$d_2/d_1$	Sotelo	Mataix	White	CFE	King	USACE	Sabersky	$K_{AG2}$
1.00	0.000	0.000	---	0.000	0.000	---	0.000	0.000
1.05	0.001	0.001	---	0.020	0.014	---	0.001	0.008
1.10	0.005	0.005	---	0.038	0.025	---	0.005	0.016
1.20	0.016	0.015	---	0.060	0.040	---	0.015	0.029
1.30	0.028	0.027	---	0.068	0.051	---	0.028	0.040
1.40	0.040	0.038	---	0.067	0.058	---	0.040	0.050
1.50	0.052	0.049	---	0.064	0.063	0.101	0.051	0.063
1.60	0.062	0.059	---	0.071	0.066	0.119	0.061	0.075
1.80	0.080	0.076	0.178	---	0.071	0.157	0.079	0.104
2.00	0.094	0.090	0.209	---	0.073	0.194	0.093	0.123
2.25	0.108	0.103	0.239	---	0.075	0.186	0.106	0.134
2.50	0.118	0.113	0.263	---	0.076	0.178	0.116	0.143
2.75	0.126	0.120	0.282	---	0.077	0.170	0.124	0.150
3.00	0.133	0.126	0.298	---	0.077	0.162	0.130	0.154
3.25	0.138	0.131	0.311	---	0.077	---	0.135	0.159
3.50	0.142	0.135	0.323	---	0.077	---	0.139	0.163
3.75	0.145	0.138	0.332	---	0.078	---	0.142	0.167
4.00	0.148	0.141	0.341	---	0.078	---	0.145	0.170
4.50	0.152	0.145	0.354	---	0.078	---	0.149	0.176
5.00	0.155	0.147	0.365	---	0.078	---	0.152	0.179
6.00	0.159	0.151	0.381	---	0.078	---	0.156	0.185
8.00	0.163	0.155	0.400	---	0.078	---	0.160	0.191
10.00	0.165	0.157	0.412	---	0.078	---	0.162	0.195

Tabla I.D.9. Valores del coeficiente  $K_{AG3}$ 

Para $\theta = 20^\circ$								
$d_2/d_1$	Sotelo	Mataix	White	CFE	King	USACE	Sabersky	$K_{AG3}$
1.00	0.000	0.000	---	0.000	0.000	---	0.000	0.000
1.05	0.004	0.004	---	0.024	0.055	---	0.004	0.018
1.10	0.013	0.013	---	0.048	0.098	---	0.013	0.037
1.20	0.039	0.040	---	0.078	0.161	---	0.039	0.071
1.30	0.070	0.072	---	0.099	0.201	---	0.070	0.102
1.40	0.101	0.103	---	0.122	0.229	---	0.101	0.131
1.50	0.129	0.133	---	0.133	0.249	0.166	0.129	0.157
1.60	0.156	0.160	---	0.150	0.263	0.198	0.156	0.182
1.80	0.200	0.206	0.253	---	0.280	0.263	0.200	0.232
2.00	0.236	0.242	0.296	---	0.291	0.327	0.236	0.269
2.25	0.270	0.277	0.337	---	0.298	0.322	0.270	0.296
2.50	0.296	0.303	0.369	---	0.302	0.317	0.296	0.314
2.75	0.316	0.324	0.395	---	0.305	0.313	0.316	0.329
3.00	0.331	0.340	0.415	---	0.306	0.308	0.331	0.342
3.25	0.344	0.352	0.431	---	0.307	---	0.344	0.354
3.50	0.354	0.363	0.444	---	0.308	---	0.354	0.363
3.75	0.362	0.371	0.455	---	0.308	---	0.362	0.370
4.00	0.368	0.378	0.464	---	0.309	---	0.369	0.377
4.50	0.379	0.389	0.479	---	0.309	---	0.379	0.387
5.00	0.386	0.396	0.490	---	0.310	---	0.386	0.394
6.00	0.396	0.406	0.505	---	0.310	---	0.396	0.403
8.00	0.406	0.417	0.524	---	0.310	---	0.406	0.413
10.00	0.411	0.421	0.536	---	0.310	---	0.411	0.418

Tabla I.D.10. Valores del coeficiente  $K_{AG4}$ 

Para $\theta = 30^\circ$								
$d_2/d_1$	Sotelo	Mataix	White	CFE	King	USACE	Sabersky	$K_{AG4}$
1.00	0.000	0.000	---	0.000	0.000	---	0.000	0.000
1.05	0.006	0.007	---	0.028	0.087	---	0.006	0.027
1.10	0.022	0.024	---	0.052	0.155	---	0.022	0.055
1.20	0.068	0.076	---	0.086	0.254	---	0.067	0.110
1.30	0.121	0.135	---	0.120	0.318	---	0.119	0.163
1.40	0.174	0.194	---	0.157	0.362	---	0.172	0.212
1.50	0.224	0.250	---	0.193	0.393	0.248	0.221	0.255
1.60	0.267	0.301	---	0.225	0.415	0.297	0.266	0.295
1.80	0.339	0.387	0.346	---	0.443	0.394	0.342	0.375
2.00	0.392	0.456	0.404	---	0.459	0.491	0.403	0.434
2.25	0.440	0.522	0.463	---	0.471	0.484	0.461	0.473
2.50	0.473	0.572	0.509	---	0.477	0.477	0.505	0.503
2.75	0.494	0.610	0.544	---	0.481	0.470	0.539	0.526
3.00	0.507	0.640	0.572	---	0.484	0.464	0.566	0.546
3.25	0.526	0.664	0.593	---	0.486	---	0.587	0.565
3.50	0.542	0.683	0.611	---	0.487	---	0.604	0.582
3.75	0.554	0.699	0.625	---	0.488	---	0.618	0.596
4.00	0.564	0.712	0.636	---	0.488	---	0.629	0.606
4.50	0.580	0.732	0.654	---	0.489	---	0.647	0.620
5.00	0.592	0.746	0.667	---	0.489	---	0.660	0.631
6.00	0.607	0.766	0.684	---	0.490	---	0.677	0.645
8.00	0.622	0.785	0.705	---	0.490	---	0.694	0.659
10.00	0.629	0.794	0.717	---	0.490	---	0.702	0.666

Tabla I.D.11. Valores del coeficiente  $K_{AG5}$ 

Para $\theta = 40^\circ$							
$d_2/d_1$	Sotelo	White	CFE	King	USACE	Sabersky	$K_{AG5}$
1.00	0.000	---	0.000	0.000	---	0.000	0.000
1.05	0.008	---	0.029	0.106	---	0.008	0.038
1.10	0.029	---	0.054	0.190	---	0.027	0.075
1.20	0.090	---	0.091	0.311	---	0.084	0.144
1.30	0.160	---	0.133	0.390	---	0.150	0.208
1.40	0.230	---	0.180	0.444	---	0.216	0.268
1.50	0.296	---	0.230	0.481	0.315	0.278	0.320
1.60	0.353	---	0.275	0.508	0.366	0.335	0.367
1.80	0.445	0.445	---	0.543	0.469	0.431	0.466
2.00	0.512	0.522	---	0.563	0.571	0.507	0.535
2.25	0.571	0.597	---	0.577	0.578	0.581	0.581
2.50	0.609	0.655	---	0.585	0.585	0.636	0.615
2.75	0.631	0.699	---	0.590	0.592	0.679	0.641
3.00	0.643	0.735	---	0.593	0.599	0.713	0.662
3.25	0.667	0.763	---	0.595	---	0.739	0.685
3.50	0.687	0.786	---	0.596	---	0.761	0.702
3.75	0.703	0.805	---	0.597	---	0.778	0.717
4.00	0.716	0.820	---	0.598	---	0.793	0.729
4.50	0.736	0.844	---	0.599	---	0.815	0.747
5.00	0.750	0.860	---	0.599	---	0.831	0.760
6.00	0.770	0.881	---	0.600	---	0.853	0.776
8.00	0.789	0.904	---	0.600	---	0.874	0.792
10.00	0.798	0.917	---	0.600	---	0.884	0.800

Tabla I.D.12. Valores del coeficiente  $K_{AG6}$ 

Para $\theta = 60^\circ$					
$d_2/d_1$	Sotelo	CFE	King	USACE	$K_{AG6}$
1.00	0.000	0.000	0.000	---	0.000
1.05	0.010	0.031	0.128	---	0.056
1.10	0.036	0.060	0.228	---	0.108
1.20	0.113	0.102	0.373	---	0.196
1.30	0.202	0.151	0.468	---	0.274
1.40	0.291	0.217	0.533	---	0.347
1.50	0.374	0.275	0.578	0.396	0.406
1.60	0.445	0.338	0.610	0.440	0.458
1.80	0.561	0.472	0.651	0.529	0.553
2.00	0.646	0.580	0.675	0.618	0.623
2.25	0.719	---	0.692	0.657	0.679
2.50	0.766	---	0.702	0.696	0.713
2.75	0.793	---	0.707	0.735	0.739
3.00	0.808	---	0.711	0.774	0.759
3.25	0.838	---	0.714	---	0.776
3.50	0.862	---	0.715	---	0.789
3.75	0.882	---	0.716	---	0.799
4.00	0.898	---	0.717	---	0.808
4.50	0.924	---	0.718	---	0.821
5.00	0.942	---	0.719	---	0.830
6.00	0.966	---	0.719	---	0.843
8.00	0.990	---	0.720	---	0.855
10.00	1.002	---	0.720	---	0.861

Tabla I.D.13. Valores del coeficiente  $K_{AG7}$ 

Para $\theta = 80^\circ$					
$d_2/d_1$	Sotelo	CFE	King	USACE	$K_{AG7}$
1.00	0.000	0.000	0.000	---	0.000
1.05	0.010	0.033	0.125	---	0.056
1.10	0.035	0.067	0.223	---	0.108
1.20	0.109	0.117	0.364	---	0.197
1.30	0.195	0.170	0.457	---	0.274
1.40	0.280	0.233	0.520	---	0.344
1.50	0.361	0.290	0.564	0.390	0.401
1.60	0.431	0.351	0.596	0.438	0.454
1.80	0.548	0.490	0.636	0.534	0.552
2.00	0.637	0.620	0.659	0.629	0.634
2.25	0.717	---	0.676	0.672	0.688
2.50	0.772	---	0.685	0.715	0.723
2.75	0.810	---	0.691	0.758	0.748
3.00	0.836	---	0.694	0.800	0.767
3.25	0.867	---	0.697	---	0.783
3.50	0.892	---	0.698	---	0.796
3.75	0.913	---	0.699	---	0.806
4.00	0.930	---	0.700	---	0.815
4.50	0.956	---	0.701	---	0.829
5.00	0.975	---	0.702	---	0.838
6.00	1.000	---	0.702	---	0.851
8.00	1.025	---	0.703	---	0.864
10.00	1.037	---	0.703	---	0.870

Tabla I.D.14. Valores del coeficiente  $K_{AG8}$ 

Para $\theta = 90^\circ$					
$d_2/d_1$	Sotelo	CFE	King	USACE	$K_{AG8}$
1.00	0.000	0.000	0.000	---	0.000
1.05	0.010	0.036	0.119	---	0.055
1.10	0.034	0.071	0.212	---	0.106
1.20	0.106	0.120	0.347	---	0.191
1.30	0.190	0.174	0.435	---	0.266
1.40	0.273	0.240	0.496	---	0.336
1.50	0.351	0.297	0.538	0.379	0.391
1.60	0.420	0.355	0.568	0.429	0.443
1.80	0.535	0.496	0.606	0.529	0.542
2.00	0.624	0.640	0.628	0.630	0.614
2.25	0.705	---	0.644	0.672	0.663
2.50	0.762	---	0.653	0.713	0.697
2.75	0.803	---	0.658	0.755	0.726
3.00	0.831	---	0.662	0.797	0.747
3.25	0.862	---	0.664	---	0.763
3.50	0.887	---	0.666	---	0.776
3.75	0.907	---	0.667	---	0.787
4.00	0.924	---	0.667	---	0.796
4.50	0.950	---	0.668	---	0.809
5.00	0.969	---	0.669	---	0.819
6.00	0.994	---	0.669	---	0.832
8.00	1.019	---	0.670	---	0.844
10.00	1.031	---	0.670	---	0.850

## APÉNDICE I.E

### DATOS DEL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA REDUCCIÓN BRUSCA DEL DIÁMETRO

Tabla I.E.1. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción brusca, (CFE, 1983)

Coordenadas de Autocad		Coordenadas reales	
X ( $A_2/A_1$ )	Y (K)	$A_2/A_1$	K
0.0000	123.9079	0.00	0.621
9.9210	120.0474	0.05	0.602
19.8419	116.5291	0.10	0.584
39.6839	108.3729	0.20	0.543
59.5258	99.5137	0.30	0.499
79.3677	88.6388	0.40	0.445
99.2096	75.2161	0.50	0.377
119.0516	58.1840	0.60	0.292
138.8935	36.1027	0.70	0.181
158.7354	17.0716	0.80	0.086
178.5774	6.8735	0.90	0.034
188.4983	3.5151	0.95	0.018
198.4193	0.0000	1.00	0.000

Tabla I.E.2. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción brusca, (Cengel et al., 2006)

Coordenadas de Autocad		Coordenadas reales	
X ( $A_2/A_1$ )	Y (K)	$A_2/A_1$	K
0.0000	97.2504	0.00	0.500
11.9770	95.9375	0.05	0.493
23.9541	93.2180	0.10	0.479
47.9765	84.1216	0.20	0.433
71.9306	71.8368	0.30	0.369
95.8676	58.7072	0.40	0.302
119.8217	45.7660	0.50	0.235
143.7587	34.2314	0.60	0.176
167.7128	23.9377	0.70	0.123
191.6498	14.7476	0.80	0.076
215.6039	6.6827	0.90	0.034
227.5639	3.0943	0.95	0.016
239.5410	0.0000	1.00	0.000

Tabla I.E.3. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción brusca, (Brater et al., 1996)

( $d_2/d_1$ )	( $A_2/A_1$ )	K
0.00	0.00	0.49
0.22	0.05	0.47
0.32	0.10	0.45
0.45	0.20	0.41
0.55	0.30	0.34
0.63	0.40	0.26
0.71	0.50	0.18
0.77	0.60	0.11
0.84	0.70	0.07
0.89	0.80	0.04
0.95	0.90	0.03
0.97	0.95	0.02
0.00	1.00	0.00

Tabla I.E.4. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción brusca, (Munson et al., 1998)

Coordenadas de Autocad		Coordenadas reales	
X ( $A_2/A_1$ )	Y (K)	$A_2/A_1$	K
0.0000	93.6800	0.00	0.497
9.5209	92.7987	0.05	0.492
19.0418	90.2672	0.10	0.479
38.0837	82.3480	0.20	0.437
57.1255	71.7446	0.30	0.381
76.1674	59.1707	0.40	0.314
95.2092	45.6060	0.50	0.242
114.2511	31.6861	0.60	0.168
133.2929	19.6497	0.70	0.104
152.3347	9.5784	0.80	0.051
171.3766	2.7483	0.90	0.015
180.8975	0.6467	0.95	0.003
190.4184	0.0000	1.00	0.000

Tabla I.E.5. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción brusca, (USACE, 1980)

Coordenadas de Autocad		Coordenadas reales	
X ( $A_2/A_1$ )	Y (K)	$A_2/A_1$	K
0.0000	55.2913	0.00	0.501
5.6637	54.7219	0.05	0.496
11.3275	53.6014	0.10	0.486
22.6550	49.9410	0.20	0.452
33.9825	45.0418	0.30	0.408
45.3100	39.2002	0.40	0.355
56.6375	31.6543	0.50	0.287
67.9650	22.8320	0.60	0.207
79.2925	13.6530	0.70	0.124
90.6200	6.2958	0.80	0.057
101.9475	1.6606	0.90	0.015
107.6113	0.3830	0.95	0.003
113.2750	0.0000	1.00	0.000

Tabla I.E.6. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción brusca, (Daugherty et al., 1965)

$X (D_2/D_1)$	$X (A_2/A_1)$	$Y (K)$
0.000	0.00	0.50
0.224	0.05	0.42
0.316	0.10	0.38
0.447	0.20	0.34
0.548	0.30	0.31
0.632	0.40	0.27
0.707	0.50	0.22
0.775	0.60	0.16
0.837	0.70	0.11
0.894	0.80	0.07
0.949	0.90	0.03
0.975	0.95	0.02
1.000	1.00	0.00

## APÉNDICE I.F

### DATOS DEL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA REDUCCIÓN GRADUAL DEL DIÁMETRO

Tabla I.F.1. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción gradual, (CFE, 1983)

$\theta^\circ$	5	10	20	30	40	60	80
$K$	0.060	0.16	0.2	0.24	0.28	0.32	0.35

Tabla I.F.2. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción gradual, (Mataix, 2010)

$D/d$	Angulo de reducción $\theta^\circ$									
	10	20	30	40	60	80	90	120	150	180
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.037	0.052	0.069	0.086	0.124	0.156	0.175	0.212	0.232	0.243
1.30	0.043	0.058	0.078	0.097	0.139	0.175	0.195	0.238	0.261	0.271
1.50	0.051	0.068	0.092	0.114	0.163	0.206	0.228	0.280	0.307	0.319
1.70	0.058	0.077	0.104	0.128	0.183	0.232	0.255	0.313	0.345	0.359
2.00	0.065	0.086	0.117	0.143	0.205	0.261	0.286	0.352	0.388	0.404
2.30	0.070	0.093	0.126	0.156	0.223	0.286	0.313	0.383	0.422	0.439
2.50	0.073	0.097	0.131	0.161	0.232	0.297	0.324	0.396	0.436	0.454
2.80	0.076	0.100	0.136	0.168	0.241	0.308	0.334	0.410	0.451	0.468
3.00	0.077	0.101	0.138	0.169	0.244	0.310	0.337	0.415	0.457	0.473

Tabla I.F.3. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción gradual, (Fox et al., 2006)

$D/d$	Angulo de reducción $\theta^\circ$							
	10	20, 30 y 40	60	80	90	120	150	180
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.020	0.020	0.030	0.050	0.060	0.090	0.130	0.140
1.30	0.040	0.040	0.045	0.075	0.090	0.140	0.190	0.200
1.50	0.050	0.046	0.063	0.108	0.130	0.195	0.260	0.285
1.70	0.050	0.043	0.066	0.120	0.148	0.230	0.300	0.325
2.00	0.050	0.040	0.070	0.140	0.170	0.270	0.350	0.410
2.30	0.050	0.043	0.073	0.146	0.176	0.276	0.356	0.425
2.50	0.050	0.045	0.075	0.150	0.180	0.280	0.360	0.435
2.80	0.050	0.048	0.078	0.158	0.186	0.286	0.368	0.450
3.00	0.050	0.050	0.080	0.160	0.190	0.290	0.370	0.460

Tabla I.F.4. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción gradual, (Mott, 2006)

$D/d$	Angulo de reducción $\theta^\circ$								
	10	20	30	40	60	80	120	150	180
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.055	0.025	0.028	0.032	0.053	0.070	0.108	0.108	0.074
1.30	0.054	0.033	0.037	0.041	0.067	0.093	0.143	0.143	0.122
1.50	0.053	0.040	0.044	0.050	0.076	0.117	0.200	0.200	0.220
1.70	0.051	0.040	0.045	0.051	0.080	0.129	0.238	0.238	0.303
2.00	0.047	0.042	0.046	0.051	0.085	0.141	0.266	0.266	0.380
2.30	0.047	0.042	0.047	0.051	0.087	0.148	0.274	0.274	0.413
2.50	0.048	0.043	0.047	0.051	0.087	0.150	0.277	0.277	0.420
2.80	0.051	0.043	0.047	0.051	0.087	0.152	0.278	0.278	0.437
3.00	0.052	0.043	0.047	0.051	0.087	0.151	0.278	0.278	0.440

Tabla I.F.5. Valores del coeficiente  $K$  para una reducción gradual, (USACE, 1980)

D/d	Angulo de reducción $\theta^\circ$								
	10	20	30	40	60	80	120	150	180
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.005	0.012	0.021	0.028	0.050	0.075	0.142	0.180	0.211
1.30	0.007	0.016	0.026	0.036	0.060	0.088	0.172	0.216	0.247
1.50	0.010	0.023	0.036	0.050	0.081	0.114	0.231	0.286	0.317
1.70	0.012	0.025	0.040	0.055	0.089	0.143	0.279	0.333	0.363
2.00	0.016	0.030	0.045	0.061	0.101	0.186	0.350	0.402	0.431

Tabla I.F.6. Valores del coeficiente propuesto para una reducción gradual ( $K_{RG1}$ )

Para $\theta = 10^\circ$					
D/d	Mataix	Mott	Fox	USACE	$K_{RG1}$
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.037	0.055	0.020	0.005	0.026
1.30	0.043	0.054	0.040	0.007	0.034
1.50	0.051	0.053	0.050	0.010	0.042
1.70	0.058	0.051	0.050	0.012	0.046
2.00	0.065	0.047	0.050	0.016	0.051
2.30	0.070	0.047	0.050	---	0.055
2.50	0.073	0.048	0.050	---	0.057
2.80	0.076	0.051	0.050	---	0.059
3.00	0.077	0.052	0.050	---	0.060

Tabla I.F.7. Valores del coeficiente propuesto para una reducción gradual ( $K_{RG2}$ )

Para $\theta = 20^\circ$					
D/d	Mataix	Mott	Fox	USACE	$K_{RG2}$
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.052	0.025	0.020	0.012	0.028
1.30	0.058	0.033	0.040	0.016	0.036
1.50	0.068	0.040	0.046	0.023	0.044
1.70	0.077	0.040	0.043	0.025	0.049
2.00	0.086	0.042	0.040	0.030	0.055
2.30	0.093	0.042	0.043	---	0.059
2.50	0.097	0.043	0.045	---	0.062
2.80	0.100	0.043	0.048	---	0.064
3.00	0.101	0.043	0.050	---	0.065

Tabla I.F.8. Valores del coeficiente propuesto para una reducción gradual ( $K_{RG3}$ )

Para $\theta = 30^\circ$					
D/d	Mataix	Mott	Fox	USACE	$K_{RG3}$
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.069	0.028	0.020	0.021	0.033
1.30	0.078	0.037	0.040	0.026	0.043
1.50	0.092	0.044	0.046	0.036	0.055
1.70	0.104	0.045	0.043	0.040	0.060
2.00	0.117	0.046	0.040	0.045	0.066
2.30	0.126	0.047	0.043	---	0.072
2.50	0.131	0.047	0.045	---	0.074
2.80	0.136	0.047	0.048	---	0.077
3.00	0.138	0.047	0.050	---	0.078

Tabla I.F.9. Valores del coeficiente propuesto para una reducción gradual ( $K_{RG4}$ )

Para $\theta = 40^\circ$					
D/d	Mataix	Mott	Fox	USACE	$K_{RG4}$
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.086	0.032	0.020	0.028	0.040
1.30	0.097	0.041	0.040	0.036	0.051
1.50	0.114	0.050	0.046	0.050	0.064
1.70	0.128	0.051	0.043	0.055	0.071
2.00	0.143	0.051	0.040	0.061	0.078
2.30	0.156	0.051	0.043	---	0.083
2.50	0.161	0.051	0.045	---	0.086
2.80	0.168	0.051	0.048	---	0.089
3.00	0.169	0.051	0.050	---	0.090

Tabla I.F.10. Valores del coeficiente propuesto para una reducción gradual ( $K_{RG5}$ )

Para $\theta = 60^\circ$					
D/d	Mataix	Mott	Fox	USACE	$K_{RG5}$
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.124	0.053	0.030	0.050	0.059
1.30	0.139	0.067	0.045	0.060	0.075
1.50	0.163	0.076	0.063	0.081	0.094
1.70	0.183	0.080	0.066	0.089	0.106
2.00	0.205	0.085	0.070	0.101	0.118
2.30	0.223	0.087	0.073	---	0.127
2.50	0.232	0.087	0.075	---	0.131
2.80	0.241	0.087	0.078	---	0.135
3.00	0.244	0.087	0.080	---	0.137

Tabla I.F.11. Valores del coeficiente propuesto para una reducción gradual ( $K_{RG6}$ )

Para $\theta = 80^\circ$					
D/d	Mataix	Mott	Fox	USACE	$K_{RG6}$
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.156	0.070	0.050	0.075	0.087
1.30	0.175	0.093	0.075	0.088	0.108
1.50	0.206	0.117	0.108	0.114	0.136
1.70	0.232	0.129	0.120	0.143	0.156
2.00	0.261	0.141	0.140	0.186	0.176
2.30	0.286	0.148	0.146	---	0.191
2.50	0.297	0.150	0.150	---	0.199
2.80	0.308	0.152	0.158	---	0.206
3.00	0.310	0.151	0.160	---	0.207

Tabla I.F.12. Valores del coeficiente propuesto para una reducción gradual ( $K_{RG7}$ )

Para $\theta = 90^\circ$					
D/d	Mataix	Mott	Fox	USACE	$K_{RG7}$
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.175	0.080	0.060	0.092	0.100
1.30	0.195	0.109	0.090	0.107	0.125
1.50	0.228	0.140	0.130	0.136	0.158
1.70	0.255	0.154	0.148	0.179	0.184
2.00	0.286	0.171	0.170	0.244	0.208
2.30	0.313	0.182	0.176	---	0.223
2.50	0.324	0.186	0.180	---	0.230
2.80	0.334	0.188	0.186	---	0.236
3.00	0.337	0.188	0.190	---	0.238

Tabla I.F.13. Valores del coeficiente propuesto para una reducción gradual ( $K_{RG8}$ )

Para $\theta = 120^\circ$					
D/d	Mataix	Mott	Fox	USACE	$K_{RG8}$
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.212	0.108	0.090	0.142	0.136
1.30	0.238	0.143	0.140	0.172	0.173
1.50	0.280	0.200	0.195	0.231	0.226
1.70	0.313	0.238	0.230	0.279	0.262
2.00	0.352	0.266	0.270	0.350	0.294
2.30	0.383	0.274	0.276	---	0.311
2.50	0.396	0.277	0.280	---	0.318
2.80	0.410	0.278	0.286	---	0.325
3.00	0.415	0.278	0.290	---	0.327

Tabla I.F.14. Valores del coeficiente propuesto para una reducción gradual ( $K_{RG9}$ )

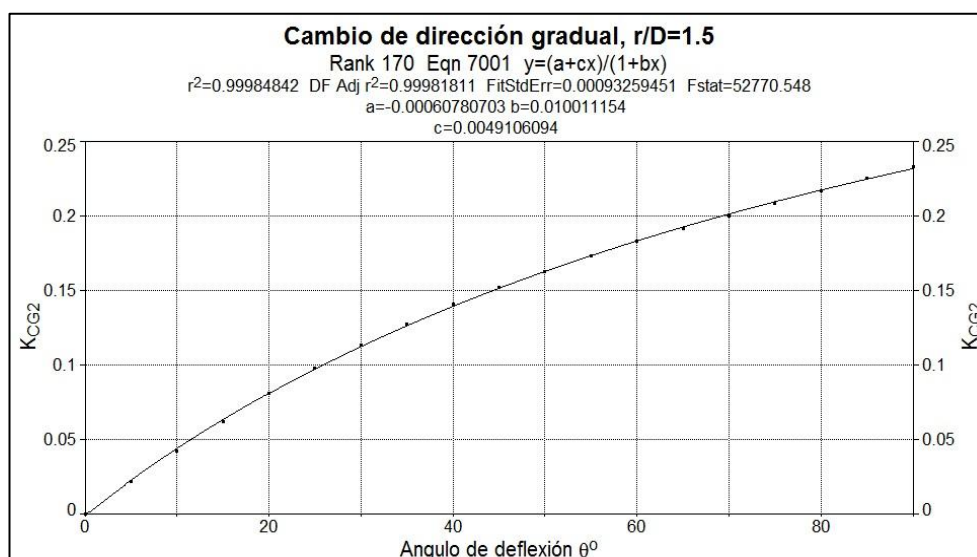
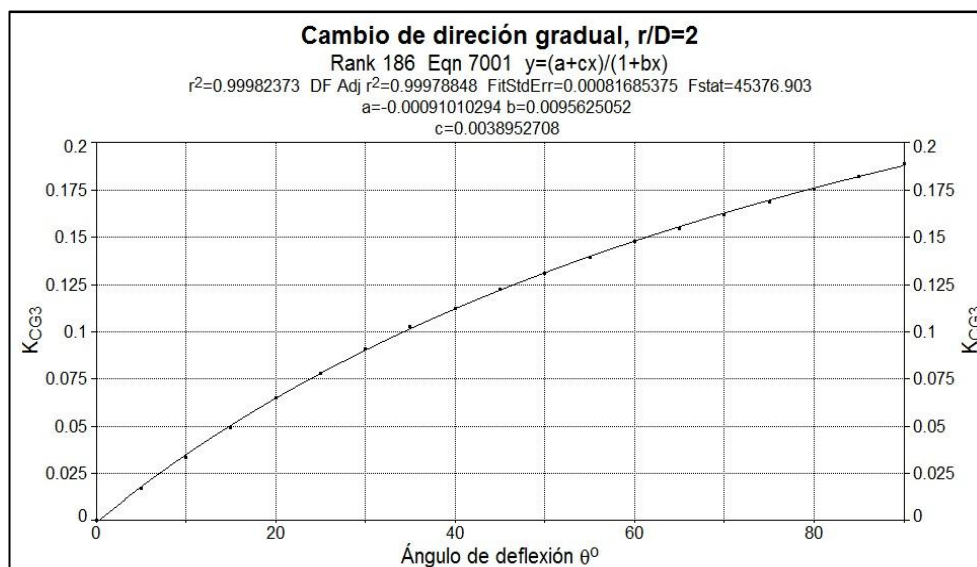
Para $\theta = 150^\circ$					
D/d	Mataix	Mott	Fox	USACE	$K_{RG9}$
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.232	0.146	0.130	0.180	0.170
1.30	0.261	0.183	0.190	0.216	0.212
1.50	0.307	0.248	0.260	0.286	0.275
1.70	0.345	0.304	0.300	0.333	0.320
2.00	0.388	0.347	0.350	0.402	0.360
2.30	0.422	0.360	0.356	---	0.379
2.50	0.436	0.363	0.360	---	0.386
2.80	0.451	0.363	0.368	---	0.394
3.00	0.457	0.363	0.370	---	0.396

Tabla I.F.15. Valores del coeficiente propuesto para una reducción gradual ( $K_{RG10}$ )

Para $\theta = 180^\circ$				
D/d	Mataix	Fox	USACE	$K_{RG10}$
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.243	0.140	0.211	0.194
1.30	0.271	0.200	0.247	0.239
1.50	0.319	0.285	0.317	0.307
1.70	0.359	0.340	0.363	0.354
2.00	0.404	0.410	0.431	0.403
2.30	0.439	0.425	---	0.432
2.50	0.454	0.435	---	0.445
2.80	0.468	0.450	---	0.459
3.00	0.473	0.460	---	0.467

## APÉNDICE II.A

### CURVAS DE AJUSTE Y ECUACIONES PARA CAMBIO DE DIRECCIÓN GRADUAL.

Figura II.A.1. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{CG2}$ Figura II.A.2. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{CG3}$

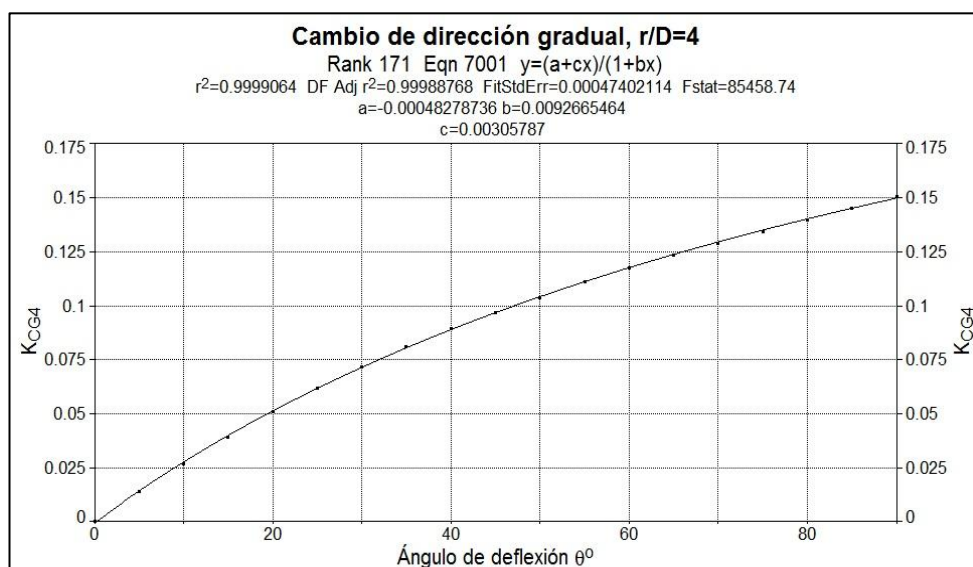


Figura II.A.3. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{CG4}$

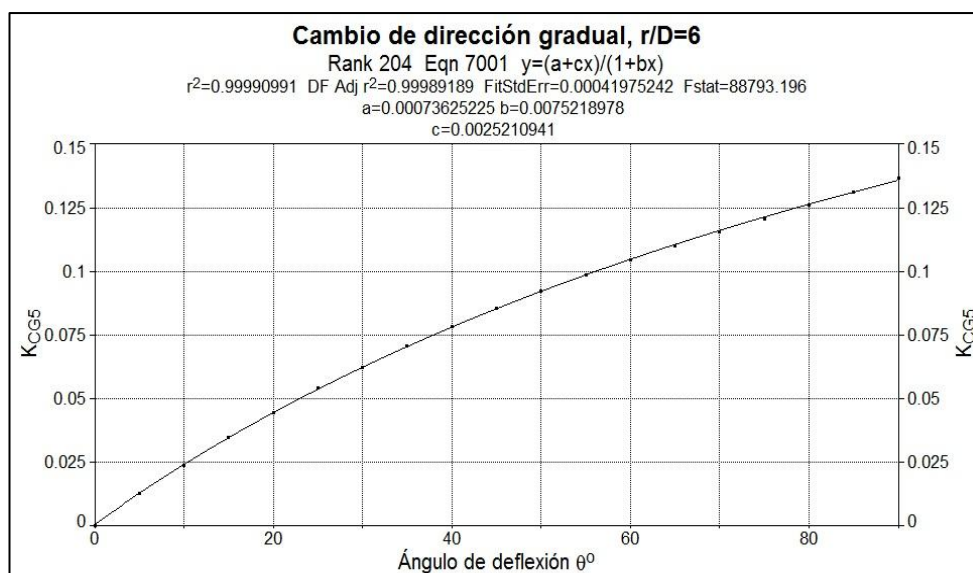


Figura II.A.4. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{CG5}$

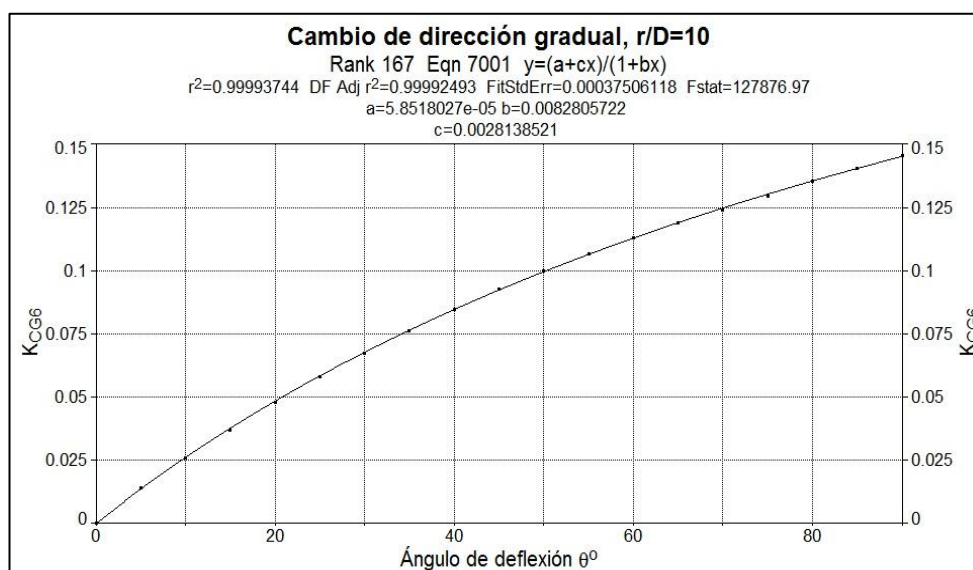


Figura II.A.5. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{CG6}$

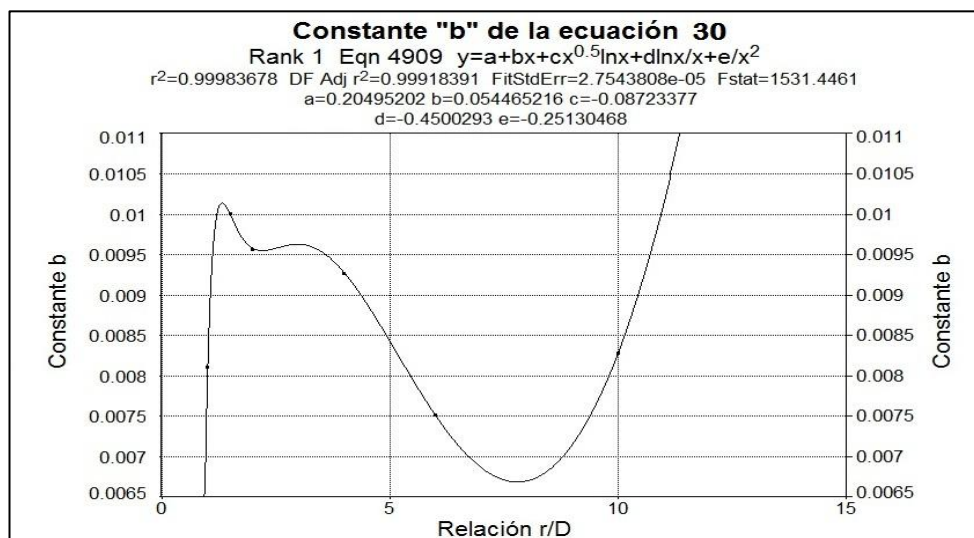


Figura II.A.6. Curva de ajuste y ecuación para constante "b" de la ecuación 30

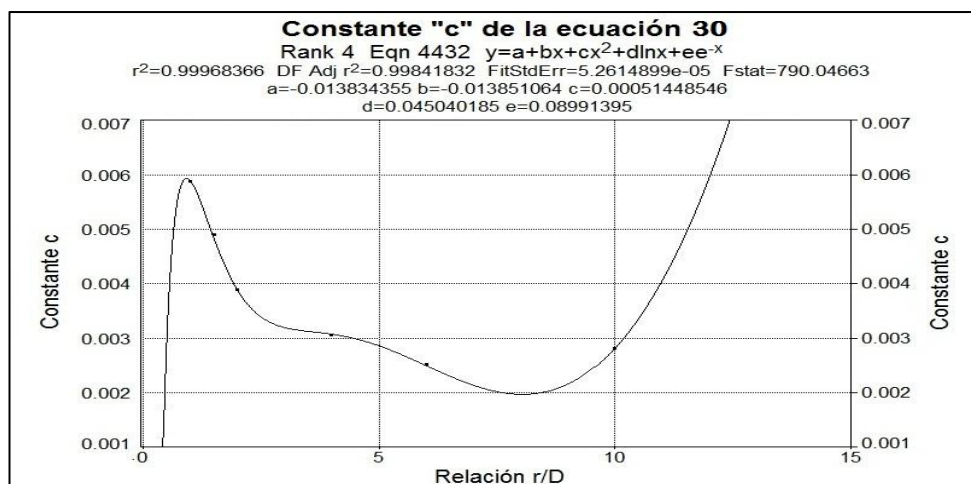


Figura II.A.7. Curva de ajuste y ecuación para constante "c" de la ecuación 30

## APÉNDICE II.B

### CURVAS DE AJUSTE Y ECUACIONES PARA AMPLIACIÓN GRADUAL DEL DIÁMETRO.

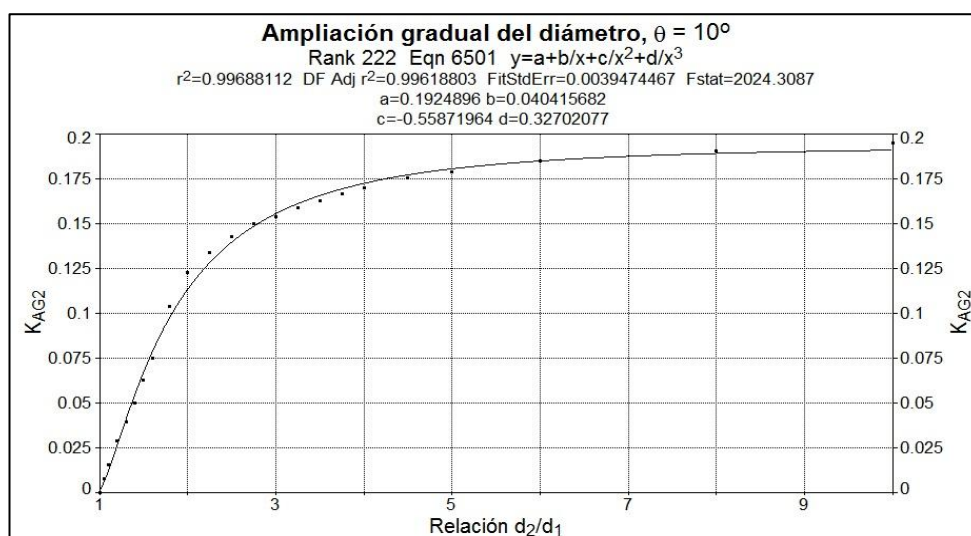


Figura II.B.1. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{AG2}$

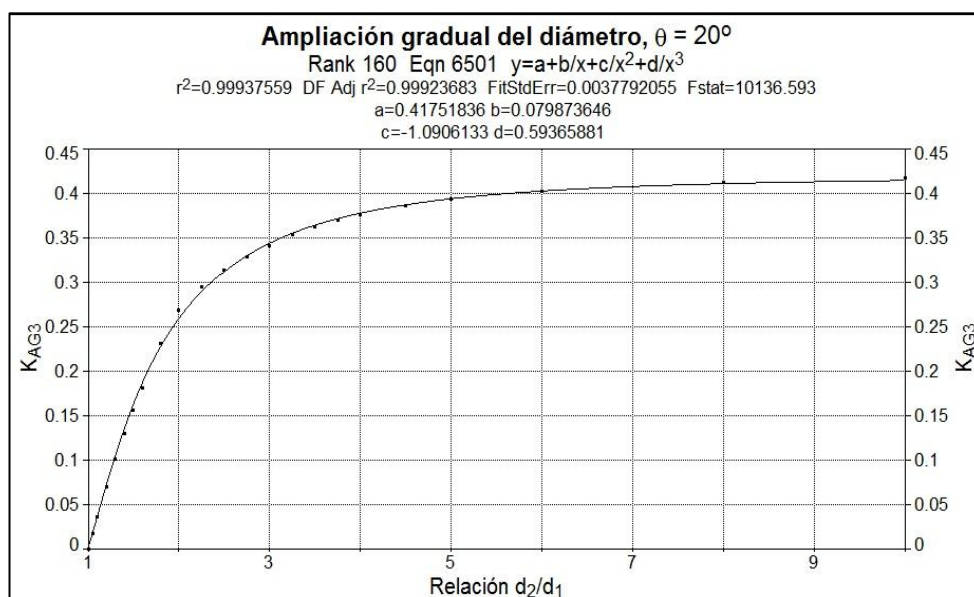


Figura II.B.2. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{AG3}$

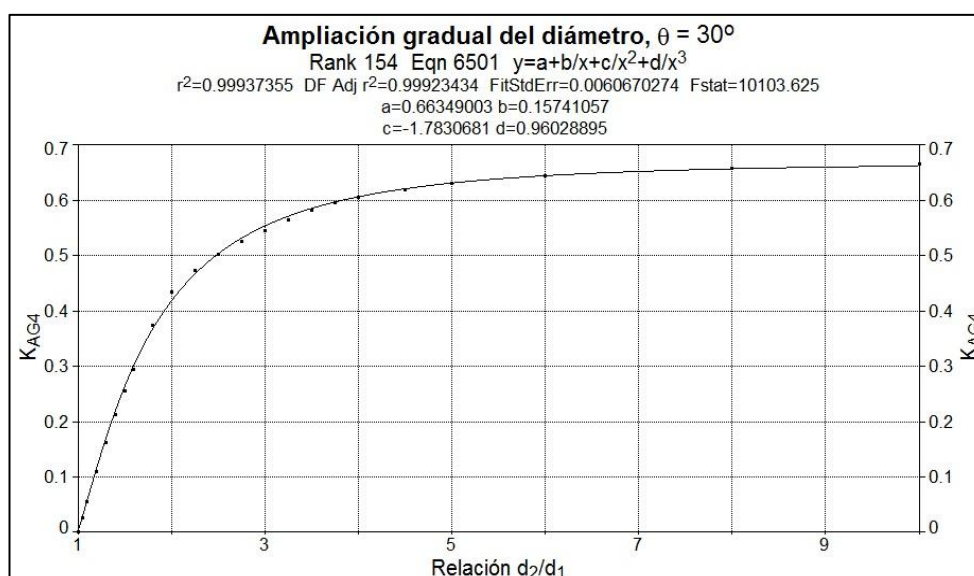


Figura II.B.3. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{AG4}$

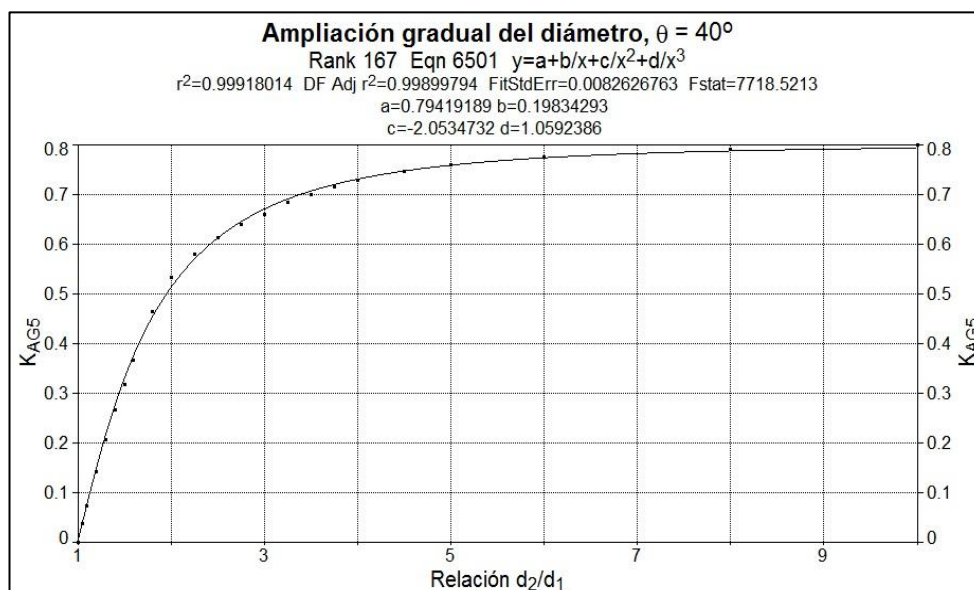


Figura II.B.4. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{AG5}$

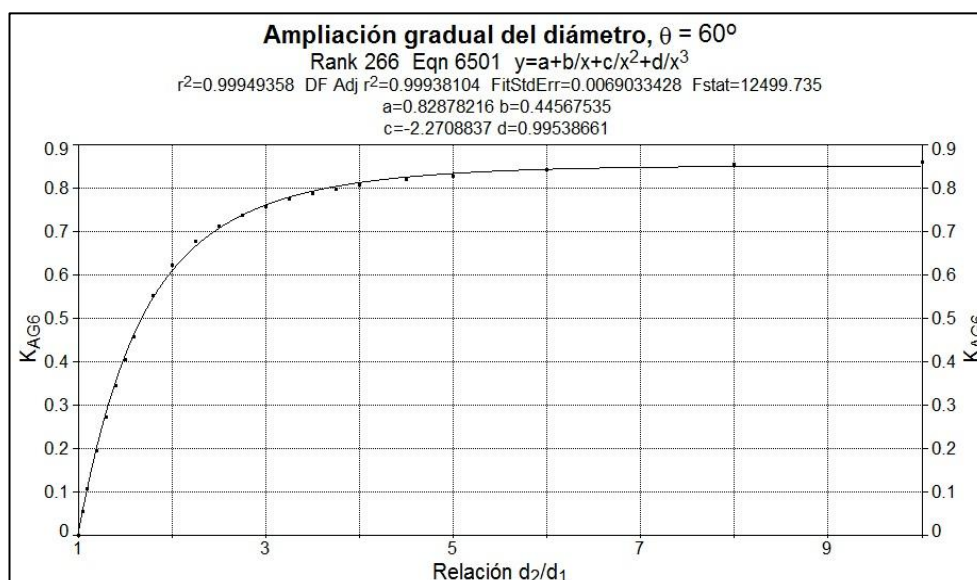


Figura II.B.5. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{AG6}$

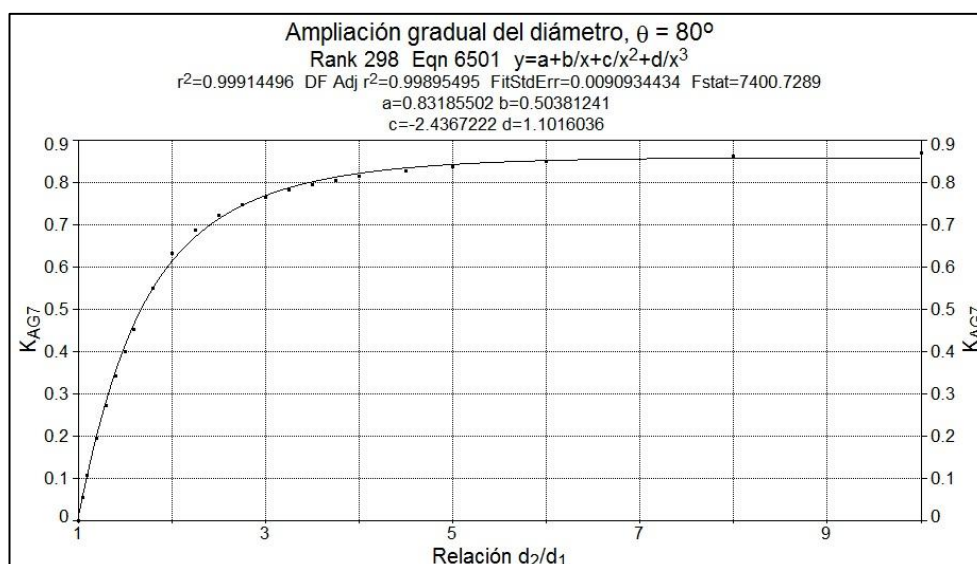


Figura II.B.6. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{AG7}$

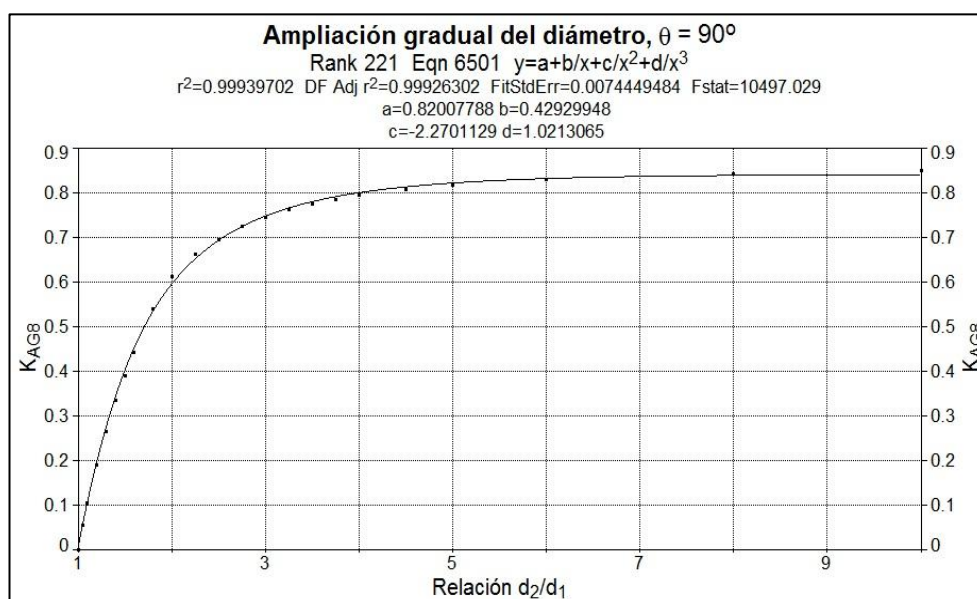


Figura II.B.7. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{AG8}$

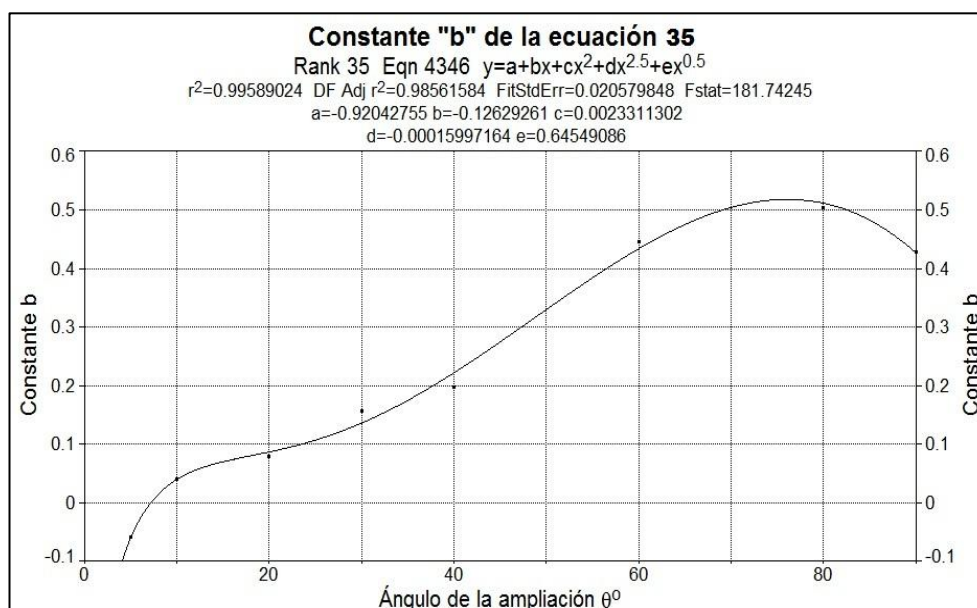


Figura II.B.8. Curva de ajuste y ecuación para la constante "b" de la ecuación 35

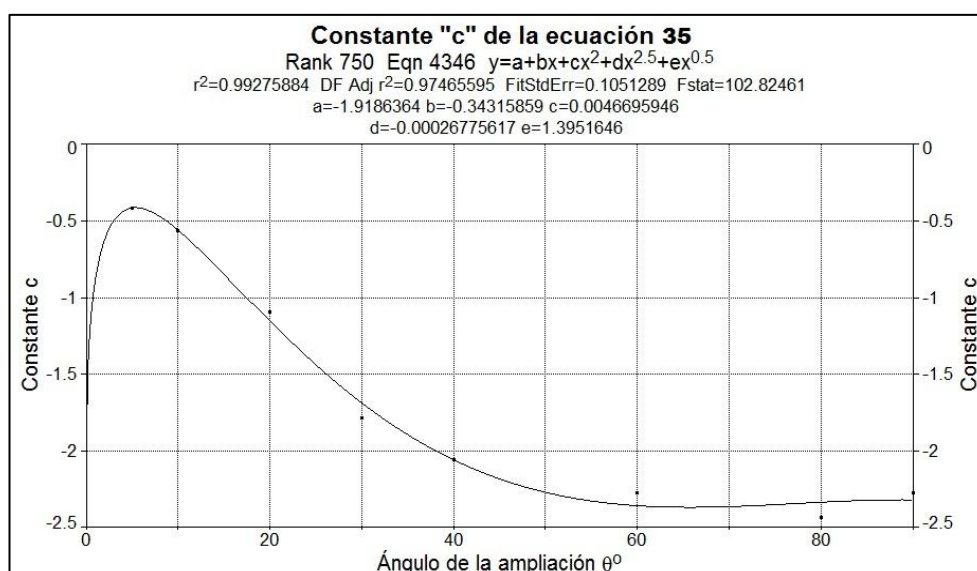


Figura II.B.9. Curva de ajuste y ecuación para la constante "c" de la ecuación 35

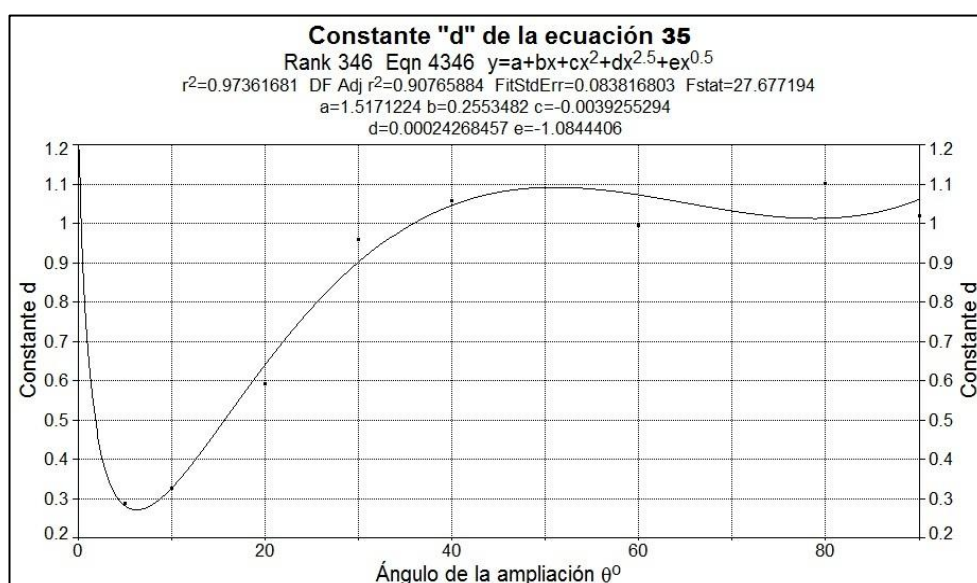


Figura II.B.10. Curva de ajuste y ecuación para la constante "d" de la ecuación 35

## APÉNDICE II.C

### CURVAS DE AJUSTE Y ECUACIONES PARA REDUCCIÓN GRADUAL DEL DIÁMETRO.

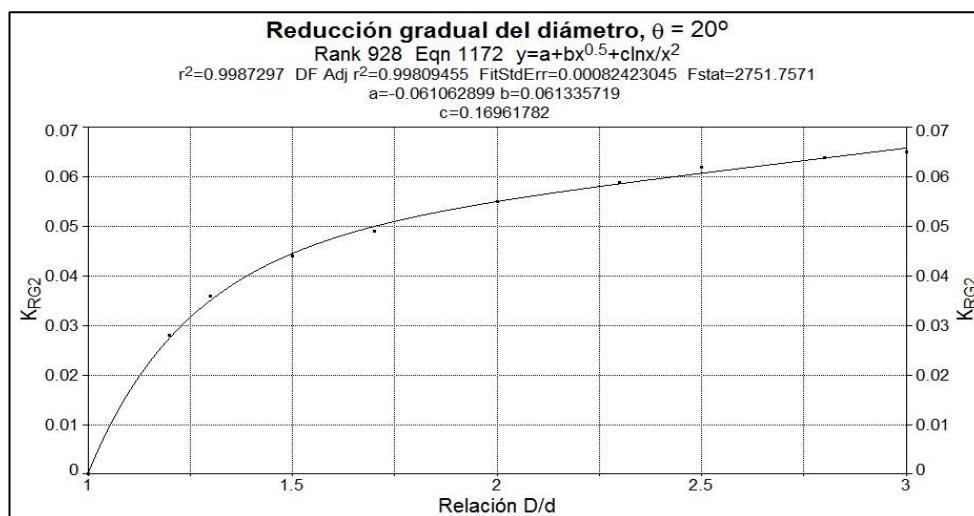


Figura II.C.1. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{RG2}$

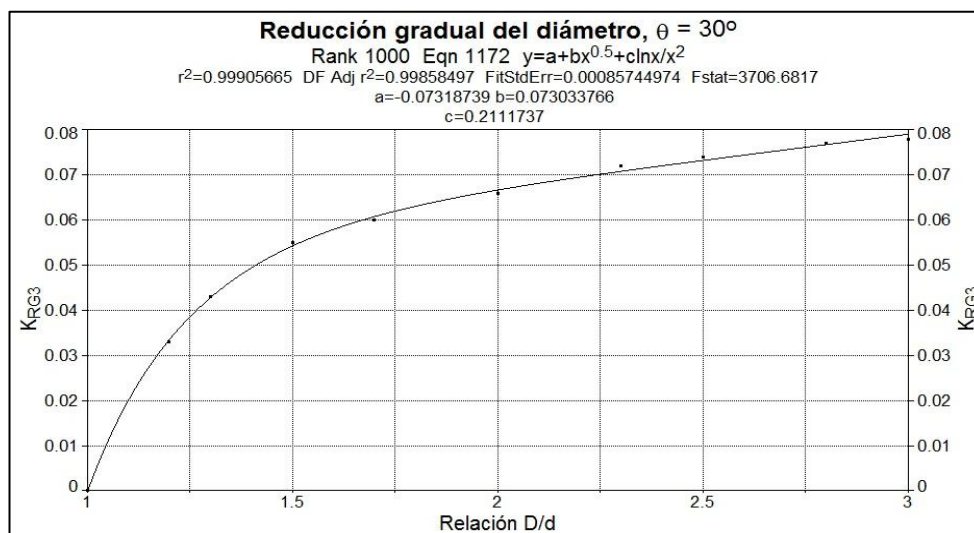


Figura II.C.2. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{RG3}$

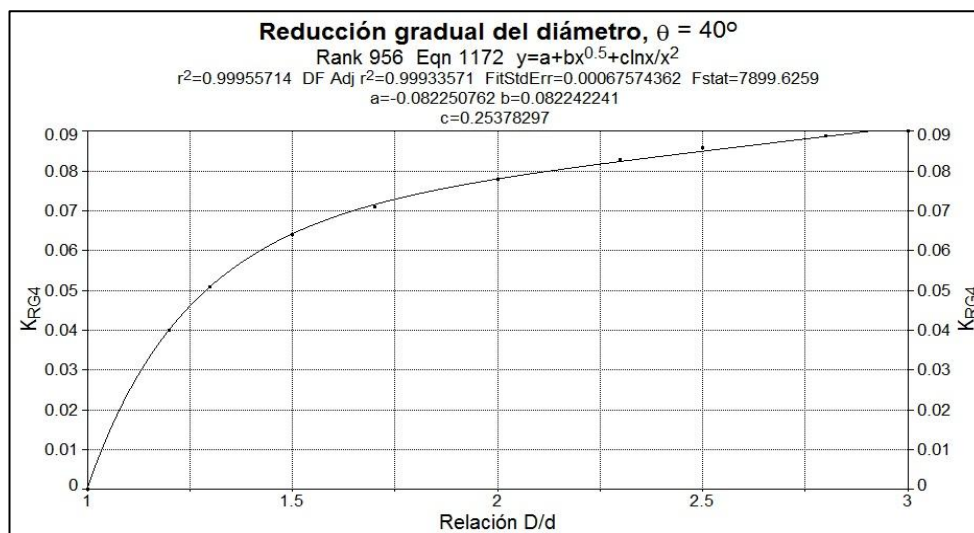


Figura II.C.3. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{RG4}$

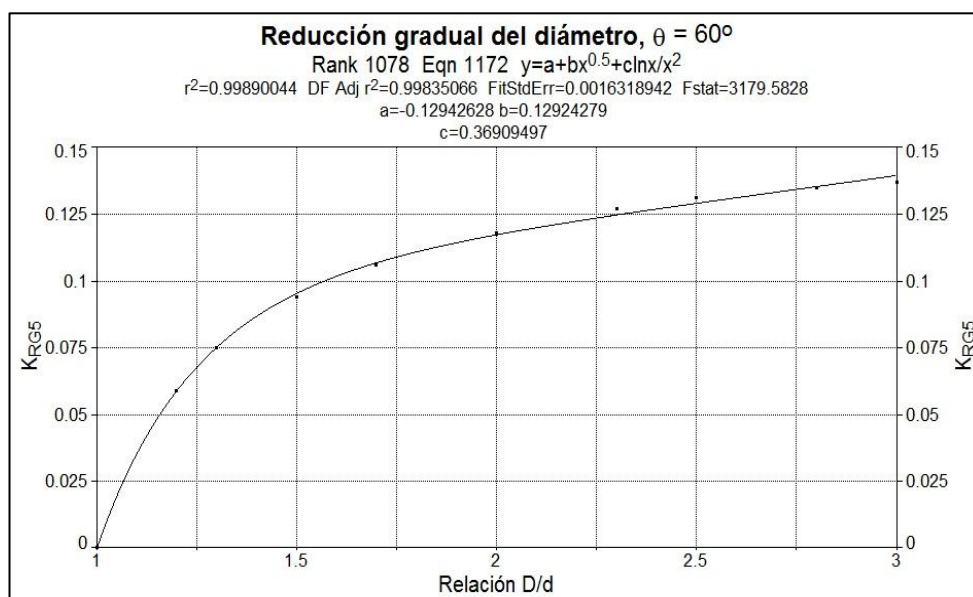


Figura II.C.4. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{RG5}$

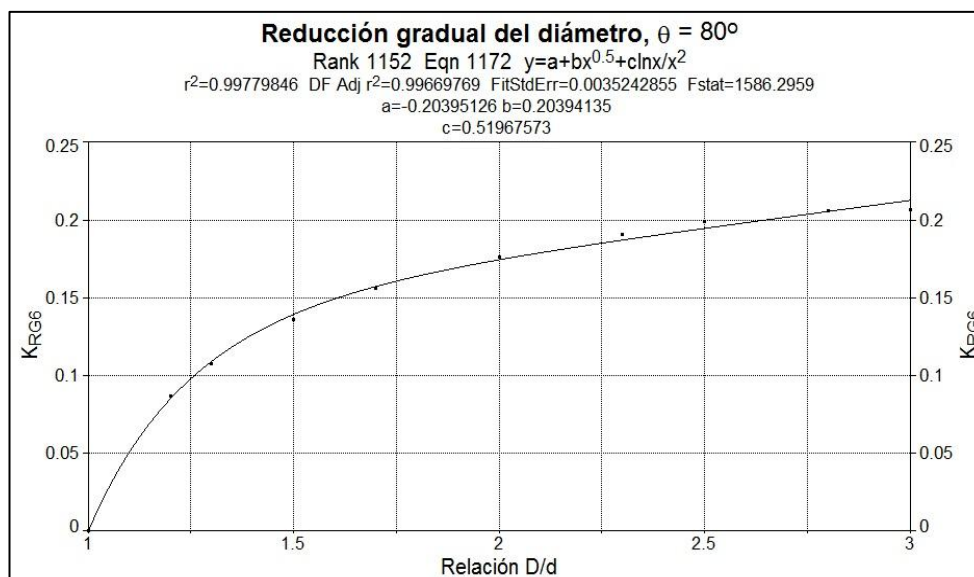


Figura II.C.5. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{RG6}$

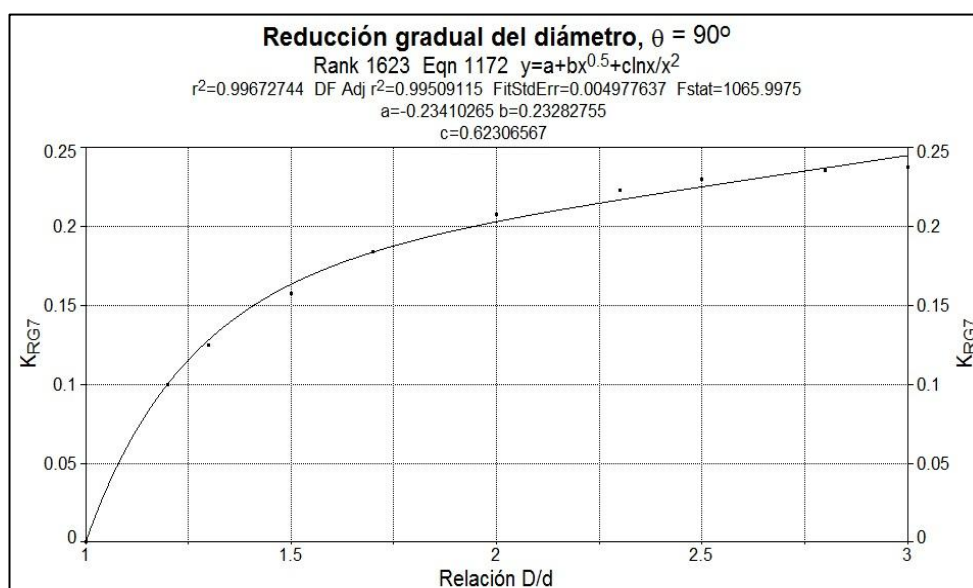


Figura II.C.6. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{RG7}$

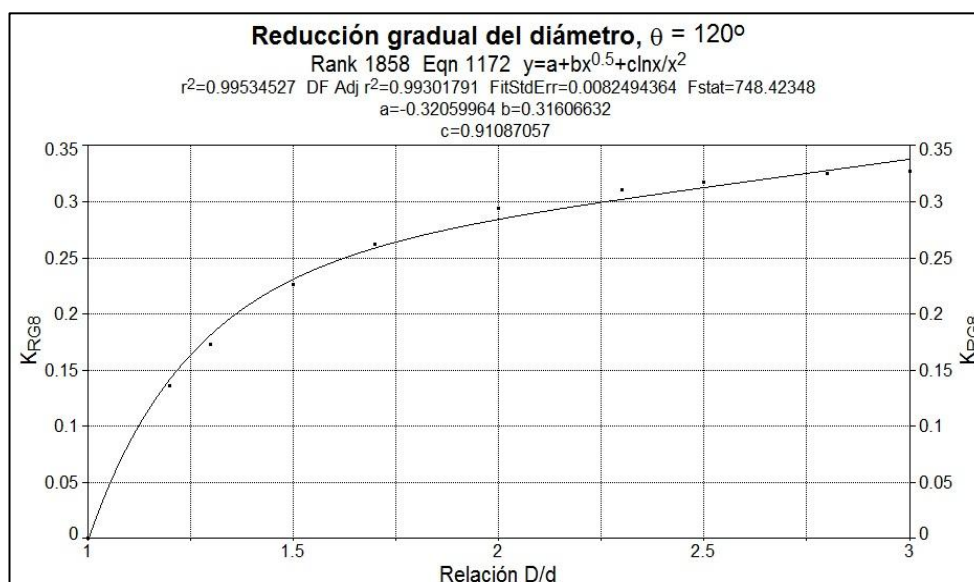


Figura II.C.7. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{RG8}$

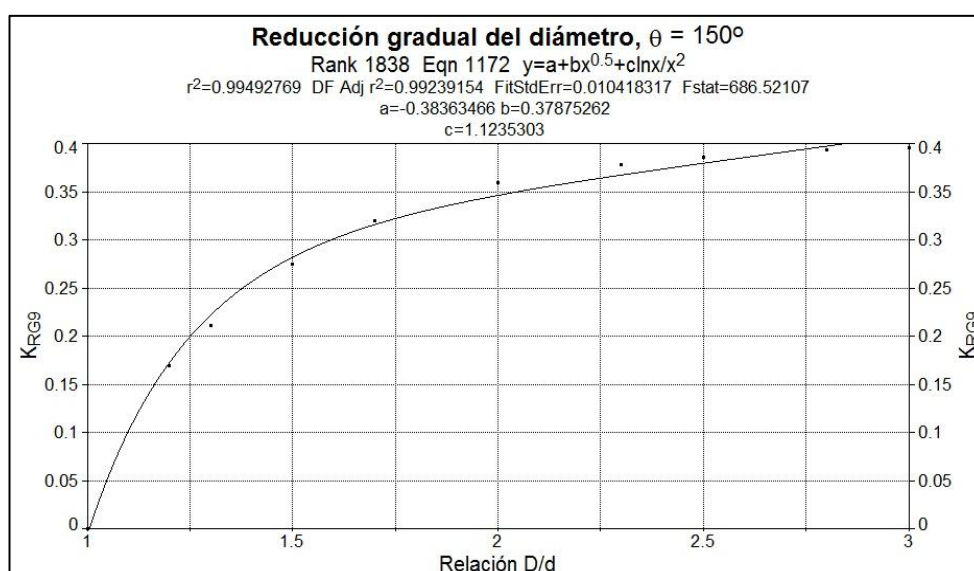


Figura II.C.8. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{RG9}$

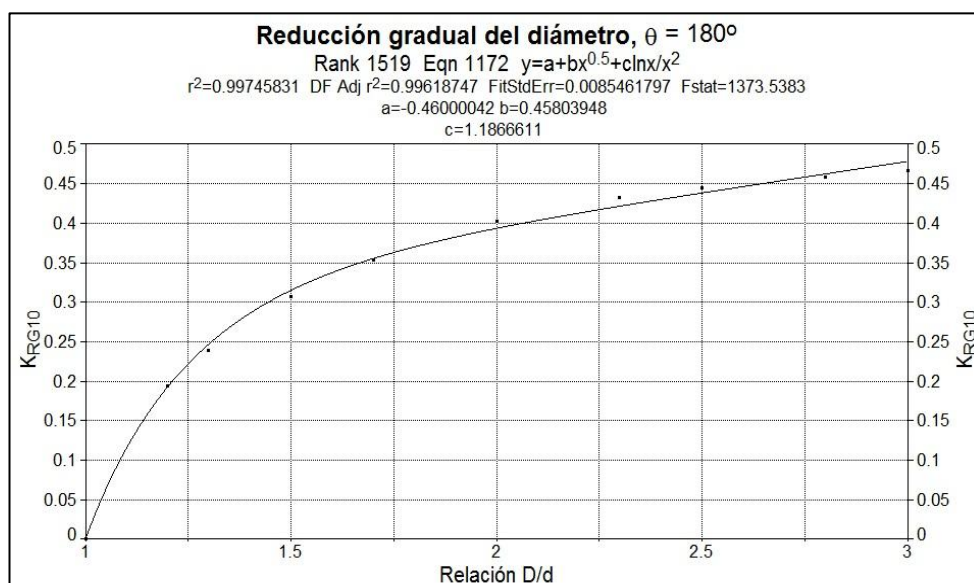


Figura II.C.9. Curva de ajuste y ecuación para el coeficiente  $K_{RG10}$

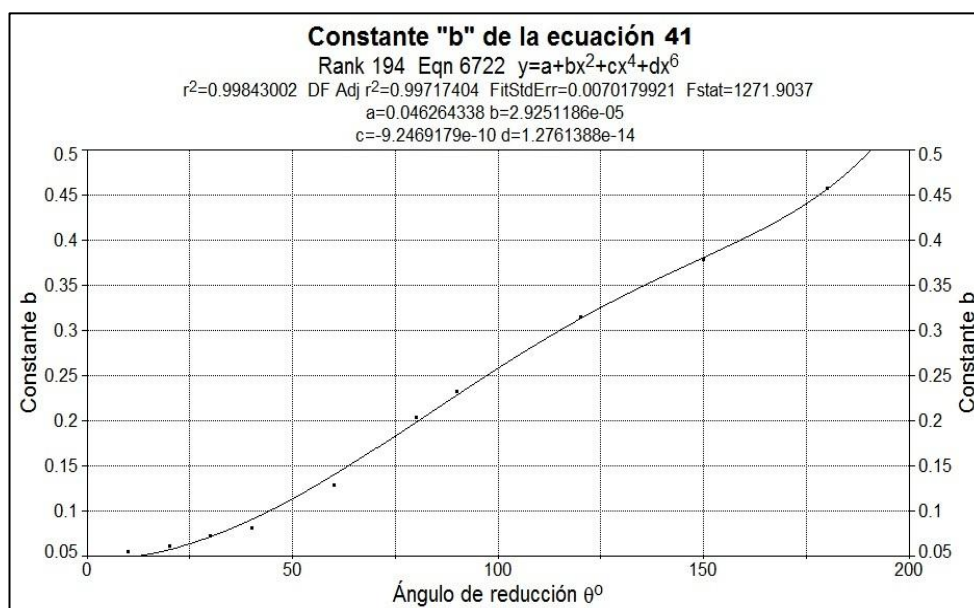


Figura II.C.10. Curva de ajuste y ecuación para la constante “b” de la ecuación 41

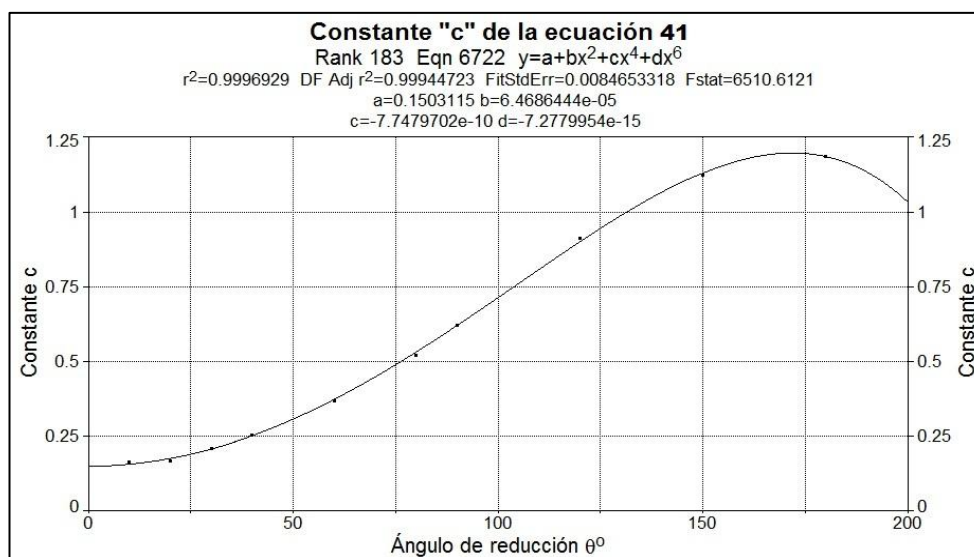


Figura II.C.11. Curva de ajuste y ecuación para la constante “c” de la ecuación 41