

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XX CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**COEFICIENTES DE GASTO Y DE CONTRACCIÓN DE UNA COMPUERTA  
PLANA CON RESALTO RECHAZADO**

**ALBERTO A. SEPÚLVEDA VERA<sup>1</sup>**

**RESUMEN**

En la literatura técnica internacional se emplea el coeficiente de gasto del tipo  $C_d$  y en Chile se acostumbra emplear el coeficiente de gasto  $m$ . El coeficiente de gasto es una función de la relación  $a/H_1$  para  $C_d$  y  $a/h$  para  $m$ , además dependen del número de Reynolds. Estos coeficientes se pueden derivar de la aplicación del Teorema  $\Pi$  (o Vashy-Buckingham). En una publicación anterior el autor (2007) presentó un nuevo enfoque que tiene el inconveniente de no ser válido para  $a/H_1 < 0,07$ . En esta presentación se obtiene coeficientes de gasto y de contracción como polinomios función del parámetro adimensional  $a/H_1$ , válidos en el rango entre  $0,00$  y  $0,91$  (despegue de la vena líquida) y para números de Reynolds mayores a  $80.000$  (Sepúlveda, 1983, 1985), como es el caso de la mayoría de las aplicaciones de la ingeniería hidráulica. Estos polinomios se determinaron en base a los datos experimentales de R. Kremer (1984) y J. González (1987). Se observa en la literatura técnica que se continúa aplicando fórmulas y gráficos en base a datos experimentales sin tomar en cuenta la influencia del número de Reynolds. El presente análisis concluye que los coeficientes de gasto y de contracción no dependen del número de Reynolds para valores sobre  $80.000$ .

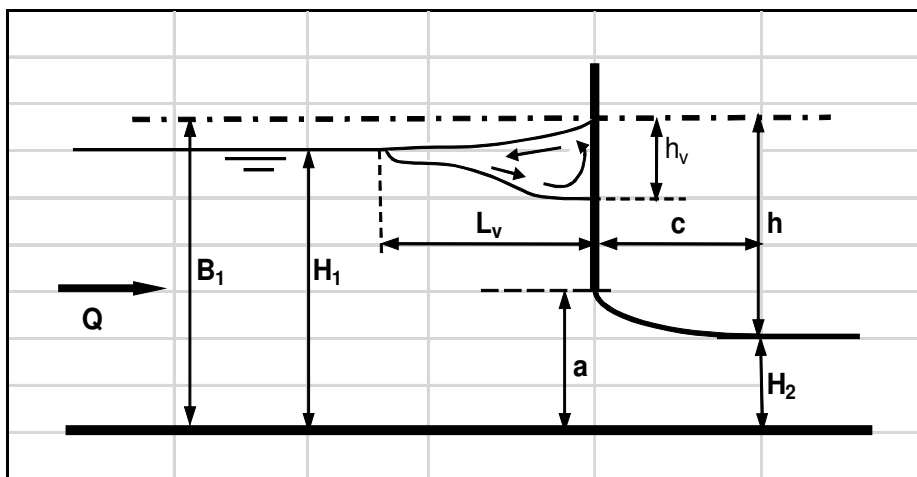
<sup>1</sup> Consultor, Ingeniero Civil Universidad de Chile. EDIC Ingenieros S.A. email asepulveda@edic.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

El flujo alrededor de de la compuerta plana es un fenómeno hidráulicamente simple, pero aún en la literatura internacional aparecen artículos que no logran aclarar las diferencias para los coeficientes de gasto y de contracción. Este estudio, basado fundamentalmente en los ensayos experimentales de R. Kremer (1984) y J. González (1987), para sus respectivas memorias de título de ingenieros civiles de la Universidad de Chile, permite determinar los coeficientes de gasto  $C_d$  y de contracción  $C_c$  mediante ecuaciones directas.

Desafortunadamente en general las publicaciones técnicas no proporcionan los datos experimentales, sólo proporcionan gráficos. En esta publicación se entrega todos los parámetros adimensionales de las referidas experiencias de laboratorio, en forma de tablas y gráficos.

En la figura siguiente se presenta un esquema del escurrimiento bajo una compuerta plana, con resalto rechazado.



**FIGURA 1 : Esquema de la compuerta plana**

Donde:

- $H_1$  : altura aguas arriba de la compuerta, fuera de la influencia de ella
- $B_1$  : Bernoulli aguas arriba de la compuerta
- $a$  : abertura de la compuerta
- $h$  :  $= B_1 - H_2$  "carga" de la compuerta
- $H_2$  :  $= C_c a$  altura del flujo en la "vena contraída"
- $c$  :  $= 2 a$  distancia desde la compuerta a la vena contraída
- $C_c$  :  $= H_2 / a$  coeficiente de contracción de la compuerta
- $Re$  :  $= q / \nu$  Número de Reynolds del flujo
- $q$  :  $= Q / b$  caudal unitario
- $b$  : ancho de la compuerta y del canal
- $Q$  : caudal que escurre bajo la compuerta
- $\nu$  : viscosidad cinemática del agua

Las secciones (1) y (2) corresponden a aquellas más cercanas a la compuerta en las que se cumple la ley hidrostática de presiones. Trabajos de Rajaratnam y Humpfreis (1982) y otros han investigado este aspecto, analizando la zona con vórtices aguas arriba de la compuerta, quienes encontraron una relación empírica para la longitud  $L_V$  de dicha zona:

$$L_V = 35 (\sigma / \gamma) / (a / H_1) \quad \text{para} \quad 0 < a/H_1 < 0,5$$

Donde:  $\sigma$  : coeficiente de tensión superficial del agua  
 $\gamma$  : peso específico del agua

Tradicionalmente se define los siguientes coeficientes de gasto:

$$C_d = q / [ a \sqrt{(2 g H_1)} ] \quad (1-1)$$

$$m = q / [ a \sqrt{(2 g h)} ] \quad (1-2)$$

Si se supone que hay una pérdida de carga  $\Delta B = B_1 - B_2 = C_k B_1$  entre las secciones (1) y (2) se puede demostrar que:

$$C_k = 1 - [ C_c + (C_d/C_c)^2 / (a/H_1) ] / (H_1/a + C_d^2 a/H_1) \quad (1-3)$$

Para el número de Froude de la vena contraída se puede escribir:

$$Fr_2 = (2 H_1/a)^{0,5} C_d / C_c^{1,5} \quad (1-4)$$

Para la relación  $a/h$  se puede escribir:

$$a/h = 1 / (H_1/a + C_d^2 a/H_1 - C_c) \quad (1-5)$$

Para el coeficiente de gasto  $m$  se puede escribir:

$$m = C_d [ (a/h) / a/H_1 ] \quad (1-6)$$

Fawer (S. Montes, 1997) indica que en la compuerta se produce pérdidas de carga de hasta un 10% del Bernoulli de aguas arriba, las que disminuyen al aumentar la relación  $H_1/a$ . El análisis de la experimentación de Kremer y González demostró lo contrario, que la pérdida de carga aumenta, lo que concuerda con Rajaratnam y Humphries.

El autor presentó en 1983 una extensa bibliografía respecto a la compuerta plana, y en 1985 coeficientes experimentales de gasto  $C_d$  y de contracción  $C_c$  de compuertas planas, con escurrimiento bajo ella y sobre ella (con resalto rechazado), basados en los ensayos de Kremer y otros, con curvas paramétricas para el Número de Reynolds. El artículo de Montes es el más completo presentado hasta ahora, pero también adolece la falta de datos experimentales relacionados con el número de Reynolds.

## 2. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

En este estudio se considerará los parámetros adimensionales  $Re$  (Número de Reynolds),  $a/H_1$ ,  $Cd$ ,  $Cc$  y  $m$ .

El presente análisis se basa en la experimentación realizada por los ingenieros Rodolfo Kremer Vera (1984) y Juan González Ortega (1987), como parte de sus respectivas memorias de título de ingenieros civiles de la Universidad de Chile, las cuales fueron dirigidas por el autor. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Recursos Hidráulicos de dicha universidad.

### 2.1. Ensayos de Kremer

Esta experimentación se realizó en dos canales diferentes: uno de ellos con un ancho de 19,9 cm midiendo el caudal en forma volumétrica con una precisión inferior al 0,8%; el otro canal con un ancho de 80,3 cm midiendo el caudal con un vertedero triangular de  $90^\circ$  calibrado volumétricamente, con una precisión media del orden de 1,2%. La medida de la altura  $H_1$  tiene poco error, ya que el flujo es subcrítico sin ondulaciones, por lo que se puede obtener una precisión de  $\pm 0,2$  mm; no es lo mismo para la medida de la altura  $H_2$  de la vena contraída, debido a que el flujo es supercrítico y se producen pulsaciones debido a los vórtices que se generan aguas arriba de la compuerta, junto a ella (Rajaratnam y Humpfreis, 1982).

En la Tabla N° 3.1-1 de más adelante se presenta los resultados de las experiencias que realizó Kremer, para  $Re > 80.000$ .

Rangos de las medidas experimentales en el canal de menor ancho ( $b=19,9$  cm):

Aberturas $a$ (cm) :	$a_7=8,13 - a_8=8,09 - a_9=8,10 - a_{10}=10,11 - a_{11}=10,11$ $a_{12}=10,12 - a_{13}=12,12 - a_{14}=12,13 - a_{15}=12,13 -$ $a_{17}=8,10 - a_{18}=12,13$
Alturas relativas de agua :	$0,246 < a / H_1 < 0,842$
No de Reynolds $Re$ :	80.616 a 172.740

Rangos de las medidas experimentales en el canal de mayor ancho ( $b=80,3$  cm):

Aberturas $a$ (cm) :	$a_{22}=10,06 - a_{23}=12,01$
Alturas relativas de agua :	$0,501 < a / H_1 < 0,903$
No de Reynolds $Re$ :	87.597 a 92.205

### 2.2. Ensayos de J. González

Esta experimentación se realizó en dos canales diferentes: uno de ellos con un ancho de 19,9 cm midiendo el caudal con un vertedero triangular de pared delgada, con un ángulo de 90 grados, el que vierte en un pozo aforador; el otro canal tiene un ancho de 120 cm donde el caudal se midió con aforos volumétricos, con lo cual se aseguró una precisión inferior al 1%. Sólo se incluyen los ensayos con  $Re > 80.000$ .

Rangos de las medidas experimentales en el canal de menor ancho ( $b=19,9$  cm):

Aberturas  $a$  (cm) :  $a_5=6 - a_6=7 - a_7=9 - a_8=11$   
 Alturas relativas de agua :  $0,171 < a / H_1 < 0,663$   
 No de Reynolds  $Re$  : 80.369 a 146.595

Rangos de medidas del canal de mayor ancho ( $b=120,0$  cm):

Aberturas  $a$  (cm) :  $a_9=4,80$   
 Alturas relativas de agua :  $0,070 < a / H_1 < 0,663$   
 No de Reynolds  $Re$  : 80.361 a 91.411

En la Tabla N° 3.2 de más adelante se presenta los resultados de las experiencias que realizó González, para  $Re > 80.000$ .

### 3. ANÁLISIS DE LA EXPERIMENTACIÓN

#### 3.1. Ensayos de R. Kremer

En la tabla siguiente se presenta los parámetros adimensionales experimentales y los parámetros adimensionales calculados [ $C_{dc}$ ,  $C_{cc}$ ,  $m_c$ ]. Los lugares vacíos para  $C_c$  y  $a/h$  en la tabla indican los casos en que no se midió experimentalmente la contracción. Sólo se ha incluido las experiencias con Números de Reynolds mayores a 80.000.

**TABLA N° 3.1-1: Experimentación de Kremer y valores calculados ( $C_{dc}$ ,  $C_{cc}$  y  $m_c$ )**

Ensayo	Re	$a / H_1$	$a / h$	$C_d$	$C_{dc}$	$C_c$	$C_{cc}$	$m$	$m_c$
a7-q1	105.720	0,257	0,299	0,562	0,560	0,630	0,623	0,606	0,604
a7-q2	80.616	0,410	0,516	0,540	0,541	0,619	0,616	0,606	0,605
a8-q1	105.840	0,255	0,296	0,561	0,560	0,628	0,623	0,605	0,604
a8-q2	81.407	0,401	0,502	0,542	0,542	0,619	0,617	0,606	0,604
a9-q1	108.329	0,248	0,287	0,564	0,561	0,629	0,623	0,607	0,604
a9-q2	80.671	0,410	0,516	0,540	0,541	0,621	0,616	0,606	0,605
a10-q1	137.760	0,284	0,335	0,553	0,556	0,620	0,622	0,600	0,604
a10-q2	113.501	0,402	0,504	0,543	0,542	0,620	0,617	0,608	0,604
a10-q3	101.221	0,488	0,634	0,532	0,531	0,611	0,614	0,607	0,605
a10-q4	89.518	0,602	0,826	0,522	0,519	0,615	0,614	0,612	0,606
a11-q1	139.189	0,278	0,327	0,554	0,557	0,622	0,622	0,601	0,604
a11-q2	112.501	0,404	0,506	0,541	0,541	0,616	0,617	0,605	0,604
a11-q3	97.999	0,508	0,668	0,528	0,529	0,613	0,613	0,605	0,605
a11-q4	89.195	0,595	0,815	0,520	0,520	0,615	0,613	0,609	0,606
a11-q5	81.732	0,685	0,980	0,513	0,513	0,620	0,619	0,614	0,606
a12-q1	137.723	0,269	0,315	0,554	0,558	0,625	0,622	0,599	0,604
a12-q2	112.150	0,405	0,507	0,540	0,541	0,615	0,617	0,604	0,604
a12-q3	98.807	0,500	0,656	0,529	0,530	0,615	0,613	0,606	0,605
a12-q4	86.977	0,596	0,816	0,521	0,520	0,614	0,613	0,610	0,606

Ensayo	Re	a / H <sub>1</sub>	a / h	C <sub>d</sub>	C <sub>dc</sub>	C <sub>c</sub>	C <sub>cc</sub>	m	m <sub>c</sub>
a13-q1	172.740	0,285	0,337	0,558	0,556	0,626	0,622	0,606	0,604
a13-q2	140.155	0,405	0,507	0,538	0,541	0,615	0,617	0,602	0,604
a13-q3	123.636	0,504	0,661	0,529	0,529	0,612	0,613	0,606	0,605
a13-q4	110.138	0,617	0,854	0,519	0,518	0,616	0,614	0,611	0,606
a13-q5	104.350	0,674	0,957	0,514	0,514	0,617	0,618	0,613	0,606
a13-q6	93.705	0,840	1,322	0,515	0,516	0,657	0,649	0,646	0,609
a14-q1	176.702	0,284	0,335	0,560	0,556	0,629	0,622	0,609	0,604
a14-q2	141.284	0,403	0,504	0,537	0,541	0,612	0,617	0,600	0,604
a14-q3	128.210	0,485	0,632	0,529	0,532	0,615	0,614	0,604	0,605
a14-q4	110.484	0,610	0,843	0,517	0,518	0,616	0,614	0,608	0,606
a14-q5	103.816	0,673	0,958	0,510	0,514	0,617	0,618	0,608	0,606
a14-q6	95.645	0,812	1,236	0,512	0,513	0,635	0,641	0,632	0,608
a15-q1	172.142	0,294	0,348	0,555	0,555	0,620	0,621	0,604	0,604
a15-q2	144.086	0,397	0,495	0,537	0,542	0,612	0,617	0,599	0,604
a15-q3	126.066	0,505	0,662	0,527	0,529	0,611	0,613	0,604	0,605
a15-q4	111.703	0,611	0,842	0,516	0,518	0,612	0,614	0,606	0,606
a15-q5	104.345	0,677	0,966	0,508	0,513	0,617	0,618	0,607	0,606
a15-q6	95.910	0,825	1,275	0,513	0,514	0,645	0,644	0,638	0,608
a17-q1	97.432	0,246	0,285	0,555	0,562	0,630	0,623	0,597	0,604
a18-q1	163.093	0,320	0,384	0,555	0,552	0,618	0,620	0,608	0,604
a18-q2	139.958	0,407	0,512	0,537	0,541	0,620	0,616	0,602	0,604
a18-q3	125.568	0,490	0,641	0,530	0,531	0,618	0,614	0,606	0,605
a18-q4	111.784	0,595	0,816	0,520	0,521	0,616	0,613	0,609	0,606
a18-q5	103.746	0,674	0,957	0,514	0,516	0,616	0,618	0,611	0,606
a18-q6	93.222	0,842	1,304	0,516	0,518	0,644	0,649	0,641	0,609
a22-q2	89.677	0,501	(+)	0,530	0,530		0,613		0,605
a23-q3	87.597	0,807	(+)	0,513	0,516		0,639		0,608
1-28	92.205	0,903	(+)	0,526	0,527		0,672		0,610

(+) : no se midió  $H_2$

Los parámetros adimensionales se pueden calcular con las siguientes ecuaciones empíricas (ajustes polinómicos de cuarto grado), obtenidas en los gráficos experimentales, para  $Re > 80.000$ , para las experiencias de Kremer y González (gráficos presentados más adelante):

$$C_{ic} = A_1 + A_2 (a/H_1) + A_3 (a/H_1)^2 + A_4 (a/H_1)^3 + A_5 (a/H_1)^4 \quad (3.1-1)$$

y

$$m_c = A_1 + A_2 (a/h) + A_3 (a/h)^2 + A_4 (a/h)^3 + A_5 (a/h)^4 \quad (3.1-2)$$

Válidas en el rango:  $0,000 < a / H_1 < 0,91$

Los coeficientes  $A_i$  para la experimentación de Kremer y González se indican en la tabla siguiente y se obtuvieron por ajustes polinómicos en los gráficos experimentales respectivos.

**TABLA N° 3.1-2: Coeficientes de los ajustes polinómicos**

Coeficiente experimental	$F[a/H_1]$					$F[a/h]$
	$C_{dc}$	$C_{cc}$	$Fr_2$	$m_c'$	$a/h$	$m_c$
A <sub>1</sub>	0,612	0,625	8,63	0,611	0,0000	0,606
A <sub>2</sub>	-0,3150	0,0178	-41,536	-0,1170	1,0800	-0,0236
A <sub>3</sub>	0,6682	-0,0907	108,990	0,5482	0,3284	0,0868
A <sub>4</sub>	-1,0587	-0,1373	-132,500	-1,1341	0,2888	-0,1189
A <sub>5</sub>	0,6515	0,3096	59,151	0,7831	0,0000	0,0634
R <sup>2</sup>	0,986	0,804	0,998	0,924	1,000	0,926

El coeficiente  $m_c = F[a/h]$  presenta menores discrepancias con  $m$  que  $m_c' = F[a/H_1]$ . El coeficiente para  $Fr_2$  es válido sólo en el rango  $0.07 < a/H_1 < 0,91$ .

Para  $Re > 80.000$  el error porcentual para el valor de  $C_{dc}$ , calculado con la ecuación tipo (3.1-1), varía entre  $-1,18\%$  y  $+1,52\%$ , pero solamente 3 de 48 valores sobrepasan el 1% de error. Se eliminaron varios ensayos por sus errores, mediante un análisis en gráficos  $H_1=f(q)$  y  $H_2=f(q)$  para la serie “a” respectiva. Para el valor de  $C_{cc}$ , calculado con la ecuación tipo (4.1-1), el error porcentual varía entre  $-2,11\%$  y  $1,52\%$ , pero solamente 4 valores sobrepasan el 1% de error. Para la relación calculada de  $m_c$  con la ecuación (3.1-2) el error varía entre  $-1,12\%$  y  $+5,82\%$  y sólo 8 valores sobrepasan el 1% de error.

En su memoria de título Kremer muestra un gráfico donde claramente el coeficiente  $C_d$  depende del Número de Reynolds, haciéndose independiente de él para valores sobre 70.000. Lo mismo sucede con el parámetro  $C_c$ . En este análisis se ha aumentado la precisión de los ajustes polinómicos considerando  $Re > 80.000$ .

Al final del numeral 3.2 se presenta los gráficos siguientes, en los que se muestra los puntos experimentales y la respectiva curva de ajuste polinómico:

$$\begin{aligned} \text{Coeficiente de gasto:} & \quad C_d = F_d[a/H_1] \\ \text{Coeficiente de gasto:} & \quad C_c = F_c[a/H_1] \\ \text{Coeficiente de gasto:} & \quad m = F_m[a/h] \end{aligned}$$

### 3.2. Ensayos de J. González

En el cuadro de más adelante se presenta los parámetros adimensionales de esta experimentación (sólo se ha incluido los valores para  $Re > 80.000$ ).

El error porcentual para el valor de  $C_{dc}$ , calculado con la ecuación tipo (3.1-1), varía entre  $-2,19\%$  y  $+2,02\%$ . Para el valor del coeficiente de contracción  $C_{cc}$ , calculado con la ecuación (7), el error porcentual varía entre  $+0,00\%$  y  $+3,80\%$ . Para la relación  $(a/h)_c$  calculada con la ecuación (6) el error varía entre  $-0,05\%$  y  $+0,60\%$ .

**TABLA N° 3.2 : Experimentación de González y valores calculados  $C_{dc}$ ,  $C_{cc}$  y  $m_c$**

Ensayo	Re	a / H <sub>1</sub>	a / h	C <sub>d</sub>	C <sub>dc</sub>	C <sub>c</sub>	C <sub>cc</sub>	m	m <sub>c</sub>
A5-Q6	80.368	0,186	0,207	0,571	0,570	0,623	0,625	0,603	0,604
A5-Q7	84.051	0,171	0,189	0,573	0,573	0,620	0,625	0,603	0,604
A6-Q7	83.108	0,189	0,211	0,569	0,570	0,614	0,625	0,601	0,604
A6-Q8	88.011	0,171	0,189	0,573	0,573	0,621	0,625	0,603	0,604
A7-Q4	82.414	0,385	0,478	0,545	0,544	0,617	0,617	0,607	0,604
A7-Q5	87.306	0,347	0,422	0,548	0,548	0,614	0,619	0,604	0,604
A7-Q6	92.434	0,316	0,377	0,553	0,552	0,613	0,620	0,605	0,604
A7-Q7	98.470	0,282	0,332	0,557	0,557	0,622	0,622	0,604	0,604
A7-Q8	108.849	0,237	0,272	0,563	0,563	0,623	0,623	0,604	0,604
A8-Q1	83.069	0,663	(+)	0,519	0,514		0,617		0,606
A8-Q2	92.474	0,561	0,754	0,520	0,523	0,608	0,613	0,603	0,605
A8-Q3	104.489	0,464	0,599	0,535	0,534	0,616	0,614	0,607	0,605
A8-Q4	111.408	0,418	0,525	0,541	0,540	0,610	0,616	0,606	0,605
A8-Q5	121.683	0,362	0,443	0,550	0,546	0,614	0,618	0,608	0,604
A8-Q6	135.819	0,302	0,360	0,556	0,554	0,625	0,621	0,607	0,604
A8-Q7	146.595	0,262	0,305	0,559	0,559	0,619	0,622	0,603	0,604
A9-Q6	80.361	0,089	0,094	0,588	0,589	0,625	0,626	0,604	0,605
A9-Q7	85.692	0,079	0,083	0,590	0,591	0,627	0,626	0,604	0,605
A9-Q8	91.411	0,070	0,073	0,596	0,593	0,629	0,626	0,609	0,605

Si se calcula el coeficiente de gasto  $C_d$  con la ecuación tipo (3.1-1) el error que se comete para las experiencias de González varía entre  $+0,92\%$  y  $-0,61\%$ . Para el coeficiente de contracción el error varía entre  $+0,66$  y  $-1,73$ .; sólo 2 valores sobrepasan el  $1\%$  de error. Para el coeficiente de gasto  $m$  el error varía entre  $+0,70$  y  $-0,47\%$ .

Se descartó el coeficiente de pérdida de carga  $C_k$  pues el error  $\Delta C_k$  que se puede cometer es muy grande. El error porcentual se puede calcular como:

$$\Delta C_k / C_k = (B_2 / B_1^2) \Delta B_1 - \Delta B_2 / B_1 \quad (3.2-1)$$

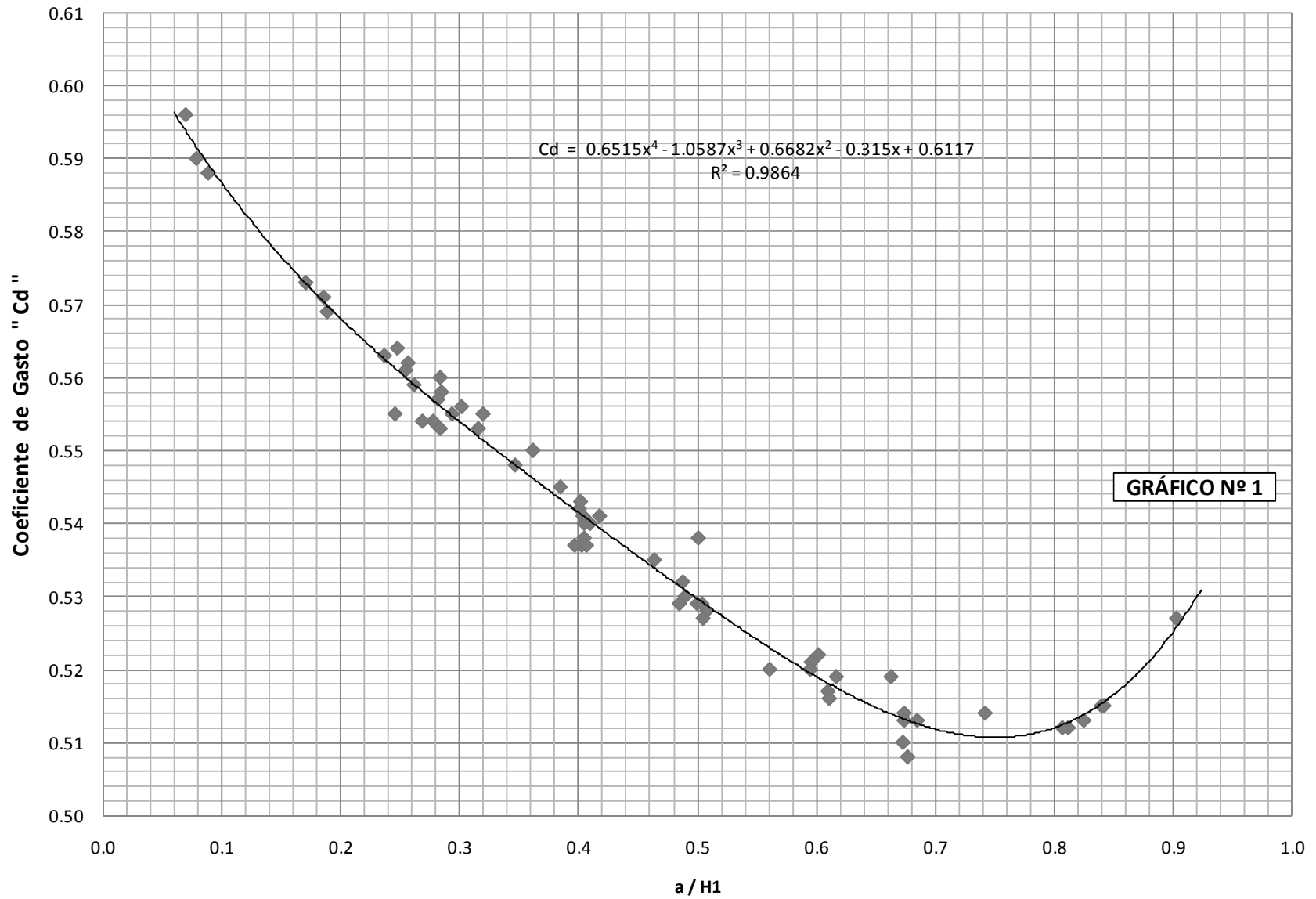
donde 
$$\Delta B_i = [ H_i - q^2 / (g H_i^2) ] (\Delta H_i / H_i) + [ q^2 / (g H_i^2) ] (\Delta q / q) \quad (3.2-2)$$

Si se toma  $\Delta H_1 / H_1 = 1\%$ ,  $\Delta H_2 / H_2 = 2\%$  y  $\Delta q / q = 1\%$ , en la serie  $a_7$  de Kremer resulta que  $\Delta C_k / C_k$  varía entre  $34$  y  $106\%$ . Para la serie  $a_{10}$  el error posible varía entre  $41$  y  $295\%$ .

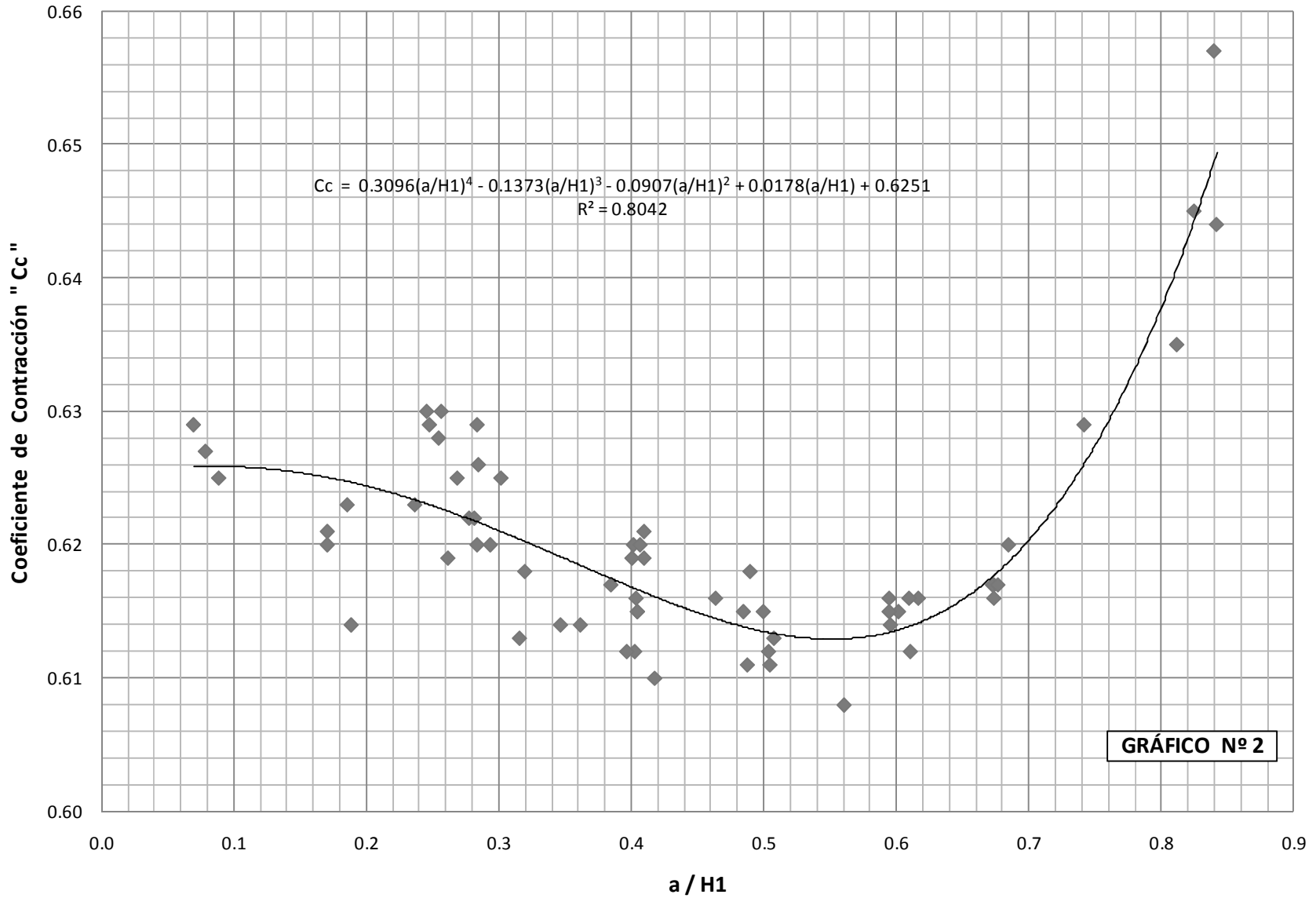
A continuación se presenta los gráficos con los puntos experimentales y las curvas de ajuste polinómico.



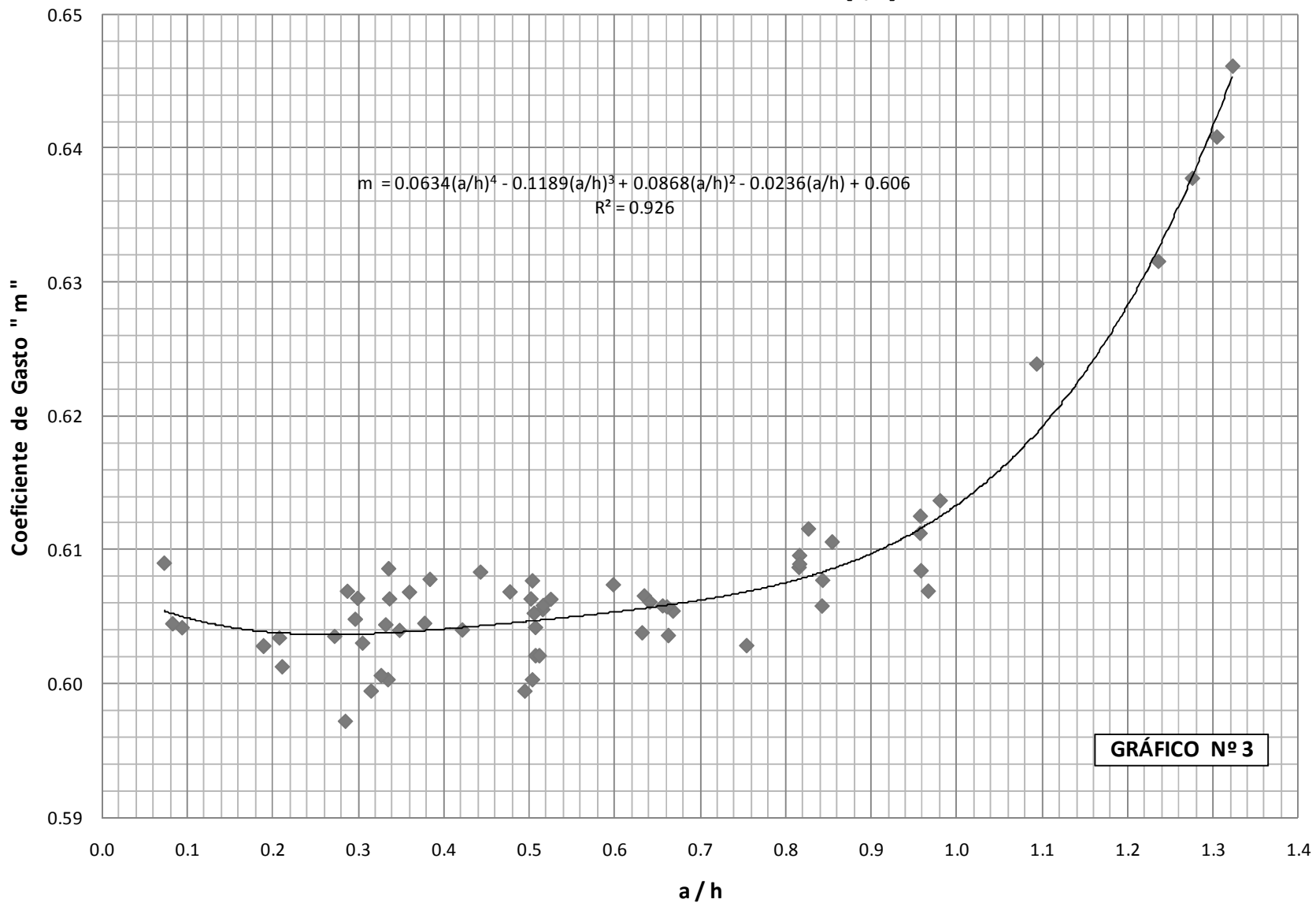
COMPUERTA PLANA - COEFICIENTES DE GASTO "Cd" PARA "Re > 80.000"



COMPUERTA PLANA - COEFICIENTES DE CONTRACCIÓN " Cc " PARA " Re > 80.000 "



COMPUERTA PLANA - COEFICIENTE DE GASTO "m = F[a/h]" PARA "Re > 80.000 "



#### 4. CONCLUSIONES

Con base en las experiencias de Kremer (1984) y González (1987) se ha obtenido gráficos y ecuaciones (polinomios) en que se correlacionan coeficientes de gasto  $C_d$  y  $m$ , coeficiente de contracción  $C_c$ , número de Froude  $Fr_2$  de la vena contraída con la relación  $a/H_1$ . El coeficiente de pérdida de carga  $C_k$  no es un coeficiente adecuado pues su precisión es muy baja, debido a los parámetros de los que depende. Se demostró que estos coeficientes dependen fuertemente del número de Reynolds, a menos que se considere  $Re > 80.000$ .

En las experiencias de Kremer se investigó también el fenómeno del despegue de la vena líquida del labio inferior de la compuerta. Se concluyó que ello sucedía para  $a/H_1 > 0,92$  según los ensayos de Kremer, lo que corresponde a  $Fr_2=1,40$ . Teóricamente, según Cowan (citado por T. Benjamin, 1956), ello sucede aproximadamente para  $Fr_2=1,25$  o  $Fr_1=0,792$ .

Otro fenómeno que también investigó Kremer fue la distancia relativa  $c/a$ , a la cual se produce la vena contraída, aguas abajo de la compuerta. Esta distancia, según Kremer y otros investigadores, se produce entre 1,5 y 2,5 veces la abertura de la compuerta. En la práctica se puede tomar  $c/a=2$ , valor que concuerda con la experiencia chilena.

#### REFERENCIAS

Benjamin, T. B. (1956). On the flow in channels when rigid obstacles are placed in the stream. J. Fluid Mechanics, 1.

González Ortega, Juan (1987). Estudios de efectos viscosos en coeficientes de gasto y contracción de compuertas planas y libres. Tesis de grado de ingeniero civil, Universidad de Chile, Santiago.

Kremer Vera, Rodolfo (1984). Coeficientes de gasto de compuertas planas para cargas pequeñas. Tesis de grado de ingeniero civil, Universidad de Chile, Santiago.

Montes V., J. Sergio (1997). Irrotational flow and real fluid effects under planar sluice gates. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 123, No 3, march, USA.

Rajaratman, N. y Humphries, J. A. (1982). Free flow immediately below sluice gates. AIRH, Journal of Hydraulic Research, Vol. 20, No 5, The Netherlands.

Sepúlveda Vera, A. (1983). Influencia del Número de Reynolds en el coeficiente de grado de compuertas planas seguidas de torrente. VI Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, vol. 1. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Santiago.

Sepúlveda Vera, A. (1985). Análisis de una compuerta plana con vertimiento superior, no aireada y con resalto rechazado. Anales de la Universidad de Chile, Quinta Serie, N° 8, agosto, Santiago.

A. Sepúlveda V. – 29.07.2011