

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y ESTRUCTURA DE LA TESINA

INTRODUCCIÓN

Normalmente las calles no se diseñan para conducir el agua de lluvia en grandes cantidades, sino que se diseñan con el principal objetivo de la circulación del automóvil. Este hecho provoca que las calles solo estén diseñadas para conducir una pequeña cantidad de agua, es decir, el agua generada en la misma calle por la lluvia y solo el corto trayecto que la separa del imbornal. Se asume que toda el agua será captada por el imbornal, y los caudales no serán nunca muy grandes.

En ciudades en vía de crecimiento, donde se genera una mayor superficie impermeable, tenemos un sistema de drenaje infradimensionado, donde existirán problemas para sucesos de lluvia con periodos de retorno relativamente pequeños. A partir de ese momento el agua podría ocasionar un mal funcionamiento del sistema de drenaje, y podría llegar al punto que el sistema funcionase a presión, e incluso se produjera la salida del agua al exterior. También puede generarse una inundación en superficie con la obstrucción o el mal funcionamiento de un conjunto de imbornales. Esta situación puede llevar al punto que toda un área importante de la ciudad esté anegada, y se genere una gran corriente de agua, con velocidades y calados peligrosos para la seguridad de peatones y automóviles.

En nuestras latitudes y por la orografía del terreno, es fácil comprobar las devastadoras consecuencias producidas por las fuertes precipitaciones. En algunas ocasiones llevando la problemática a un extremo, tenemos situaciones difíciles de controlar como pasó en Alcalá de Guadaira (Sevilla, 2007), donde las turbias aguas de la avenida que asoló varias calles de la ciudad hispalense, acabaron con la vida de una conductora al arrastrar el agua su vehículo. Podemos ver en la siguiente figura, una fotografía del suceso:



Figura 1: Siniestro provocado por una gran escorrentía en Alcalá de Guadaira (Sevilla)

La simulación del flujo en un cruce de calles no solo comporta el conocimiento de calados y velocidades por la seguridad peatonal, sino que pretende localizar las zonas donde podría ser necesario la ubicación de los imbornales o, de sistemas de drenaje, ante la existencia de grandes acumulaciones de agua. Saber como se reparte los caudales en un cruce de calles será básico en esta tesina.

Una parte importante de este estudio se basa en la correcta definición de los cruces de calle, donde se trabaja con Autocad, herramienta muy válida para definirla con precisión, ya que GID permite la importación de estos archivos. Como la geometría de las calles influye decisivamente en los resultados obtenidos, será necesario definirla de manera correcta.

Para simular el proceso de reparto de caudal en el cruce con precisión, trabajaremos con dos programas como GID y CARPA. El excelente funcionamiento, a partir de la comparación de los resultados obtenidos con estos programas con los datos extraídos de la tesis doctoral de Nania et. al (datos medidos en un dispositivo experimental), es básico para esta simulación, ya que trabajaremos con calados muy pequeños (0,1-15 cm) y velocidades medias (0.05-3 m/s). Aunque el flujo en las calles es inicialmente un flujo no permanente, gradualmente variable en el tiempo y en el espacio, nosotros estudiaremos el flujo estabilizado en régimen permanente, es decir, obtendremos resultados de un flujo permanente gradualmente variado, producto de la entrada de un caudal constante en el tiempo. Dada la dificultad que genera el flujo en régimen lento, por la necesidad de definir unas condiciones de contorno, se estudiará el flujo en régimen rápido, dado que con este régimen solo necesitamos condiciones de contorno aguas arriba de las calles, y esto no genera tantos problemas. A partir de un modelo que simula correctamente la realidad, el objetivo será simular numéricamente los diferentes cruces de calle propuestos (intersecciones con ángulos en planta diferentes entre las calles), y obtener un patrón del funcionamiento hidráulico de cada uno de ellos.

ESTRUCTURACIÓN DE LA TESIS

La tesis consta de 7 capítulos:

En el primer capítulo se hace una breve introducción sobre la problemática asociada a los cruces de calles y el tipo de flujo a estudiar.

En el segundo capítulo se explican los objetivos que se desean cumplir con la tesis.

En el tercer capítulo se presentan los datos experimentales utilizados en esta tesis, así como una breve explicación de su obtención y del proceso seguido para ello.

En el cuarto capítulo se explican los criterios de diseño, que se han considerado para cada cruce de calles, y las herramientas utilizadas para diseñarlos.

En el quinto capítulo se explica brevemente el funcionamiento de CARPA y GID, y se especifican los objetivos para utilizar CARPA y GID.

En el sexto capítulo se comparan los datos experimentales con los resultados obtenidos con CARPA y GID.

Finalmente, en el séptimo capítulo se presentan los resultados: del reparto de caudales de salida y de los ángulos de resalto en el cruce, en función de la proporción de potencia de entrada. Obtenidos para los diferentes ángulos que forma el cruce de calles, y para las diferentes combinaciones de pendientes.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS Y ANTECEDENTES

OBJETIVOS

El objetivo de esta tesina es simular a partir de programas informáticos contrastados y datos experimentales, los diferentes tipos de cruces de calle (cruces, con calles que formen en planta ángulos de 30°, 45°, 60° y 90°, con bombeo transversal, y para diferentes combinaciones de pendientes). Con la finalidad, de llegar a conocer el patrón de comportamiento del flujo, y de poder predecir el reparto de caudales entre las calles de salida.

Entender el comportamiento del flujo en los cruces de calle será básico para establecer estos patrones, siempre teniendo en cuenta que el tipo de flujo es gradualmente variable a corto plazo, y de tipo gradualmente variado a medio plazo. Este estudio está destinado a abordar el problema a medio plazo, ya que la problemática suele relacionarse con sucesos duraderos. De esta manera a partir de unas curvas patrón podremos conocer con precisión las características de este flujo, y saber como se reparten los caudales en un cruce de calles.

ANTECEDENTES

Actualmente como hemos visto en la introducción, una gran escorrentía puede generar en zonas urbanizadas graves problemas. Por desgracia en la actualidad en mayor o menor medida se originan estos sucesos, provocados en muchos casos por el crecimiento de las ciudades. Este hecho origina un aumento de la superficie urbana que acrecentado por un mal funcionamiento del sistema de drenaje, suele ser el desencadenante de estas grandes corrientes.

Este problema fue estudiado con detenimiento en la tesis doctoral (Nania et al, 1999), de la cual se deriva esta tesina. En la tesis doctoral se estudia la escorrentía en redes de calles, a partir del conocimiento teórico de todos los procesos que se desarrollan en los cruces de calles, mediante las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo, y a partir de resultados prácticos obtenidos de un cruce de calles (dispositivo experimental), construido en el Dept. de Hidráulica, Marítima y Ambiental de E.T.S.E.C.C.P.B. de la U.P.C.

En el próximo capítulo se presentan los datos experimentales utilizados en esta tesina; estos datos han sido extraídos de los resultados obtenidos del dispositivo experimental en la tesis doctoral (Nania et. al, 1999).

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE DIVISIÓN DE CAUDALES EN UN CRUCE DE CALLES

3.1 Introducción

La problemática que suscita el comportamiento hidráulico en un cruce de calles ha sido abordada en muchos estudios. Haciendo referencia a recientes estudios sobre esta problemática (Mignot et. al, 2008), se detalla el comportamiento del flujo en canales ortogonales abiertos para un flujo supercrítico, donde proporcionan una descripción sobre las elevaciones superficiales, el comportamiento de los saltos hidráulicos, las desviaciones de los flujos entrantes, y la formación y las características de zonas de recirculación.

En este capítulo se recogen los resultados que definen el comportamiento hidráulico de un cruce de calles particular, con unas características geométricas que explicaremos en el próximo apartado. Estos datos se han obtenido de los trabajos en el laboratorio con un dispositivo experimental, donde se recreó un cruce de calles. Estos ensayos fueron una parte del trabajo realizado en la tesis doctoral (Nania et. al, 1999).

3.2 Dispositivo experimental

3.2.1 Introducción

Previamente a comentar el dispositivo se hace una pequeña descripción de un cruce de calles. Un cruce de calles esta definido por el ancho, la sección transversal, la pendiente, el ángulo en planta de las calles que la constituyen, la geometría de la zona del cruce y por la existencia o no de chaflanes en las esquinas. Como veremos en el tipo de cruce de calles construido, se pueden hacer varias simplificaciones en algunos de los elementos descritos.

3.2.2 Variables e hipótesis simplificativas

- Variables

Las variables involucradas en el problema de la división del flujo en cruces de calle son de tres tipos: las relacionadas con la geometría del cruce, las relativas a las características del flujo y las relativas a las propiedades del flujo. Los parámetros correspondientes en la caracterización del cruce de calle son los siguientes:

B_{ex} , B_{ey} : ancho de las calles de entrada al cruce en las direcciones “x” e “y”.

B_{sx} , B_{sy} : ancho de las calles de salida del cruce en las direcciones “x” e “y”.

S_{lx} , S_{ly} : pendiente longitudinal en las direcciones “x” e “y”.

S_{tx} , S_{ty} : pendiente transversal o bombeo, según el eje de la calle para las direcciones “x” e “y”.

ϑ : ángulo entre los ejes de las calles que forman el cruce

n : coeficiente de rugosidad de Manning en las calles y el cruce, que se supone constante

δ : grado de suavización, redondeo o achaflamiento en las esquinas.

Asimismo las variables hidráulicas que caracterizan el flujo en el cruce de calles son las siguientes:

Q_{ex} , Q_{ey} : caudales medios del flujo de entrada en las direcciones “x” e “y”, evaluados en la primera sección de entrada de la calle.

Q_{sx} , Q_{sy} : caudales medios del flujo de salida en las direcciones “x” e “y”, evaluados en la última sección de salida de la calle.

V_{ex} , V_{ey} : velocidades medias del flujo de entrada en las direcciones “x” e “y”, evaluadas en la sección de entrada del cruce.

V_{sx} , V_{sy} : velocidades medias del flujo de salida en las direcciones “x” e “y”, evaluadas en la sección de salida del cruce.

Y_{ex} , Y_{ey} : calados medios del flujo de entrada en las direcciones “x” e “y”, evaluados en la sección de entrada del cruce.

Y_{sx} , Y_{sy} : calados medios del flujo de salida en las direcciones “x” e “y”, evaluados en la sección de salida del cruce.

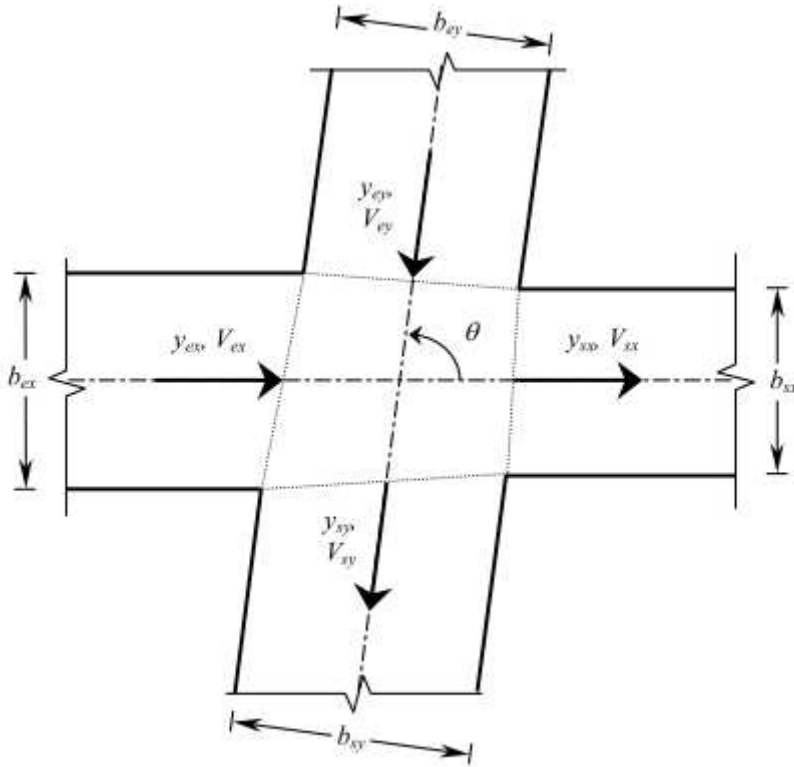


Figura 2: Esquema de un cruce de calles, sus parámetros geométricos y las variables hidráulicas (Nania et.al, 1999)

Las propiedades del fluido a considerar son:

μ : la viscosidad dinámica

ρ : la densidad

- Hipótesis simplificativas

- El ángulo en planta de las calles que forman el cruce será de 90° . Esta hipótesis descansa en el hecho de que, en general, los cruces de calles tienden a ser en ángulo recto o en ángulos que se aproximan bastante a éste.
- El ancho de las calles será constante y el mismo en todas ellas ($b_{ex}= b_{ey} =b_{sx}=b_{sy} =b$). Esta hipótesis también descansa en el hecho común, ya que las calles tienden a ser aproximadamente del mismo ancho de un lado a otro del cruce para facilitar la circulación.
- La superficie formada por la intersección de las dos calles en planta será considerada horizontal. Esta simplificación se asume, por un lado, dada la dificultad de caracterizar esta superficie con alguna pendiente en especial y, por el otro, por razones de simplicidad de construcción del dispositivo.

- d) Las esquinas estarán formadas por las aristas de las intersecciones de los planos verticales que forman los cajeros de las calles, es decir no se considerarán chaflanes de ningún tipo, ni suavización de las mismas. Estas hipótesis se asumen también por simplicidad constructiva, pero es muy probable que la influencia de la forma de las esquinas en la distribución del flujo aguas abajo sea notable.

Aceptando estas hipótesis podremos eliminar del análisis los siguientes parámetros:

$\delta, n, b_{ex}, b_{ey}, b_{sx}, b_{sy}$ y ϑ

Por lo tanto después de estas hipótesis simplificativas el cruce de calles quedará definido como podemos ver en la siguiente figura:

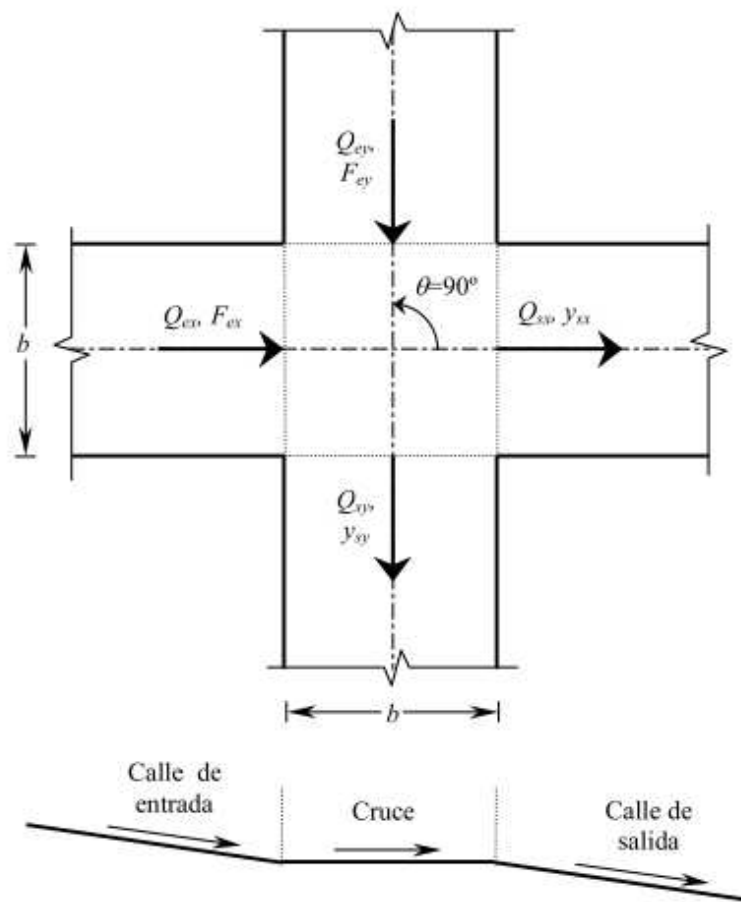


Figura 3: Esquema del cruce de calles simplificado. Planta y perfil longitudinal del eje de una calle. (Nania et. al, 1999)

3.2.3 Diseño y dimensiones del dispositivo

- Diseño del dispositivo

El dispositivo experimental está compuesto por dos canales que se cruzan y que simulan un cruce de calles simplificado, como se explica en el apartado anterior. El dispositivo fue construido en el laboratorio de modelos reducidos del Dept. de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la U.P.C.

Las dimensiones del dispositivo experimental vinieron fijadas teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Espacio y caudal disponible en el laboratorio: el caudal máximo se estimó en 100 l/s por calle.
- Factibilidad técnica: la necesidad de cambiar las pendientes de manera rápida y económica, fijo el rango de pendientes entre: la horizontal y el 4% en la dirección del flujo. No existe pendiente transversal en la calzada, podríamos decir que la calle se comporta hidráulicamente como un canal.
- Económicos: por esta limitación se estableció que las calles del dispositivo experimental podrían llegar a tener 1,5 metros como máximo. Se estudiaron teóricamente los parámetros hidráulicos para determinar la influencia del ancho de la calle en estos. Se determinó que al estudiar flujos con calados no inferiores de 1 a 2 cm, para anchos de calle de 1, 1,5 y 2 m tendríamos respectivamente unas relaciones de aspecto de 50, 75, 100 no influirían las fuerzas viscosas.

Los factores que limitaron el tamaño mínimo fueron:

- Precisión de medida de los calados
- Minimización de la influencia relativa de la tensión superficial (tensión importante para calados muy pequeños).
- Longitud mínima necesaria de las calles para asegurar la unidimensionalidad del flujo.

- Dimensiones del dispositivo

Teniendo en cuenta estudios previos realizados en la tesis doctoral de Nania estas fueron las dimensiones del dispositivo:

Ancho de calles: 1,5 metros.

Longitud de las calles de aproximación del cruce: 2 metros.

Longitud de las calles de salida del cruce: 5 metros.

Altura de los cajeros: 0,35 metros.

Las calles forman entre sí ángulo recto en planta y la superficie propia del cruce queda formada por un cuadrado de 1,5 metros de lado horizontal. La pendiente longitudinal de las calles varía de 0% a 4%. Los caudales máximos serán de 100 l/s por cada una de las entradas. Los calados se medirán con una precisión de ± 1 mm. En las siguientes figuras podemos ver las dimensiones del cruce de calle.

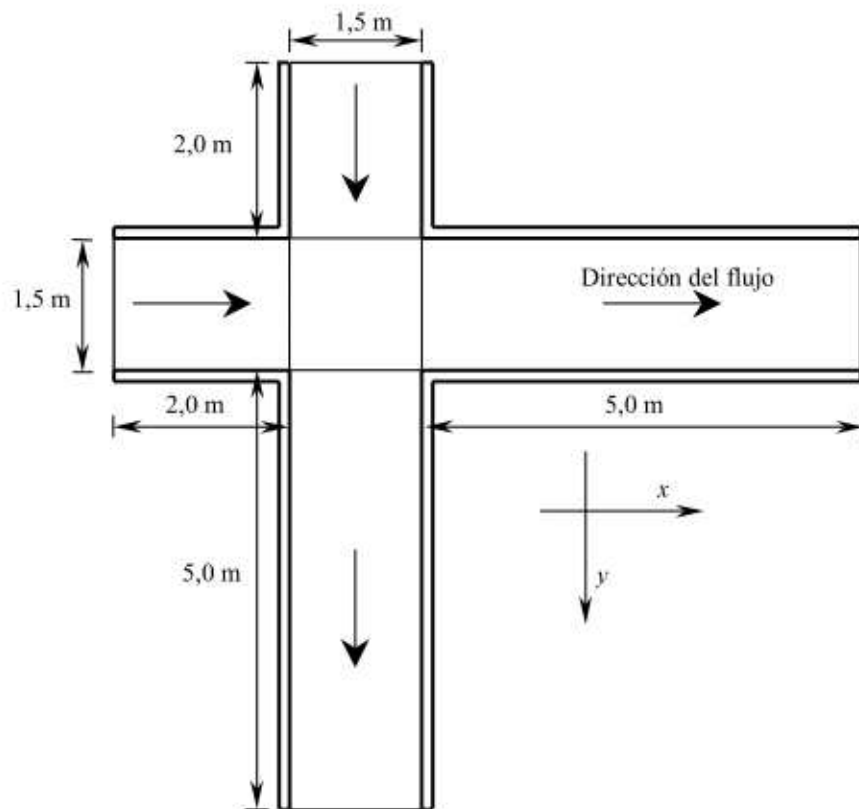


Figura 4: Esquema en planta del dispositivo experimental con sus dimensiones (Nania et. al, 1999)



Figura 5: Fotografía del dispositivo experimental construido en el laboratorio de modelos reducidos de la U.P.C.

3.3 Datos de laboratorio

3.3.1 Introducción

La campaña definitiva de ensayos se llevó a cabo exclusivamente con flujo de entrada y salida supercrítico, dejando el estudio en régimen supercrítico para un trabajo posterior. Se tomó esta decisión, por la problemática del régimen subcrítico en la campaña preliminar de ensayos, la necesidad de aplicar unas condiciones de contorno aguas abajo provocó problemas de convergencia de los métodos numéricos, que imposibilitaron la reproducción de las condiciones de contorno reales. La marcada influencia que tienen las condiciones de contorno sobre el reparto de caudales en el cruce complica trabajar con este tipo de régimen.

3.3.2 Resultados experimentales

Como podemos ver en la siguiente figura 6 se han señalado los puntos donde se han tomado medidas de calados. Estos valores serán muy útiles cuando valoremos el funcionamiento del CARPA.

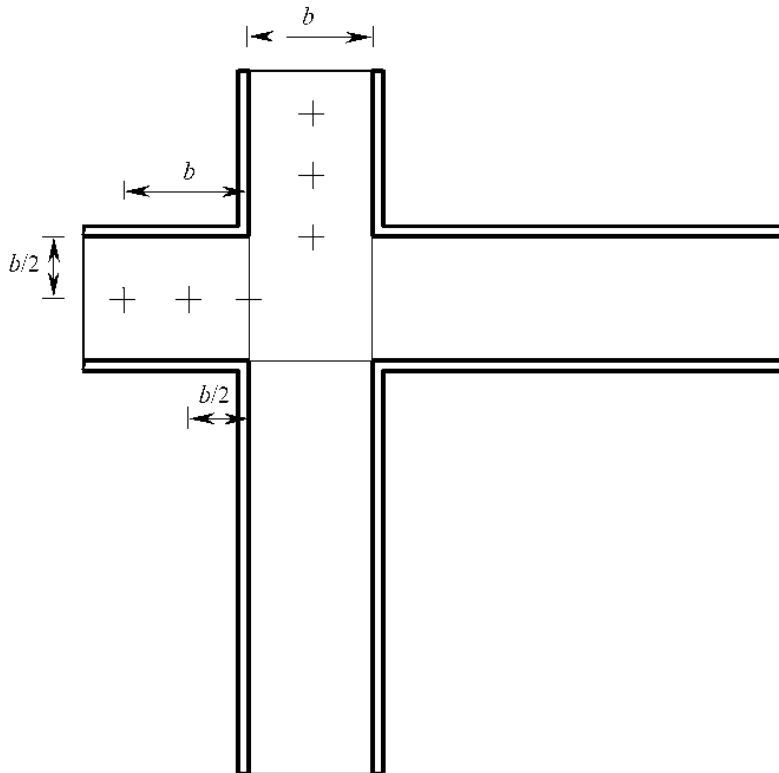


Figura 6: Lugar geométrico de los puntos de medida de los calados en la campaña experimental (Nania et. al, 1999)

En la siguiente figura podemos ver un ejemplo de los diferentes patrones de flujo: el tipo 1 los resaltos no se producen en el cruce, es decir, en el cruce el régimen es lento, el tipo 2 un resalto se produce en el cruce y el otro en la calle. Este último tipo se puede dividir en el tipo 2a y tipo 2b, dependiendo si el resalto se produce en la calle de la dirección "x" o en la dirección "y". Existe también otro parámetro importante relacionado con el resalto, como es α que representa el ángulo formado por un plano perpendicular a Q_{ey} con la cresta que forma el resalto.

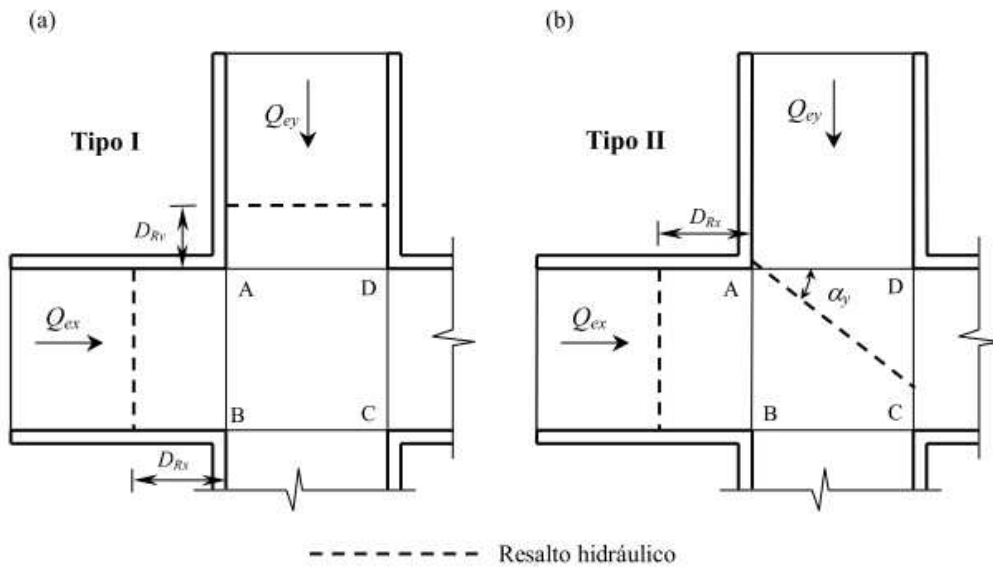


Figura 7: Esquema de los patrones de flujo: Tipo I y Tipo2. (Nania et. al, 1999)

En la próxima figura se puede observar como en el cruce domina el patrón de flujo Tipo 2, en este caso en concreto al formarse uno de los dos resaltos en la calle dirección “y” sería tipo 2b. También podemos comprobar como el resalto en el cruce forma un ángulo (α_x) aproximadamente de unos 30 °.



Figura 8: Fotografía de un cruce de calles con un patrón de flujo tipo 2 b

En las siguientes tablas se presentan los valores que se obtuvieron de esta campaña experimental. Las próximas tablas nos muestran, en este orden, los siguientes valores: caudales de entrada en ambas direcciones, calado en los puntos comentados, distancia del resalto al cruce (siempre que el resalto se forme en la calle y no en el cruce) y caudales de salida en ambas direcciones.

En la primera tabla de valores tenemos que la calle en la dirección “x” tiene un pendiente longitudinal del 1%, es decir $S_{lx}=0,01$, y la calle en la dirección “y” tiene también una pendiente longitudinal del 1%, es decir $S_{ly}=0,01$.

Q_{ex} [l/s]	Q_{ey} [l/s]	y_{ex} [cm]				D_{Rx} [cm]	y_{ey} [cm]				D_{Ry} [cm]	Q_{sx} [l/s]	Q_{sy} [l/s]
		<i>b</i>	<i>b/2</i>	<i>Cruce</i>	<i>Arr.Res</i>		<i>b</i>	<i>b/2</i>	<i>Cruce</i>	<i>Arr.Res</i>			
8,4	75,0	4,8	5,6	6,1	**	**	3,7	3,7	3,8	***	***	12,5	70,8
11,1	99,6	6,2	7,0	7,5	**	**	4,7	4,7	4,7	***	***	17,5	93,2
12,6	50,0	4,4	5,3	5,9	**	**	2,7	2,7	2,8	***	***	16,3	46,3
18,8	75,1	6,2	7,2	7,8	**	**	3,7	3,8	3,8	***	***	24,4	69,4
21,4	50,0	*	6,5	6,9	**	**	2,7	2,7	2,8	***	***	26,6	44,7
25,0	24,9	1,6	1,6	5,7(5,4)	1,7	40	1,7	1,7	5,6(5,6)	1,7	55	27,1	22,8
25,0	99,5	8,1	9,1	9,5	**	**	4,8	4,7	4,7	***	***	34,8	89,7
25,0	37,4	1,6	5,7	6,3(6,5)	1,6	120	2,2	2,2	*	2,3	25	31,0	31,5
25,1	58,1	6,1	7,2	7,7	**	**	3,1	3,1	3,2	***	***	31,9	51,4
33,2	49,8	2,0	7,0	7,5(7,7)	1,9	130	2,7	2,7	*	2,9	30	40,2	42,9
37,5	25,0	2,2	2,2	*	2,4	25	1,6	5,9	6,7(6,5)	1,6	120	37,7	24,8
42,9	99,6	9,5	10,6	11,1	**	**	4,8	4,7	*	4,9	25	55,9	86,5
49,9	50,2	2,6	*	8,6(8,8)	2,8	100	2,7	*	9,1(9,0)	2,7	100	52,9	47,2
50,0	33,4	2,7	2,7	*	2,9	30	2,0	7,4	8,1(7,8)	2,0	150	49,6	33,8
50,1	12,6	2,7	2,8	2,8	***	***	4,4	5,4	6,1	**	**	51,1	11,6
50,1	21,5	2,7	2,7	2,8	***	***	5,4	6,5	7,3	**	**	50,6	21,0
58,4	25,0	3,0	3,0	3,1	***	***	*	7,2	8,0	**	**	58,3	25,1
66,7	100,6	10,4	11,8	12,2	**	**	4,8	4,7	11,6	4,9	45	82,5	84,7
74,9	18,7	3,8	3,7	3,7	***	***	6,2	7,3	8,0	**	**	75,3	18,3
75,0	8,2	3,8	3,7	3,7	***	***	4,7	5,6	6,4	**	**	74,3	8,9
75,0	74,8	3,8	11,1	11,4	3,8	150	3,8	11,1	11,9	3,8	150	79,0	70,8
				(11,6)					(11,6)				
99,8	99,9	*	13,5	14,0	**	**	*	13,6	14,3	**	**	104,0	95,7
99,9	25,0	4,8	4,7	4,6	***	***	8,1	9,0	9,8	**	**	98,1	26,9
100,0	42,9	4,7	4,7	4,9	***	***	9,6	10,7	11,5	**	**	96,1	46,8
100,0	66,4	4,8	4,6	11,1	4,9	40	*	12,0	12,6	**	**	93,4	73,0
100,3	11,0	4,7	4,6	4,7	***	***	6,2	7,0	7,8	**	**	99,3	12,1

* Lectura de calado no tomada por excesiva ondulación de la lámina de agua.

** El flujo es subcrítico en la calle de entrada.

*** El resalto se forma dentro del cruce.

El valor entre paréntesis corresponde al calado calculado con un enfoque unidimensional en función del medido aguas arriba del resalto y la posición del resalto.

Tabla 1: Datos experimentales para $S_x=0,01$ y $S_y=0,01$ (Nania et. al, 1999)

En la siguiente tabla de valores tenemos que la calle en la dirección “x” tiene un pendiente longitudinal del 1%, es decir $S_{lx}=0,01$, y la calle en la dirección “y” tiene también una pendiente longitudinal del 2%, es decir $S_{ly}=0,02$.

Q_{ex} [l/s]	Q_{ey} [l/s]	y_{ex} [cm]				D_{Rx} [cm]	y_{ey} [cm]				D_{Ry} [cm]	Q_{ax} [l/s]	Q_{ay} [l/s]
		b	$b/2$	Cruce	Arr.Res		b	$b/2$	Cruce	Arr.Res			
8,3	74,8	4,5	5,4	5,9	**	**	3,6	3,6	3,6	***	***	9,2	73,9
11,0	99,6	7,0	6,7	7,4	**	**	4,7	4,4	4,5	***	***	13,3	97,4
12,4	50,0	*	5,2	5,7	**	**	2,7	2,6	2,7	***	***	12,3	50,1
18,8	75,0	6,2	7,1	7,6	**	**	3,7	3,6	3,6	***	***	19,0	74,7
21,4	50,0	*	6,3	6,8	**	**	2,6	2,6	2,7	***	***	22,7	48,7
25,0	100,0	7,9	8,9	9,5	**	**	4,7	4,4	4,5	***	***	27,7	97,3
25,0	59,0	*	7,2	7,7	**	**	3,0	3,0	3,0	***	***	27,5	56,5
25,1	41,5	1,6	5,9	6,4(6,6)	1,6	130	2,1	2,1	2,2	***	***	28,0	38,6
25,1	24,9	1,6	1,7	5,2(5,6)	1,7	60	1,6	1,6	*(5,5)	1,6	25	26,6	23,4
32,2	75,1	*	8,5	9,0	**	**	3,8	3,5	3,5	***	***	35,4	71,8
33,4	49,9	2,0	7,2	7,7(7,7)	2,0	140	2,6	2,6	*	2,7	25	36,1	47,1
37,5	25,0	2,1	2,2	2,4	2,4	15	1,6	1,6	6,7(6,8)	1,6	75	38,0	24,5
42,7	100,6	9,5	10,5	11,1	**	**	4,7	4,5	4,5	***	***	49,7	93,7
49,9	12,5	2,7	2,6	2,8	***	***	0,9	4,5	6,3(5,9)	1,0	125	49,6	12,8
49,9	50,3	2,7	2,8	8,2(8,5)	2,8	75	2,7	2,6	*(8,6)	2,6	35	53,4	46,8
50,2	33,3	2,7	2,7	*	3,0	20	1,9	*	8,1(7,9)	2,0	80	49,0	34,5
50,3	21,4	2,7	2,7	2,9	***	***	1,4	5,7	7,2(7,1)	1,4	110	49,5	22,2
58,3	25,2	3,1	3,0	3,1	***	***	1,6	6,4	8,0(7,8)	1,6	120	57,6	25,8
66,5	100,0	10,6	12,0	12,5	**	**	4,7	4,5	*	4,6	25	75,2	91,3
74,8	18,7	3,8	3,6	3,8	***	***	*	6,5	8,1(7,6)	1,3	160	74,0	19,5
74,9	32,2	3,8	3,7	3,8	***	***	1,9	8,0	9,4(9,3)	1,9	150	72,9	34,2
75,0	8,3	3,8	3,7	3,8	***	***	3,3	4,9	6,3	**	**	74,0	9,2
75,1	74,8	3,7	10,9	11,4 (11,5)	3,8	140	3,7	3,6	11,6 (11,5)	3,6	65	77,9	72,0
99,6	11,1	4,8	4,6	4,7	***	***	*	6,1	7,8	**	**	98,0	12,6
99,7	25,0	4,8	4,6	4,7	***	***	*	8,3	9,8	**	**	97,3	27,4
99,9	42,9	4,8	4,7	5,0	***	***	*	9,9	11,4	**	**	94,9	47,9
100,0	66,9	4,7	4,6	*	5,0	40	3,3	10,9	12,6 (12,6)	3,3	140	92,3	74,7
100,1	99,6	*	13,6	14,0	**	**	4,7	*	14,3 (14,1)	4,5	100	103,4	96,4

* Lectura de calado no tomada por excesiva ondulación de la lámina de agua.

** El flujo es subcrítico en la calle de entrada.

*** El resalto se forma dentro del cruce.

El valor entre paréntesis corresponde al calado calculado con un enfoque unidimensional en función del medido aguas arriba del resalto y la posición del resalto.

Tabla 2: Datos experimentales para $S_x=0,01$ y $S_y=0,02$ (Nania et. al, 1999)

En la siguiente tabla de valores tenemos que la calle en la dirección “x” tiene un pendiente longitudinal del 1%, es decir $S_{lx}=0,01$, y la calle en la dirección “y” tiene también una pendiente longitudinal del 4%, es decir $S_{ly}=0,04$.

Q_{ex} [l/s]	Q_{ey} [l/s]	y_{ex} [cm]				D_{Rx} [cm]	y_{ey} [cm]				D_{Ry} [cm]	Q_{xx} [l/s]	Q_{yy} [l/s]
		b	$b/2$	Cruce	Arr.Res		b	$b/2$	Cruce	Arr.Res			
8,3	75,1	4,4	5,2	5,8	**	**	3,5	3,2	3,2	***	***	6,6	76,7
11,4	100,3	5,6	6,5	7,1	**	**	4,5	4,1	4,0	***	***	9,0	102,6
12,5	50,0	4,3	5,1	5,7	**	**	2,5	2,3	2,4	***	***	6,4	56,1
18,7	75,2	*	6,9	7,4	**	**	3,5	3,2	3,2	***	***	10,4	83,5
21,4	49,8	*	6,1	6,8(6,3)	1,5	160	2,5	2,3	2,4	***	***	17,0	54,2
25,0	37,5	1,7	5,7	6,3(6,3)	1,6	115	2,0	1,9	1,8	***	***	23,3	39,2
25,0	58,4	*	6,9	7,4	**	**	2,9	2,6	2,6	***	***	20,0	63,3
25,1	99,9	7,6	8,5	9,1	**	**	4,4	4,0	4,0	***	***	16,2	108,8
25,1	25,0	1,7	1,7	5,5(5,7)	1,6	55	1,5	1,4	1,3	***	***	24,4	25,7
33,4	50,3	2,0	7,2	7,8(7,7)	2,0	140	2,6	2,3	2,3	***	***	30,8	52,9
37,5	25,0	2,2	2,2	*	2,4	10	1,5	1,4	*	1,4	25	38,6	23,9
43,2	100,2	9,2	10,2	10,8	**	**	4,5	4,0	4,0	***	***	38,5	104,9
49,9	21,4	2,6	2,8	2,9	***	***	1,3	1,3	7,0(6,9)	1,3	50	50,6	20,8
50,0	12,3	2,8	2,8	2,9	***	***	0,9	0,9	5,9(5,8)	0,9	60	50,8	11,5
50,0	49,9	2,7	*	8,9(8,8)	2,8	100	2,5	2,3	*	2,3	25	47,1	52,9
50,1	33,1	2,7	2,8	*	2,3	20	1,8	1,7	*(7,9)	1,7	35	49,4	33,8
58,3	25,0	3,0	3,1	3,1	***	***	1,5	1,4	7,8(7,4)	1,4	50	58,4	24,9
66,6	100,2	10,7	11,9	12,5	**	**	4,5	4,1	4,1	***	***	64,8	102,0
75,1	8,3	3,6	3,7	3,7	***	***	0,7	*	6,3(6,2)	0,7	90	74,4	8,9
75,1	18,5	3,7	3,7	3,8	***	***	1,2	*	8,0(7,7)	1,1	80	74,0	19,6
99,8	99,8	*	13,5	14,1	**	**	4,4	4,1	*	4,0	35	99,4	100,3
99,9	67,2	4,8	4,7	11,0	5,0	40	3,3	2,9	11,9 (12,0)	2,9	50	92,7	74,4
100,0	11,2	4,8	4,7	4,7	***	***	0,9	4,5	7,7(7,5)	0,8	105	98,6	12,5
100,1	25,0	4,8	4,7	4,7	***	***	1,5	*	9,7(9,6)	1,4	100	97,2	27,8
100,1	43,2	4,8	4,7	4,9	***	***	2,3	*	11,3 (11,2)	2,1	85	95,0	48,2

* Lectura de calado no tomada por excesiva ondulación de la lámina de agua.

** El flujo es subcrítico en la calle de entrada.

*** El resalto se forma dentro del cruce.

El valor entre paréntesis corresponde al calado calculado con un enfoque unidimensional en función del medido aguas arriba del resalto y la posición del resalto.

Tabla 3: Datos experimentales para $S_x=0,01$ y $S_y=0,04$ (Nania et. al, 1999)

CAPÍTULO 4

GEOMETRÍAS CONSIDERADAS DE CRUCES DE CALLES

4.1 Introducción

El criterio básico que se tuvo en cuenta en el diseño de los diferentes cruces de calle, fue recrear la realidad. Además de consultar la instrucción 3.1-IC, así como diferentes libros de trazado: ingeniería de carreteras Vol.1 (Kraemer et al. 2003),..., no se logró establecer una normativa clara para el diseño de calles urbanas. La otra opción fue extrapolar la normativa de carreteras, siempre que fuera posible y consultar al departamento de carreteras de FCC (Fomento de Construcciones y Contratas).

El diseño de la geometría se importó de CAD (.dxf), es decir, en su inicio el diseño empezó en Autocad, aunque se acabó de precisar en GID.

4.2 Criterios de diseño

En primera instancia se decidió cuáles y cuántos eran los tipos de cruces de calle necesarios para poder establecer el comportamiento hidráulico de cualquier cruce de calles.

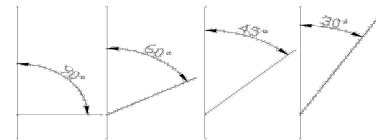
Se llegó a la conclusión que debían estar representados los siguientes conceptos:

- a) Todo tipo de intersecciones: debe estar representado todo el abanico de ángulos que puede haber en un cruce de calles; en los cruces el ángulo tiende a ser de 90° pero no tiene porque.
- b) Existencia de bombeo: en la realidad toda la red de calles urbanas esta diseñada con bombeo. Una calle además de tener un firme permeable, debe tener un bombeo, de este modo las aguas pluviales se escurren hacia los extremos de la calle donde el flujo es recogido por los imbornales.
- c) Régimen rápido: ante la problemática que suscita tener las condiciones de contorno aguas abajo, es mucho más estable numéricamente trabajar con régimen rápido, como ya se explicó en el capítulo 3.

- d) Longitud de las calles: deben tener una longitud importante antes del cruce, muchas veces tenemos caudales muy pequeños en una dirección y muy grandes en la otra, y de esta manera en la calle con poco caudal podemos tener al inicio régimen lento, y desvirtuar el análisis.
- e) El ancho de las calles será constante y el mismo en todas ellas.
- f) La superficie formada por la intersección de las dos calles en planta será considerada horizontal en un caso (90° sin bombeo), y tendrá la pendiente de la calle principal en los demás casos.
- g) Las esquinas estarán formadas: por las aristas de las intersecciones de los planos verticales que forman los cajeros de las calles, es decir, no se considerarán chaflanes de ningún tipo, ni suavización de las mismas.

-Dimensiones de los diferentes cruces de calles

Teniendo en cuenta estudios previos que se realizaron en la tesis doctoral (Nania et. al, 1999), éstas fueron las dimensiones que se utilizaron en GID y CARPA para representar la geometría del cruce:



Ángulos en planta del cruce de calles: 30° , 45° , 60° y 90° .

Ancho de calles: 1,5 metros.

Longitud de las calles de aproximación del cruce: 6 metros.

Longitud de las calles de salida del cruce: 5 metros.

Pendiente longitudinal: 1%, 2% y 4%.

Pendiente transversal: 2%, menor en la zona de aproximación de la calle secundaria, ya que debe acomodar su bombeo a la pendiente de la calle principal. Hay que comentar que existe un cruce de calles a 90° que tiene bombeo y otro que no. Según el libro de Ingeniería de carreteras Vol.1 (Kraemer et. al, 2003), es preferible utilizar pendientes de bombeo del orden de 2% - 3%, porque el bombeo introduce un quiebro en el centro de la calzada, que si es excesivo, puede hacer demasiado brusco el paso de un carril a otro, sobre todo en vehículos altos.

- Particularidades de la pendiente transversal

Como hemos dicho antes, en el cruce de las calles debemos modificar la pendiente longitudinal y transversal de la calle secundaria, para poder acomodarla a la pendiente que tiene la calle principal.

Se decidió que la calle principal tuviese la dirección del eje “y”, y la calle secundaria la dirección de un eje desplazado 30°, 45°, 60° o 90° respecto al eje de coordenadas “y”.

Como se ha explicado en la introducción del apartado, se estudió la forma de acomodar la calle secundaria en el cruce. Se decidieron dos soluciones dependiendo del tipo de cruce:

La transición de peralte o bombeo, según la instrucción, debe llevarse a cabo combinando las tres condiciones siguientes:

- Características dinámicas aceptables por el vehículo
- Rápida evacuación de las aguas de la calzada
- Sensación estética agradable

Tipo A

La calle secundaria conserva su pendiente transversal y longitudinal hasta la sección que su extremo derecho (mirando aguas abajo) choca con el extremo izquierdo de la calle principal, a partir de esta sección la pendiente de la calle secundaria se acomoda a la principal, para que coincidan sus pendientes en la sección que es común a las dos. La variación de la pendiente en la calle secundaria queda comprendida entre dos secciones, como podemos ver en la siguiente figura, visualmente esta zona queda representada en planta por un triángulo. Esta solución aplicada en calles urbana pretende valorar tanto las características dinámicas aceptables por el vehículo, como sobretodo una rápida evacuación de las aguas de la calzada.

Los cruces de calles con ángulos de 30°, 45° y 60° serian del tipo A.

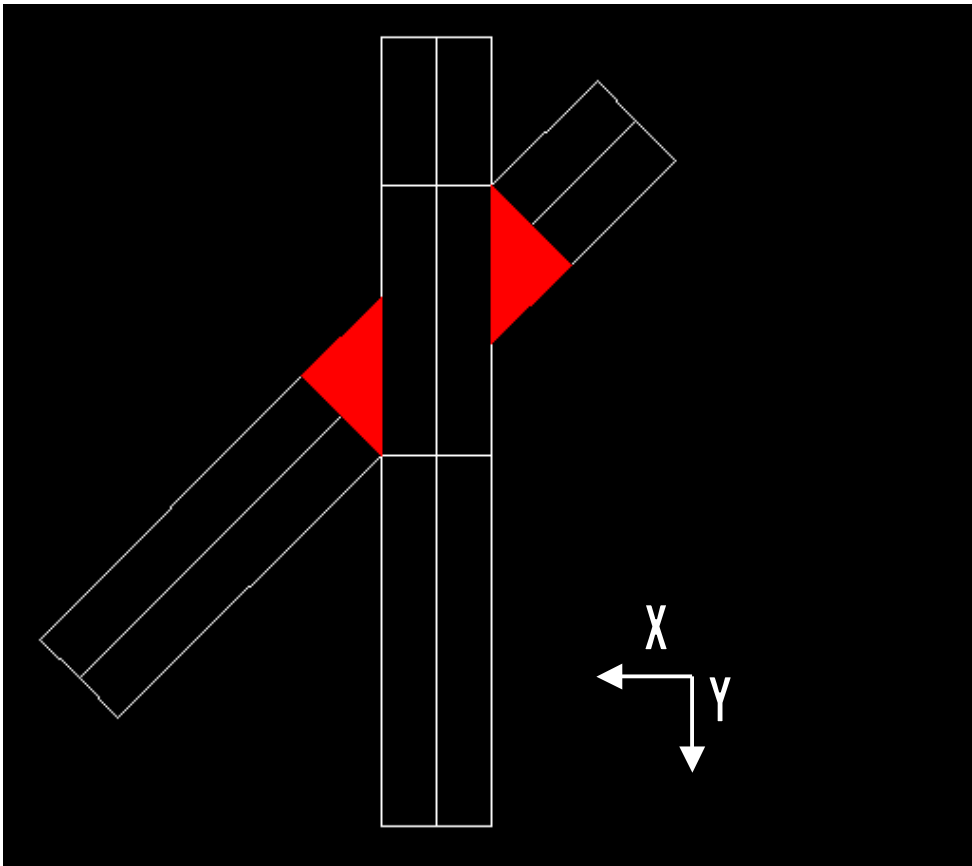


Figura 9: Triángulo que contiene la zona de variación de pendiente de la calle secundaria

Tipo B

En este caso tendríamos únicamente al cruce de calles a 90° con bombeo. Como es lógico no podemos aplicar el mismo procedimiento que en el caso anterior, de manera que se ha extrapolado la teoría de la instrucción para poder introducirla en calles urbanas.

Según la instrucción, los desvanecimientos de bombeo se hacen en la alineación recta, para carreteras de grupo 2 (es decir con $V_p \leq 100$ Km/h) para plataformas con dos pendientes podemos variar como máximo la pendiente 2° cada 20 metros, es decir, para calles con $V_{aprox} = 50$ Km/h deberíamos poder variar como máximo la pendiente 2° cada 10m o 1° cada 5m. Aunque al trabajar en una escala mucho más reducida que la real, tendremos que calcular el factor de escala. La plataforma de una carretera puede llegar a medir 9 m, el ancho de nuestra plataforma tiene 1,5 m, es decir, seis veces más pequeña; y por lo tanto deberíamos variar la pendiente 1° cada 0,8333 m.

La pendiente transversal en la calle secundaria varía primero en la plataforma derecha (mirando aguas abajo) hasta cambiar el sentido y tener la misma pendiente que tiene el bombeo de la plataforma izquierda, llegado a este punto si la calle principal tiene una pendiente longitudinal mayor que el bombeo de la plataforma izquierda de la calle secundaria, esta deberá aumentar su bombeo para acomodarse a la pendiente

longitudinal de la principal. Recordemos que toda esta metodología se introduce en cambios de bombeo, entre una alineación recta y una curva circular, y la utilizamos porque la instrucción solo habla de desvanecimiento de bombeo en estos casos. Como muestra la siguiente figura.

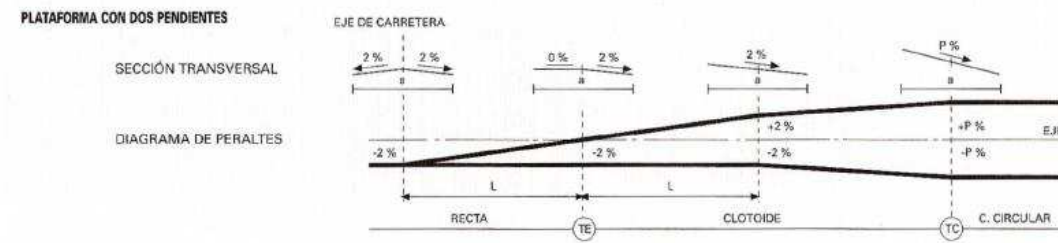


Figura 10: Variación de bombeo en una plataforma con dos pendientes

Podemos ver en la siguiente figura la zona de variación de bombeo en la calle secundaria.

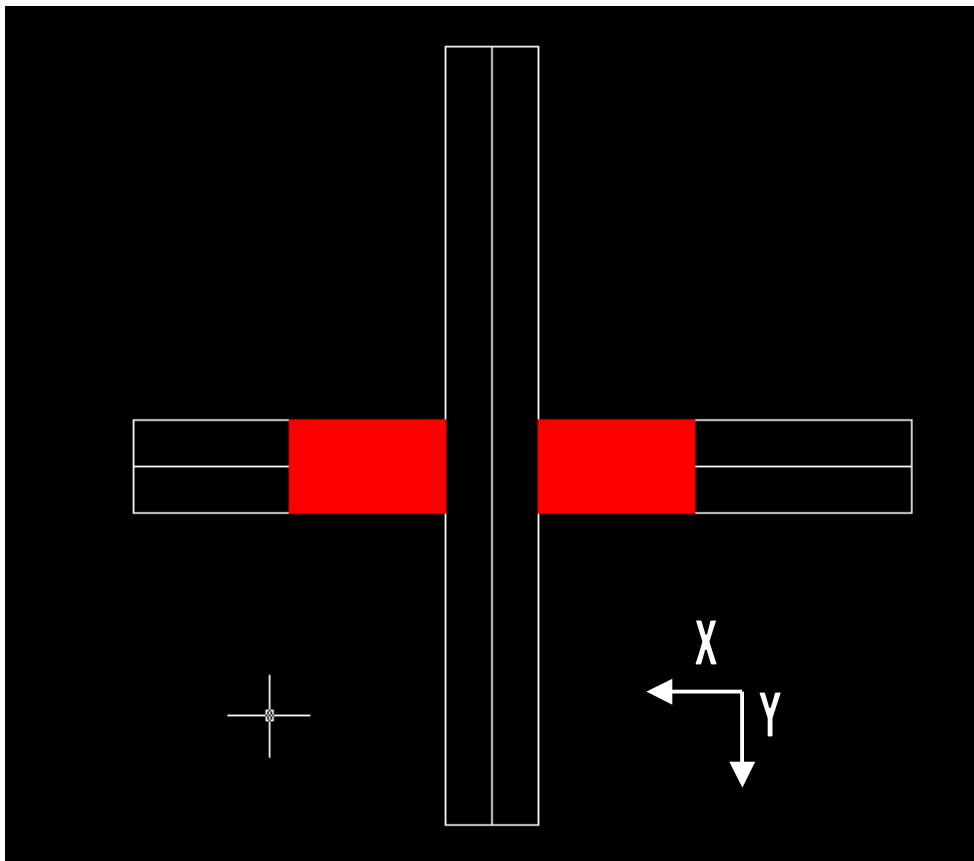


Figura 11: Variación de bombeo en la calle secundaria

4.3 Diseño en Autocad

En primera instancia se tuvo que calcular las coordenadas que debían tener cada par de puntos que conforman cada arista de las calles. En un caso con pocos puntos, como es un cruce de calles a 30° con una pendiente del 1%, existen 48 puntos para introducir coordenadas. Se tuvieron que calcular con excel, y posteriormente diseñar en autocad 15 casos diferentes (5 tipos de cruces de calle, según el ángulo del cruce, para 3 combinaciones de pendientes diferentes), es decir, se introdujeron unos 800 puntos. Podemos ver en la siguiente figura dos casos de cruce de calles en autocad.

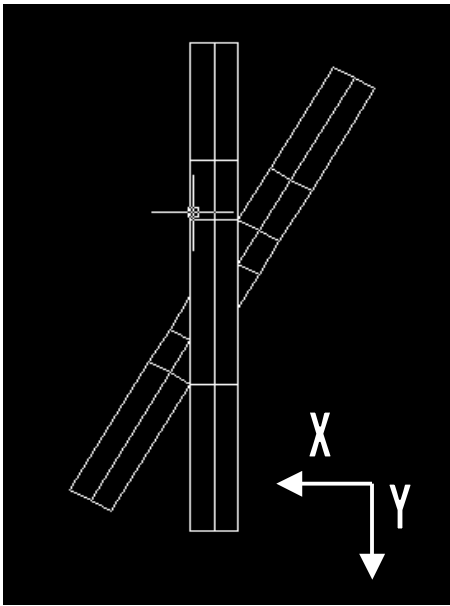


Figura 12: Cruce de calle con un ángulo de 30°

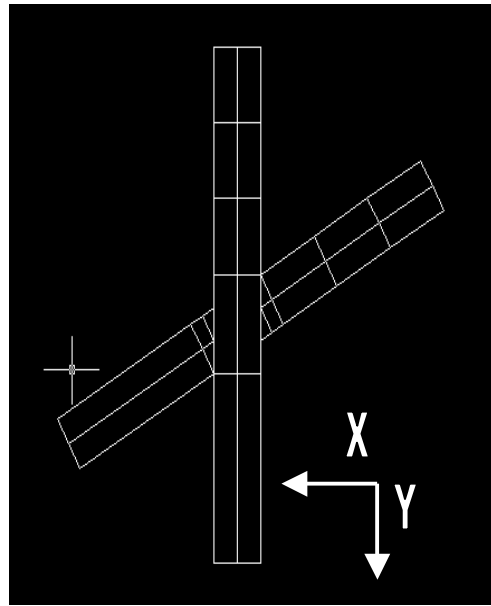


Figura 13: Cruce de calle con un ángulo de 60°

CAPÍTULO 5

MODELOS DE CÁLCULO UTILIZADOS: CARPA /GID

5.1 Introducción

Debido a la imposibilidad por cuestiones económicas de construir un cruce de calles con las características mencionadas en el capítulo anterior, se ha estudiado el comportamiento del flujo en un cruce de calles a partir de los modelos CARPA / GID. Se ha demostrado la validez de estos modelos a lo largo de este capítulo, comprobando si la formulación utilizada puede describir el comportamiento del flujo.

El GID es un programa desarrollado por el CIMME (Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería) creado para simular geometrías, introducir valores, generar mallas donde cada elemento tiene asignados los valores y visualizar los resultados para todo tipo de simulaciones numéricas. Los típicos problemas que son tratados normalmente con este programa son: simulaciones de sólidos y estructuras, fluidos dinámicos, elementos electromagnéticos, transferencias de calor, etc...; permitiéndonos trabajar con elementos finitos, volúmenes finitos, diferencias finitas o elementos de contorno. El software GID se utilizó con la ayuda del manual de usuario (Ribó et. al, 2008).

El CARPA (Cálculo en Alta Resolución de Propagación de Avenidas) es una herramienta de cálculo numérico del flujo de agua en lámina libre y régimen variable, desarrollado por el grupo de investigación Flumen de la E.T.S. de Ing. De Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (U.P.C.). El programa se utilizó con la ayuda del manual de usuario de CARPA” (Bladé et. al, 2007).

El sistema CARPA ha sido desarrollado para estudios hidrodinámicos en geometrías irregulares e integra las aproximaciones en una y dos dimensiones con distintas posibilidades de conexión entre dominios. Utiliza esquemas numéricos de alta resolución que permiten el cálculo de flujos discontinuos, y permite trabajar en dos dimensiones con mallas irregulares no estructuradas formadas por cuadriláteros o triángulos.

Por otro lado CARPA implementa mecanismos para considerar el mojado y el secado del dominio así como rugosidad variable en el espacio y en función de las características del flujo.

5.2 Modelo de cálculo: CARPA

5.2.1 Aspectos generales

Como comentamos en el capítulo anterior, CARPA puede funcionar como un programa independiente o acceder a él a través del software GID. En esta tesina se ha trabajado a través de GID, por las ventajas que proporciona éste en la modelización de geometrías.

5.2.2 Formulación utilizada por CARPA

Ecuaciones de Saint Venant

A partir de las leyes generales como son: conservación de masa, conservación de la cantidad de movimiento y las ecuaciones constitutivas Particularizadas para un fluido incompresible e isótropo, como es el agua, se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes para el movimiento instantáneo y de ellas se deducen, considerando variables medias en el tiempo, las ecuaciones de Reynolds. De éstas, integrando en la profundidad para eliminar la dimensión vertical, se obtienen las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales, válidas cuando el flujo que se quiere representar tiene velocidades verticales pequeñas, pendientes del fondo del cauce suave, y en general las dimensiones horizontales predominantes sobre la vertical. Utilizando notación vectorial, podemos escribir las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones como:

$$\frac{\partial}{\partial t} U + \nabla F = H$$

$$U = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}; \quad F = \begin{pmatrix} hu & hv \\ hu^2 + g \frac{h^2}{2} & huv \\ huv & hv^2 + g \frac{h^2}{2} \end{pmatrix}; \quad H = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{pmatrix}$$

Donde cada término representa:

h: calado

u: componente de la velocidad (velocidad media en la profundidad) en la dirección "x"

v: componente de la velocidad (velocidad media en la profundidad) en la dirección "y"

g: la aceleración de la gravedad

S_{0x} y S_{0y} : las componentes de la pendiente del fondo según la dirección del eje de coordenadas

S_{fx} y S_{fy} : las componentes de la pendiente motriz según la dirección del eje de coordenadas

Por lo tanto U es el vector de variables de flujo, F es el tensor de flujo y H es el término independiente o término fuente. Esta ecuación consta de tres términos. El primer término representa la variación temporal local de las variables hidráulicas: masa y cantidad de movimiento; el segundo término representa la variación espacial de los flujos de dichas cantidades; el tercer término (término fuente o independiente) representa la ganancia o pérdida de masa y cantidad de movimiento por unidad de tiempo en un volumen diferencial que se mueve con el fluido. Las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones han sido extraídas del manual de usuario del programa CARPA (Bladé et. al, 2007)

Podemos decir que las ecuaciones Saint Venant son un caso concreto de un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales hiperbólico, cuasi-lineal y con término independiente.

5.2.3 Discretización en volúmenes finitos

Haremos una breve explicación de la utilización de los volúmenes finitos consultada en el manual de usuario del programa CARPA (Bladé et. al, 2007). Esta técnica de cálculo numérico se ha mostrado muy útil a la hora de desarrollar esquemas de alta resolución en dos dimensiones. Los volúmenes finitos permiten discretizar el dominio con mallas irregulares, y por lo tanto adaptadas a los contornos, y se utiliza la formulación integral de la ecuación. La expresión integral para un volumen V cualquiera de las ecuaciones de Saint Venant bidimensional es:

$$\int U_t dV + \int \nabla F dV = \int H dV$$

y aplicando el teorema de Gauss tendremos:

$$\int U_t dV + \int (F * n) ds = \int H dV$$

Donde s es el contorno que encierra a V . Si ahora denotamos con U_{ij} y H_{ij} al valor promedio en el volumen finito V , las podremos sacar de la integral.

$$U_t = \frac{-1}{V_{i,j}} + \int (F * n) ds + H_{i,j}$$

En la siguiente figura podemos ver un dominio bidimensional discretizado en volúmenes finitos.

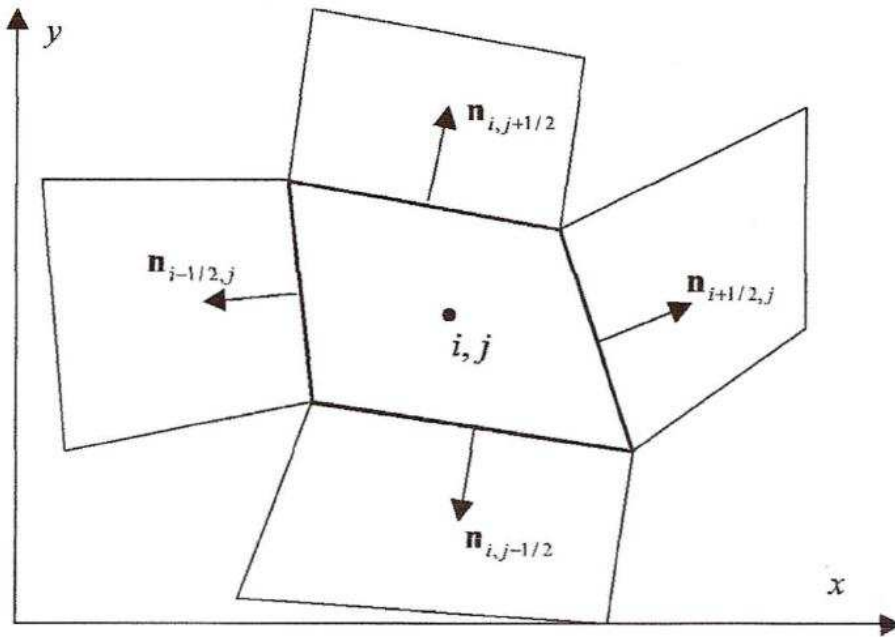


Figura 14: Discretización de volúmenes finitos de un dominio bidimensional

Al utilizar un esquema explícito, la condición de Courant limita el incremento de tiempo que se puede utilizar según la siguiente expresión, extraída del manual de usuario del programa CARPA (Bladé et. al, 2007).

$$\Delta t \leq \min \left(\frac{l}{\sqrt{2} |\sqrt{u^2 + v^2} + c|} \right)$$

Donde l es la longitud del lado de un elemento, u y v las componentes de la velocidad y $c = \sqrt{gh}$ la celeridad de onda.

5.2.4 Malla de cálculo, condiciones iniciales y de contorno

- Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales se deben imponer en la geometría de la figura. De esta manera, cuando creamos la malla cada elemento de volumen tendrá asignado un valor.

- Condiciones contorno

El tipo de condiciones de contorno a imponer dependerán del tipo de régimen con el que trabajemos, como podemos ver en la siguiente tabla. Se pueden imponer condiciones de contorno en diferentes instantes de tiempo para dar condiciones variables como pueden ser hidrogramas de entrada o niveles de agua. En nuestro caso las condiciones no serán variables ya que trabajaremos con caudales y calados constantes.

Extremo	Régimen hidráulico	Condición impuesta
Entrada	Rápido	1a. Calado y componentes de la velocidad según las direcciones normal y tangente al contorno. 1b. Calado y caudal específico según las direcciones normal y tangente al contorno.
	Lento	2a. Componentes de la velocidad según las direcciones normal y tangente al contorno. 2b. Caudal específico según las direcciones normal y tangente al contorno.
Salida	Lento	3a. Calado 3c. Caudal específico normal al contorno 3d. Vertedero
	Rápido	Ninguna

Figura 15: Tabla con las diferentes condiciones de contorno a imponer (marcada las c.c en nuestro caso)

- Malla de cálculo

CARPA resuelve las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones en un dominio discretizado por una malla de cálculo irregular y no estructurada. Los volúmenes finitos pueden ser para cualquiera de los esquemas numéricos implementados, cuadriláteros o triángulos, o combinaciones de ambos. Para ello se puede utilizar una malla regular o irregular y, en este caso, puede ser estructurada o no. En el siguiente apartado podemos ver la geometría de un cruce de calles en GID y la malla asignada a esa geometría.

5.3 Modelo de cálculo: GID

5.3.1 Geometría

Creados los diseños de un cruce de calles en Autocad, se importaron para trabajar con GID. La existencia de aristas que no estaban unidas a otras, porque el punto en común tenía el cuarto decimal diferente, hizo que el diseño final tuviera que acabarse en GID.

En la siguiente figura podemos ver la geometría de un caso en GID.

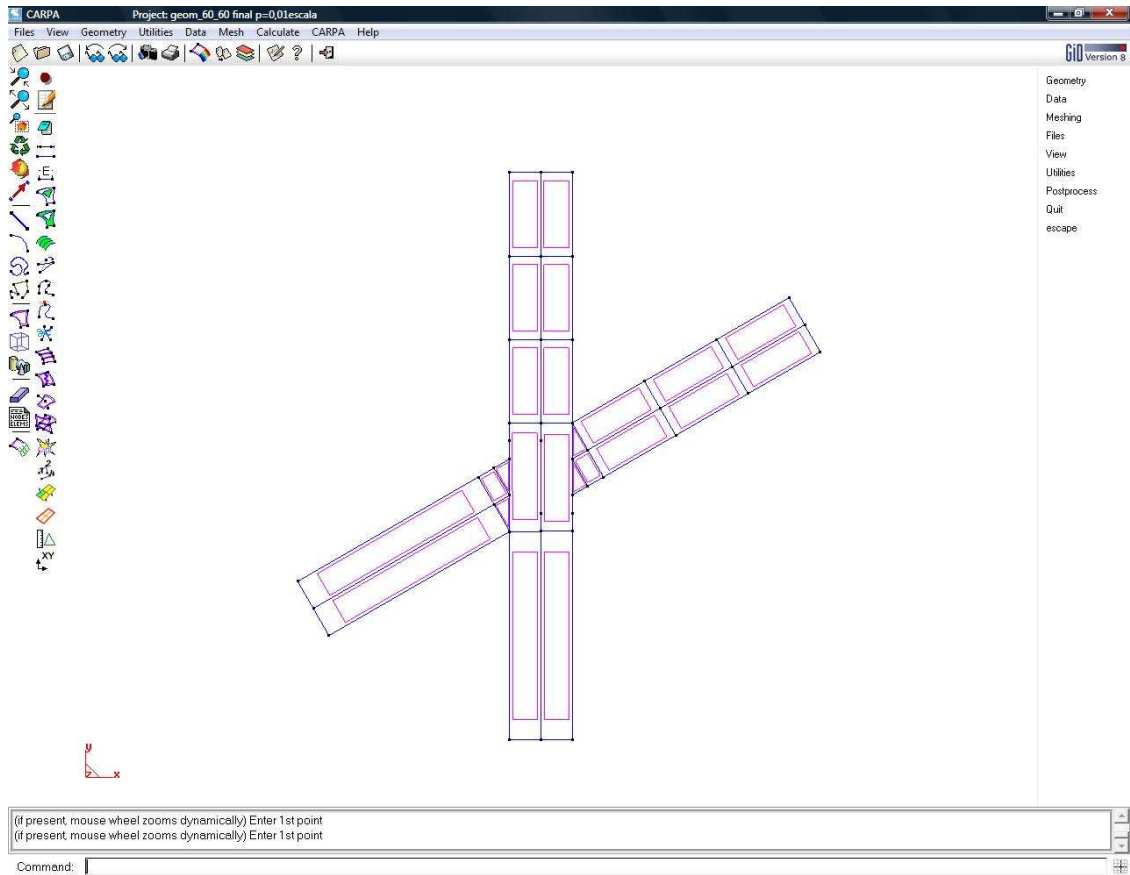


Figura 16: Geometría de un cruce de calle con un ángulo de 60° en GID

5.3.1 Malla de un cruce de calles

El tipo de malla que se utilizó mayoritariamente fue de cuadriláteros, pero en determinadas zonas debido a la geometría, se utilizó malla triangular.

La densidad de la malla es variable. En la zona fuera del cruce se utilizó malla de cuadriláteros, donde el lado que coincidía con la sección transversal, tenía una medida de 5 cm, y el otro lado una medida de 10 cm. En la zona del cruce existe una malla mixta con cuadriláteros y triángulos, con unos elementos que tienen una medida aproximada de $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ y de $5\text{cm} \times 2,5\text{cm}$, respectivamente.

Una densidad importante de malla es necesaria en los cálculos numéricos, aunque el tiempo de cálculo sea mayor por la existencia de más puntos de estudio.

En la siguiente figura podemos ver la malla del anterior cruce de calles.

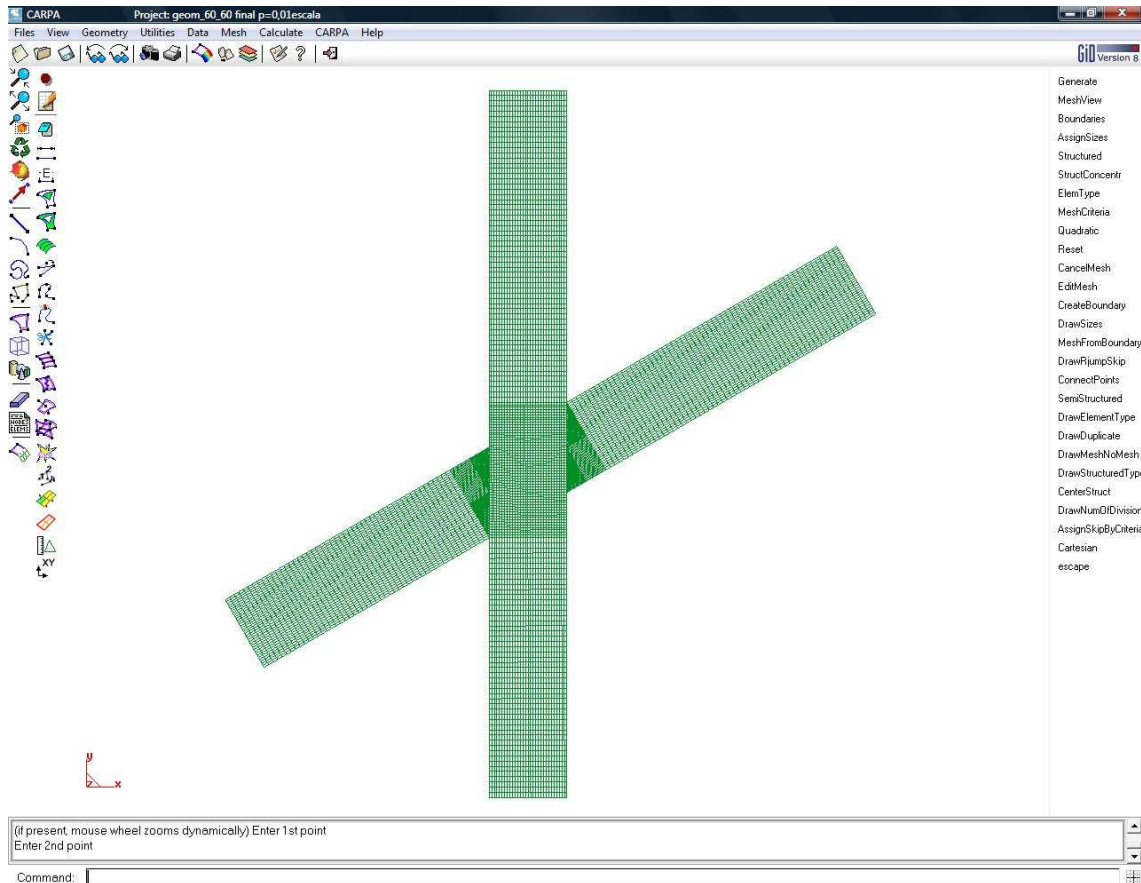


Figura 17: Malla de un cruce de calle con un ángulo de 60° en GID

5.4 Utilidades de CARPA

5.4.1 Aspectos generales

Una de las claves de CARPA es su buen funcionamiento y su simplicidad, ya que solo requiere dos archivos en la entrada de datos:

CARPA2D que contiene datos del módulo 2D en archivo tipo ASCII .

CARPA1D que contiene datos del módulo 1D en archivo tipo ASCII .

Pueden existir dos archivos más de entrada de datos, que no utilizaremos en nuestro caso. CARPA genera una serie de archivos de resultados que podemos editar y visualizar con cualquier editor del tipo Bloc de Notas, pero en este caso, es más complejo trabajar con los resultados y es casi obligado visualizarlos con GID.

5.4.2 Recomendaciones en la entrada de datos

En esta tesina como se ha comentado anteriormente, hemos definido un gran número de casos a estudiar con GID y CARPA, para obtener una cantidad suficiente de puntos que nos permita establecer un patrón en el comportamiento del flujo y conocer el reparto del caudal de salida.

El número de casos a estudiar fueron de 395, donde en cada uno de ellos se tuvieron que introducir las condiciones iniciales y de contorno. Aunque la entrada de datos es lenta, introducirlos con GID aun hubiese complicado más el proceso.

Esta introducción de datos se hizo a partir del archivo CARPA2D. Este archivo se tenía que generar para cada cruce de calle con diferente ángulo o con diferente pendiente. El problema era que para generar ese archivo, se debía introducir los materiales, condiciones iniciales, de contorno, y calcularlo con GID.

Como podemos comprobar en la figura, la introducción de condiciones de contornos una vez tenemos la geometría y la malla es muy fácil. Podemos fijarnos en la primera fila donde el primer número es el elemento, el segundo el lado, el tercero el instante, el cuarto es el caudal específico, los otros números hacen referencia al tipo de régimen del flujo, donde destacamos el sexto número que es el calado.

carpa2D.dat - Bloc de notas									
Archivo Edición Formato Ver Ayuda									
CC: CONDICIONS CONTORN									
541	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
542	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
543	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
544	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
545	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
546	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
547	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
548	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
549	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
550	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
551	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
552	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
553	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
554	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1
555	4	0	-0.038866666	0	0.031	-11	2	1	1

Figura 18: Condiciones de contorno dentro de un archivo CARPA2D

CAPÍTULO 6

VERIFICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

6.1 Introducción

Como hemos expuesto teóricamente en el apartado anterior, los modelos de cálculo GID y CARPA deberían representar correctamente el comportamiento hidráulico en un cruce de calles. En este apartado se comprobará que estos dos modelos representan adecuadamente el fenómeno físico, que se produce en un cruce de calles.

Aunque el tipo de problema con que trabajaremos (cruce de calles) cumple las limitaciones que hemos explicado en el apartado 5.2.2, debíamos asegurarnos que realmente la dimensión vertical no tuviese un componente importante en el flujo, así como otras variables que no hemos considerado.

Por este motivo, siguiendo los pasos que se han explicado en los capítulos anteriores, se simuló con GID y CARPA las mismas condiciones y el mismo dispositivo experimental (cruce de calles), que se construyó para obtener los datos experimentales de la tesis doctoral. De esta manera se hizo una comparación entre los datos experimentales de la tesis doctoral de Nania, con los valores obtenidos en la simulación.

Comprobado para este caso, la similitud entre los valores experimentales y numéricos. Podremos diseñar diferentes geometrías de cruce de calles y establecer el reparto de caudal, así como el ángulo de resalto que se forma en el cruce.

6.2 Comparación entre datos experimentales /valores numéricos

6.2.1 Características del cruce de calles

Como se ha explicado para esta comparación de resultados se simuló un cruce de calles con las siguientes características:

- Ángulo del cruce de calles: 90°
- Rugosidad del material (Manning): 0,01 (parámetro de ajuste)
- Ancho de la sección: 1,5 m
- No existencia de bombeo
- Superficie horizontal en el cruce

- Longitud de las calles de aproximación del cruce: 6 metros.
- Longitud de las calles de salida del cruce: 5 metros.

Donde todas las características del cruce de calles son valores fijos, menos el coeficiente de Mannig "n" ya que es un parámetro de ajuste, y por lo tanto debería aproximarse para obtener unos valores cercanos a los resultados experimentales. Como ya se ha dicho el tipo de régimen a estudiar será rápido.

Podemos ver en la figura siguiente las direcciones de los flujos de entrada en el cruce de calles descrito (para los valores numéricos):

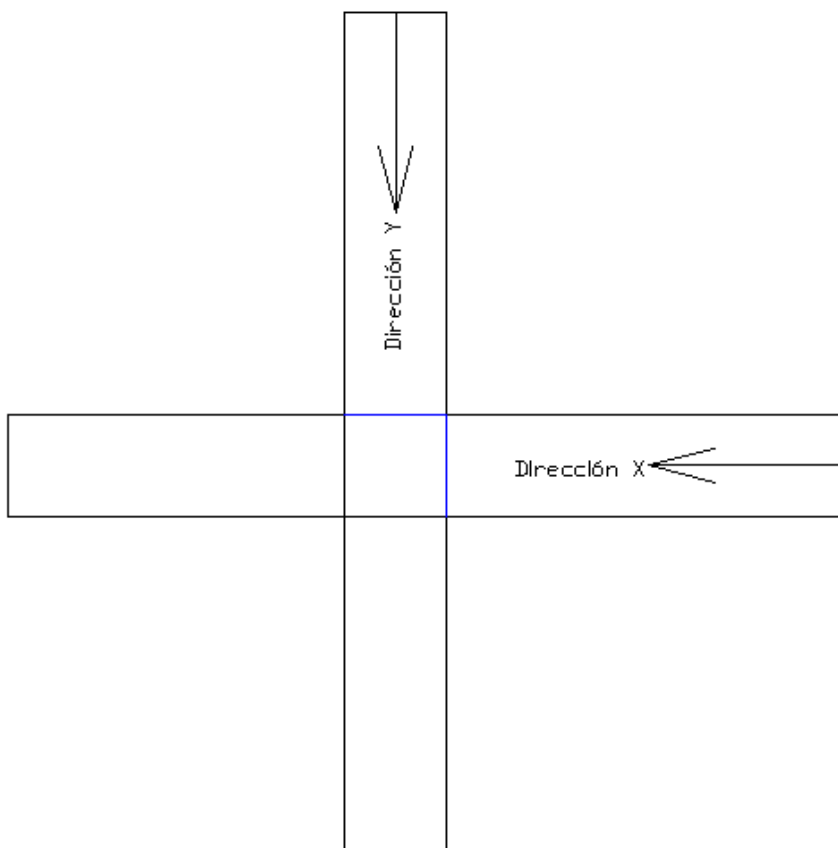


Figura 19: Direcciones de entrada de los flujos en CARPA. También podemos ver en color azul las secciones del cruce donde evaluamos los calados

Como podemos observar, conserva la misma dirección "y" y "x" que el dispositivo experimental, pero no conserva el mismo sentido del flujo de entrada en la dirección "x", como podemos ver en el capítulo 3.

6.2.2 Resultados para la combinación de pendientes $S_x=1\%$ y $S_y=1\%$

En la siguiente tabla podemos comprobar la relación entre los caudales introducidos aguas arriba del cruce, con los caudales de salida obtenidos aguas abajo del cruce, con el programa CARPA y con el dispositivo experimental.

Casos	Caudal (l/s) (Dispositivo experimental)				Caudal (l/s) (Resultados numéricos)			
	Entrada (Disp.Exp)		Salida (Disp.Exp)		Entrada (Num.)		Salida (Num.)	
	Qx (l/s)	Qy (l/s)	Qx (l/s)	Qy (l/s)	Qx (l/s)	Qy (l/s)	Qx (l/s)	Qy (l/s)
1	8.4	75	12.5	70.8	8.4	75	15.1	68.1
2	11.1	99.6	17.5	93.2	11.1	99.6	18.4	92.0
3	12.6	50	16.3	46.3	12.6	50	19.5	43.0
4	18.8	75.1	24.4	69.4	18.8	75.1	27.0	66.8
5	21.4	50	26.6	44.7	21.4	50	29.4	42.0
6	25	24.9	27.1	22.8	25	24.9	24.9	24.9
7	25	99.5	34.8	89.7	25	99.5	33.9	91.4
8	25	37.4	31	31.5	25	37.4	29.0	33.3
9	25.1	58.1	31.9	51.4	25.1	58.1	34.1	49.0
10	33.2	49.8	40.2	42.9	33.2	49.8	38.6	44.4
11	37.5	25	37.7	24.8	37.5	25	33.4	29.1
12	42.9	99.6	55.9	86.5	42.9	99.6	57.7	84.8
13	49.9	50.2	52.9	47.2	49.9	50.2	50.0	50.1
14	50	33.4	49.6	33.8	50	33.4	44.6	38.8
15	50.1	12.6	51.1	11.6	50.1	12.6	43.3	19.5
16	50.1	21.5	50.6	21	50.1	21.5	42.1	29.5
17	58.4	25	58.3	25.1	58.4	25	49.5	33.9
18	66.7	100.6	82.5	84.7	66.7	100.6	77.5	89.8
19	74.9	18.7	75.3	18.3	74.9	18.7	66.1	27.4
20	75	8.2	74.3	8.9	75	8.2	67.7	15.1
21	75	74.8	79	70.8	75	74.8	74.9	74.9
22	99.8	99.9	104	95.7	99.8	99.9	99.9	99.9
23	99.9	25	98.1	26.9	99.9	25	83.3	39.1
24	100	42.9	96.1	46.8	100	42.9	86.3	56.3
25	100	66.4	93.4	73	100	66.4	89.3	76.9
26	100.3	11	99.3	12.1	100.3	11	92.38	19.55

Tabla 4: Tabla con la relación de caudales de entrada y salida del dispositivo experimental (izquierda) y del programa CARPA (derecha), para una combinación de pendientes $S_x=1\%$ y $S_y=1\%$

Existe una desviación entre los resultados experimentales y los numéricos como era de esperar, pero la variabilidad entre resultados no es importante. Podemos comprobar como los resultados entre el dispositivo experimental y el numérico se asemejan en gran medida.

También se establece una relación de calados (cm) entre los cruces de entrada para el dispositivo experimental y el programa CARPA, como se presenta en la siguiente tabla.

Casos	Dispositivo experimental		Resultados Numéricos	
	calado en el cruce x	calado en el cruce y	calado en el cruce x	calado en el cruce y
1	6,1	3,8	6,4	4
2	7,5	4,7	7,5	4,93
3	5,9	2,8	6,3	3,22
4	7,8	3,8	8,1	4,1
5	6,9	2,8	7	5,6
6	5,7	5,6	5,45	5,45
7	9,5	4,7	9,4	4,9
8	6,3		6,5	6,4
9	7,7	3,2	7,85	6
10	7,5		7,8	7,5
11		6,7	6,3	6,65
12	11,1		11,1	8,8
13	8,6	9,1	8,9	8,75
14		8,1	7,6	7,7
15	2,8	6,1	3,2	6,65
16	2,8	7,3	5,3	6,95
17	3,1	8	4,9	7,81
18	12,2	11,6	12,7	12,4
19	3,7	8	4,25	8,37
20	3,7	6,4	4,1	6,5
21	11,4	11,9	11,35	11,3
22	14	14,3	13,99	13,99
23	4,6	9,8	6	9,5
24	4,9	11,5	7,9	11,5
25	11,1	12,6	12,15	12,47
26	4,7	7,8	6,3	4,3

Tabla 5: Tabla con la relación entre calados de los cruces para el dispositivo experimental y el programa CARPA, para una combinación de pendientes $S_x=1\%$ y $S_y=1\%$

Después de comparar los resultados experimentales con los resultados numéricos, podemos llegar a la conclusión (para este caso con la misma pendiente en “x” e “y”), que la diferencia entre unos y otros es leve. Hay que añadir que el dispositivo experimental es una recreación de la realidad, esto siempre conlleva un pequeño error y por tanto estos resultados son aproximaciones de la realidad.

En el Anejo 1 se encuentran los resultados del calado a una distancia de $b/2$ y b del cruce. Estos resultados se pueden comparar con los valores experimentales, que se encuentran en el Capítulo 3. También podemos consultar en este Anejo 1 mapas con los siguientes parámetros: nº Froud (rangos 0-1) y caudales.

6.2.3 Resultados para la combinación de pendientes $S_x=1\%$ y $S_y=2\%$

En la siguiente tabla podemos comprobar la relación entre los caudales introducidos aguas arriba del cruce, con los caudales de salida obtenidos aguas abajo del cruce, con el programa CARPA y con el dispositivo experimental.

Casos	Caudal (l/s) (Dispositivo experimental)				Caudal (l/s) (Resultados numéricos)			
	Entrada (Disp.Exp)		Salida (Disp.Exp)		Entrada (Num.)		Salida (Num.)	
	Qx (l/s)	Qy (l/s)	Qx (l/s)	Qy (l/s)	Qx (l/s)	Qy (l/s)	Qx (l/s)	Qy (l/s)
1	8.3	74.8	9.3	73.9	8.3	74.8	7.97	75.15
2	11	99.6	13.3	97.4	11	99.6	9.99	99.99
3	12.4	50	12.3	50.1	12.4	50	13.37	48.95
4	18.8	75	19	74.7	18.8	75	18.36	75.44
5	21.4	50	22.7	48.7	21.4	50	23.58	47.67
6	25	100	27.7	97.3	25	100	22.67	102.35
7	25	59	27.5	56.5	25	59	27.01	56.85
8	25.1	41.5	28	38.6	25.1	41.5	27.54	39.00
9	25.1	24.9	26.6	23.4	25.1	24.9	25.01	24.93
10	32.2	75.1	35.4	71.8	32.2	75.1	34.10	72.64
11	33.4	49.9	36.1	47.1	33.4	49.9	36.06	47.03
12	37.5	25	38	24.5	37.5	25	32.95	29.45
13	42.7	100.6	49.7	93.7	42.7	100.6	44.67	98.17
14	49.9	12.5	49.6	12.8	49.9	12.5	42.21	19.84
15	49.9	50.3	53.4	46.8	49.9	50.3	49.99	49.93
16	50.2	33.3	49	34.5	50.2	33.3	44.09	39.24
17	50.3	21.4	49.5	22.2	50.3	21.4	41.58	29.89
18	58.3	25.2	57.6	25.8	58.3	25.2	48.61	34.78
19	66.5	100	75.2	91.3	66.5	100	71.56	95.10
20	74.8	18.7	74	19.5	74.8	18.7	65.48	27.79
21	74.9	32.2	72.9	34.2	74.9	32.2	62.94	43.78
22	75	8.3	74	9.2	75	8.3	67.42	15.63
23	75.1	74.8	77.9	72	75.1	74.8	74.40	74.94
24	99.6	11.1	98	12.6	99.6	11.1	90.92	19.93
25	99.7	25	97.3	27.4	99.7	25	88.38	36.38
26	99.9	42.9	94.9	47.9	99.9	42.9	84.96	57.50
27	100	66.9	92.3	74.7	100	66.9	88.33	78.22
28	100.1	99.6	103.4	96.4	100.1	99.6	99.02	100.09

Tabla 6: Tabla con la relación de caudales de entrada y salida del dispositivo experimental (izquierda) y del programa CARPA (derecha), para una combinación de pendientes $S_x=1\%$ y $S_y=2\%$

Podemos comprobar como los resultados entre el dispositivo experimental y el numérico se asemejan en gran medida. También se ha representado una relación de calados (cm) entre los cruces de entrada para el dispositivo experimental y el programa CARPA, como se presenta en la siguiente tabla.

Casos	Dispositivo experimental		Resultados Numéricos	
	calado en el cruce	calado en el cruce y	calado en el cruce x	calado en el cruce y
1	5,9	3,6	5.94	3.46
2	7,4	4,5	7.003	4.12
3	5,7	2,7	5.82	2.74
4	7,6	3,6	7.53	3.55
5	6,8	2,7	6.97	2.87
6	9,5	4,5	8.94	4.28
7	7,7	3	7.73	3.17
8	6,4	2,2	6.79	4.1
9	5,2	5,5	5.44	5.4
10	9	3,5	9.26	3.42
11	7,7		7.98	5.01
12	2,4	6,7	6.3	6.33
13	11,1	4,5	11.21	4.15
14	2,8	6,3	3.22	6.21
15	8,5	8,6	8.76	8.55
16		7,9	7.65	7.73
17	2,9	7,1	4.71	6.95
18	3,1	7,8	5	7.94
19	12,5		7.65	7.73
20	3,8	8,1	4.1	8.04
21	3,8	9,3	5.58	9.18
22	3,8	6,3	4.11	6.42
23	11,4	11,5	11.5	11.4
24	4,7	7,8	4.91	7.7
25	4,7	9,8	4.91	9.81
26	5	11,4	6.33	11.17
27		12,6	12.17	12.38
28	14	14,1	13.95	13.85

Tabla 7: Tabla con la relación entre calados de los cruces para el dispositivo experimental y el programa CARPA, para una combinación de pendientes $S_x=1\%$ y $S_y=2\%$

Después de comparar los resultados experimentales con los resultados numéricos, podemos llegar a la conclusión que la diferencia entre unos y otros es leve.

En el Anejo 2 se encuentran los resultados del calado a una distancia de $b/2$ y b del cruce. Estos resultados se pueden comparar con los valores experimentales, que se encuentran en el Capítulo 3. También podemos consultar en este Anejo 2 mapas con los siguientes parámetros: n° Froud (rangos 0-1) y caudales.

En la siguiente figura podemos comprobar el valor de los calados en una campaña de obtención de datos, planificada y realizada por Ernest Bladé como parte de su tesis doctoral, en un cruce de calles a 90° sin bombeo. Estos valores fueron obtenidos a partir del dispositivo experimental del laboratorio, donde se llegaron a medir 803 puntos.

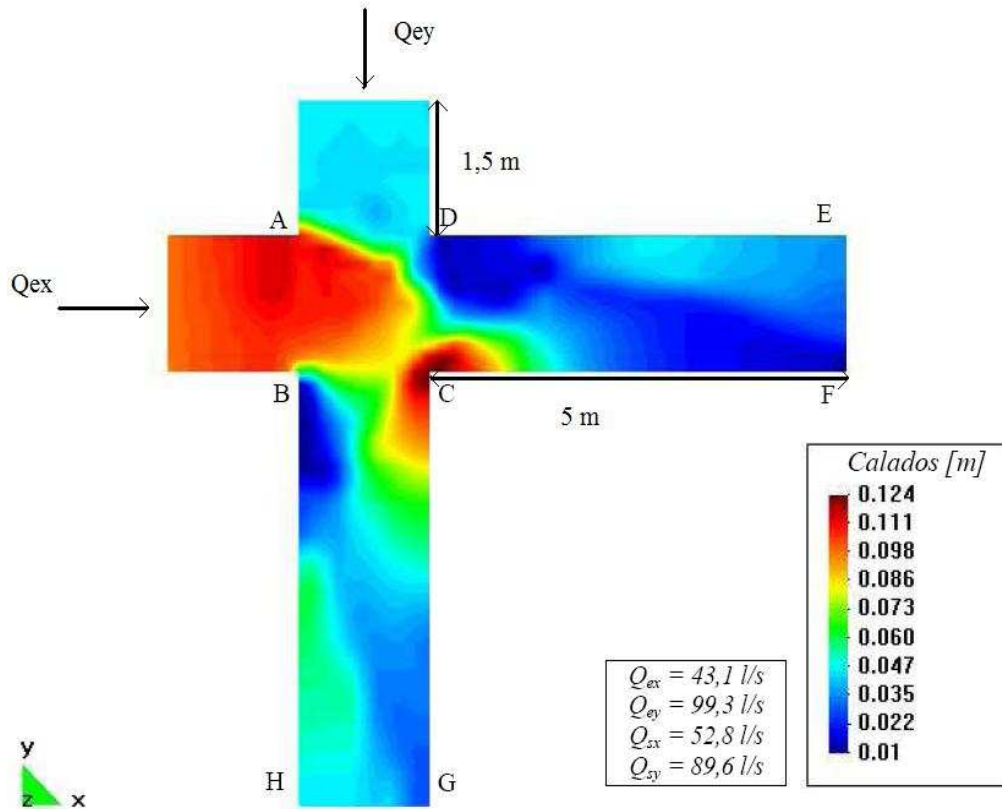


Figura 20: Calados de un cruce de calles a 90° sin bombeo para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%$ y $S_{ly}=2\%$ ($Q_{ex}=43,1 \text{ l/s}$ - $Q_{ey}=99,3 \text{ l/s}$). Valores obtenidos del dispositivo experimental construido en el Dept. de Hidráulica, Marítima y Ambiental de E.T.S.E.C.C.P.B. de la U.P.C.

Podemos comparar este mapa de calados obtenidos con el dispositivo experimental, con el mapa de calados obtenidos con GID y CARPA de la próxima figura. Como hemos explicado, en el modelo numérico el Q_{ex} tiene un sentido diferente (\leftarrow "x") al que tenemos en el modelo experimental. Aunque para poder comparar los calados de estas dos figura, se ha rotado la figura 21. En el caso numérico tendremos también una combinación de pendientes $S_{lx}=1\%$ y $S_{ly}=2\%$, y una relación de caudales de entrada: $Q_{ex}= 43,1 \text{ l/s}$ y $Q_{ey}= 99,3 \text{ l/s}$.

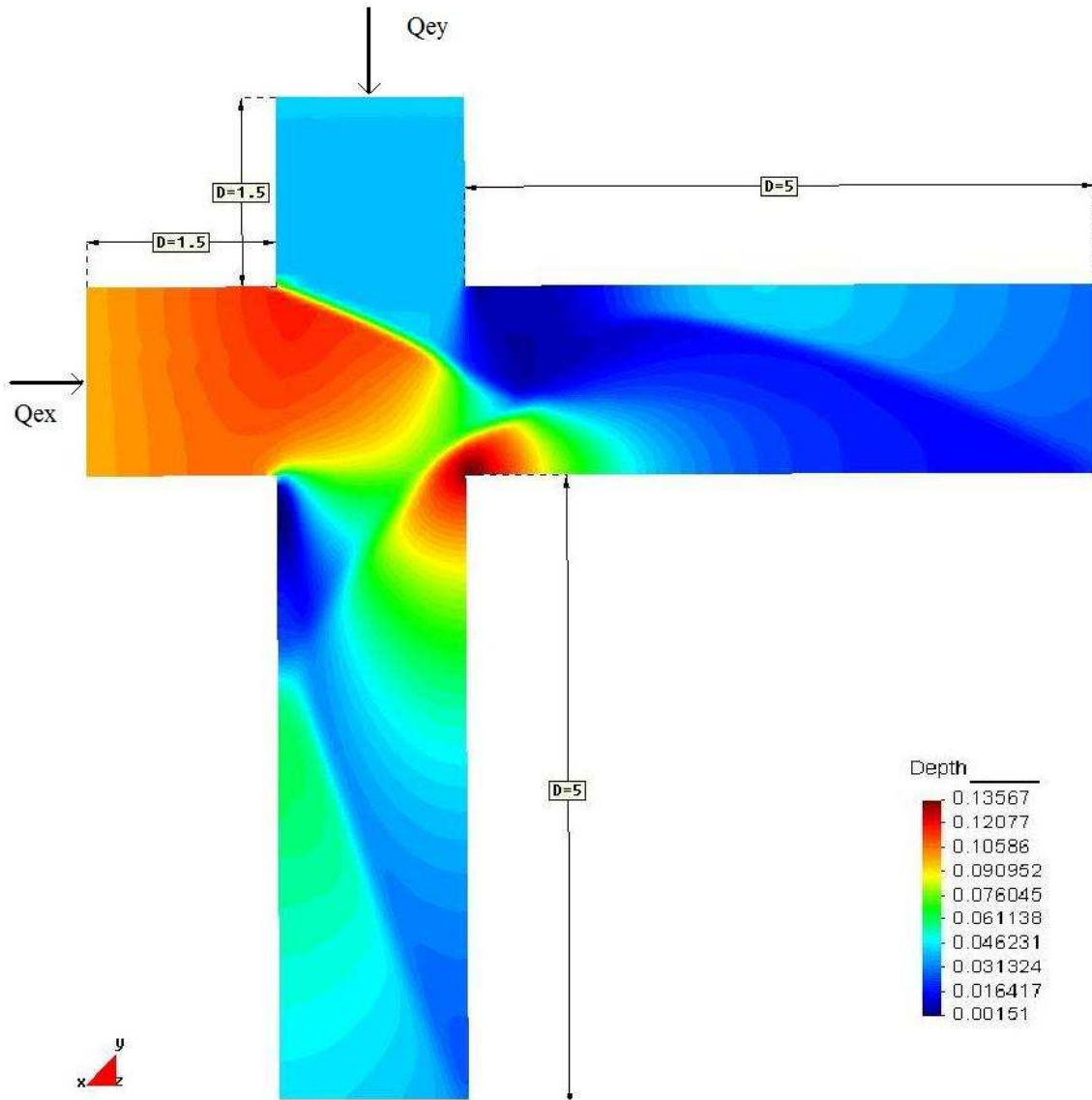


Figura 21: Calados (metros) de un cruce de calles a 90° sin bombeo para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%$ y $S_{ly}=2\%$ ($Q_{ex}=43,1$ l/s- $Q_{ey}=99,3$ l/s). Valores obtenidos con los programas GID y CARPA.

Podemos comprobar que los mapas de calados son muy parecidos.

6.2.4 Resultados para la combinación de pendientes $S_x=1\%$ y $S_y=4\%$

En la siguiente tabla podemos comprobar la relación entre los caudales introducidos aguas arriba del cruce, con los caudales de salida obtenidos aguas abajo del cruce, con el programa CARPA y con el dispositivo experimental.

Casos	Caudal (l/s) (Dispositivo experimental)				Caudal (l/s) (Resultados numéricos)			
	Entrada (Disp.Exp)		Salida (Disp.Exp)		Entrada (Num.)		Salida (Num.)	
	Qx (l/s)	Qy (l/s)	Qx (l/s)	Qy (l/s)	Qx (l/s)	Qy (l/s)	Qx (l/s)	Qy (l/s)
1	8.3	75.1	6.6	76.7	1	8.3	5.55	78.00
2	11.4	100.3	9	102.6	2	11.4	7.95	103.50
3	12.5	50	6.4	56.1	3	12.5	6.21	56.33
4	18.7	75.2	10.4	83.5	4	18.7	6.96	86.89
5	21.4	49.8	17	54.2	5	21.4	16.48	54.97
6	25	37.5	23.3	39.2	6	25	22.58	40.27
7	25	58.4	20	63.3	7	25	18.43	65.16
8	25.1	99.9	16.2	108.8	8	25.1	8.77	115.89
9	25.1	25	24.4	25.7	9	25.1	22.79	27.36
10	33.4	50.3	30.8	52.9	10	33.4	29.37	54.64
11	37.5	25	38.6	23.9	11	37.5	33.46	29.28
12	43.2	100.2	38.5	104.9	12	43.2	29.00	114.43
13	49.9	21.4	50.6	20.8	13	49.9	41.09	30.44
14	50	12.3	50.8	11.5	14	50	42.06	20.26
15	50	49.9	47.1	52.9	15	50	45.64	54.63
16	50.1	33.1	49.4	33.8	16	50.1	45.05	38.43
17	58.3	25	58.4	24.9	17	58.3	48.33	35.25
18	66.6	100.2	64.8	102	18	66.6	56.09	110.29
19	75.1	8.3	74.4	8.9	19	75.1	67.34	15.93
20	75.1	18.5	74	19.6	20	75.1	65.44	28.12
21	99.8	99.8	99.4	100.3	21	99.8	90.93	108.50
22	99.9	67.2	92.7	74.4	22	99.9	92.33	74.88
23	100	11.2	98.6	12.5	23	100	90.83	20.14
24	100.1	25	97.2	27.8	24	100.1	88.05	36.82
25	100.1	43.2	95	48.2	25	100.1	84.58	58.78

Tabla 8: Tabla con la relación de caudales de entrada y salida del dispositivo experimental (izquierda) y del programa CARPA (derecha), para una combinación de pendientes $S_x=1\%$ y $S_y=4\%$

Podemos comprobar como los resultados entre el dispositivo experimental y el numérico se asemejan, aunque no con la misma precisión que en los casos con pendientes en “y” inferiores al 4%. También se ha representado una relación de calados (cm) entre los cruces de entrada para el dispositivo experimental y el programa CARPA, como se presenta en la siguiente tabla.

Casos	Dispositivo experimental		Resultados Numéricos	
	calado en el cruce x	calado en el cruce y	calado en el cruce x	calado en el cruce y
1	4.4	3.5	5.46	2.8
2	5.6	4.5	6.58	3.39
3	4.3	2.5	5.54	2.16
4		3.5	7.23	2.8
5		2.5	6.75	2.15
6	1.7	2	6.57	1.83
7		2.9	7.47	2.38
8	7.6	4.4	8.66	3.38
9	1.7	1.5	5.69	2.22
10	2	2.6	8	2.17
11	2.2	1.5	6.29	4.66
12	9.2	4.5	10.7	3.4
13	2.6	1.3	4.8	6.63
14	2.8	0.9	3.24	5.95
15	2.7	2.5	9.2	3.44
16	2.7	1.8	7.56	5.86
17	3	1.5	4.96	7.46
18	10.7	4.5	12.65	3.39
19	3.6	0.7	4.06	6.17
20	3.7	1.2	4.06	7.81
21		4.4	14.17	5.5
22	4.8	3.3	11.89	9.87
23	4.8	0.9	4.92	7.52
24	4.8	1.5	4.92	9.49
25	4.8	2.3	6.36	10.9

Tabla 9: Tabla con la relación entre calados de los cruces para el dispositivo experimental y el programa CARPA, para una combinación de pendientes $S_x=1\%$ y $S_y=4\%$

Después de comparar los resultados experimentales con los resultados numéricos, podemos llegar a la conclusión que la diferencia entre unos y otros es insustancial. Aunque como hemos dicho anteriormente, no existe la misma precisión en los resultados para los calados, que en los casos con pendientes en “y” inferiores al 4%.

En el Anejo 3 se encuentran los resultados del calado a una distancia de $b/2$ y b del cruce. Estos resultados se pueden comparar con los valores experimentales, que se encuentran en el Capítulo 3. También podemos consultar en este Anejo 3 mapas con los siguientes parámetros: n° Froud (rangos 0-1) y caudales.

6.3 Coincidencias entre curvas patrón

6.3.1 Relaciones entre la potencia de los flujos de entrada y caudales de salida

A raíz de la tesis doctoral de Nania se concluyó, que a partir de la relación entre la proporción de potencia de los flujos de entrada, era posible determinar los repartos de caudal en la salida. La potencia del flujo en una sección, depende del caudal y de la energía del flujo en esa sección. Por lo tanto, podremos determinar la potencia del flujo en una calle como:

$$W = \gamma * Q * H$$

$$W_x = \gamma * Q_{ex} * \left(z + y + \frac{V^2}{2g} \right)$$

Donde “z” es la cota del punto en el cual se está calculando la potencia, con respecto a un plano de referencia, “y” es el calado medio en la sección y “V” es la velocidad media en la sección. Todas las potencias se calculan en el cruce de entrada de la calle. En la siguiente figura de la tesis doctoral de Nania, se presenta para los resultados experimentales (dispositivo experimental) la relación existente, entre la proporción de potencias en la dirección “x” y la proporción de caudales de salida en la misma dirección, para las tres combinaciones de pendientes ($S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$, $S_{lx}=1\%-S_{ly}=2\%$ y $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$). Podemos comprobar como el flujo se comporta según tres patrones diferentes, como explicamos en el capítulo 3 (pag.16).

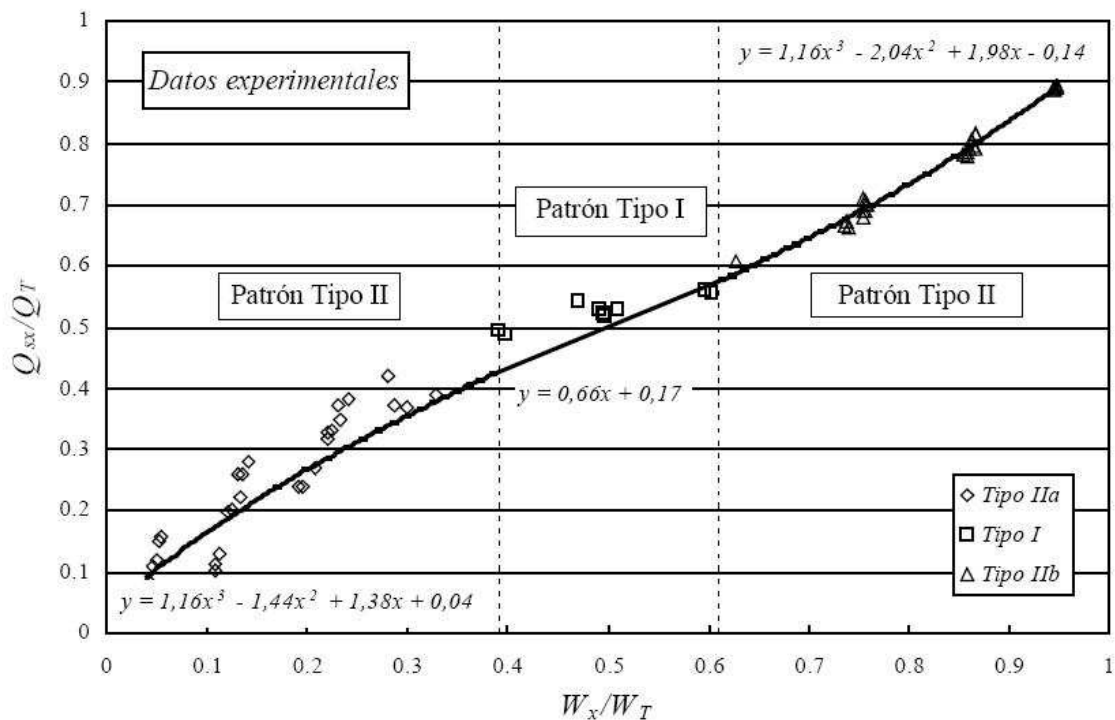


Figura 22: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “x” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Resultados experimentales, para las combinaciones de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$, $S_{lx}=1\%-S_{ly}=2\%$ y $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$ (Nania et. al.1999)

Como podemos en la gráfica, se concluyó en la tesis doctoral de Nania que un polinomio de tercer grado se ajustaba muy bien a los datos correspondientes al patrón de flujo tipo 2. Uniendo ambas curvas con una recta, se obtuvo la función de ajuste para los datos pertenecientes al patrón de flujo tipo 1.

La tabla de la siguiente figura, presenta las funciones de ajuste para cada patrón de flujo, que se han presentado en la anterior figura.

Zona	Patrón de flujo	Rango de validez $x = W_x/W_T$	Función de ajuste	Coef. de correlación R^2
1	Tipo II	0,04-0,39	$\frac{Q_{sx}}{Q_T} = 1,16x^3 - 1,44x^2 + 1,38x + 0,04$	0,87
2	Tipo I	0,39-0,61	$\frac{Q_{sx}}{Q_T} = 0,664x + 0,168$	0,83
3	Tipo II	0,61-0,96	$\frac{Q_{sx}}{Q_T} = 1,16x^3 - 2,04x^2 + 1,98x - 0,14$	0,99

Tabla 10: Tabla de la relación entre la proporción de potencia y la proporción de caudales de salida en una dirección, zonas de la curva, patrones de flujo en cada zona y la función que mejor ajusta a los datos experimentales en cada zona con el coeficiente de correlación correspondiente. Resultados experimentales. (Nania et. al.1999)

Se puede hacer una comparación entre la figura 22 y la gráfica obtenida con los resultados numéricos (figura 23). Como podemos ver en la gráfica obtenida con resultados numéricos, para cada patrón de flujo tenemos unas funciones que se ajustan con polinomios. Se comprueba que cada función de cada patrón, esta elevada al mismo exponente en los resultados experimentales como en los numéricos. Es decir, tenemos valores muy parecidos en los tres patrones de flujo en ambos casos.

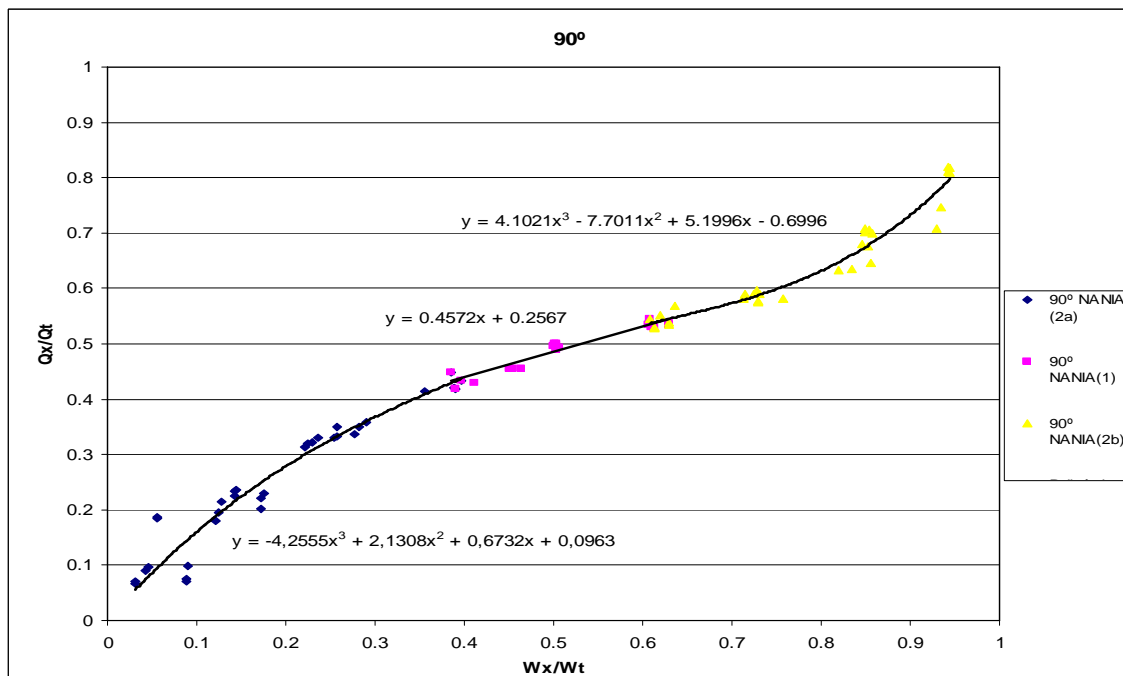


Figura 23: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección "x" y la proporción de caudal de salida en la misma dirección. Resultados numéricos, para las combinaciones de pendientes Slx=1%-Sly=1%, Slx=1%-Sly=2% y Slx=1%-Sly=4%

La tabla de la siguiente figura, presenta las funciones de ajuste para cada patrón de flujo, que se han presentado en la anterior figura.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo $x= Wx/Wt$	Función de ajuste	Coef. De correlación R2
1	Tipo 2a	0,04-0,42	$Q_{sx}/Q_t = -4,2555x^3 + 2,1308x^2 + 0,6732x + 0,0963$	0,9188
2	Tipo 1	0,42-0,66	$Q_{sx}/Q_t = 0,4572x + 0,2567$	0,9283
3	Tipo 2b	0,66-0,96	$Q_{sx}/Q_t = 4,1021x^3 - 7,7011x^2 + 5,1996x - 0,6996$	0,944

Tabla 11: Tabla de la relación entre la proporción de potencia y la proporción de caudales de salida en una dirección, zonas de la curva, patrones de flujo en cada zona y la función que mejor ajusta a los datos experimentales en cada zona con el coeficiente de correlación correspondiente. Resultados numéricos

Se puede concluir que conociendo la potencia de flujos de entrada, es posible determinar el reparto de caudales. Otra manera de caracterizar el flujo, según Nania, era demostrar la relación existente entre el ángulo de inclinación del resalto, y la proporción de potencias del flujo de entrada. Como podemos ver en la figura 23, existen puntos con potencias bajas en la calle “x” que presentan una desviación respecto al resto de valores, aunque esta desviación no es importante, ya que el coef. de correlación es muy alto. Estos valores tienen todos en común su combinación de pendientes: $S_x=1\%$ y $S_y=4\%$. Se puede comprobar en el Anejo 1, la relación de potencia del flujo de entrada en “x”, y la proporción de caudal de salida en “x”, para una pendiente longitudinal del 1% en ambas direcciones. En el Anejo 2 se puede comprobar esta relación para una pendiente longitudinal en “x” del 1% y una pendiente longitudinal en “y” del 2%. Por último, en el Anejo 4 se pueden comprobar esta relación para una pendiente longitudinal en “x” del 1% y una pendiente longitudinal en “y” del 4%.

6.3.2 Relaciones entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la potencia de los flujos de entrada.

En la siguiente figura se explica como se toman los ángulos de inclinación del resalto en los resultados numéricos.

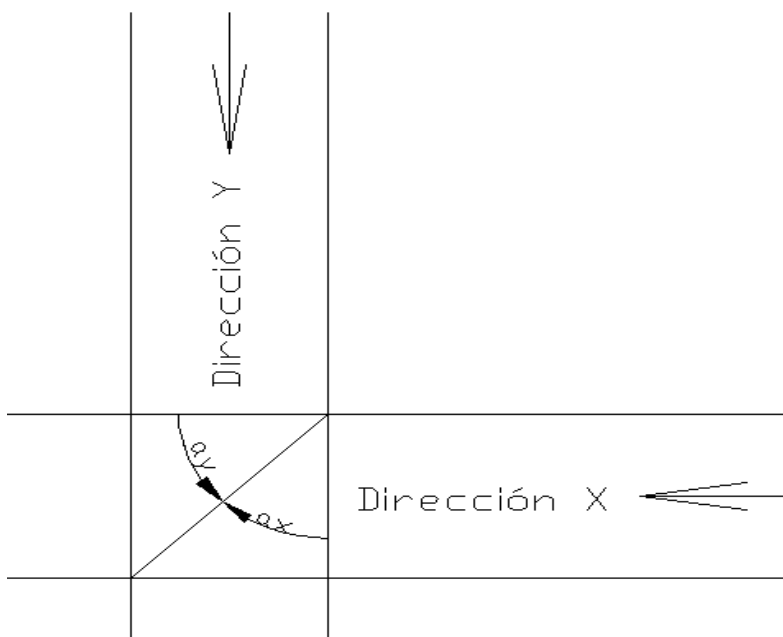


Figura 24: Representación de como se han considerado los ángulos de los resaltos en un cruce de calles

Existe una relación lineal, entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “x”. En la siguiente figura se presenta esta relación para los resultados experimentales. También existe un patrón de flujo diferente según la potencia del flujo.

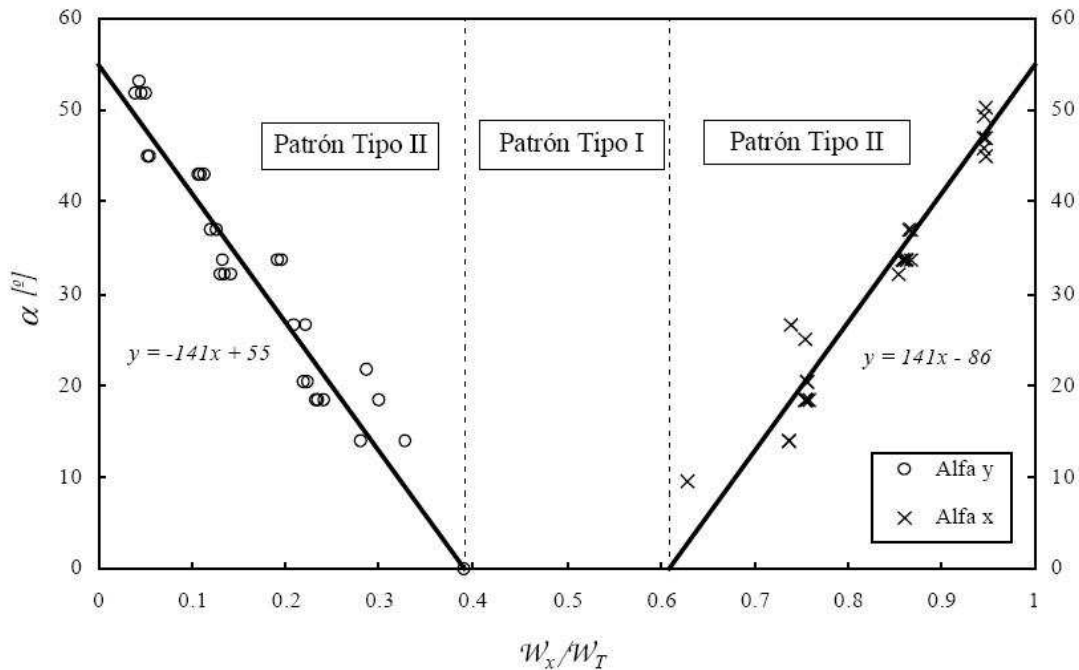


Figura 25: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “x”. Valores experimentales, para las combinaciones de pendientes Slx=1%-Sly=1%, Slx=1%-Sly=2% y Slx=1%-Sly=4%.(Nania et. al.1999)

Podemos comprobar que para relaciones de potencias en “x” pequeñas, el resalto en el cruce es provocado por la calle “y”, con ángulos menores cuanto más grande es esa potencia. A partir de relaciones de potencia en “x” de 0,4, el resalto no se formará en el cruce sino en las calles. A partir de relaciones importantes de potencia en “x”, alrededor de 0,6, el resalto se volverá a formará en el cruce pero provocado por la calle “x”.

La tabla de la siguiente figura presenta las funciones de ajuste para cada patrón de flujo, que se han presentado en la anterior figura.

Zona	Patrón de flujo	Rango de validez $x = W_x'/W_T'$	Función de ajuste	Coef. de correlación R^2
1	Tipo II	0,04-0,39	$\alpha_y = -141x + 55$	0,97
2	Tipo I	0,39-0,61	No se forma resalto en el cruce	---
3	Tipo II	0,61-0,96	$\alpha_x = 141x - 86$	0,96

Tabla 12: Tabla con la relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “x”, patrones del flujo encada zona y la función que mejor ajusta los datos experimentales en cada zona con el coeficiente de correlación correspondiente. Valores experimentales. (Nania et. al.1999)

Existe una relación lineal, entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “x”, en la siguiente figura se presenta esta relación para los resultados numéricos. Se comprueba que a diferencia del caso anterior, la relación lineal no conserva la misma pendiente en los dos patrones de flujo, esto puede ser por la dificultad de valorar el ángulo del resalto en el programa, como por un desviación en los resultados comentada anteriormente.

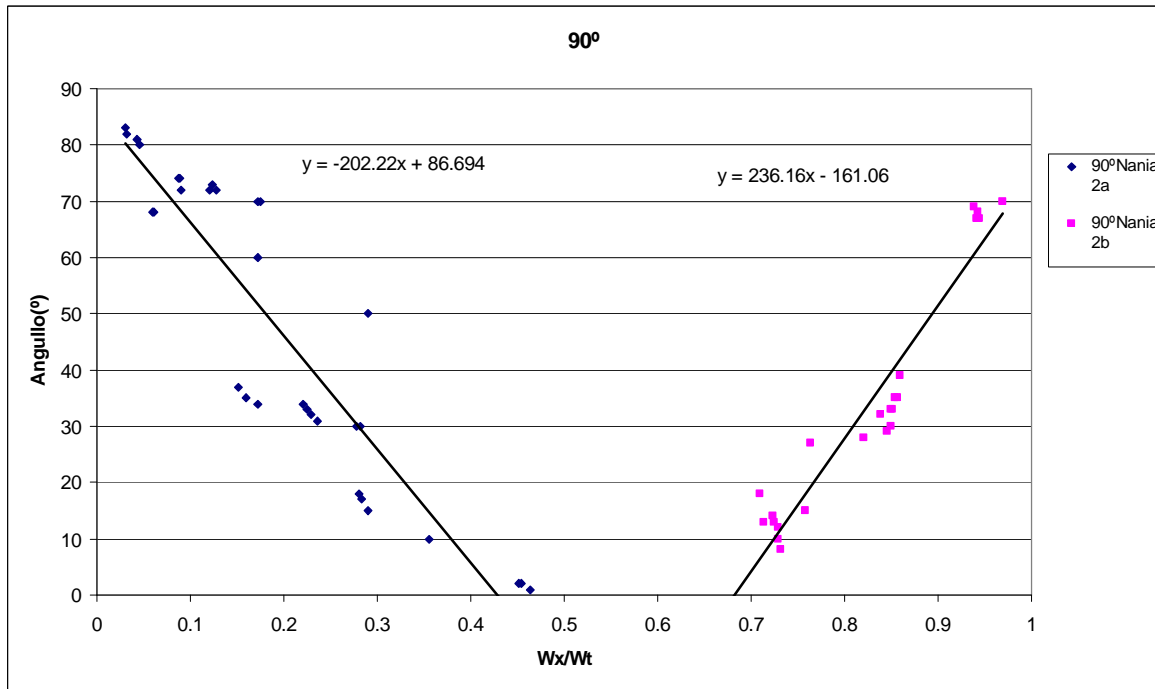


Figura 26: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “x”. Valores numéricos, para las combinaciones de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$, $S_{lx}=1\%-S_{ly}=2\%$ y $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$

La tabla de la siguiente figura, presenta las funciones de ajuste para cada patrón de flujo, que se han presentado en la anterior figura.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo $x= Wx/Wt$	Función de ajuste	Coef. De correlación R2
1	Tipo 2a	0,04-0,42	$\alpha y = -202.22x + 86.694$	0.8374
2	Tipo 1	0,42-0,66	No hay resalto	
3	Tipo 2b	0,66-0,96	$\alpha x = 236.16x - 161.06$	0.9182

Tabla 13: Tabla con la relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “x”, patrones del flujo encada zona y la función que mejor ajusta los datos experimentales en cada zona con el coeficiente de correlación correspondiente. Valores numéricos

Estas zonas representadas por diferentes patrones de flujo, se pueden interpretar fácilmente. Cuando la proporción de potencia en la dirección “x” está entre 0,39-0,61 (resultados experimentales) o entre 0,42-0,66 (resultados numéricos), tenemos un patrón del flujo tipo 1, por lo tanto no existe resalto en el cruce. Cuando la proporción de potencia es mayor a 0,61 (resultados experimentales) o mayor a 0,66 (resultados numéricos), el resalto dentro del cruce se produce en la dirección “x”, puesto que el flujo en esa dirección tiene mayor potencia que en la dirección “y”. En cuanto tenemos más potencia en la dirección “x” el ángulo α_x se va haciendo mayor. Existen una serie de puntos con potencias en “x” bajas, que tienen una mayor desviación que otros. Estos valores ,como ocurre en la figura 23, tienen una combinación de pendientes $S_x=1\%$ y $S_y=4\%$. Esta desviación es tan importante, que podemos decir, que esos puntos no pertenecen a la misma familia de valores que los demás. Ya que en la figura 26, las líneas de tendencia deberían tener la misma pendiente por la simetría del problema .

Se puede comprobar en el Anejo 1, la relación entre el ángulo de inclinación del resalto y la proporción de potencia en la dirección “x”, para una pendiente longitudinal del 1% en ambas direcciones. En el Anejo 2 se puede comprobar esta relación para una pendiente longitudinal en “x” del 1% y pendiente longitudinal en “y” del 2%. Por último, en el Anejo 4 se puede comprobar esta relación para una pendiente longitudinal en “x” del 1% y pendiente longitudinal en “y” del 4%.

Por este motivo, en la siguiente figura podemos ver: la relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “x”, y la proporción de caudal de salida en la misma dirección, para los valores de las combinaciones de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$ y $S_{lx}=1\%-S_{ly}=2\%$. De esta manera se comprobará la excelente correlación entre los diferentes valores.

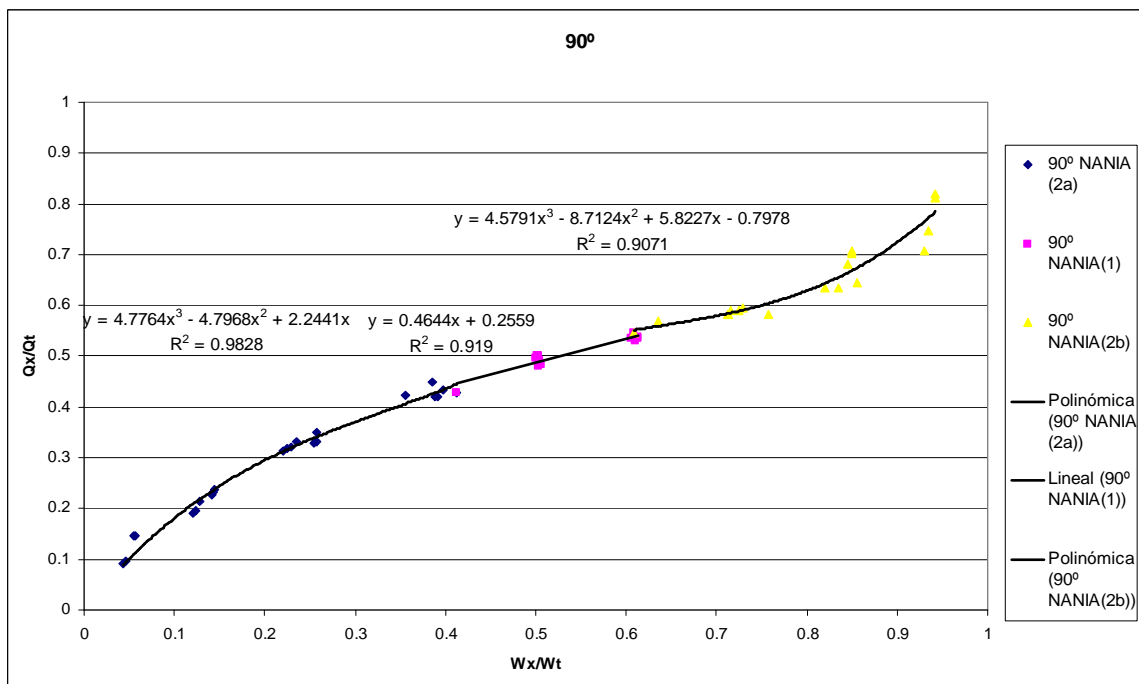


Figura 27: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “x” y la proporción de caudal de salida en la misma dirección. Resultados numéricos, para las combinaciones de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$ y $S_{lx}=1\%-S_{ly}=2\%$

Podemos comprobar en la siguiente tabla, una mayor correlación entre los resultados, y una mayor similitud entre las curvas patrón del flujo tipo 2.

La tabla de la siguiente figura, presenta las funciones de ajuste para cada patrón de flujo, que se han presentado en la anterior figura.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo x= Wx/Wt	Función de ajuste	Coef. De correlación R2
1	Tipo 2a	0,04-0,4	$Q_{sx}/Q_t = 4.7764x^3 - 4.7968x^2 + 2.2441x$	0.9828
2	Tipo 1	0,4-0,62	$Q_{sx}/Q_t = 0.4644x + 0.2559$	0.919
3	Tipo 2b	0,62-0,96	$Q_{sx}/Q_t = 4.5791x^3 - 8.7124x^2 + 5.8227x - 0.7978$	0.9071

Tabla 14: Tabla de la relación entre la proporción de potencia y la proporción de caudales de salida en una dirección, zonas de la curva, patrones de flujo en cada zona y la función que mejor ajusta a los datos experimentales en cada zona con el coeficiente de correlación correspondiente. Resultados numéricos

También podemos comprobar esta mayor correlación en la gráfica que relaciona el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “x”, como podemos en la siguiente figura.

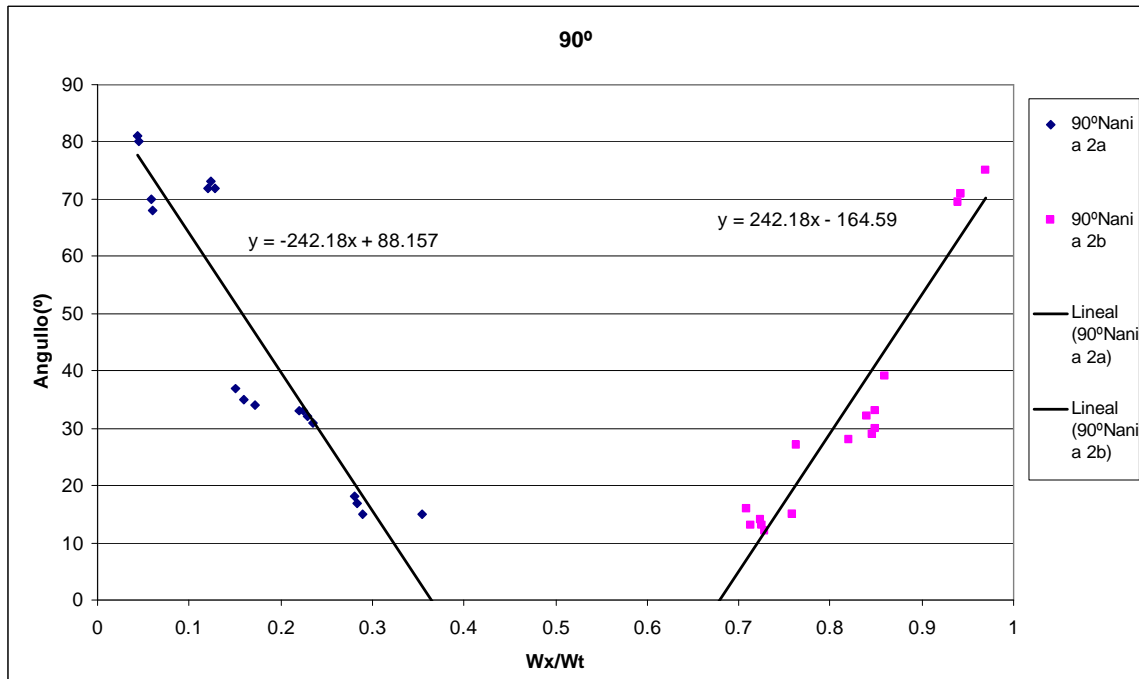


Figura 28: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “x”. Valores numéricos, para las combinaciones de pendientes $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$ y $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=2\%$

Una vez no consideramos los valores para una combinación de pendientes $S_x=1\%$ y $S_y=4\%$, tenemos pendientes muy parecidas en las líneas de tendencia para los dos patrones de flujo tipo 2. La tabla de la siguiente figura, presenta las funciones de ajuste para cada patrón de flujo, que se han presentado en la anterior figura.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo $x=$ W_x/W_t	Función de ajuste	Coef. De correlación R^2
1	Tipo 2a	0,04-0,37	$\alpha y = -242.18x + 88.157$	0.8579
2	Tipo 1	0,37-0,68	No hay resalto	
3	Tipo 2b	0,68-0,96	$\alpha x = 242.18x - 164.59$	0.9069

Tabla 15: Tabla con la relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “x”, patrones del flujo encada zona y la función que mejor ajusta los datos experimentales en cada zona con el coeficiente de correlación correspondiente. Valores numéricos

CAPÍTULO 7

CAUDALES DE REPARTO Y PATRONES DE FLUJO PARA DIFERENTES CRUCES DE CALLE

7.1 Introducción

Una vez verificado el funcionamiento favorable de CARPA y GID. Podremos utilizar estos modelos para obtener el reparto de caudales de salida y los ángulos del resalto en el cruce, en función de la proporción de potencias de entrada para cualquier ángulo del cruce de calles. En una primera instancia, se ha expresado el comportamiento del flujo en función de su pendiente longitudinal y el ángulo que forma el cruce, aunque en última instancia se expresado exclusivamente, en función del ángulo que forma el cruce. Se han utilizado, como condiciones de contorno, los caudales y calados de entrada obtenidos en la tesis doctoral de Nania. Estos valores de caudales y calados fueron estudiados para poder establecer un tipo de régimen rápido, y de esta manera conocer los diferentes patrones de flujo para los diferentes cruces de calle. Con la finalidad de obtener las líneas de tendencia para cada patrón de flujo, y como hemos explicado, obtener el reparto de caudales de salida y los ángulos de resalto en el cruce.

7.2 Patrones de flujos para los diferentes ángulos de cruce de calles

7.2.1 Cruce de calles a 90° con bombeo.

- Patrones de flujos para las combinaciones de pendientes: $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=1\%$, $S_{Ix}=1\%$ $S_{Iy}=2\%$ y $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=4\%$

En este apartado se han intentado caracterizar los patrones de flujo para un ángulo del cruce de 90° con bombeo, trabajando con los valores obtenidos para las combinaciones pendientes: $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=1\%$, $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=2\%$ y $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=4\%$.

A partir de las relaciones de caudales (79 casos, entre las tres combinaciones de pendientes) se han obtenido suficientes resultados para caracterizar los patrones de flujo de un cruce de calle con un ángulo de 90° con bombeo.

La siguiente figura presenta la relación de potencia del flujo de entrada en “y”, y la proporción de caudal de salida en “y”, así como, las líneas de tendencia para cada patrón de flujo. De esta manera intentaremos determinar el reparto de caudales de salida, a partir de la proporción de potencias de entrada y del ángulo que forma el cruce, independientemente de la combinación de pendientes que tengan las calles.

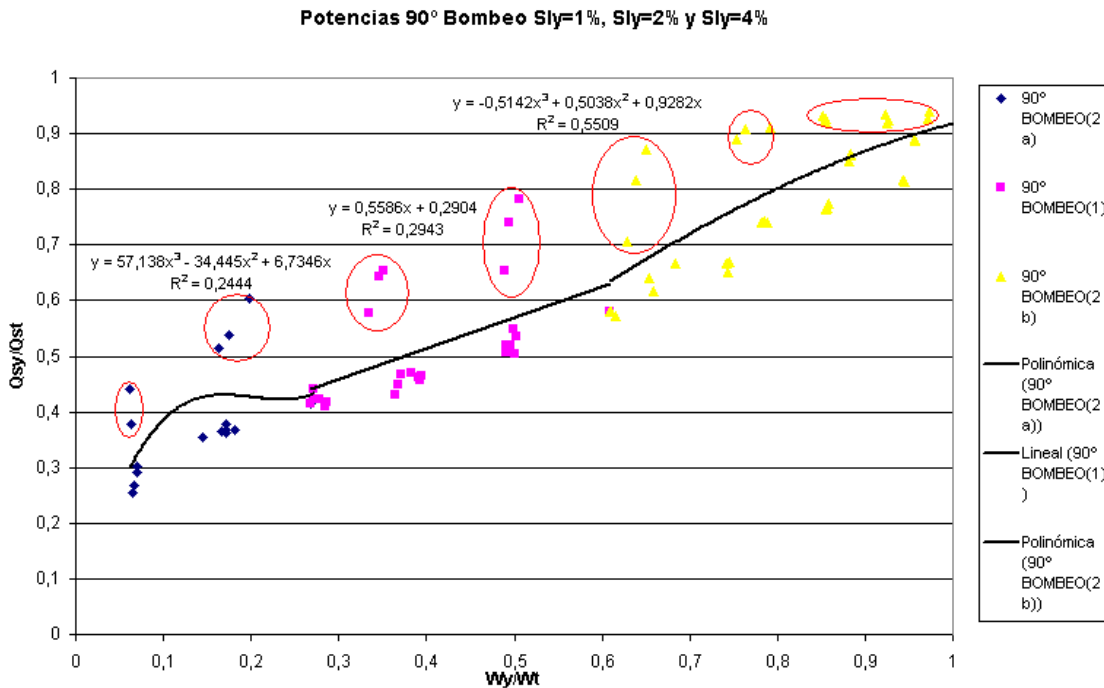


Figura 29: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “y” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Cruce de calles a 90° con bombeo (Slx=1%-Sly=1%, Slx=1%-Sly=2% y Slx=1%-Sly=4%)

En la figura 29 vemos representadas las líneas de tendencia para cada patrón de flujo. Los valores del patrón de flujo tipo 2a (color azul) ajustan con un polinomio de 3º grado, así como, los valores del patrón de flujo tipo 2b (color amarillo), en cambio los valores para el patrón de flujo tipo 1 (color magenta) ajustan con un polinomio de 1º grado. Se comprueba en la siguiente figura unos coef. de correlación bajísimos, es decir, tenemos unas curvas patrón que no representan el comportamiento del flujo. Los valores introducidos que pertenecen a la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$, no “parecen” que guarden relación con los valores de las otras dos combinaciones de pendientes. Podemos ver redondeados en color rojo, todos los valores para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$.

En la siguiente tabla tenemos un resumen de la figura anterior.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo		
		x= Wy/Wt	Función de ajuste	Coef. De correlación R2
1	Tipo 2b	0,04-0,22	$Q_{sx}/Q_t = 57,138x^3 - 34,445x^2 + 6,7346x$	0.2444
2	Tipo 1	0,22-0,61	$Q_{sx}/Q_t = 0,5586x + 0,2904$	0.2943
3	Tipo 2a	0,61-0,97	$Q_{sx}/Q_t = -0,5142x^3 + 0,5038x^2 + 0,9282x$	0.5509

Tabla 16: Tabla resumen de la figura anterior. Cruce a 90° con bombeo (Slx=1%-Sly=1%, Slx=1%-Sly=2% y Slx=1%-Sly=4%)

La siguiente figura presenta la relación entre el ángulo de inclinación del resalto, y la proporción de potencia en la dirección “y”.

Angulos 90° Bombeo Sly=1%, Sly=2% y Sly=4%

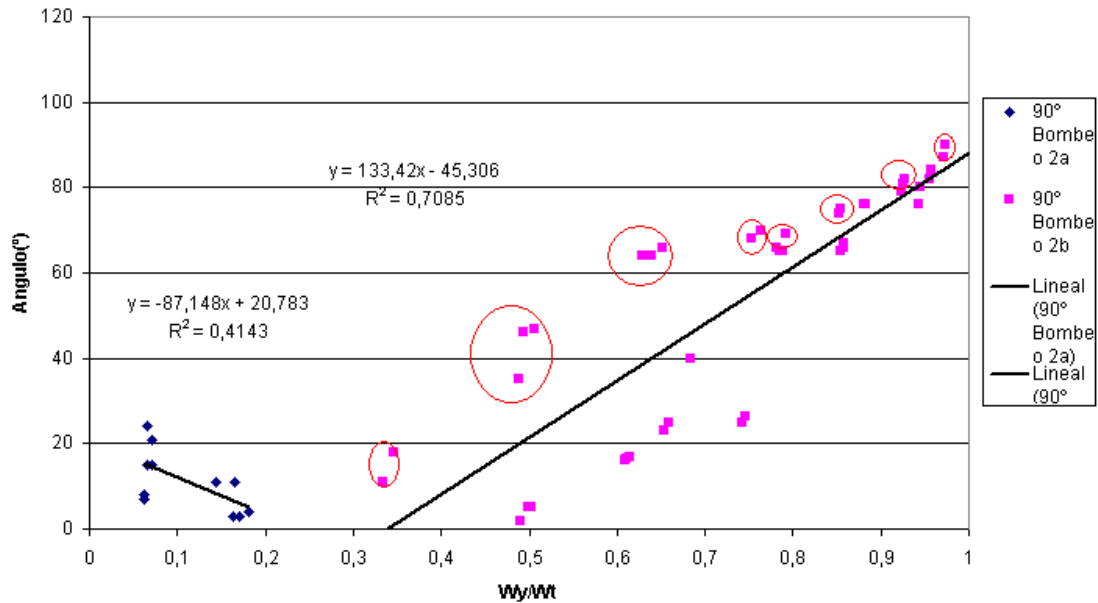


Figura 30: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección "y". Cruce de calles a 90° con bombeo (S_{lx}=1%-S_{ly}=1%, S_{lx}=1%-S_{ly}=2% y S_{lx}=1%-S_{ly}=4%)

Los valores de la figura 30 presentan una dispersión del coef. de correlación importante; como en la gráfica de la figura 29 existen valores con una desviación respecto a los demás considerable, son los valores que corresponden a combinaciones de pendientes S_{lx}=1%-S_{ly}=4% (podemos ver estos valores redondeados en la figura 30).

Como podemos ver en la figura 30 tenemos valores muy pequeños de α_x , aunque tengamos Wy/Wt muy bajas, en cambio tenemos α_y bastante altos para valores con Wy/Wt medios. Este comportamiento se debe a la geometría del cruce, donde la calle principal "y" conserva su pendiente y su bombeo en el cruce, y es la secundaria "x" la que debe acomodarse a esta en el cruce, como hemos explicado en el capítulo 3, este hecho penaliza a nivel energético la calle secundaria. Este comportamiento nos pretende demostrar el importante peso de la geometría en un cruce de calles, por este motivo tenemos en la figura 30 unas líneas de tendencia no simétricas, todo lo contrario que en un cruce de calles a 90° sin bombeo (figura 25).

Aunque es difícil asignar un ángulo a un resalto en determinadas condiciones, sobretodo para valores cercanos a los umbrales de cambio de patrón de flujo. El ángulo del resalto que se mide, se produce en el cruce y éste es una geometría complicada, normalmente la cresta del resalto no es una línea, sino en muchos casos una curva. Esto último, unido a una dispersión importante de los resultados por los motivos comentados, hace en muchos casos muy complicado determinar un ángulo.

Una forma para comprobar que la dispersión de los resultados, esta originada por los valores de la combinación de pendientes S_{lx}=1%-S_{ly}=4%, es comprobar individualmente cada combinación de pendientes. Se demuestra que podemos obtener valores de reparto de caudal de salida y ángulo del resalto en el cruce, a partir de la proporción de potencias de entrada y el ángulo del cruce.

- Patrones de flujos para la combinación de pendientes: $S_{lx}=1\%$ y $S_{ly}=1\%$

A partir de las relaciones de caudales (26 casos) se han obtenido suficientes resultados para caracterizar los patrones de flujo de un cruce con un ángulo de 90° con bombeo. La siguiente figura presenta la relación de potencia del flujo de entrada en “y”, y la proporción de caudal de salida en “y”, así como, las líneas de tendencia para cada patrón de flujo.

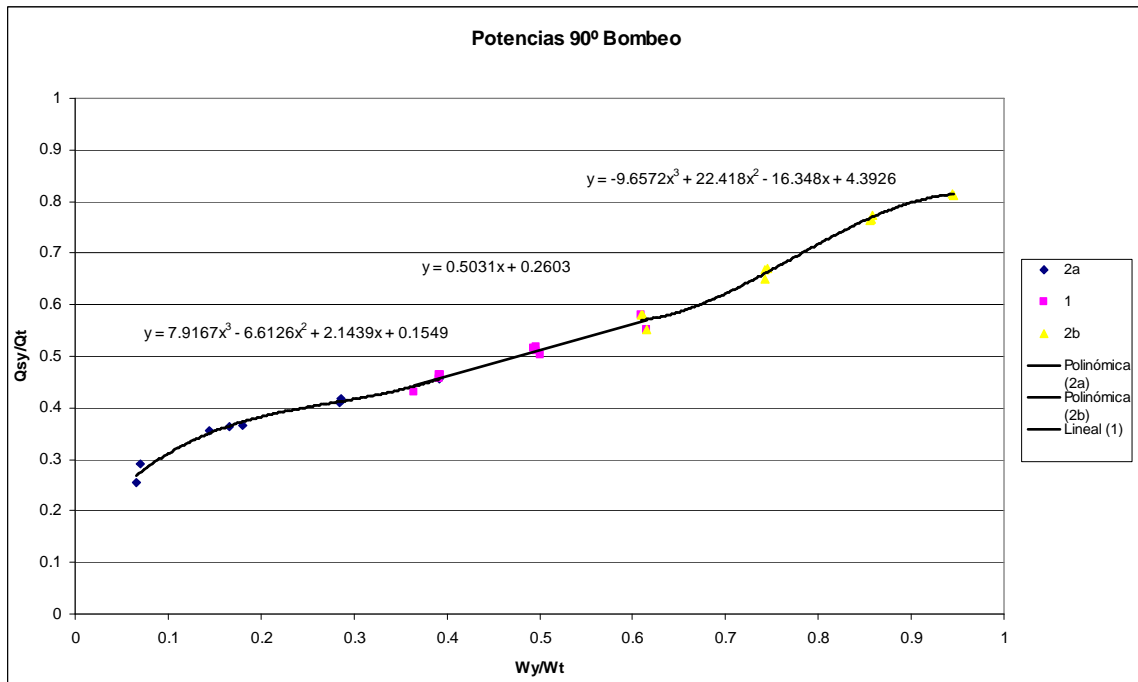


Figura 31: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “y” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Cruce de calles a 90° con bombeo ($S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$)

En la figura 31 vemos representadas las líneas de tendencia para cada patrón de flujo. Los valores del patrón de flujo tipo 2a (color azul) ajustan con un polinomio de 3º grado, así como, los valores del patrón de flujo tipo 2b (color amarillo), en cambio los valores para el patrón de flujo tipo 1 (color magenta) ajustan con un polinomio de 1º grado. Tenemos unos coef. de correlación muy altos, podemos decir que estas curvas representan claramente unos patrones del flujo. En la siguiente tabla tenemos un resumen de la figura anterior.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo $x= W_y/W_t$	Función de ajuste	Coef. De correlación
1	Tipo 2b	0,06-0,3	$Q_{sy}/Q_t=7.9167x^3 - 6.6126x^2 + 2.1439x + 0.1549$	0.9819
2	Tipo 1	0,3-0,59	$Q_{sy}/Q_t=0.5031x + 0.2603$	0.947
3	Tipo 2a	0,59-0,82	$Q_{sy}/Q_t=-9.6572x^3 + 22.418x^2 - 16.348x + 4.3926$	0.9907

Tabla 17: Tabla resumen de la figura anterior. Cruce a 90° con bombeo ($S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$)

La siguiente figura presenta la relación entre el ángulo de inclinación del resalto, y la proporción de potencia en la dirección “y”.

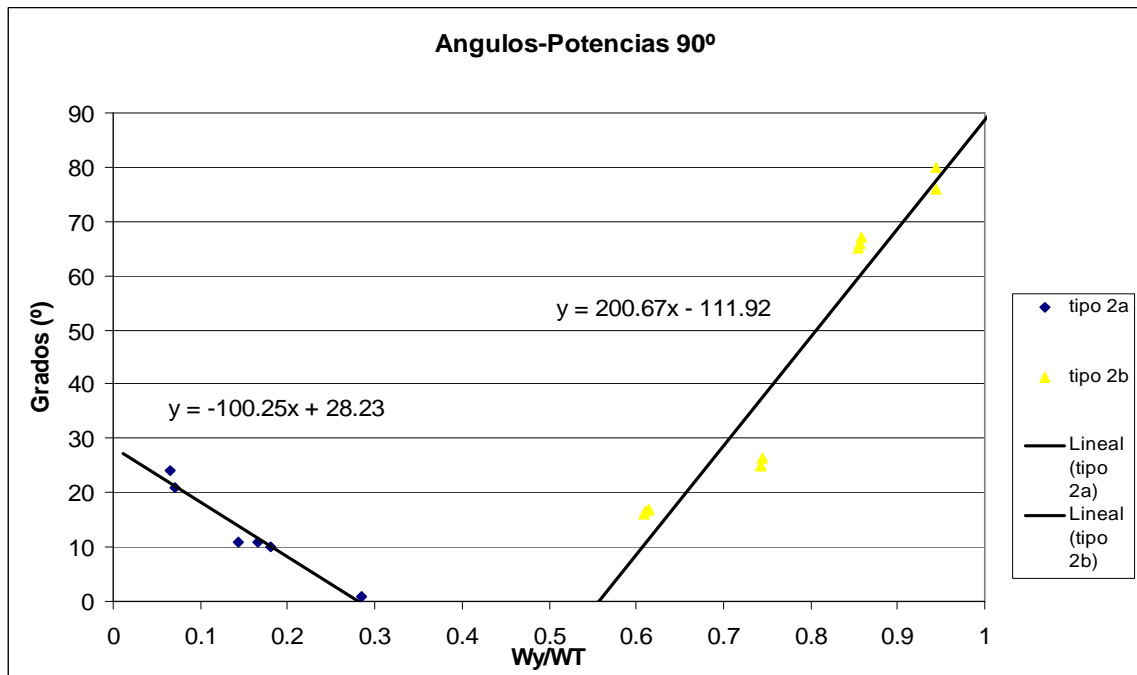


Figura 32: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “y”. Cruce de calles a 90° con bombeo ($S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$)

Como ya se ha explicado, para casos cercanos a los umbrales de un cambio de patrón del flujo, es muy complicado establecer un ángulo de resalto. Podemos comprobar las imágenes de los resaltos en el Anejo 1, para esta combinación de pendientes.

En la figura 32 podemos observar la existencia de una relación lineal en la recta de tendencia, como en la figura 27 para un cruce de calles a 90° sin bombeo. Aunque en este caso en la calle principal (“y”), con valores pequeños de potencia tenemos que el ángulo α_x solo puede llegar a valores de 26°. Este efecto es producido como se ha explicado anteriormente, porque la calle principal “y” conserva su pendiente y su bombeo, y es la secundaria “x” la que debe en el cruce acomodarse a esta.

En el Anejo 1 podemos observar las tablas con: las relaciones de caudales de entrada y salida, la relación de potencia del flujo de entrada en “y” y la proporción de caudal de salida en “y”, y la relación entre el ángulo de inclinación del resalto y la proporción de potencia en la dirección “y”.

- Patrones de flujos para la combinación de pendientes: $S_{lx}=1\%$ y $S_{ly}=2\%$

A partir de las relaciones de caudales (28 casos) se han obtenido suficientes resultados para caracterizar los patrones de flujo de un cruce con un ángulo de 90° con bombeo. La siguiente figura presenta la relación de potencia del flujo de entrada en “y”, y la proporción de caudal de salida en “y”, así como, las líneas de tendencia para cada patrón de flujo.

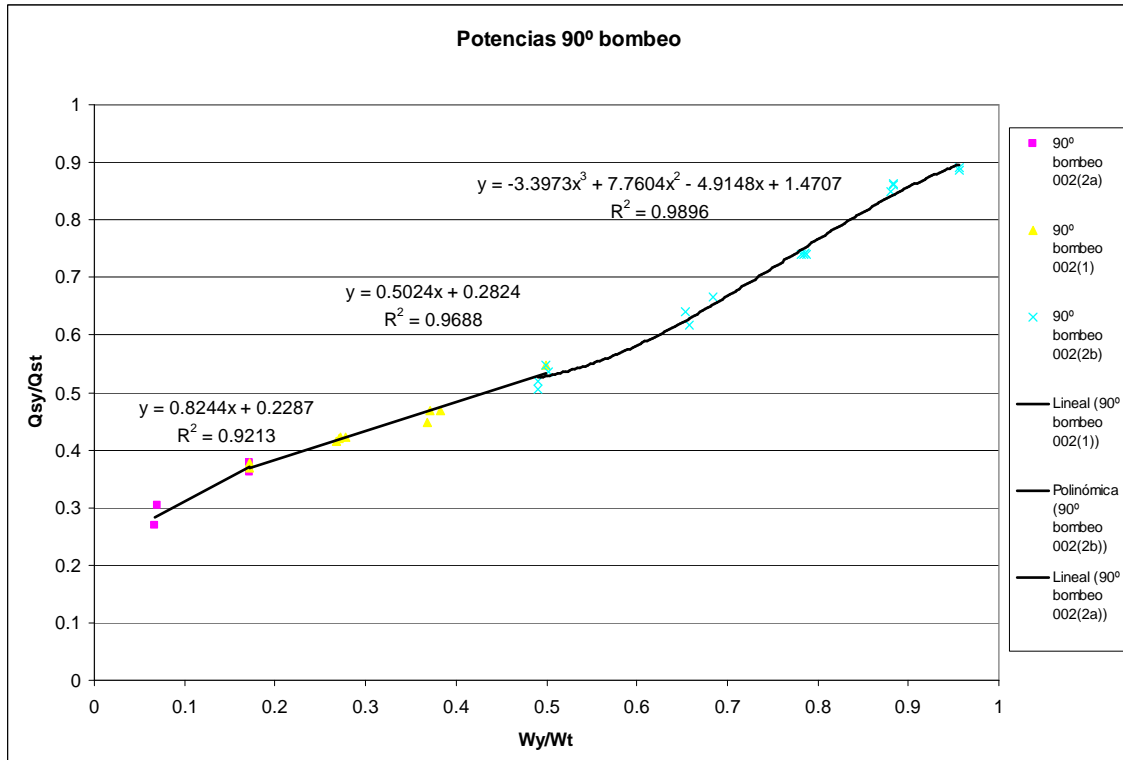


Figura 33: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “y” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Cruce de calles a 90° con bombeo (Slx=1%-Sly=2%)

En la figura 33 vemos representadas las líneas de tendencia para cada patrón de flujo. Los valores del patrón de flujo tipo 2a (color azul) ajustan con un polinomio de 1° grado, así como, los valores del patrón de flujo tipo 1 (color amarillo), en cambio los valores para el patrón de flujo tipo 2b (color azul) ajustan con un polinomio de 3° grado. Que ajusten los valores del patrón tipo 2a a con un polinomio de 1° grado, no es especificativo de nada, ya que solo existen 3 puntos para representar ese patrón.

En la siguiente tabla tenemos un resumen de la figura anterior.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo x= Wy/Wt	Función de ajuste	Coef. De correlación R2
1	Tipo 2b	0,04-0,173	$Q_{sy}/Q_t = 0.8244x + 0.2287$	0.9213
2	Tipo 1	0,173-0,499	$Q_{sy}/Q_t = 0.5024x + 0.2824$	0.9688
3	Tipo 2a	0,499-0,95	$Q_{sy}/Q_t = -3.3973x^3 + 7.7604x^2 - 4.9148x + 1.4707$	0.9896

Tabla 18: Tabla resumen de la figura anterior. Cruce a 90° con bombeo (Slx=1%-Sly=2%)

La siguiente figura presenta la relación entre el ángulo de inclinación del resalto, y la proporción de potencia en la dirección “y”.

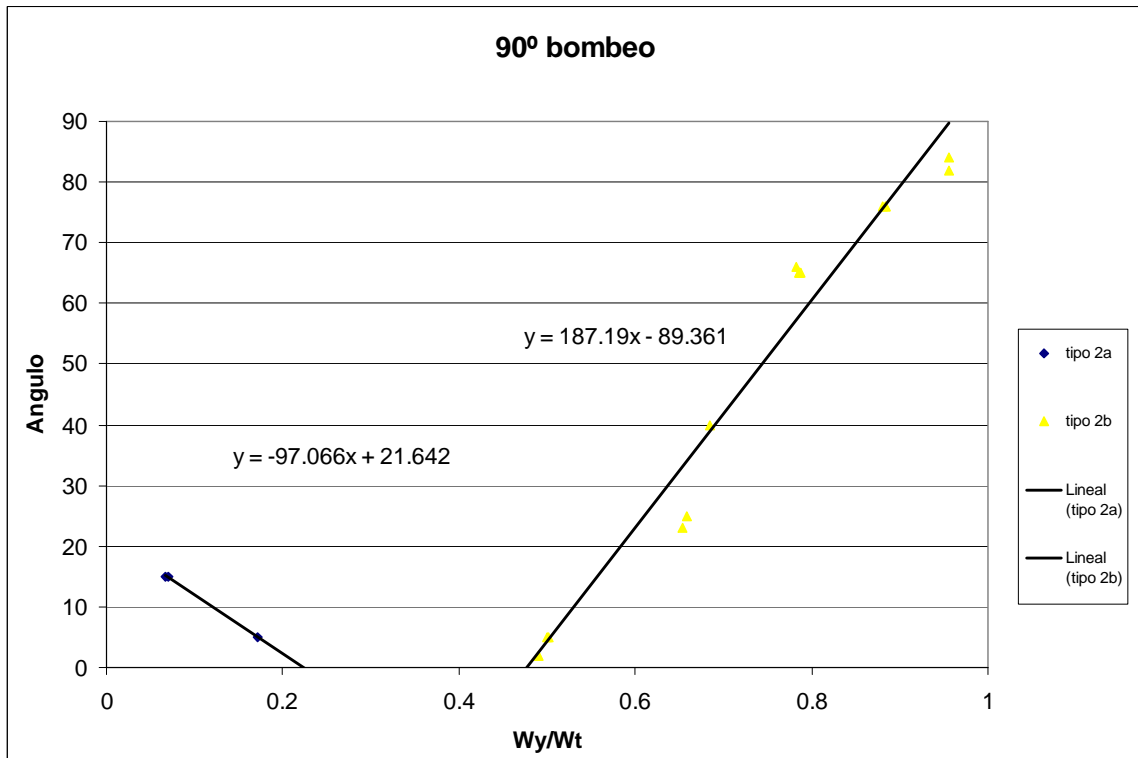


Figura 34: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “y”. Cruce de calles a 90° con bombeo ($S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=2\%$)

En la gráfica podemos observar la existencia de una relación lineal en la recta de tendencia, como en la figura 32. Aunque en este caso, para valores pequeños de potencia en la calle principal (“y”), tenemos como máximo valores de α_x de 16°, es decir, tenemos un valor de α_x menor que en la figura 32. Este efecto es producido, como se ha explicado anteriormente, porque la calle principal “y” conserva su pendiente y su bombeo, y es la secundaria “x” la que debe en el cruce acomodarse a esta. Por lo tanto podemos decir, comparando la figura 34 con la 32, que para los mismos valores de potencia tenemos unos valores de α_x más pequeños, es decir necesitamos más potencia en “x” para tener α_x más grandes; este efecto se produce porque se ha aumentado la pendiente de “y” en el cruce. Podemos ver como los valores para esta combinación de pendientes tiene un buen coef. de correlación.

Se debe comentar, que para casos cercanos a los umbrales de un cambio de patrón del flujo, es muy complicado establecer un ángulo de resalto. En el Anejo 2 podemos comprobar las imágenes de los resaltos, así como las tablas con: las relaciones de caudales de entrada y salida, la relación de potencia del flujo de entrada en “y” y la proporción de caudal de salida en “y”, y la relación entre el ángulo de inclinación del resalto y la proporción de potencia en la dirección “y”.

- Patrones de flujos para la combinación de pendientes: $S_{Ix}=1\%$ y $S_{Iy}=4\%$

A partir de las relaciones de caudales (25 casos) se han obtenido suficientes resultados para caracterizar los patrones de flujo de un cruce con un ángulo de 90° con bombeo. La siguiente figura presenta la relación de potencia del flujo de entrada en “y”, y la proporción de caudal de salida en “y”, así como, las líneas de tendencia para cada patrón de flujo.

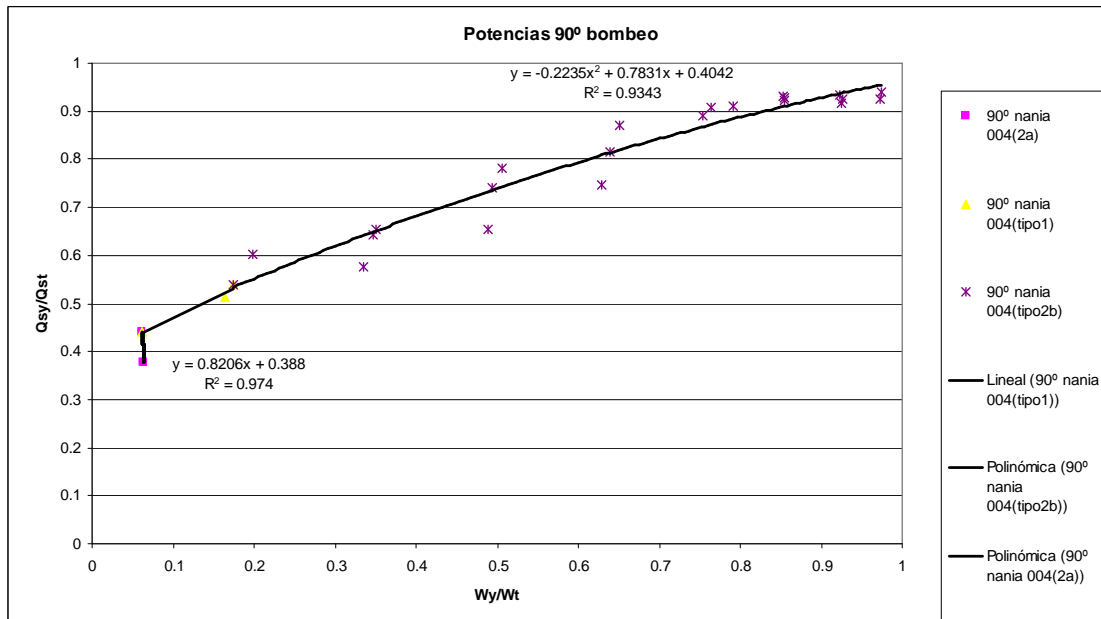


Figura 35: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “y” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Cruce de calles a 90° con bombeo (Slx=1%-Sly=4%)

En la figura 35 vemos representadas las líneas de tendencia para cada patrón de flujo. Los valores del patrón de flujo tipo 2a (color magenta) ajustan con un polinomio de 1° grado, así como, los valores del patrón de flujo tipo 1 (color amarillo), en cambio los valores para el patrón de flujo tipo 2b (color púrpura) ajustan con un polinomio de 3° grado. Aunque como hemos dicho en los comentarios de la figura 33, solo existen dos valores en el rango de flujo tipo 2a, por lo tanto esa curva no es representativa. El rango de valores para los patrones de flujo tipo 1 y 2a cada vez se reduce más, comportándose el flujo mayoritariamente con un patrón tipo 2b. Se cree que es debido a la geometría, cada vez tenemos una geometría más favorable al flujo en la calle “y” (sobre todo en el cruce), y más desfavorable en la calle “x”. Necesitamos más potencia en la calle secundaria “x” para provocar un resalto en el cruce que en la principal “y”. En la siguiente tabla tenemos un resumen de la figura anterior.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo x= Wy/Wt	Función de ajuste	Coef. De correlación R2
1	Tipo 2b	0,04-0,062		
2	Tipo 1	0,062-0,17	$Q_{sy}/Q_t = 0.8206x + 0.388$	0.974
3	Tipo 2a	0,17-0,975	$Q_{sy}/Q_t = -0.2235x^2 + 0.7831x + 0.4042$	0.9343

Tabla 19: Tabla resumen de la figura anterior. Cruce a 90° con bombeo (Slx=1%-Sly=4%)

La siguiente figura presenta la relación entre el ángulo de inclinación del resalto, y la proporción de potencia en la dirección “y”.

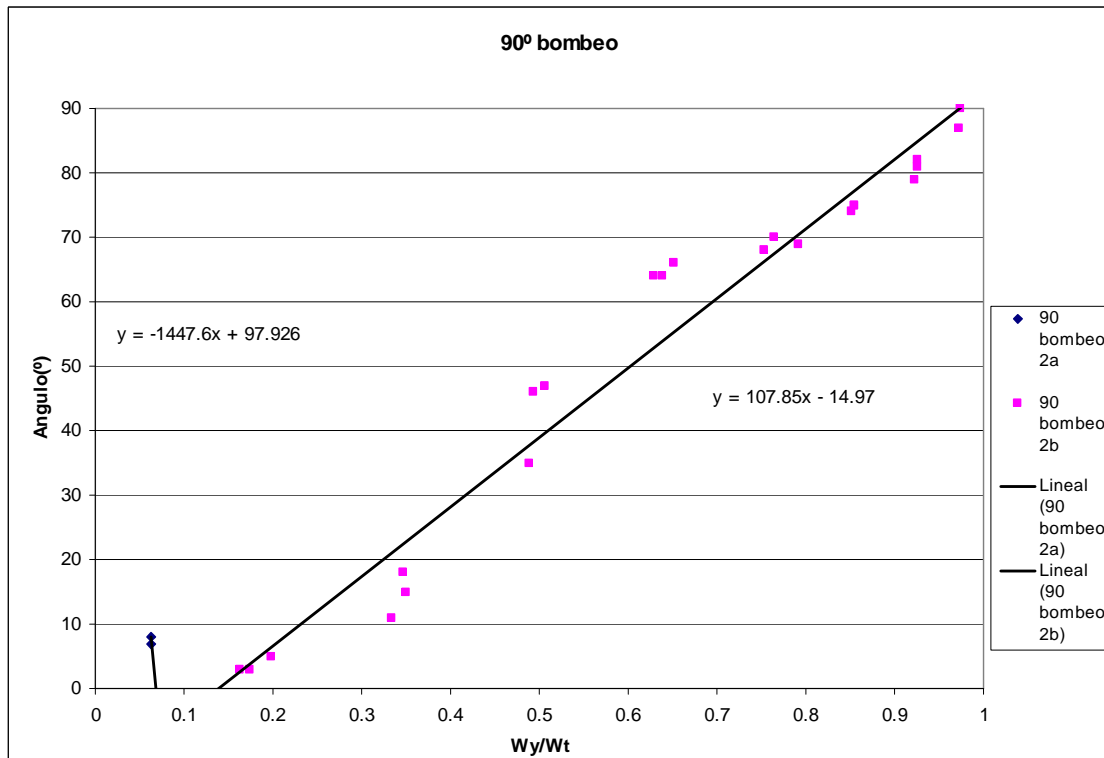


Figura 36: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “y”. Cruce de calles a 90° con bombeo ($S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=4\%$)

En la figura 36 podemos observar la existencia de una relación lineal en la recta de tendencia, como en las figuras 30, 32 y 34. Aunque en este caso, para valores pequeños de potencia en la calle principal (“y”), tenemos como máximo valores de α_x de 8°, es decir, tenemos un valor de α_x menor que en la figura 32 y 34. Es decir, necesitamos más potencia en la calle secundaria “x” para obtener α_x más grandes, para la combinación de pendientes $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=4\%$ que para las otras combinaciones de pendientes.

En el Anejo 3 podemos observar las tablas con: las relaciones de caudales de entrada y salida, la relación de potencia del flujo de entrada en “y” y la proporción de caudal de salida en “y”, y la relación entre el ángulo de inclinación del resalto y la proporción de potencia en la dirección “y”.

- Patrones de flujos para las combinaciones de pendientes: $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=1\%$ y $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=2\%$.

En este apartado se han intentado caracterizar los patrones de flujo para un ángulo del cruce de 90° con bombeo, trabajando con los valores obtenidos para las combinaciones pendientes: $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=2\%$ y $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=2\%$.

A partir de las relaciones de caudales (54 casos generados de las dos combinaciones de pendientes) se han obtenido suficientes resultados para caracterizar los patrones de flujo de un cruce con un ángulo de 90° con bombeo.

La siguiente figura presenta la relación de potencia del flujo de entrada en “y”, y la proporción de caudal de salida en “y”, así como, las líneas de tendencia para cada patrón de flujo.

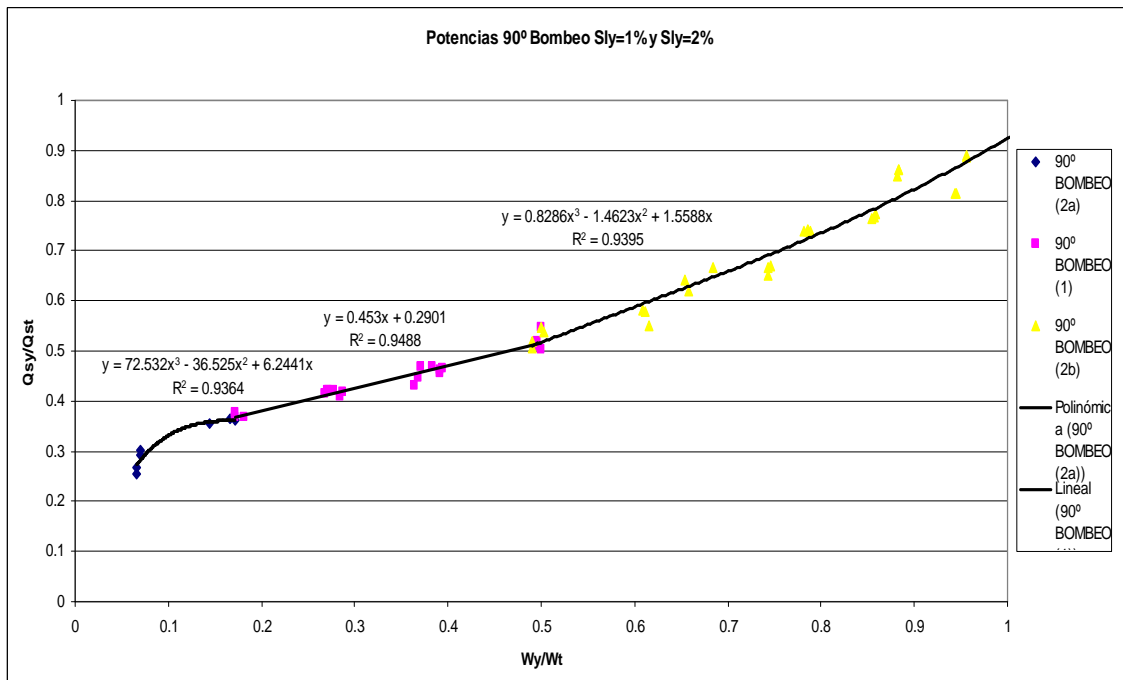


Figura 37: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “y” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Cruce de calles a 90° con bombeo (Slx=1%-Sly=1% y Slx=1%-Sly=2%)

En la figura 37 vemos representadas las líneas de tendencia para cada patrón de flujo. Los valores del patrón de flujo tipo 2a (color azul) ajustan con un polinomio de 3° grado, así como, los valores del patrón de flujo tipo 2b (color amarillo), en cambio los valores para el patrón de flujo tipo 1 (color púrpura) ajustan con un polinomio de 1° grado. Se comprueba en la siguiente figura unos coef. de correlación altísimos, es decir, tenemos unas curvas patrón que representan con gran exactitud el comportamiento del flujo. En la siguiente tabla tenemos un resumen de la figura anterior.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo x= Wy/Wt	Función de ajuste	Coef. De correlación R2
1	Tipo 2b	0,04-0,18	$Q_{sy}/Q_t = 72.532x^3 - 36.525x^2 + 6.2441x$	0.9364
2	Tipo 1	0,18-0,5	$Q_{sy}/Q_t = 0.453x + 0.2901$	0.9488
3	Tipo 2a	0,5-0,95	$Q_{sy}/Q_t = 0.8286x^3 - 1.4623x^2 + 1.5588x$	0.9395

Tabla 20: Tabla resumen de la figura anterior. Cruce a 90° con bombeo (Slx=1%-Sly=1% y Slx=1%-Sly=2%)

La siguiente figura presenta la relación entre el ángulo de inclinación del resalto, y la proporción de potencia en la dirección “y”.

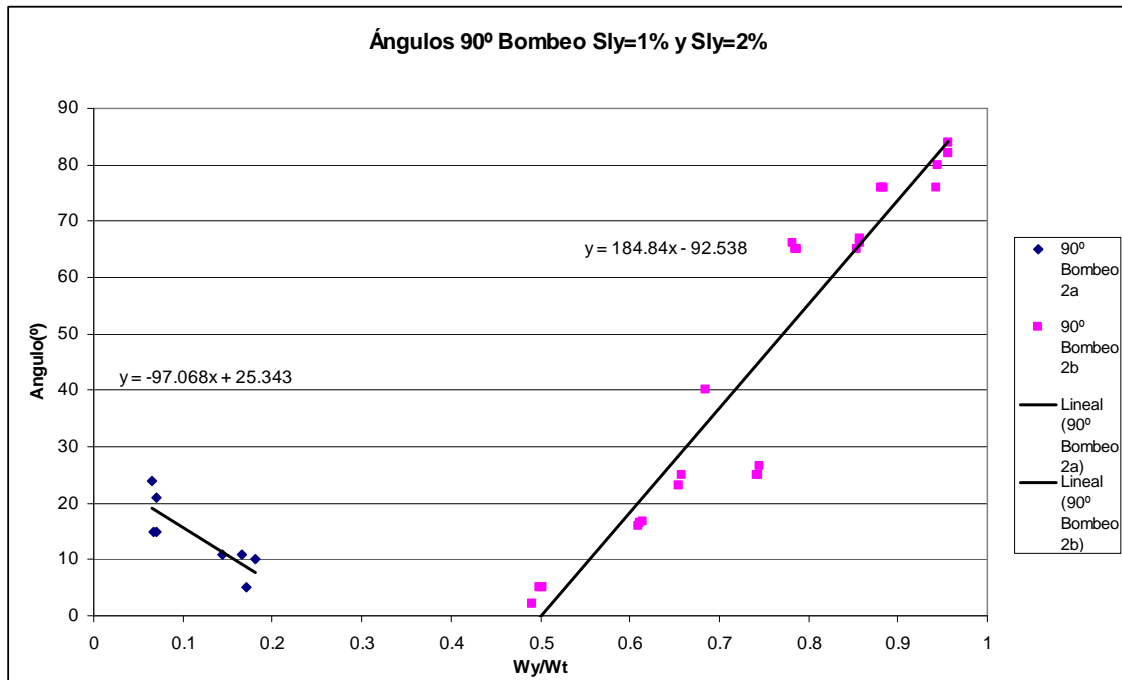


Figura 38: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “y”. Cruce de calles a 90° con bombeo (S_{Ix}=1%-S_{Iy}=1% y S_{Ix}=1%-S_{Iy}=2%)

En la figura 34 podemos ver que el flujo con un patrón tipo 2a, tiene un rango de valores muy pequeño, donde como máximo podemos alcanzar valores de $\alpha_x=26^\circ$, en cambio para relaciones altas de W_y/W_t podemos tener $\alpha_y=85^\circ$. Esto se explica por la gran descompensación que tenemos entre las calles, se ha favorecido el flujo en la calle principal “y”, en cambio se ha desfavorecido en la calle “x”. Existe en la geometría una asimetría con relación a un cruce a 90° sin bombeo. Como ya se ha explicado anteriormente, la calle principal “y” conserva su pendiente y bombeo en toda su longitud, en cambio la secundaria tiene que acomodar en el cruce su pendiente y bombeo a la principal. De esta manera, necesitas una potencia mucho más alta en la calle secundaria “x”, que la necesaria en “y”, para crear el mismo ángulo de resalto en el cruce.

7.2.2 Cruce de calles a 60° con bombeo.

- Patrones de flujos para las combinaciones de pendientes: S_{Ix}=1% - S_{Iy}=1%, S_{Ix}=1% (S_{Iy})=2% y S_{Ix}=1% - S_{Iy}=4%

En este apartado se han intentado caracterizar los patrones de flujo para un ángulo del cruce de 60° con bombeo, trabajando con los valores obtenidos para las combinaciones pendientes: S_{Ix}=1%-S_{Iy}=2%, S_{Ix}=1%-S_{Iy}=2% y S_{Ix}=1%-S_{Iy}=4%.

A partir de las relaciones de caudales (79 casos, de las tres combinaciones de pendientes) se han obtenido suficientes resultados para caracterizar los patrones de flujo de un cruce con un ángulo de 60° con bombeo.

La siguiente figura presenta la relación de potencia del flujo de entrada en “y”, y la proporción de caudal de salida en “y”, así como, las líneas de tendencia para cada patrón de flujo.

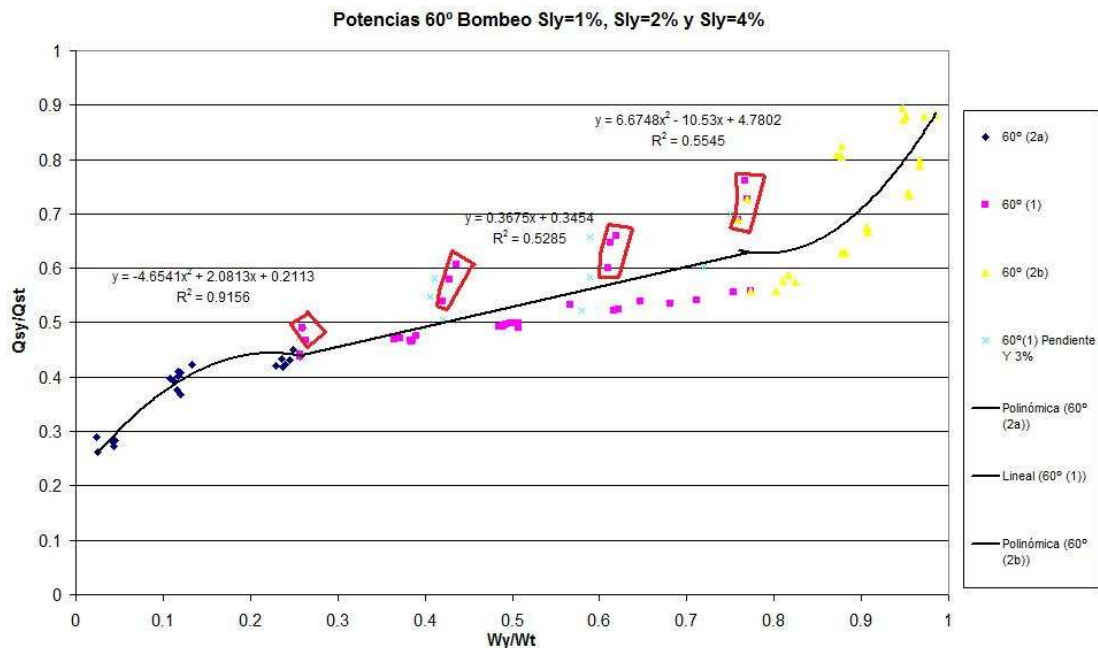


Figura 39: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “y” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Cruce de calles a 60° con bombeo (S_{lx}=1%-S_{ly}=1%, S_{lx}=1%-S_{ly}=2% y S_{lx}=1%-S_{ly}=4%)

En la figura 39 vemos representadas las líneas de tendencia para cada patrón de flujo. Los valores del patrón de flujo tipo 2a (color azul marino) ajustan con un polinomio de 2º grado, así como, los valores del patrón de flujo tipo 2b (color amarillo), en cambio los valores para el patrón de flujo tipo 1 (color púrpura) ajustan con un polinomio de 1º grado. Se comprueba en la siguiente figura unos coef. de correlación bajísimos, es decir, tenemos unas curvas patrón que no representan el comportamiento del flujo.

Los valores introducidos que pertenecen a la combinación de pendientes S_{lx}=1%-S_{ly}=4% (redondeadas en la figura 39), no “parecen” que guarden relación con los valores de las otras dos combinaciones de pendientes. En la siguiente tabla tenemos un resumen de la figura anterior.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo x= Wy/Wt	Función de ajuste	Coef. De correlación R2
1	Tipo 2b	0,04-0,18	Qsy/Qt= -4,6541x ² + 2,0813x + 0,2113	0.9156
2	Tipo 1	0,18-0,8	Qsy/Qt=0,3716x + 0,3429	0.5285
3	Tipo 2a	0,8-0,97	Qsy/Qt= 6,6748x ² - 10,53x + 4,7802	0.5545

Tabla 21: Tabla resumen de la figura anterior. Cruce a 60° con bombeo (S_{lx}=1%-S_{ly}=1%, S_{lx}=1%-S_{ly}=2% y S_{lx}=1%-S_{ly}=4%)

Como hemos explicado, existe una clara dispersión en los resultados para la suma de las tres combinaciones de pendiente (concretamente para la combinación S_{lx}=1%-S_{ly}=4%). Cuando se aportan los valores del caso S_{lx}=1%-S_{ly}=4% a los otros dos casos: S_{lx}=1%-S_{ly}=1% y S_{lx}=1%-S_{ly}=2%, los coef. de dispersión dan valores muy pequeños. En un principio, se pensó que eran familias de datos diferentes y por lo tanto, imposibles de parametrizar con las mismas curvas. También se pensó que al trabajar con pendientes

del 4% (considerable pendiente) y teniendo en cuenta que el programa informático CARPA no representa la 3ª dimensión (hipótesis válida para velocidades verticales pequeñas) originase algún problema. Es decir, que el programa estimara una simplificación no asumible, y por lo tanto no podríamos dar validez a la solución. Por este motivo, se hizo una comprobación para poder situar el rango de pendiente, a partir de la cual existía una mayor dispersión de los valores. En la siguiente figura podemos ver en color azul los valores obtenidos con una combinación de pendientes $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=3\%$.

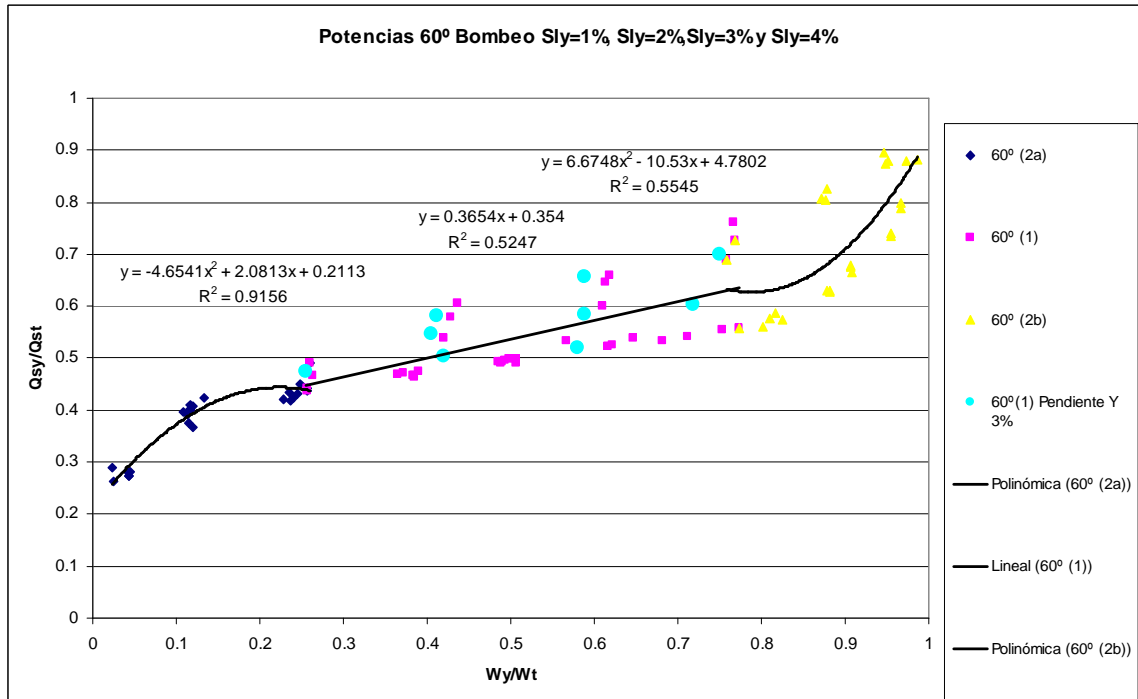


Figura 40: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “y” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Cruce de calles a 60° con bombeo ($S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=1\%$, $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=2\%$ y $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=4\%$)

Como podemos ver en la figura los valores para la combinación de pendientes $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=3\%$ (color azul cian) se sitúan entre los valores de la combinación $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=4\%$ y la combinación de las otras dos ($S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=1\%$ $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=2\%$). Se pudo comprobar:

- Para puntos con valores muy altos de W_x/W_t o muy bajos de W_y/W_t no existía dispersión (en el patrón tipo 2a no hay dispersión), es decir, si en la calle secundaria teníamos grandes caudales, con calados y velocidades altas, no le afectaba esta combinación ($S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=4\%$) de manera diferente que las otras dos.
- Los puntos con valores medios de W_x/W_t y altos de W_x (calados y velocidades altos en la calle secundaria) no tienen tanta dispersión, como los puntos con valores medios de W_x/W_t y bajos de W_x . Podemos ver estos puntos (valores altos de W_x) en la siguiente figura marcados en rojo.

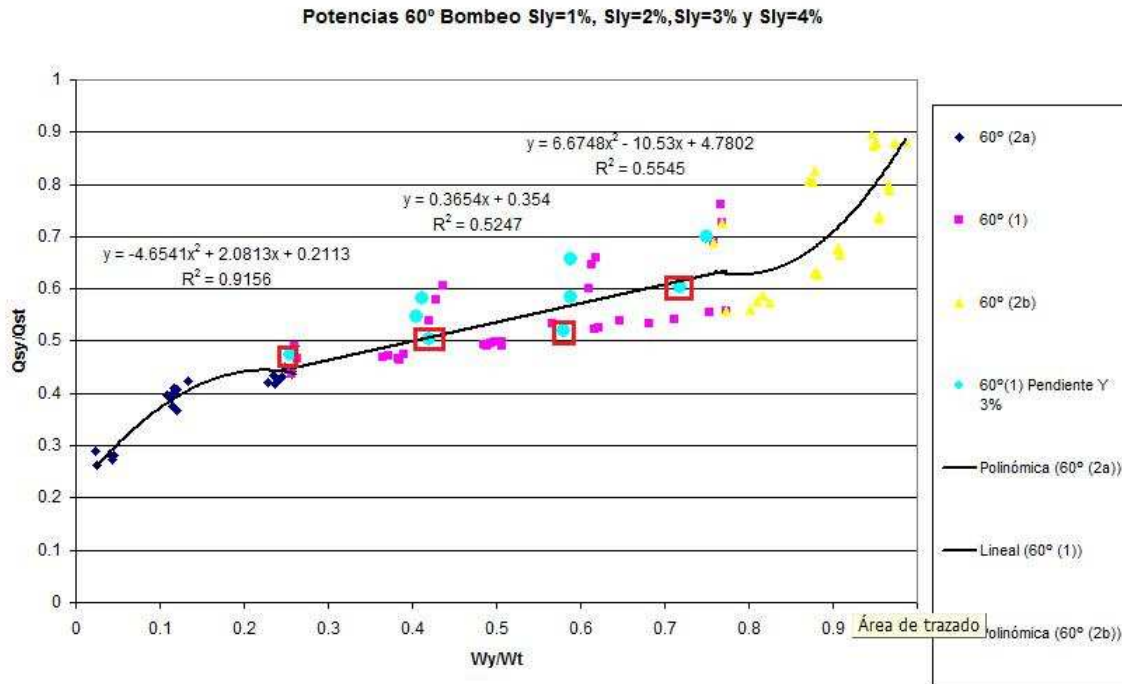


Figura 41: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “y” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Cruce de calles a 60° con bombeo. Podemos ver valores de la combinación $S_{1x}=1\%$ - $S_{1y}=3\%$ con W_x altas marcados en rojo ($S_{1x}=1\%$ - $S_{1y}=1\%$, $S_{1x}=1\%$ - $S_{1y}=2\%$ y $S_{1x}=1\%$ - $S_{1y}=4\%$)

Se llegó a la conclusión que con valores de W_x altos no existía tanta dispersión, producido por una menor perturbación de la geometría del cruce en el comportamiento del flujo. Sin duda, un cambio de altura de varios cm en un metro de longitud, no es una gran variación siempre que tengamos calados y velocidades importantes, ya que los calados en un cruce de calles se mueve en el rango de 1-18 cm.

Por este motivo, se comprobó los vectores de velocidades y los calados en los cruces, para tres casos con una combinación de pendientes: $S_{1x}=1\%$ - $S_{1y}=4\%$, donde cada caso correspondía a un patrón de flujo diferente. Estos tres casos se compararon con sus homólogos (misma relación de caudales de entrada) para una combinación de pendientes $S_{1x}=1\%$ - $S_{1y}=1\%$, y de esta manera poder evaluar las diferencias, y demostrar el efecto de la geometría del cruce en el comportamiento del flujo. Estos tres grupos de casos se separan en tres apartados.

Podemos comprobar que en el caso de un cruce a 90° sin bombeo, utilizando todos los valores de combinaciones de pendientes no tenemos una gran dispersión. Este caso, reafirma la anterior conclusión, ya que el cruce a 90° sin bombeo es un plano horizontal y por lo tanto no se favorece el flujo en ninguna calle.

1. Comparación entre casos con patrón de flujo tipo 2b

Para la combinación de pendientes $S_{ix}=1\%$ - $S_{iy}=4\%$ se ha escogido el caso 5, donde tenemos los siguientes caudales de entrada en la calle principal (“y”) y en la secundaria respectivamente: 21.4 l/s-49.8 l/s. Por lo tanto tendremos una proporción $Q_{ey}/Q_{et}= 0.7$.

Para la combinación de pendientes $S_{ix}=1\%$ - $S_{iy}=1\%$ se ha escogido el caso 5, donde tenemos los siguientes caudales de entrada en la calle principal (“y”) y en la secundaria respectivamente: 21.4 l/s-50 l/s. Por lo tanto tendremos una proporción $Q_{ey}/Q_{et}= 0.7$. La siguiente figura representa los vectores de velocidad en el cruce para las dos combinaciones de pendientes.

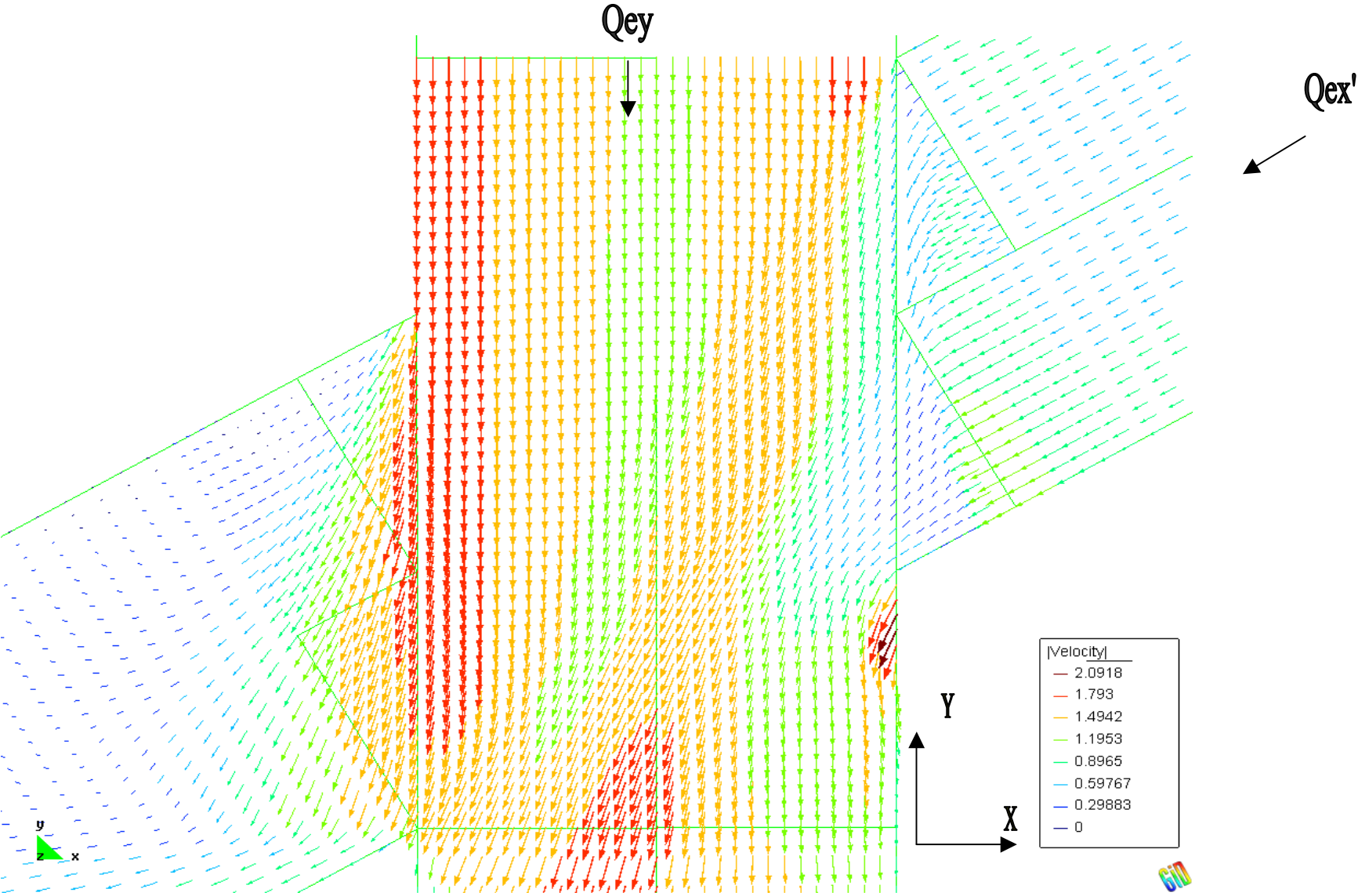


Figura 42: Vectores de velocidades en el cruce con un ángulo de 60° con bombeo, para el caso 5 de la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$

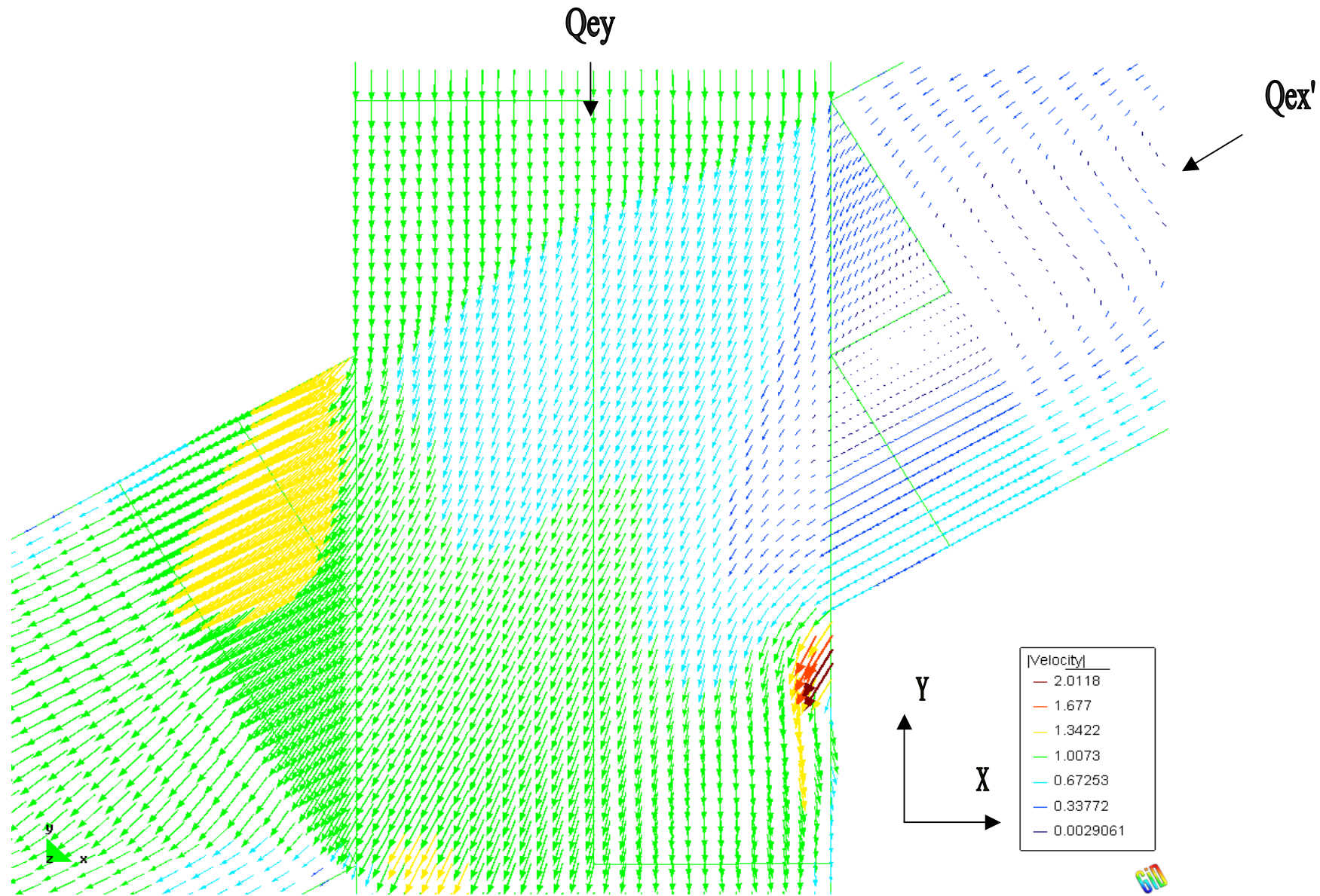


Figura 43: Vectores de velocidades en el cruce con un ángulo de 60° con bombeo, para el caso 5 de la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$

Como podemos ver en las figuras 42 y 43, para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=4\%$ tenemos unos vectores de velocidades más marcados y con mayor densidad en la dirección “y”, por lo tanto tenemos un mayor caudal en esa dirección. En este caso, podemos ver que la mayoría del caudal que nutre la calle secundaria de salida proviene de la calle “y”, provocado por el bombeo que existe en ella. Este fenómeno no se comprueba para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$. Por lo tanto, se demuestra que la geometría del cruce es decisiva en el comportamiento para este patrón de flujo. Recordemos, que para poder nutrir la calle secundaria de entrada a la de salida, en una combinación de pendientes $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=4\%$, el flujo debe sortear una pendiente del 4% en la dirección “y”, y además debe remontar el bombeo de la calle principal. En las siguientes figuras tenemos valores de la velocidad en la dirección “y”, para los dos casos, y de esta manera dejar más claro la explicación del párrafo anterior.

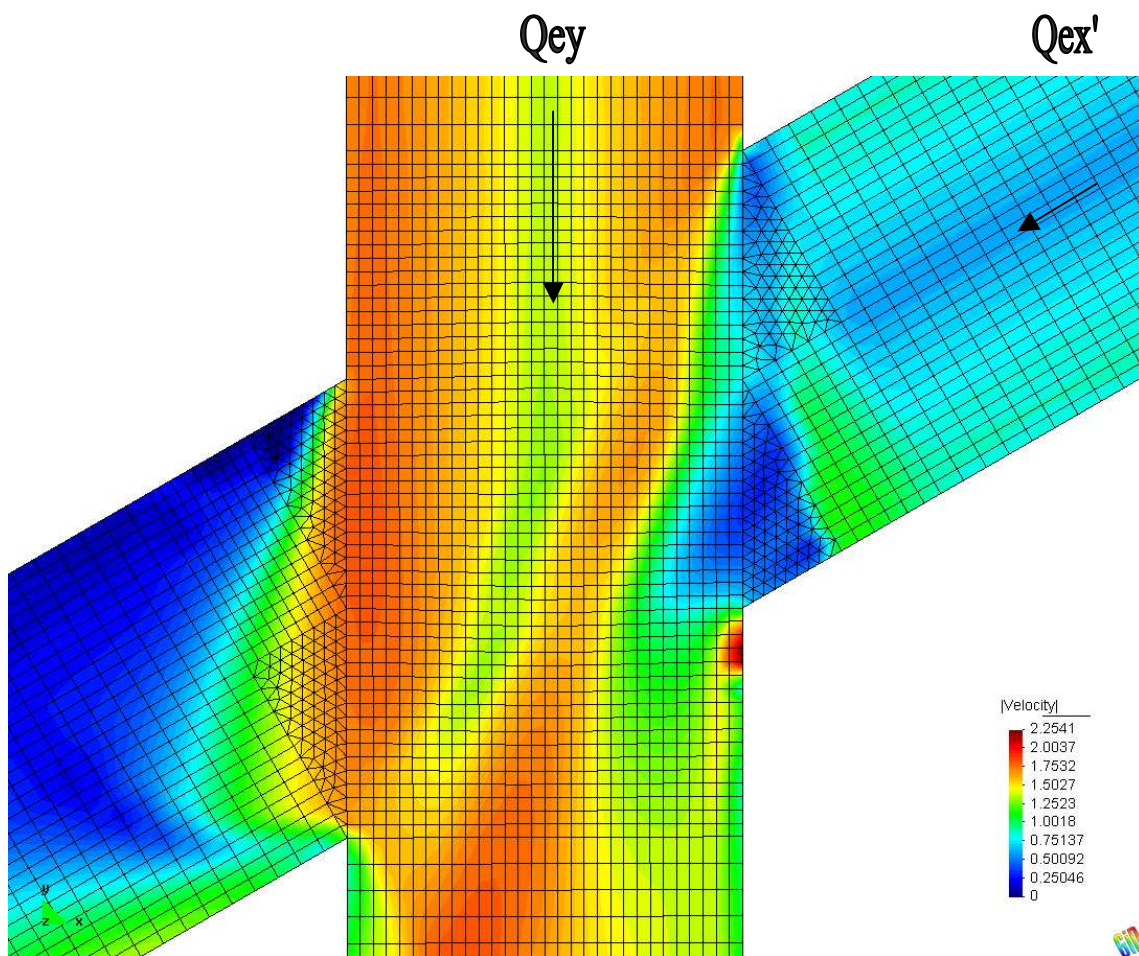


Figura 44: Velocidades “Y” (dirección “y”) en el cruce con un ángulo de 60° con bombeo, para el caso 5 de la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=4\%$

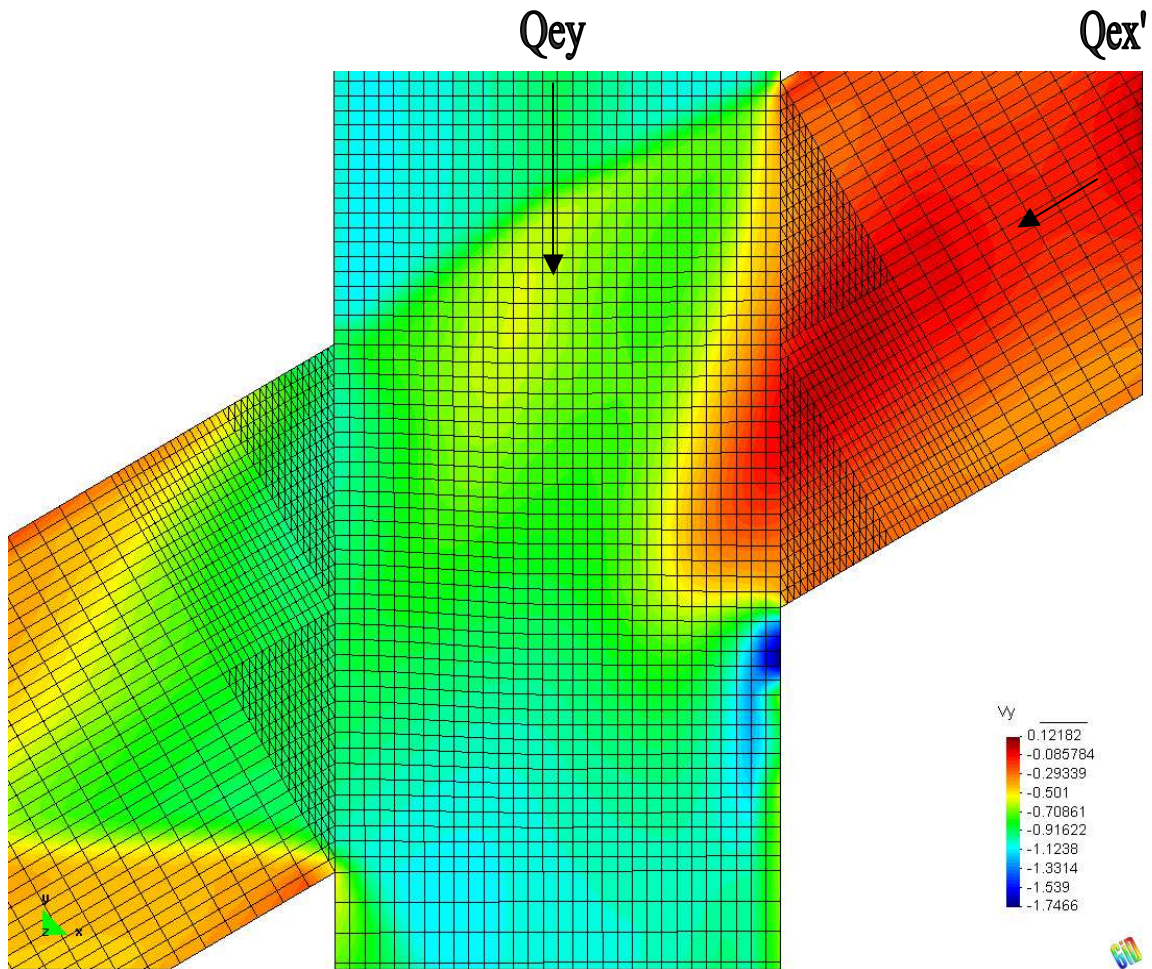


Figura 45: Velocidades “Y” (dirección “y”) en el cruce con un ángulo de 60° con bombeo, para el caso 5 de la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$

Si nos fijamos en la figura 44, que representa las velocidades en “y” para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$, podemos observar en el cruce unas velocidades en “y” más importantes que en la otra combinación de pendientes. Además de todos los efectos de la geometría en el cruce, que condicionan el flujo en la calle secundaria. Habría que hacer hincapié en las altas velocidades en “y” producidas en el cruce (figura 44), provocadas al mantener la pendiente en la calle principal.

2. Comparación entre casos con patrón de flujo tipo 1

Para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$ se ha escogido el caso 15, donde tenemos los siguientes caudales de entrada en la calle principal (“y”) y en la secundaria respectivamente: 50 l/s-49.9 l/s. Por lo tanto tendremos una proporción $Q_{ey}/Q_{et}= 0.5$.

Para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$ se ha escogido el caso 13, donde tenemos los siguientes caudales de entrada en la calle principal (“y”) y en la secundaria respectivamente: 49.9 l/s-50.2 l/s. Por lo tanto tendremos una proporción $Q_{ey}/Q_{et}= 0.5$. La siguiente figura representa los vectores de velocidad en el cruce para las dos combinaciones de pendiente.

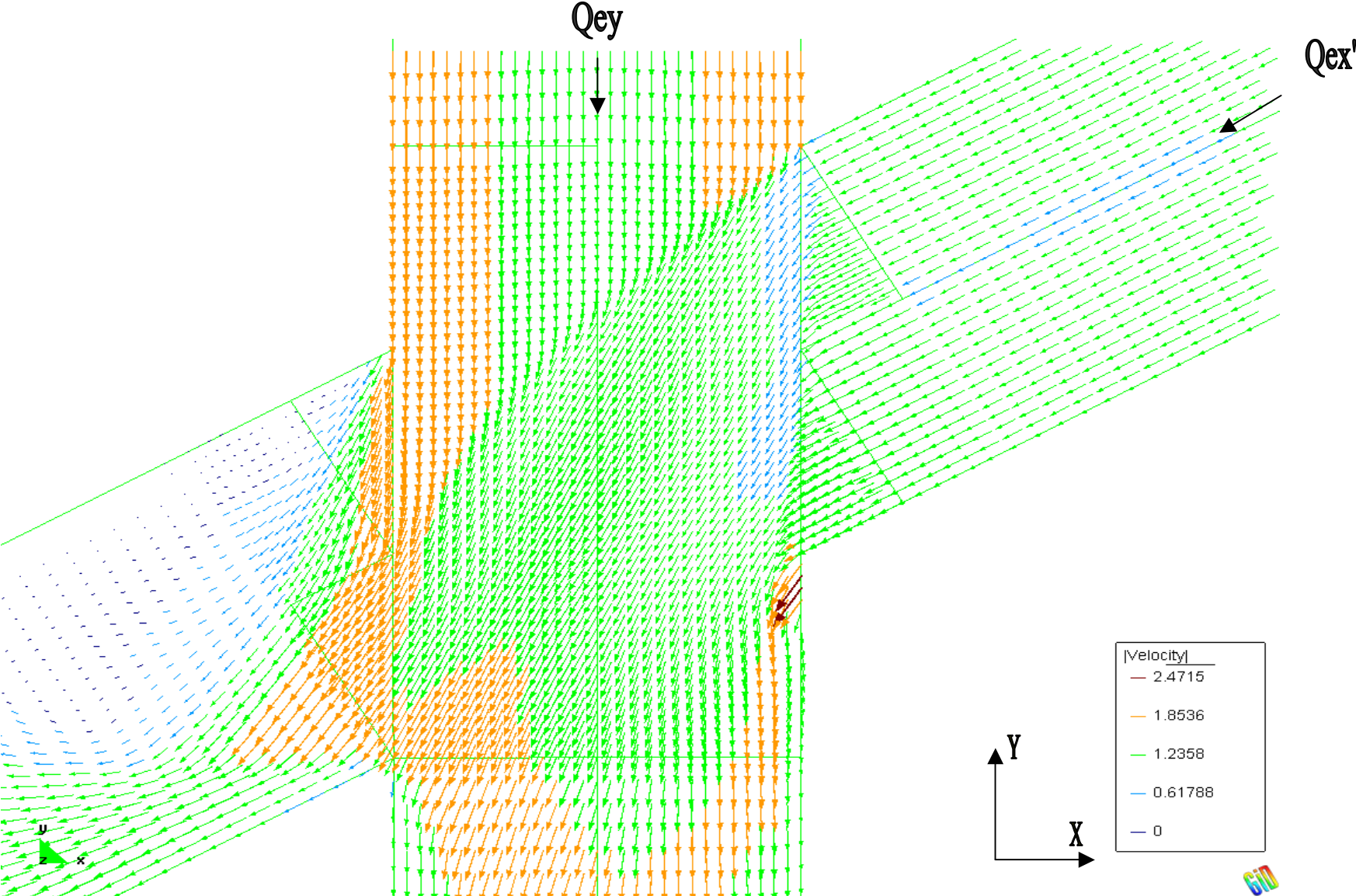


Figura 46: Vectores de velocidades en el cruce con un ángulo de 60° con bombeo, para el caso 15 de la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=4$

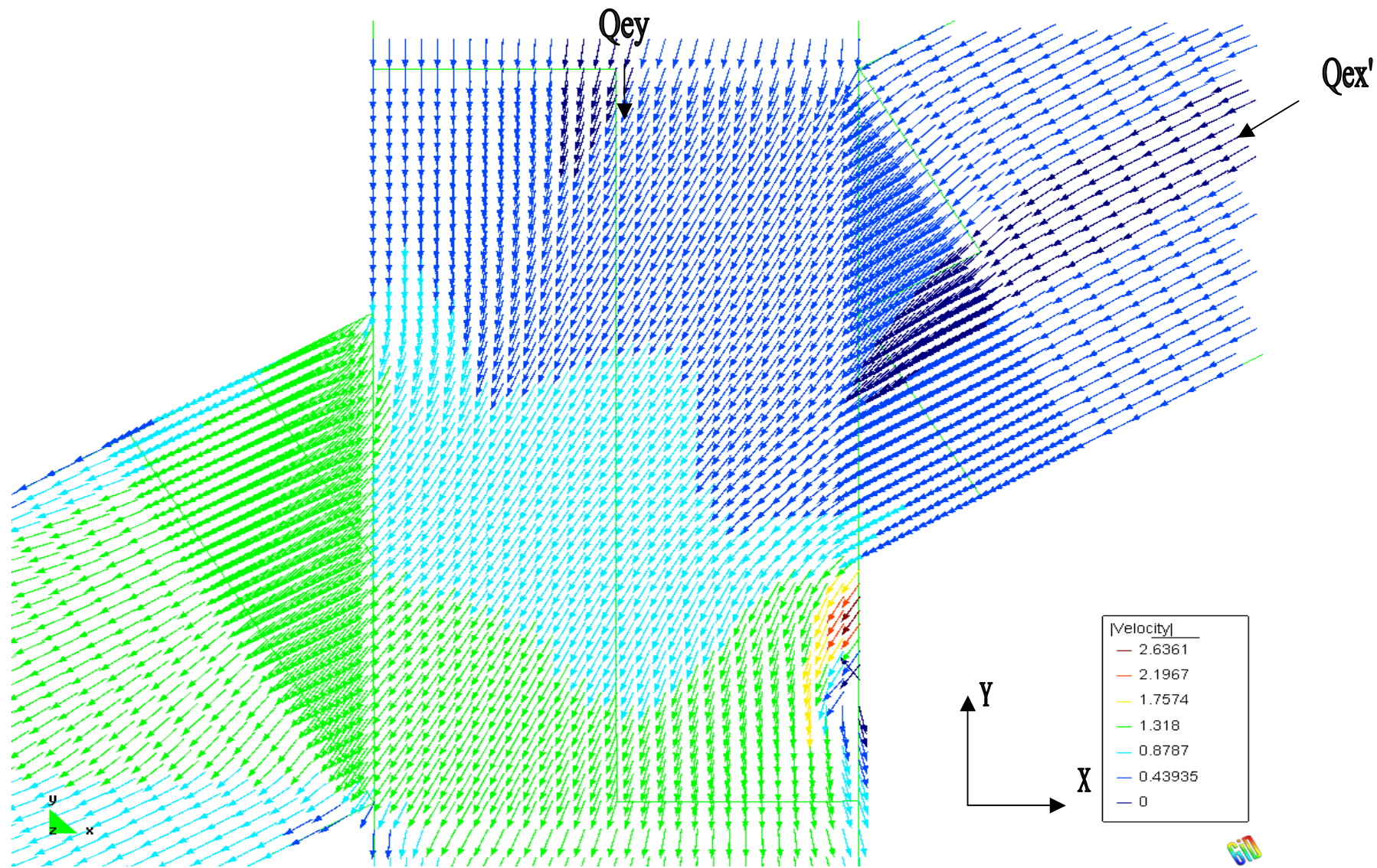


Figura 47: Vectores de velocidades en el cruce con un ángulo de 60° con bombeo, para el caso 13 de la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$

Como podemos ver en las figuras 46 y 47, para la combinación $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$ la mayoría del caudal que nutre la calle secundaria ya no proviene exclusivamente de la principal “y”. En esa figura podemos ver una franja que separa el agua que proviene de la calle “y”, del agua que proviene de la secundaria. En cambio, para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$, podemos ver como no hay claramente un flujo predominante en una dirección (bastante lógico, ya que trabajamos con $Q_{ex}/Q_{et}=0.5$). El flujo en la calle secundaria de entrada tiene más potencia que en el caso de la figura 42, por este motivo, podemos ver una aportación de la calle secundaria de entrada a la de salida.

En las siguientes figuras tenemos valores de la velocidad en la dirección “y”, para los dos casos, y de esta manera dejar más claro la explicación del párrafo anterior.

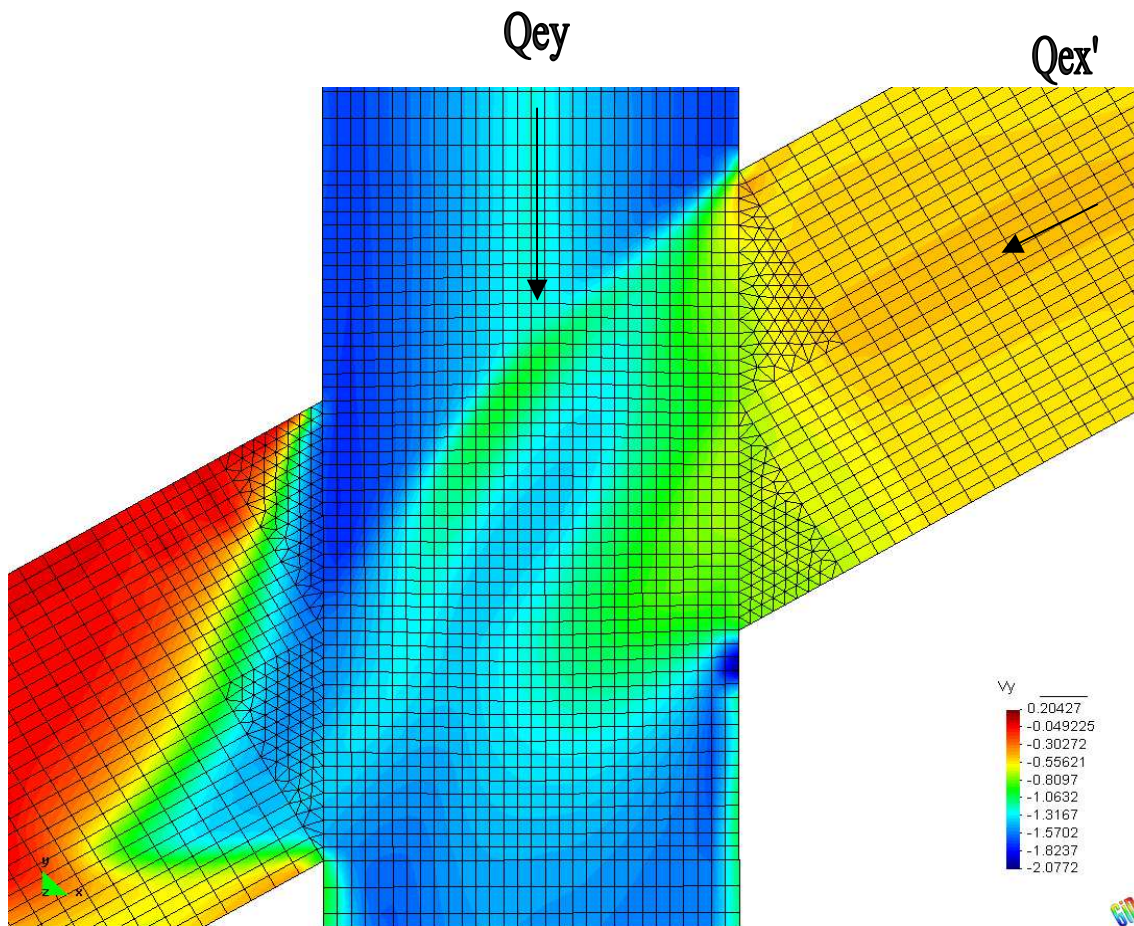


Figura 48: Velocidades “Y” (dirección “y”) en el cruce con un ángulo de 60° con bombeo, para el caso 15 de la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$

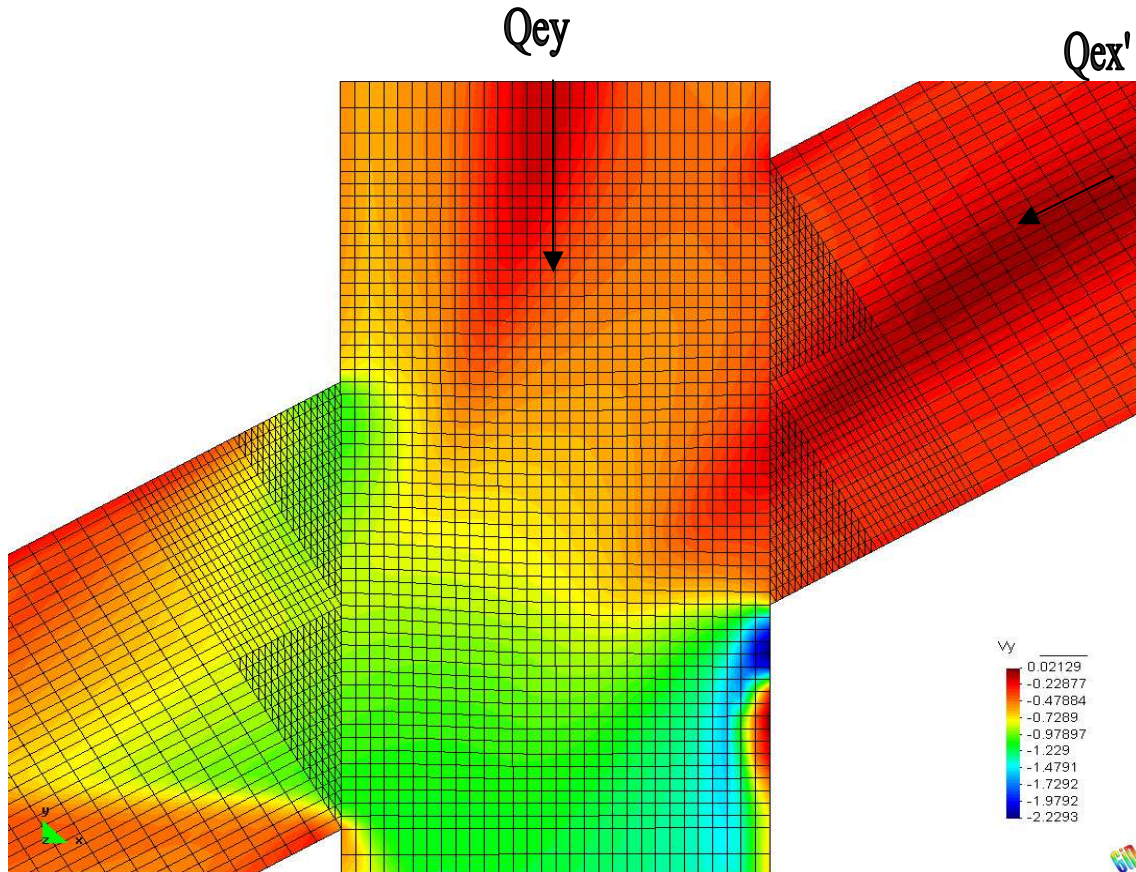


Figura 49: Velocidades “Y” (dirección “y”) en el cruce con un ángulo de 60° con bombeo, para el caso 13 de la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$

A partir de la figura 48 de velocidades en “y” para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$, comprobamos en el cruce unas velocidades en “y” más importantes que en la otra combinación pendiente, producto de las mismas causas que se han comentado en el apartado anterior.

Se puede comprobar la formación de lo que parece un vórtice en el cruce de salida de la calle “y”.

3. Comparación entre casos con patrón de flujo tipo 2a

Para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$ se ha escogido el caso 17, donde tenemos los siguientes caudales de entrada en la calle principal (“y”) y en la secundaria respectivamente: 58.3 l/s-25 l/s. Por lo tanto tendremos una proporción $Q_{ey}/Q_{et}=0.3$.

Para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$ se ha escogido el caso 17, donde tenemos los siguientes caudales de entrada en la calle principal (“y”) y en la secundaria respectivamente: 58.4 l/s-25 l/s. Por lo tanto tendremos una proporción $Q_{ey}/Q_{et}=0.3$.

La siguiente figura representa los vectores de velocidad en el cruce para las dos combinaciones de pendientes.

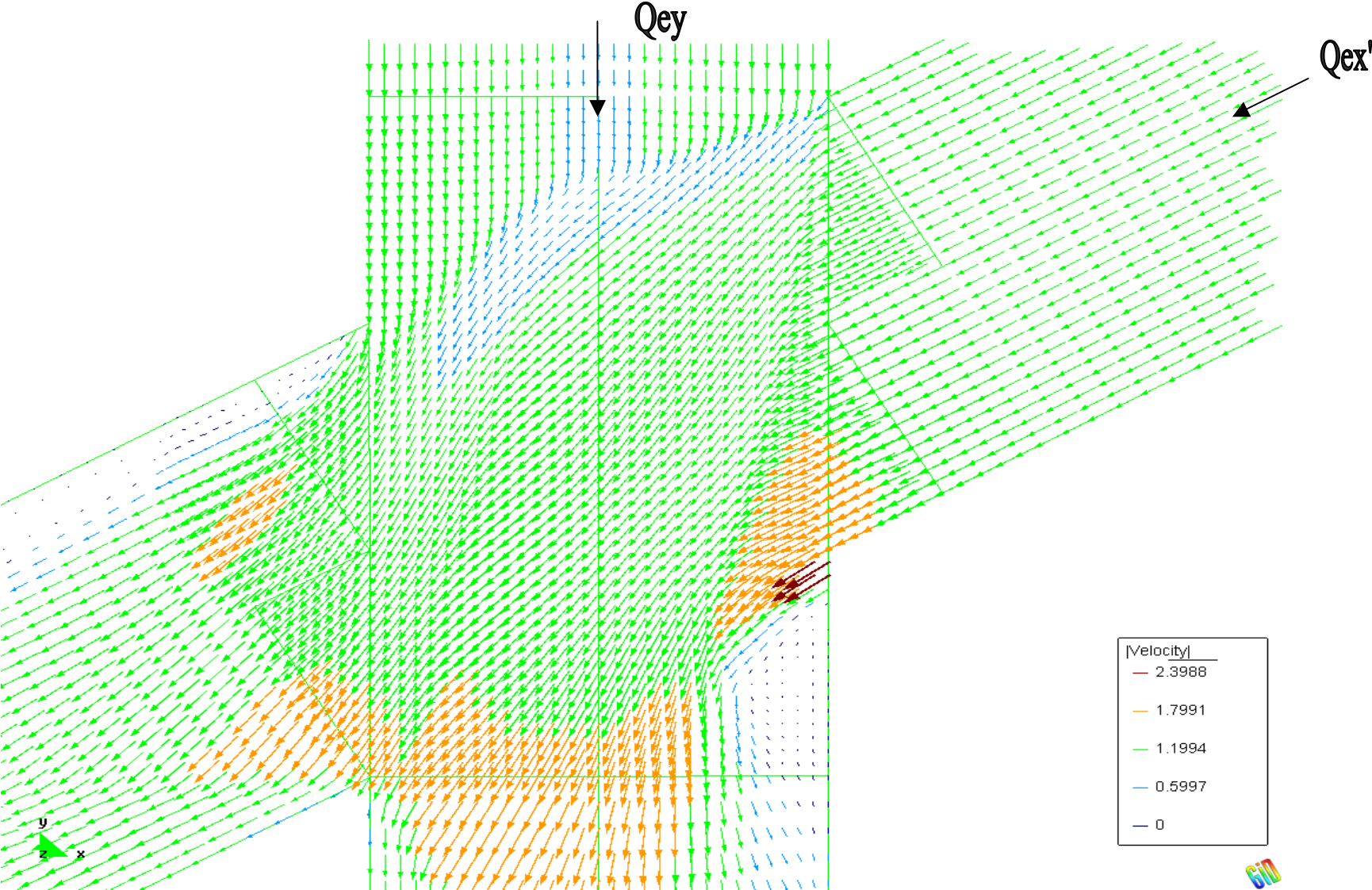


Figura 50: Vectores de velocidades en el cruce con un ángulo de 60° con bombeo, para el caso 17 de la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=4\%$

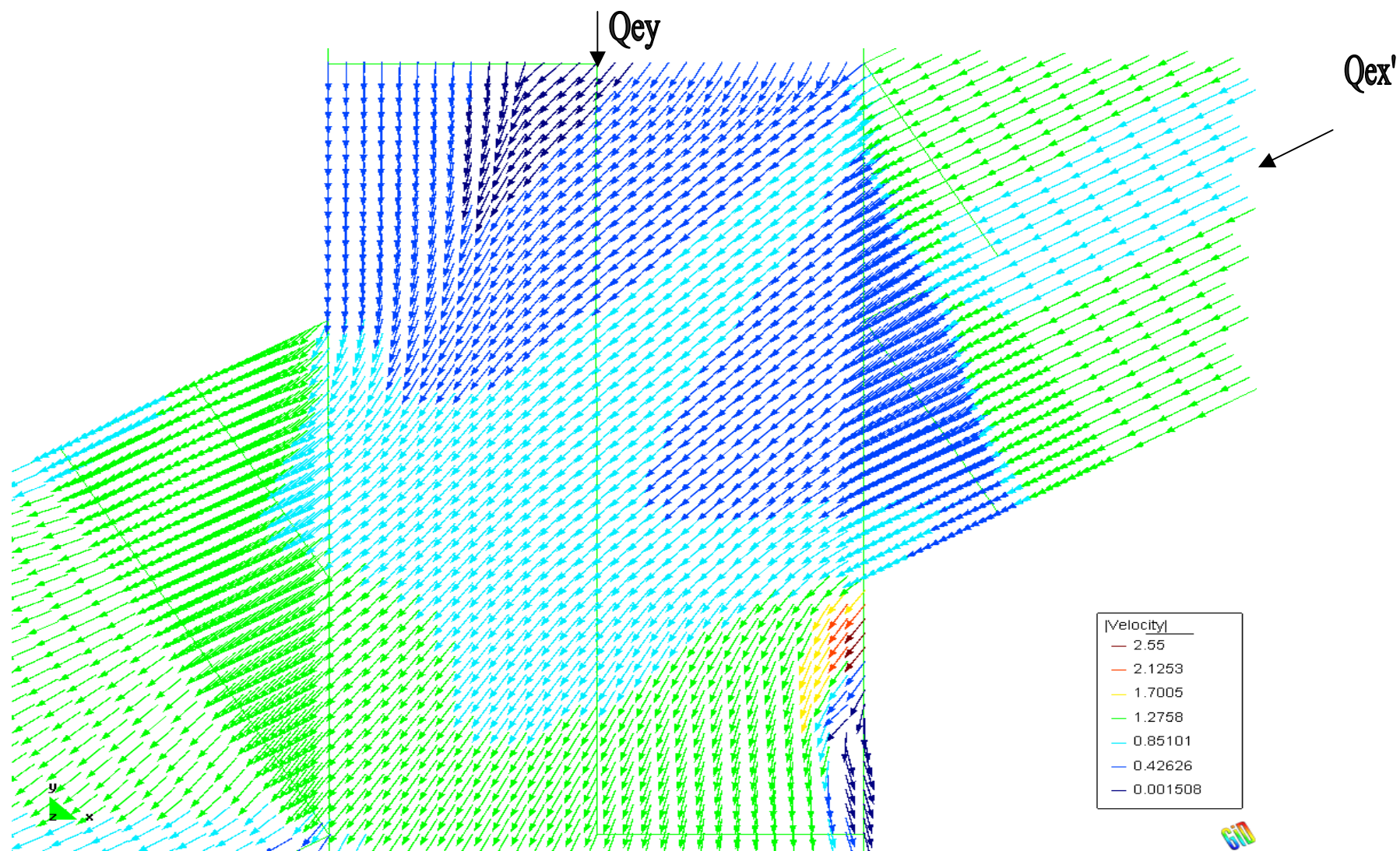


Figura 51: Vectores de velocidades en el cruce con un ángulo de 60° con bombeo, para el caso 17 de la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$

En este caso, para la combinación $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$ podemos ver que el caudal que nutre la calle secundaria proviene del producto de las dos calles de entrada. Si comparamos la figura 50 con la siguiente (figura 51), existe una similitud en la dirección y magnitud de los vectores de velocidad. Podemos comprobar en la gráfica que relaciona la proporción de potencia de entrada en “y” y la proporción de caudal de salida en “y”, para este caso 17 (Anejo 1 y 3), que tenemos valores muy parecidos en las dos combinaciones de pendientes. Existe un valor en la relación de potencia en “x”, a partir del cual, la geometría del cruce no condiciona tan exageradamente el comportamiento del flujo. En las siguientes figuras tenemos valores de la velocidad en la dirección “y”, para los dos casos, y de esta manera dejar más claro la explicación del párrafo anterior.

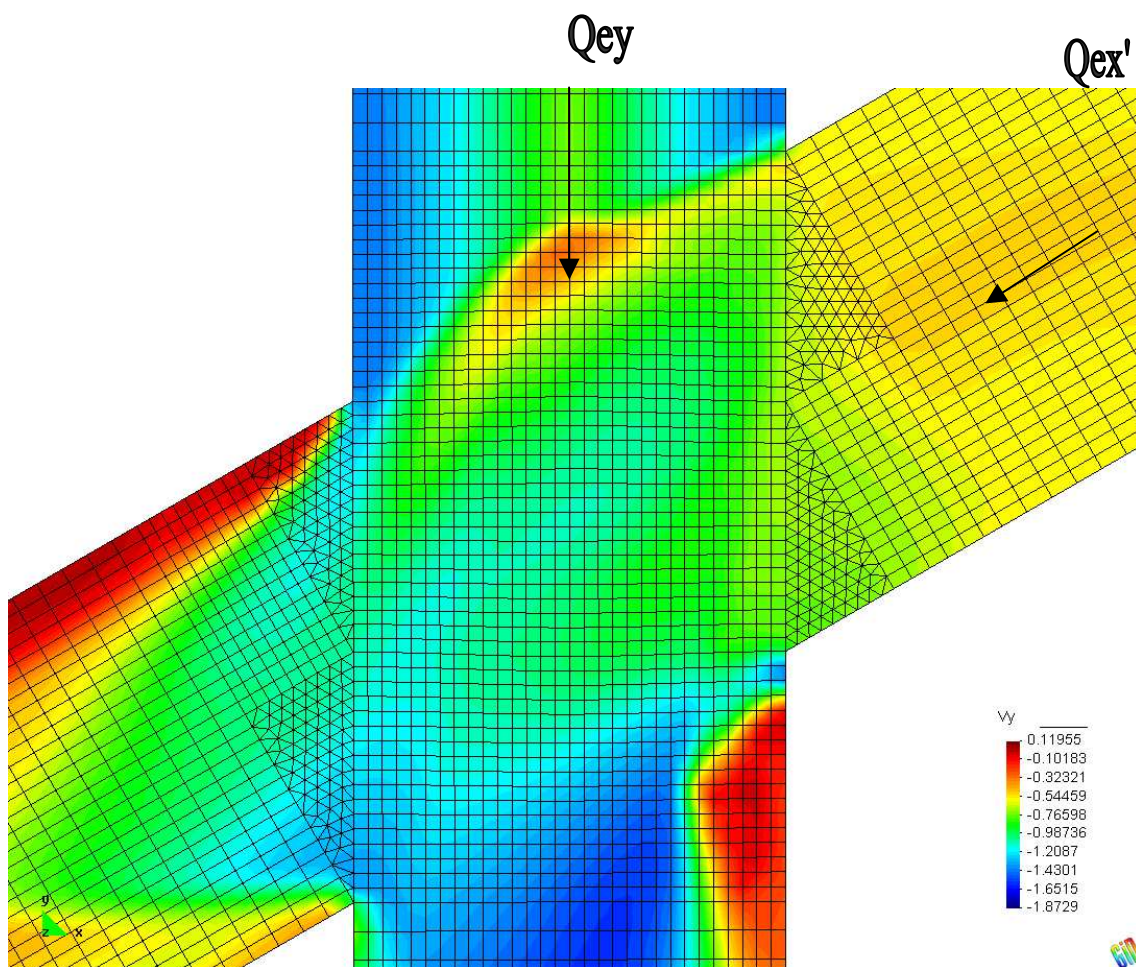


Figura 52: Velocidades “Y” (dirección “y”) en el cruce con un ángulo de 60° con bombeo, para el caso 15 de la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$

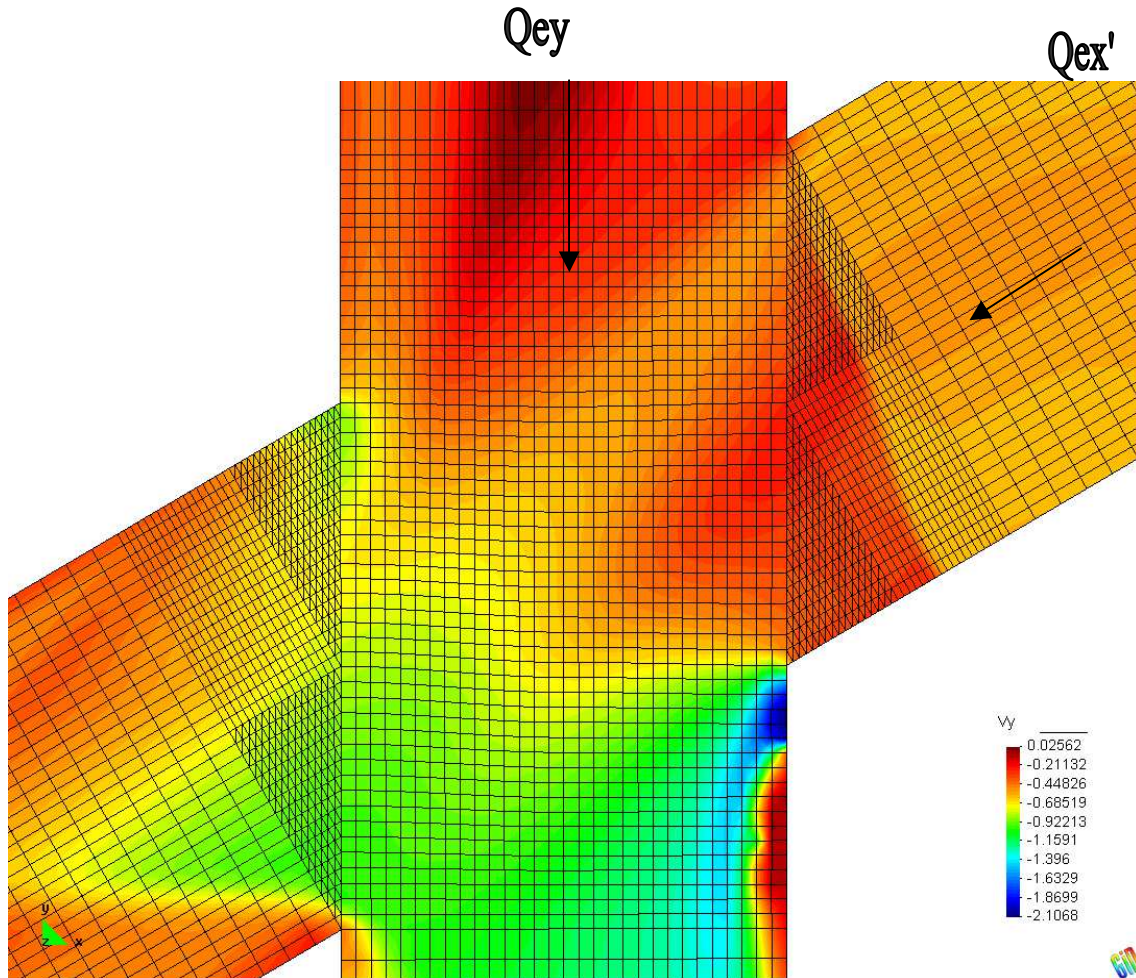


Figura 53: Velocidades “Y” (dirección “y”) en el cruce con un ángulo de 60° con bombeo, para el caso 13 de la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$

La figura de velocidades en “y” para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$, presenta en la salida del cruce de la calle principal, unas velocidades en “y” similares a las que presenta la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$.

Para finalizar esta comprobación, que hemos hecho a partir de los vectores y magnitudes de velocidad, podemos decir que la geometría juega un papel fundamental en el reparto de los caudales de salida.

La siguiente figura presenta la relación entre el ángulo de inclinación del resalto, y la proporción de potencia en la dirección “y”.

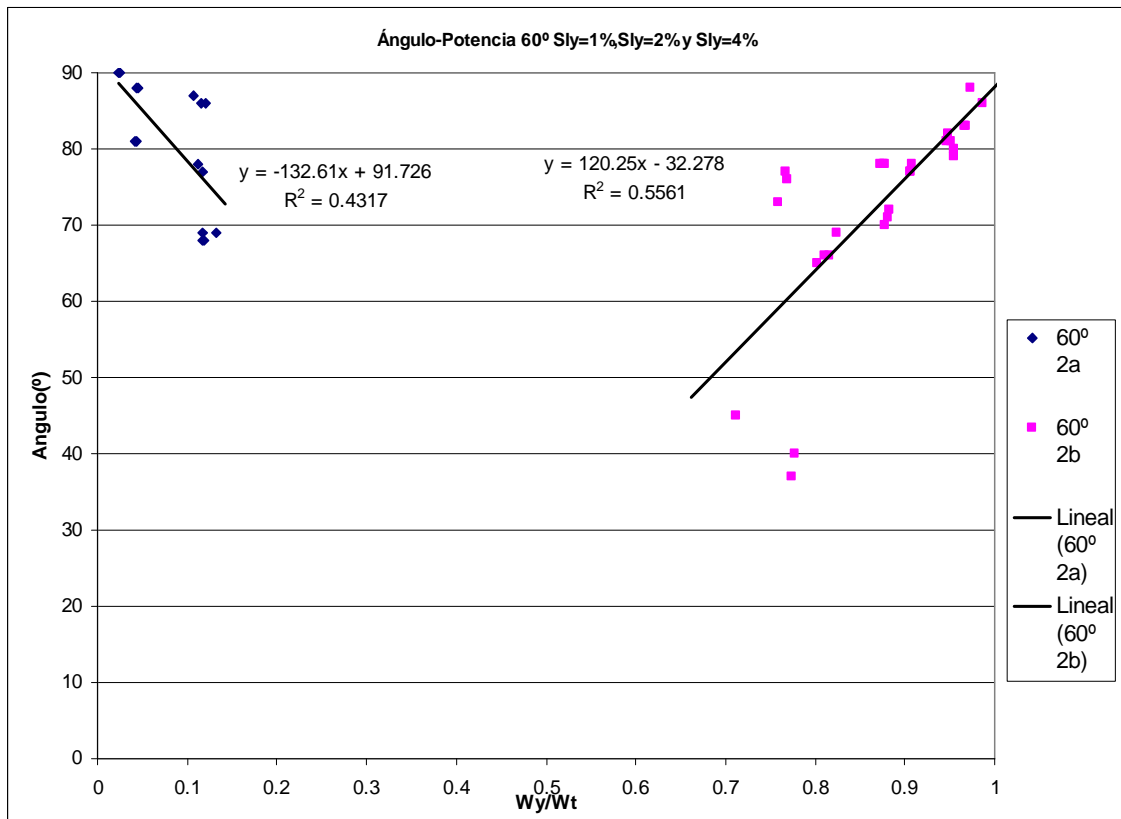


Figura 54: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “y”. Cruce de calles a 60° con bombeo (S_{lx}=1%-S_{ly}=1%, S_{lx}=1%-S_{ly}=2% y S_{lx}=1%-S_{ly}=4%)

En esta gráfica tenemos dos rectas con la misma pendiente y con valores de relaciones de potencia-ángulos muy parecida.

Para un cruce a 60° con bombeo no se especificará cada combinación de pendiente individualmente, como se hizo en el caso de un cruce a 90° con bombeo. Esta decisión se tomó, porque la problemática para un cruce de 60° con bombeo es la misma, los valores para la combinación S_{lx}=1%-S_{ly}=4% presentan una desviación respecto a los demás valores, por los motivos comentados anteriormente.

En esta gráfica podemos ver que a partir de relaciones de potencia pequeñas (alrededor de 0,13) pasamos de tener un resalto en el cruce con un ángulo importante (68°) a que no exista resalto en el cruce. Este fenómeno no implica que el resalto desaparezca, simplemente es imposible identificar al resalto con un ángulo. En puntos cercanos al umbral de cambio en el patrón de flujo, el resalto se desfigura, podemos comprobar las imágenes en el Anejo 1, 2 y 3. Este mismo fenómeno ocurre para las relaciones de potencia alrededor de 0,77. En la figura 54 comprobamos que el patrón tipo 2b tiene un valor mínimo del ángulo de resalto superior al tipo 2a (40°). Como se explicó en la figura 38, se debe a la existencia de una calle principal en la cual hemos favorecido el flujo, a partir de la geometría en el cruce.

En el Anejo 1, 2 y 3 podemos observar las tablas y las gráficas con: las relaciones de caudales de entrada y salida, la relación de potencia del flujo de entrada en “y” y la proporción de caudal de salida en “y”, y la relación entre el ángulo de inclinación del resalto y la proporción de potencia en la dirección “y”, para cada combinación de pendientes.

- Patrones de flujos para las combinaciones de pendientes: $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$ y $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=2\%$.

En este apartado se han intentado caracterizar los patrones de flujo para un ángulo del cruce de 60° con bombeo, trabajando con los valores obtenidos para las combinaciones pendientes: $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=2\%$ y $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$. A partir de las relaciones de caudales (54 casos generados de las dos combinaciones de pendientes) se han obtenido suficientes resultados para caracterizar los patrones de flujo de un cruce con un ángulo de 60° con bombeo. La siguiente figura presenta la relación de potencia del flujo de entrada en “y”, y la proporción de caudal de salida en “y”, así como, las líneas de tendencia para cada patrón de flujo.

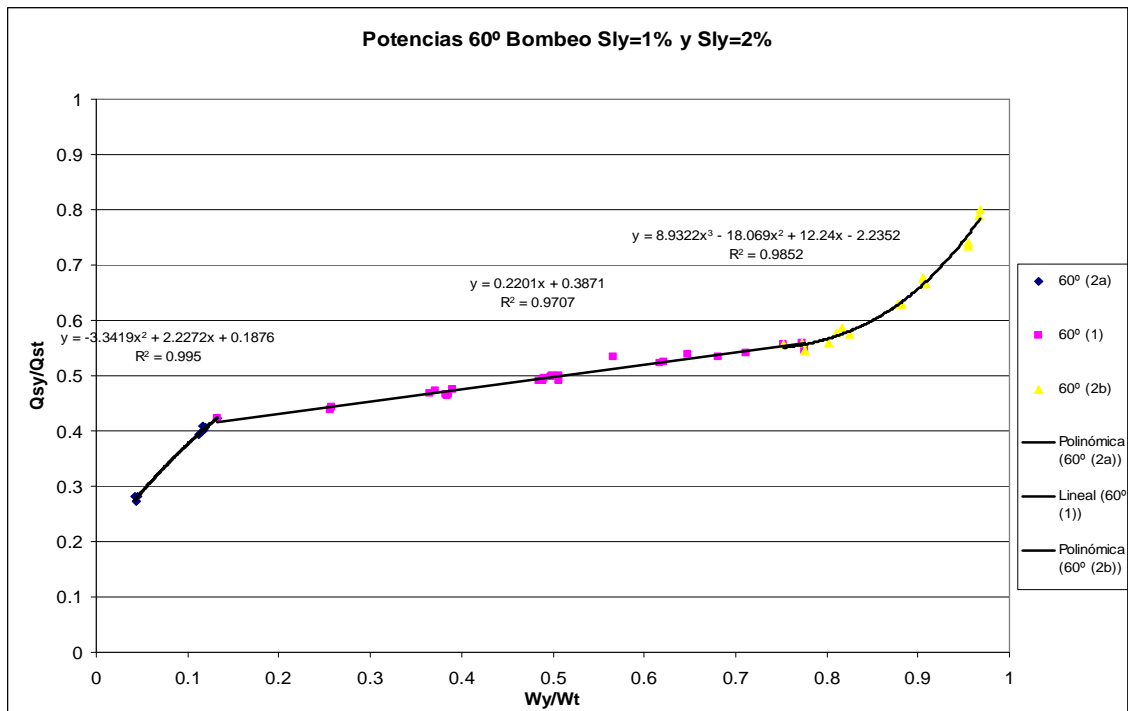


Figura 55: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “y” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Cruce de calles a 60° con bombeo ($S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$ y $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=2\%$)

En la figura 55 vemos representadas las líneas de tendencia para cada patrón de flujo. Los valores del patrón de flujo tipo 2a (color azul marino) ajustan con un polinomio de 2° grado, los valores del patrón de flujo tipo 2b (color amarillo) ajustan con un polinomio de 3° grado, en cambio los valores para el patrón de flujo tipo 1 (color magenta) ajustan con un polinomio de 1° grado. Volvemos a observar unos coef. de correlación altísimos, producto de una gran afinidad entre los valores de las dos combinaciones de pendientes. Este resultado será básico para poder afirmar, que no es fundamental en la relación de potencia del flujo de entrada en “y”, y la proporción de caudal de salida en “y”, la combinación de pendientes, aunque si y mucho, la geometría del cruce. Afirmación basada en los estudios anteriores, a partir de las figuras con los vectores de velocidad y el caso de un cruce a 90° sin bombeo.

En el anterior apartado (cruce de calles a 90° con bombeo) teníamos que el umbral entre flujos tipo 2a y tipo 1 se situaba sobre el 0,18. Podemos observar que la variación de los rangos de flujo, respecto al cruce de calles a 90° con bombeo, se ha reducido, ya que con una potencia de entrada (0,13) en la dirección “y”, el resalto ya no se produce en el cruce y el patrón de flujo cambia al tipo 1, esto último se puede comprobar en la siguiente tabla.

En la siguiente tabla tenemos un resumen de la figura anterior.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo $x=$ W_y/W_t	Función de ajuste	Coef. De correlación R2
1	Tipo 2b	0,04-0,13	$Q_{sx}/Q_t = -3.3419x^2 + 2.2272x + 0.1876$	0.995
2	Tipo 1	0,13-0,72	$Q_{sx}/Q_t = 0.2201x + 0.3871$	0.9707
3	Tipo 2a	0,72-0,96	$Q_{sx}/Q_t = 8.9322x^3 - 18.069x^2 + 12.24x - 2.2352$	0.9852

Tabla 22: Tabla resumen de la figura anterior. Cruce a 60° con bombeo ($Sl_x=1\%-Sl_y=1\%$ y $Sl_x=1\%-Sl_y=2\%$)

La siguiente figura presenta la relación entre el ángulo de inclinación del resalto, y la proporción de potencia en la dirección “y”.

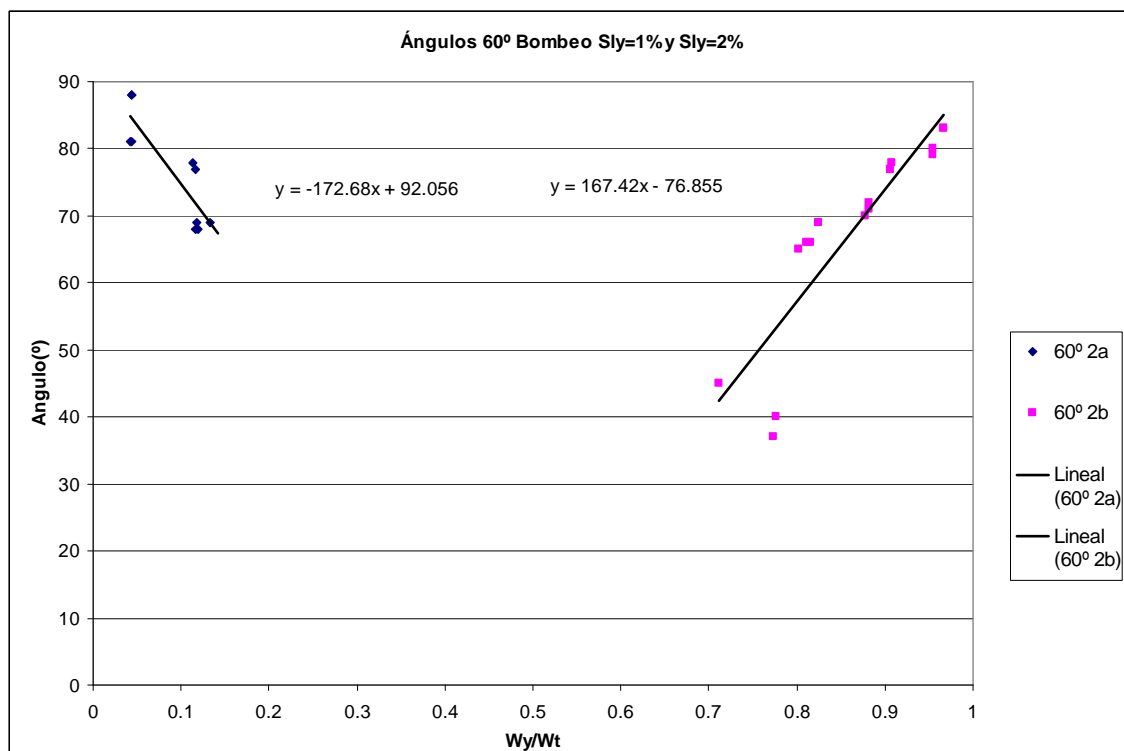


Figura 56: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “y”. Cruce de calles a 60° con bombeo ($Sl_x=1\%-Sl_y=1\%$ y $Sl_x=1\%-Sl_y=2\%$)

En esta gráfica tenemos dos rectas con una pendiente muy parecida, como teníamos en la figura 54, aunque en esta figura tenemos una líneas de tendencia con una pendiente mayor.

A partir de todas las gráficas analizadas: relación ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “y” (incluidas también las gráficas del cruce a 60° con bombeo, para cada combinación de pendiente por separado (Anejo 1,2 y 3)), podemos comprobar que a medida que aumenta la pendiente en “y” respecto la calle secundaria, la pendiente de estas gráficas disminuye y aumenta un poco cuando decrece el ángulo del cruce (se mantiene más o menos constante). También se demuestra que la pendiente de la recta para el flujo tipo 2a y 1 es similar, aunque no sus valores, ya que como hemos dicho existe una dirección preferente para el flujo.

7.2.3 Cruce de calles a 45° con bombeo.

- Patrones de flujos para las combinaciones de pendientes: $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$, $S_{lx}=1\%$ ($S_{ly}=2\%$) y $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=4\%$

En este apartado se han intentado caracterizar los patrones de flujo para un ángulo del cruce de 60° con bombeo, trabajando con los valores obtenidos para las combinaciones pendientes: $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=2\%$, $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=2\%$ y $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=4\%$.

A partir de las relaciones de caudales (79 casos generados de las tres combinaciones de pendientes) se han obtenido suficientes resultados para caracterizar los patrones de flujo de un cruce con un ángulo de 45° con bombeo. La siguiente figura presenta la relación de potencia del flujo de entrada en “y”, y la proporción de caudal de salida en “y”, así como, las líneas de tendencia para cada patrón de flujo.

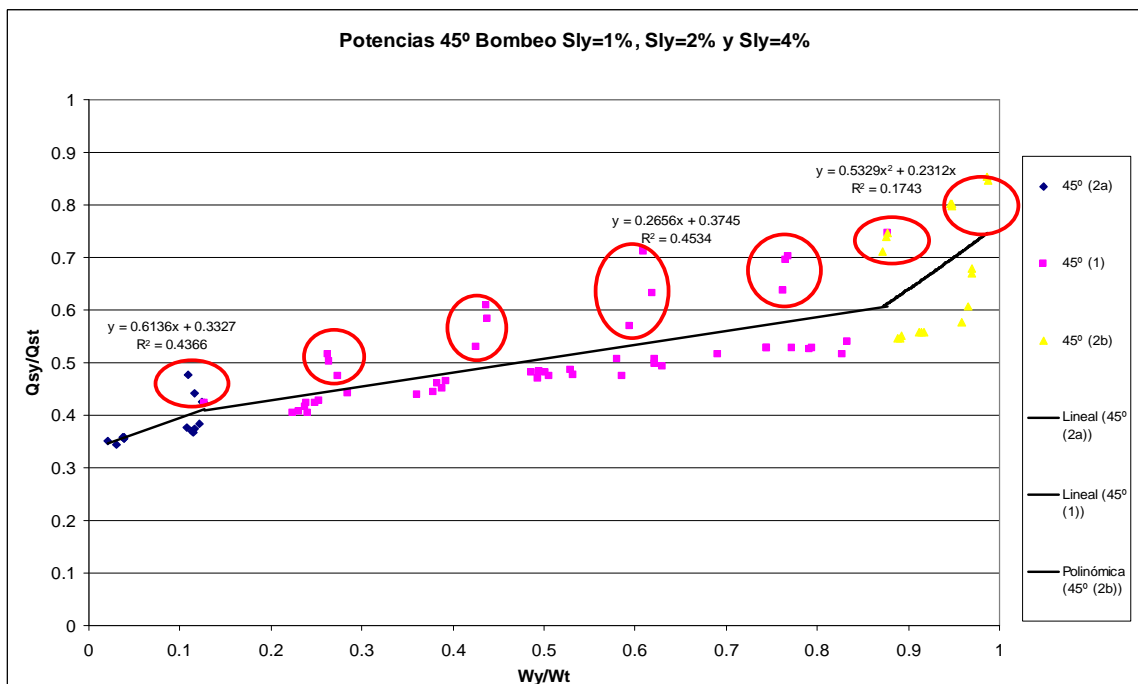


Figura 57: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “y” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Cruce de calles a 45° con bombeo ($S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$, $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=2\%$ y $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=4\%$)

En la figura 57 se presentan las líneas de tendencia para cada patrón de flujo. Todos estos valores ajustan con un polinomio de 1° grado para las curvas patrón tipo 1 y 2. Como se ha presentado en los anteriores casos tenemos unos coef. de correlación bajísimos. Los valores introducidos que pertenecen a la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=4\%$, no “parecen” que guarden relación con los valores de las otras dos combinaciones de pendientes, provocado por el cambio de geometría.

También podemos observar la variación de los rangos de flujo, donde con una potencia de entrada (0,12) en la dirección “y”, el resalto ya no se produce en el cruce y el patrón de flujo cambia al tipo 1, esto último se puede comprobar en la siguiente tabla. En la siguiente tabla tenemos un resumen de la figura anterior.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo $x= W_y/W_t$	Función de ajuste	Coef. De correlación R2
1	Tipo 2b	0,04-0,12	$Q_{sy}/Q_t=0.6136x + 0.3327$	0.4366
2	Tipo 1	0,12-0,8	$Q_{sy}/Q_t=0.2656x + 0.3745$	0.4534
3	Tipo 2a	0,8-0,97	$Q_{sy}/Q_t= 0.5329x^2 + 0.2312x$	0.1743

Tabla 23: Tabla resumen. Cruce a 45° con bombeo ($S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$, $S_{lx}=1\%-S_{ly}=2\%$ y $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$)

La siguiente figura presenta la relación entre el ángulo de inclinación del resalto, y la proporción de potencia en la dirección “y”.

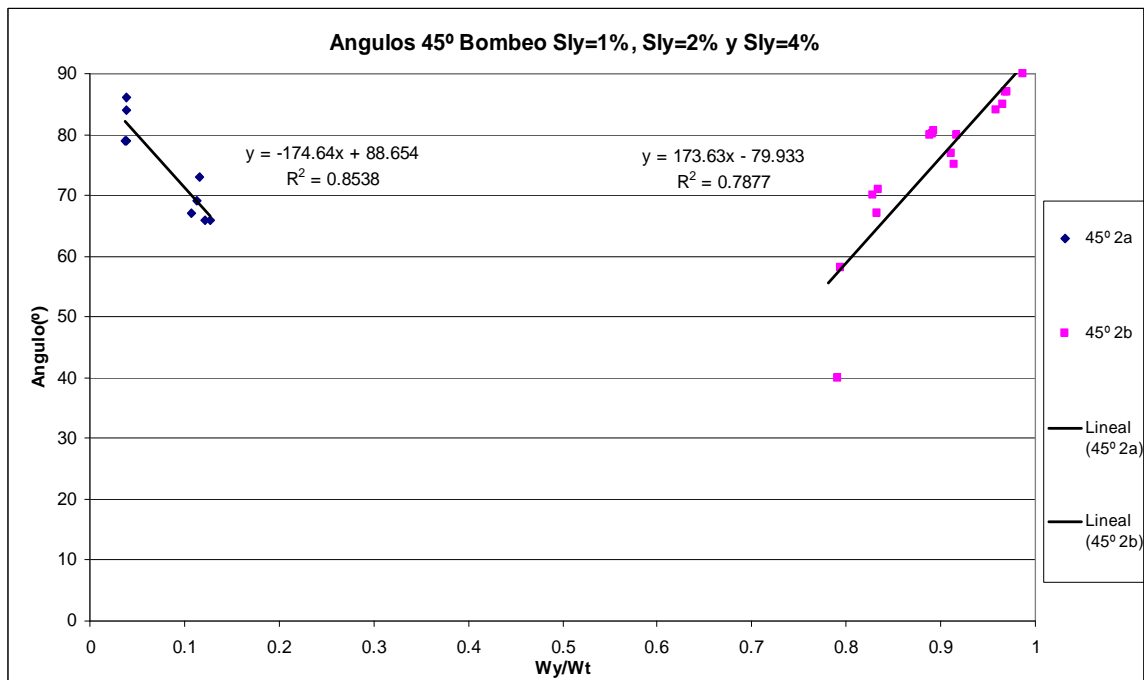


Figura 58: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “y”. Cruce de calles a 45° con bombeo ($S_{lx}=1\%-S_{ly}=1\%$, $S_{lx}=1\%-S_{ly}=2\%$ y $S_{lx}=1\%-S_{ly}=4\%$)

En la gráfica tenemos otra vez pendientes en las líneas de tendencia muy parecidas y coef. de correlación altos.

En el Anejo 1, 2 y 3 podemos observar las tablas y las gráficas con: las relaciones de caudales de entrada y salida, la relación de potencia del flujo de entrada en “y” y la proporción de caudal de salida en “y”, y la relación entre el ángulo de inclinación del resalto y la proporción de potencia en la dirección “y”, para cada combinación de pendientes.

- Patrones de flujos para las combinaciones de pendientes: $S_{lx}=1\% - S_{ly}=1\%$ y $S_{lx}=1\% - S_{ly}=2\%$.

En este apartado se han intentado caracterizar los patrones de flujo para un ángulo del cruce de 60° con bombeo, trabajando con los valores obtenidos para las combinaciones pendientes: $S_{lx}=1\%-S_{ly}=2\%$ y $S_{lx}=1\%-S_{ly}=2\%$.

A partir de las relaciones de caudales (54 casos generados de las dos combinaciones de pendientes) se han obtenido suficientes resultados para caracterizar los patrones de flujo de un cruce con un ángulo de 45° con bombeo.

La siguiente figura presenta la relación de potencia del flujo de entrada en “y”, y la proporción de caudal de salida en “y”, así como, las líneas de tendencia para cada patrón de flujo.

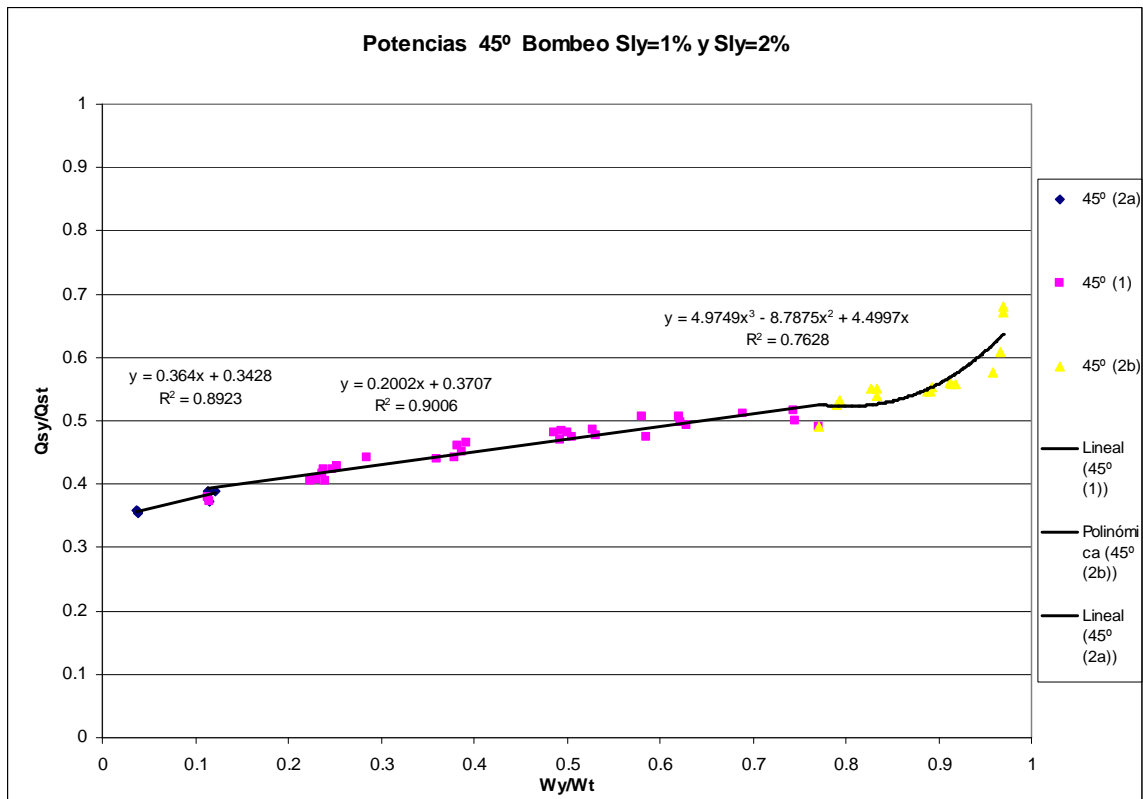


Figura 59: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “y” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Cruce de calles a 45° con bombeo (Slx=1%-Sly=1% y Slx=1%-Sly=2%)

En la figura 59 vemos representadas las líneas de tendencia para cada patrón de flujo. Los valores del patrón de flujo tipo 2a (color azul marino) ajustan con un polinomio de 1° grado, así como, los valores del patrón de flujo tipo 1 (color magenta), en cambio los valores para el patrón de flujo tipo 2b (color amarillo) ajustan con un polinomio de 3° grado. Volvemos a observar unos coef. de correlación altos, aunque con más dispersión que en el caso 60° con bombeo. Podemos llegar a la conclusión, que a medida que decrece el ángulo entre los cruces, también decrece el rango del flujo para los diferentes patrones del flujo. En la siguiente tabla tenemos un resumen de la figura anterior.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo $x = W_y/W_t$	Función de ajuste	Coef. De correlación R2
1	Tipo 2b	0,04-0,12	$Q_{sy}/Q_t = 0.364x + 0.3428$	0.8923
2	Tipo 1	0,12-0,8	$Q_{sy}/Q_t = 0.2002x + 0.3707$	0.9006
3	Tipo 2a	0,8-0,97	$Q_{sy}/Q_t = 4.9749x^3 - 8.7875x^2 + 4.4997x$	0.7628

Tabla 24: Tabla resumen de la figura anterior. Cruce a 45° con bombeo (Slx=1%-Sly=1% y Slx=1%-Sly=2%)

La siguiente figura presenta la relación entre el ángulo de inclinación del resalto, y la proporción de potencia en la dirección “y”.

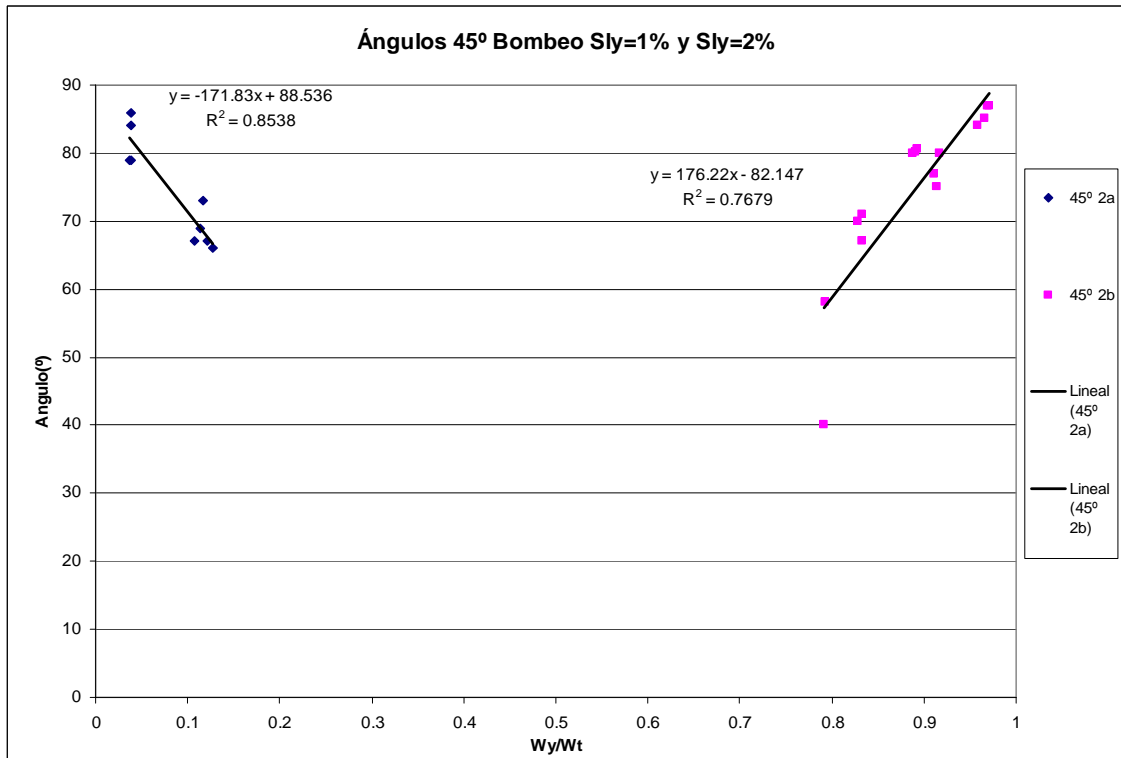


Figura 60: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “y”. Cruce de calles a 45° con bombeo (Slx=1%-Sly=1% y Slx=1%-Sly=2%)

Tenemos unas líneas de tendencia con pendientes muy parecidas, aunque para relaciones de $W_x/W_t=0,1$ (o $W_y/W_t=0,9$) tenemos $\alpha_x= 68^\circ$, en cambio para $W_x/W_t=0,9$ (o $W_y/W_t=0,1$) tenemos $\alpha_y= 80^\circ$. Esta situación se produce, como hemos comentada anteriormente, porque la geometría es favorable para la calle principal.

En esta gráfica podemos ver que a partir de relaciones de potencia pequeñas (alrededor de 0,12) pasamos de tener un resalto en el cruce con un ángulo importante (68°) a que no exista resalto en el cruce. Podemos comprobar que sigue un comportamiento parecido al cruce de calles a 60° con bombeo.

Según los resultados de esta gráfica podemos seguir aceptando la explicación que se ha dado sobre las pendientes de estas rectas. A partir de todas las gráficas analizadas: relación ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “y” (incluidas también las del cruce a 45° con bombeo, para cada combinación de pendiente por separado (Anejo 1,2 y 3)); podemos comprobar que a medida que aumenta la pendiente en “y” respecto la calle secundaria, la pendiente de estas gráficas disminuye y se mantiene “relativamente” constante (aumenta un poco) para diferentes ángulos del cruce de calle.

7.2.3 Cruce de calles a 30° con bombeo.

- Patrones de flujos para las combinaciones de pendientes: $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=1\%$, $S_{Ix}=1\%$ ($S_{Iy})=2\%$ y $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=4\%$

En este apartado se han intentado caracterizar los patrones de flujo para un ángulo del cruce de 60° con bombeo, trabajando con los valores obtenidos para las combinaciones pendientes: $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=2\%$, $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=2\%$ y $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=4\%$.

A partir de las relaciones de caudales (79 casos generados de las tres combinaciones de pendientes) se han obtenido suficientes resultados para caracterizar los patrones de flujo de un cruce con un ángulo de 30° con bombeo.

La siguiente figura presenta la relación de potencia del flujo de entrada en “y”, y la proporción de caudal de salida en “y”, así como, las líneas de tendencia para cada patrón de flujo.

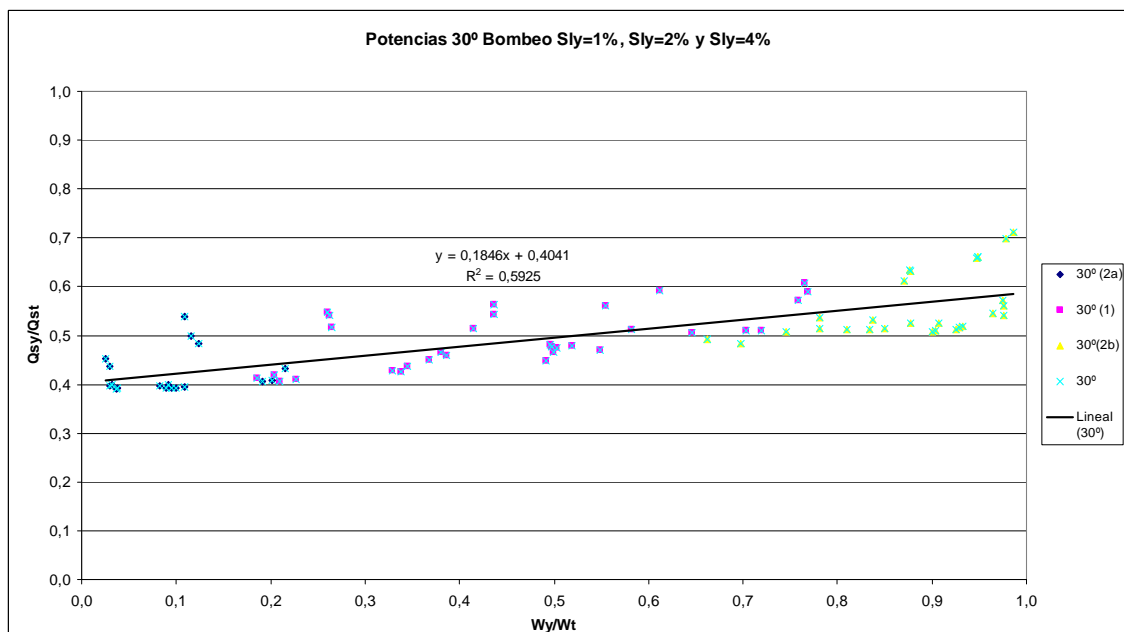


Figura 61: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “y” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Cruce de calles a 30° con bombeo ($S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=1\%$, $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=2\%$ y $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=4\%$)

Aunque según la gráfica: relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “y”, existen tres zonas con un comportamiento del flujo diferente, los valores se ajustaban mejor a una única curva que a tres curvas, una para cada patrón de flujo. Para los valores de la combinación de pendiente $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=1\%$, si que existen tres zonas diferenciadas, pero para la combinación de pendientes $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=4\%$ y $S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=2\%$, no hay resaltos en el cruce, como se puede comprobar en el Anejo 2 y 3. En el anejo 1 ($S_{Ix}=1\%$ - $S_{Iy}=1\%$) podemos observar un patrón de flujo dominante (tipo1), ya que con una potencia de entrada (0,099) en la dirección “y”, el resalto ya no se produce en el cruce y el patrón de flujo cambia al tipo 1. Por este motivo, podemos tener valores con ángulos de resalto en el cruce, aunque tengamos una única curva para representar todos los patrones del flujo. En la siguiente tabla tenemos un breve resumen de la figura anterior.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo $x= W_y/W_t$	Función de ajuste	Coef. De correlación R2
1	Tipo 2b			
2	Tipo 1	0,04-0,97	$Q_{sx}/Q_t=0.1846x + 0.4041$	0.5925
3	Tipo 2a			

Tabla 25: Tabla resumen de la figura anterior. Cruce a 30° con bombeo (Slx=1%-Sly=1%, Slx=1%-Sly=2% y Slx=1%-Sly=4%)

La siguiente figura presenta la relación entre el ángulo de inclinación del resalto, y la proporción de potencia en la dirección “y”.

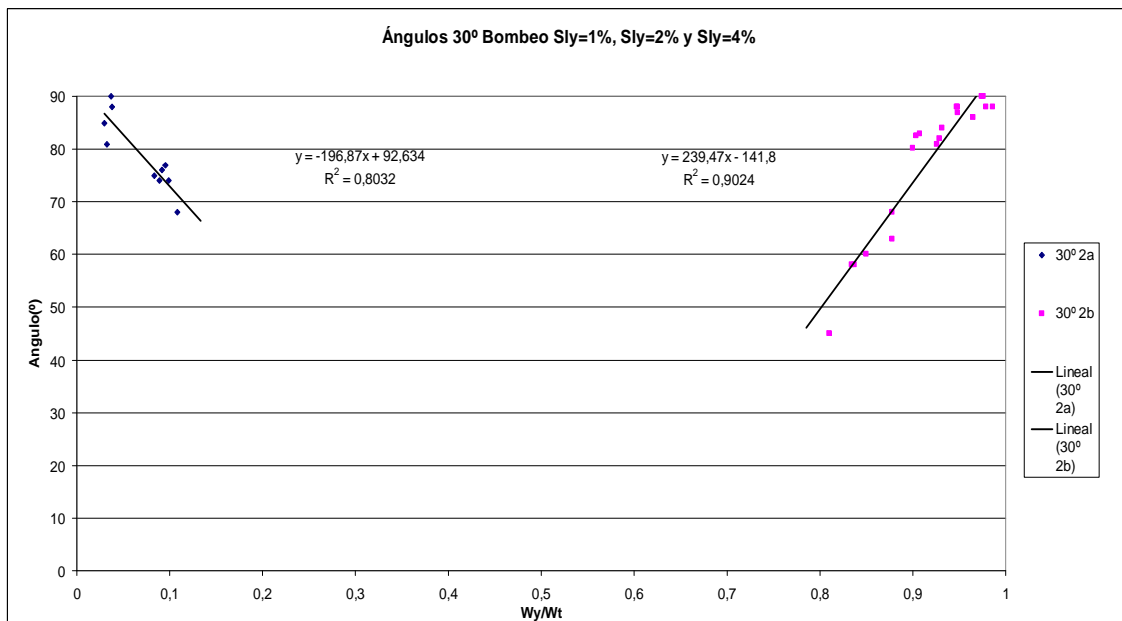


Figura 62: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “y”. Cruce de calles a 30° con bombeo (Slx=1%-Sly=1%, Slx=1%-Sly=2% y Slx=1%-Sly=4%)

En esta gráfica podemos ver que a partir de relaciones de potencia pequeñas (alrededor de 0,1) pasamos de tener un resalto en el cruce con un ángulo importante (68°) a que no exista resalto en el cruce. Al disminuir el ángulo del cruce también disminuye el rango del flujo tipo 2a.

En el Anejo 1, 2 y 3 podemos observar las tablas y las gráficas con: las relaciones de caudales de entrada y salida, la relación de potencia del flujo de entrada en “y” y la proporción de caudal de salida en “y”, y la relación entre el ángulo de inclinación del resalto y la proporción de potencia en la dirección “y”, para cada combinación de pendientes.

- Patrones de flujos para las combinaciones de pendientes: $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$ y $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=2\%$.

En este apartado se han intentado caracterizar los patrones de flujo para un ángulo del cruce de 60° con bombeo, trabajando con los valores obtenidos para las combinaciones pendientes: $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=2\%$ y $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=2\%$.

A partir de las relaciones de caudales (54 casos generados de las dos combinaciones de pendientes) se han obtenido suficientes resultados para caracterizar los patrones de flujo de un cruce con un ángulo de 30° con bombeo.

La siguiente figura presenta la relación de potencia del flujo de entrada en “y”, y la proporción de caudal de salida en “y”, así como, las líneas de tendencia para cada patrón de flujo.

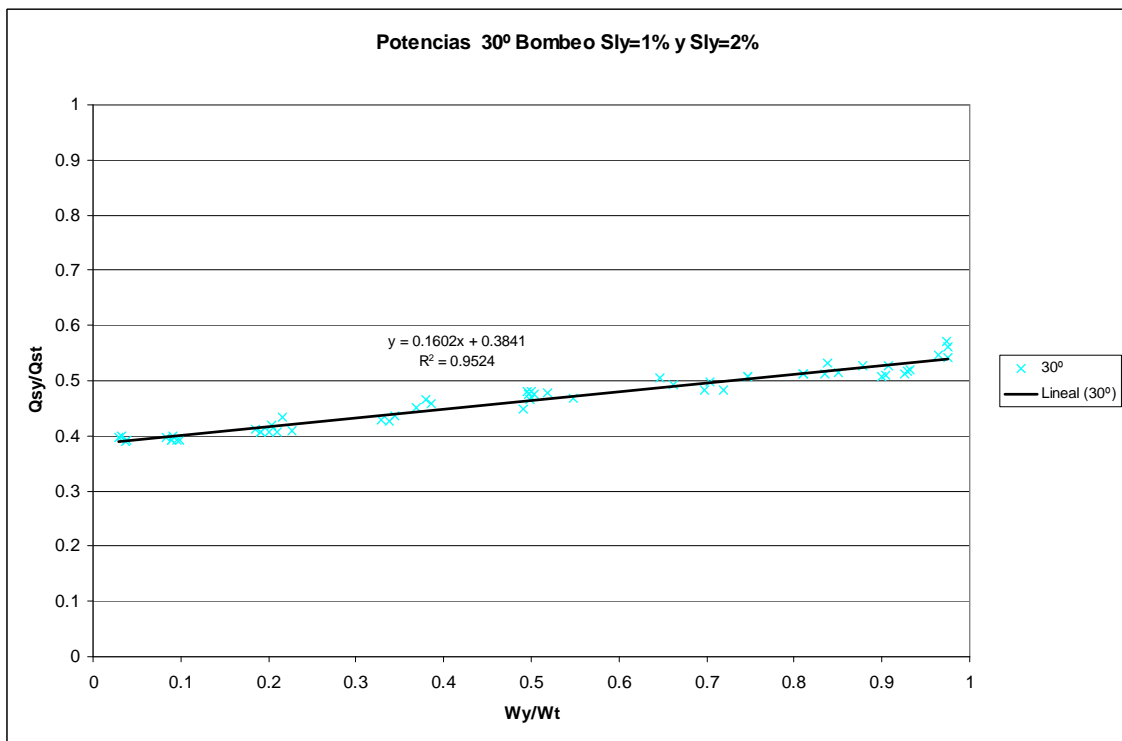


Figura 63: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección “y” y al proporción de caudal de salida en la misma dirección. Cruce de calles a 30° con bombeo ($S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$ y $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=2\%$)

Podemos ver tenemos una línea de tendencia que ajusta con un polinomio de 1° grado para los diferentes patrones de flujo. Volvemos a observar unos coef. de correlación muy alto, como en con los casos de 60° y 90° con bombeo. Podemos llegar a la conclusión, que a medida que decrece el ángulo entre los cruces también decrece el rango de la relación de caudales de salida. En la siguiente figura tenemos un breve resumen de la figura anterior.

Zona	Patrón de flujo	Rango del flujo x= Wy/Wt	Función de ajuste	Coef. De correlación R2
1	Tipo 2b			
2	Tipo 1	0,42-0,66	$Q_{sx}/Q_t=0.1602x + 0.3841$	0.9524
3	Tipo 2a			

Tabla 26: Tabla resumen de la figura anterior. Cruce a 30° con bombeo (Slx=1%-Sly=1% y Slx=1%-Sly=2%)

La siguiente figura presenta la relación entre el ángulo de inclinación del resalto, y la proporción de potencia en la dirección “y”.

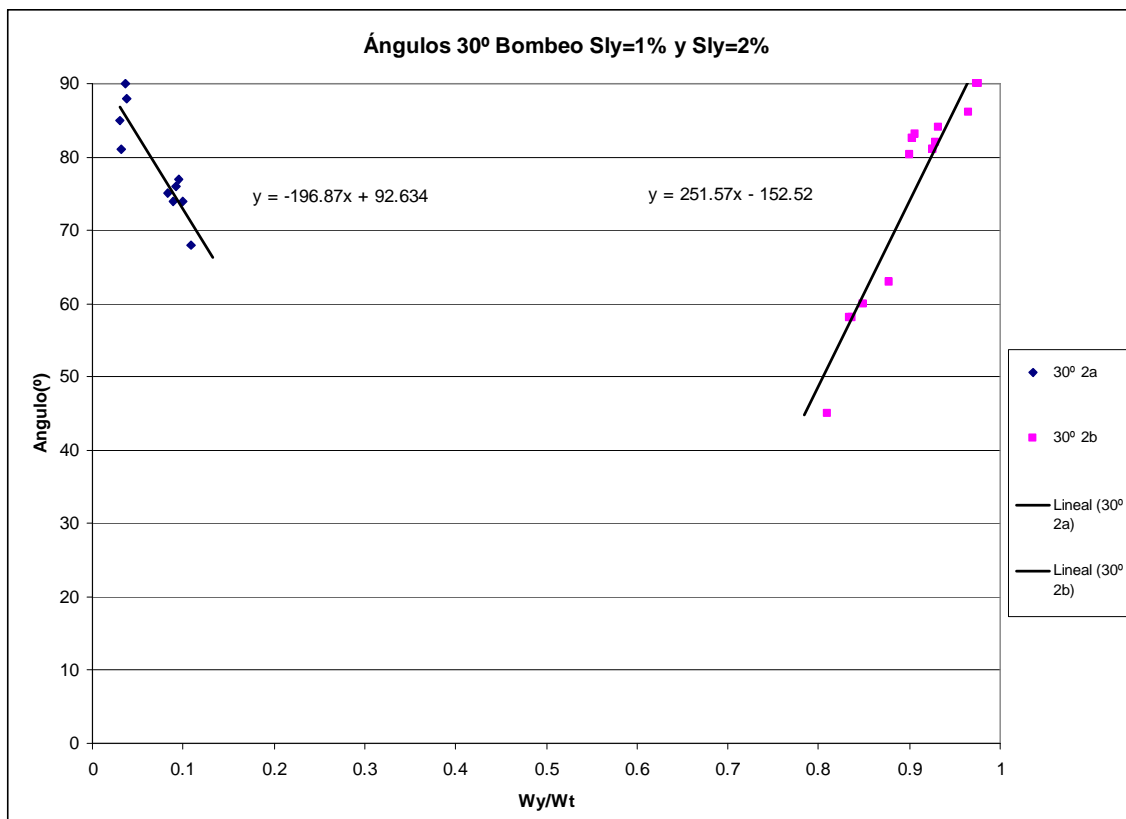


Figura 64: Relación entre el ángulo de inclinación del resalto dentro del cruce y la proporción de potencia en la dirección “y”. Cruce de calles a 30° con bombeo (Slx=1%-Sly=1% y Slx=1%-Sly=2%)

Aunque tengamos pendientes diferentes para las líneas de tendencia, la dispersión no es tan grande como para decir que la relación de ángulos-potencia tiene crecimientos diferentes. Es decir, es cierto que a medida que aumenta la pendiente en “y” respecto a la calle secundaria, la pendiente de estas gráficas disminuye, pero en el caso de un cruce a 30° con bombeo no es cierto que se mantenga constante (con una ligera tendencia a aumentar), la pendiente de las rectas de la gráfica, sino que aumenta mucho en relación a las gráficas de los otros ángulos de cruces de calle.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta tesina se ha estudiado el modelo físico/ numérico del flujo en un cruce de calles, para los diferentes ángulos de cruce (90° , 60° , 45° y 30°), con diferentes combinaciones de pendientes ($S_{Ix}=1\%-S_{Iy}=1\%$, $S_{Ix}=1\%-S_{Iy}=2\%$ y $S_{Ix}=1\%-S_{Iy}=4\%$), y todas ellas con bombeo transversal.

El objetivo ha sido comprobar la relación entre los valores de reparto de caudal de salida (Q_{sy}/Q_{total}), en función de la proporción de potencia del caudal de entrada (W_{ey}/W_{total}). Así como, la relación entre los ángulos del resalto en el cruce ($\alpha_{principal} "y" - \alpha_{secundaria} "x" "$), en función de la proporción de potencia del caudal de entrada.

- Podemos representar en una gráfica los parámetros mencionados (reparto de caudales de salida- proporción de potencia del caudal de entrada) para cada ángulo de cruce de calles, y para las diferentes combinaciones de pendientes.

Todos los valores representados en cada gráfica (Nania et al, 1999) se dividen en tres familias de datos, y cada familia se puede representar con una curva (línea de tendencia). Como se ha explicado en el capítulo 3, existen tres familias o patrones de flujo diferentes, dependiendo de la proporción de la potencia de entrada, es decir, cada familia se moverá en un rango de potencias.

En la siguiente figura, se muestran los tipos de patrones del flujo en función de la posición del resalto. Si los resaltos se producen en las calles, tendremos un patrón del tipo I, si por lo contrario, un resalto se produce en la calle y el otro en el cruce tendremos un patrón del tipo II. Si el resalto en el cruce está producido por la calle principal "y" (es decir, W_{ey}/W_{total} grandes), tendremos el tipo IIa, y si el resalto en el cruce está producido por la calle secundaria "x" (es decir, W_{ey}/W_{total} pequeños), tendremos el tipo IIb. Por último decir, que cada curva que representa una familia de valores es un curva patrón.

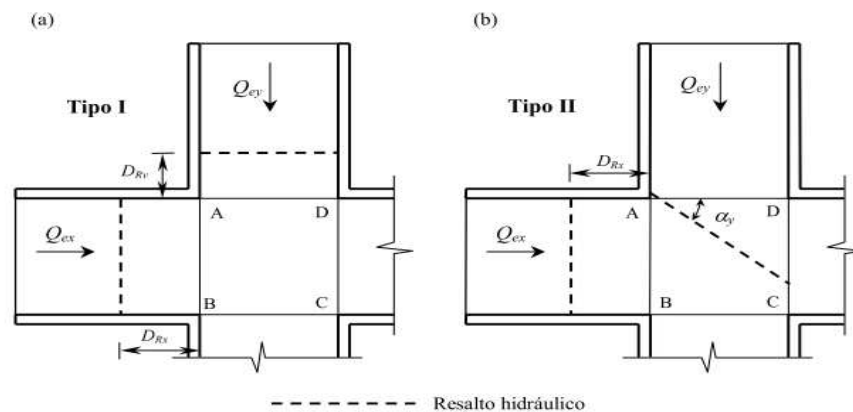


Figura 65: Esquema de los patrones de flujo: Tipo 1 y Tipo2 (Nania et. al.1999)

- También se ha podido representar con líneas de tendencia, los ángulos del resalto que se forman en el cruce en función de la proporción de potencia del caudal de entrada.
- Se ha comprobado el buen funcionamiento de los programas GID y CARPA, para modelar numéricamente cruces de calles. A partir de los valores (calados y caudales) del capítulo 6, donde se compararon los resultados obtenidos en un dispositivo experimental (cruce en un plano horizontal, con calles ortogonales y sin bombeo) con los resultados numéricos de GID y CARPA, se pudo evaluar la pequeña variación entre los resultados, y demostrar que son buenos modelos. Las curvas patrón obtenidas para los dos modelos (experimental y numérico) tienen valores similares, por lo tanto, confirman la validez de los resultados (calados y caudales).

El elevado coeficiente de correlación que presentan las curvas patrón en el caso de un cruce a 90° sin bombeo (capítulo 6), muestra la estabilidad del modelo numérico.

- En la gráfica (Q_{sy}/Q_{total} - W_{ey}/W_{total}) para un cruce a 90° con bombeo (figura 37), se comprueba la existencia de tres familias de valores diferenciados. Es decir, podemos tener el resalto en cualquier posición (en el cruce o en las calles). También comprobamos que, para potencias de caudal altas, si incrementamos su valor, la proporción de caudal de salida aumenta considerablemente, en cambio para potencias de caudal bajas no existe ese crecimiento. Por lo tanto, al dar preferencia a la calle principal, a partir de la geometría, modificamos claramente el comportamiento del flujo. Ésta conclusión se puede justificar al comparar esta gráfica, con la obtenida para un cruce a 90° sin bombeo.

Los ángulos del resalto en el cruce (figura 38) dependerán si nos fijamos en α_x o en α_y . Si tenemos en cuenta los resaltos producidos en el cruce por la calle secundaria (α_x), podemos llegar a tener ángulos máximos de 20°. Mientras que, los ángulos producidos por la principal (α_y) pueden llegar a 90°. El rango de potencias para el flujo tipo IIb es mucho más reducido que en el tipo IIa. Como hemos dicho, la geometría tiene un papel fundamental en el comportamiento del flujo.

- En la gráfica (Q_{sy}/Q_{total} - W_{ey}/W_{total}) para un cruce a 60° con bombeo (figura 55), hemos obtenido también 3 patrones de flujo diferentes como en los dos puntos anteriores. Aunque en este caso, los valores del patrón tipo II se mueven en un rango de potencias más pequeño, que los obtenidos para cruces a 90° con bombeo. Podemos ver en la gráfica, como se ha reducido el rango de valores para Q_{sy}/Q_{total} , respecto a un cruce a 90° con bombeo. Esta tendencia se comprueba, en la disminución de las pendientes de los polinomios que constituyen las líneas de tendencia. Para el flujo tipo I conservamos la recta como línea de tendencia, pero en los flujos tipo II se han reducido los grados que están elevados los polinomios.

Los ángulos del resalto en el cruce (figura 56), también dependerán si nos fijamos en el ángulo $\alpha_{secundaria}$ "x" o en el $\alpha_{principal}$ "y". Mientras los ángulos máximos son muy parecidos, el rango de potencias en el que se mueve $\alpha_{secundaria}$ "x" es inferior al que tenemos para $\alpha_{principal}$ "y". Se puede comprobar como $\alpha_{secundaria}$ "x" se mueve entre 85°-65°, en cambio $\alpha_{principal}$ "y" se mueve entre 58°-88°. Existen diferencias entre los dos tipos de ángulos, aunque estas diferencias son más importantes para un cruce a 90° con bombeo.

- En la gráfica (Q_{sy}/Q_{total} - W_{ey}/W_{total}) para un cruce a 45° con bombeo (figura 59), hemos obtenido 3 patrones de flujo diferentes como en los tres apartados anteriores. Podemos observar, como los patrones de flujo tipo II se mueven en unos rangos de potencias menores que los obtenidos en los cruces a 90° con bombeo y 60° con bombeo. También podemos observar, como el máximo caudal de salida es menor que los obtenidos en los otros tipos de cruces. Esto se debe a la reducción del ángulo del cruce. Cada vez, necesitamos proporciones de potencia de caudal más bajas o más altas para crear un resalto en el cruce.
Los ángulos del resalto (figura 60), tanto en magnitud como en rango de potencia, son similares a los obtenidos en un cruce a 60° con bombeo.
- En la gráfica (Q_{sy}/Q_{total} - W_{ey}/W_{total}) para un cruce a 30° con bombeo (figura 63), hemos obtenido una única familia de valores para las combinaciones de pendiente $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=2\%$ y $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=4\%$, en cambio tenemos 3 patrones de flujo para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$. En todos los casos, los patrones de flujo se pueden representar con una recta, ya que tenemos un flujo tipo I. El rango de valores que alcanza Q_{sy}/Q_t es de 0,4 a 0,6, por lo tanto, inferior al obtenido en los cruces a 90° con bombeo, 60° con bombeo y 45° con bombeo. Es decir, como máximo podemos obtener proporciones de caudales de salida de 0,6, aunque apliquemos una potencia de entrada de 0,96.
Los ángulos del resalto (figura 64) varían entre 68° y 90° para el patrón de flujo tipo IIb, y de 45° a 90° para el patrón de flujo tipo IIa. Parece que tengamos valores parecidos a los de un cruce a 60° con bombeo y 45° con bombeo, pero en este caso, la pendiente de las líneas de tendencia para los patrones son muy diferentes.
- Como se ha comprobado en el capítulo 7, el comportamiento del flujo para un ángulo de cruce cualquiera, es muy parecido en las combinaciones de pendientes $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=1\%$ y $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=2\%$. En cambio, para la combinación de pendientes $S_{lx}=1\%$ - $S_{ly}=4\%$, el comportamiento del flujo es muy diferente al que tenemos en las otras dos combinaciones. En un principio, se pensó que esta variación era producto únicamente, de haber aumentado la pendiente en la calle principal respecto a la secundaria. Después de analizar el problema en el apartado 7.2.2 y la figura 23 (cruce a 90° sin bombeo), se consideró la posibilidad que el cambio en el comportamiento del flujo, también dependía en gran medida al trato preferente que se había dado al flujo en la calle principal. Manteniendo en el cruce, la pendiente longitudinal y el bombeo de ésta.
- La geometría de las calles, especialmente en los cruces, es básico en el comportamiento del flujo; sobretodo cuando la calle secundaria (geometría desfavorable al flujo) tiene valores de potencia de caudal bajos (como hemos visto en el apartado 7.2.2). La variación de los caudales de salida puede llegar a un 10%, si tenemos calles con diferencias importantes entre sus pendientes y con una potencia alta en la calle secundaria. En cambio puede variar un 40%, si tenemos calles con diferencias importantes entre sus pendientes y con una potencia baja en la calle secundaria.

- Aunque es difícil cuantificar, los ángulos del resalto para proporciones de potencia próximos al límite entre patrones de flujo. Se han podido establecer los ángulos del resalto, y los rangos de potencia para diferentes ángulos del cruce. También comentar, que se ha obtenido la misma dispersión de resultados para la combinación de pendientes $S_{1x}=1\%$ - $S_{1y}=4\%$, que la obtenida en las gráficas de reparto de caudal de salida en función de la proporción de potencia del caudal de entrada. En cruces de calles con ángulos inferiores a 90° con bombeo, es imposible establecer ángulos de resalto inferiores a 45° , y en cruces de calle con ángulos de 90° con bombeo, es imposible establecer un α_x superior a 20° .

- Futuros desarrollos

Para estudios posteriores que sigan la línea de esta tesina, deberían tener en cuenta:

- Estudiar el comportamiento hidráulico de un cruce de calles para un tipo de régimen lento, no únicamente en régimen rápido como ha sido objeto de esta tesina.
- La geometría del cruce es un factor muy importante, por este motivo deberíamos comprobar el comportamiento del flujo para un cruce horizontal, donde no se da preferencia a ninguna dirección del flujo. Y de esta manera poder asegurar, que las curvas de los patrones del flujo no dependen de la pendiente de la calle.
- Debido que en el cruce la geometría no es simétrica (solución adoptada en esta tesina), se debería repetir el estudio para diferentes pendientes en la calle “secundaria”, ya que la única calle que modifica su pendiente es la principal.
- En posteriores tesinas se debería conocer el comportamiento del flujo para pendientes longitudinales superiores al 4%.

CAPÍTULO 9

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bladé, E.; Corestein, G.(2007), “Manual del Usuario del programa CARPA”. Grup Flumen, E.T.S.E.C.C.P.B., U.P.C.

Gómez, M. (1992), “Análisis hidráulico de las redes de drenaje urbano”. En: inundaciones y redes de drenaje urbano, J.Dolz, M. Gómez, J.P.Marín (editores), Monografías del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos No.10, Madrid,pp.59-78.

Kraemer, C.; y otros (2003), “Ingeniería de carreteras. Volumen 1”. Ed Editorial Mc Graw Hill.

López, L. (1997), “Manual de Hidráulica”. Publicaciones de la Universidad de Alicante.

Massalle, F.; Miró, J.R. (2006) “Apuntes de caminos”. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio, E.T.S.E.C.C.P.B., U.P.C.

Mignot, E , Riviere, N , Perkins, R y Paquier (2008), “Flow Patterns in a Four-Branch Junction with Supercritical Flow”. Journal of Hydraulic Engineering, nº6, pp.701-713.

Ministerio de Fomento. Normativa. (2003), “Instrucción de carreteras (Norma 3.1-IC)”. Centro de Publicaciones. Ministerio de Fomento.

Nania, L. (1999) “Metodología numérico-experimental para el análisis de riesgo asociado a la escorrentia pluvial en una red de calle”. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, E.T.S.E.C.C.P.B., U.P.C.

Ribó, R.; Pasenau de Riera, M.; Escolano, Tercero, E.; Suit, Pérez, Ronda, J.; Coll, Sans, A.; Melendo, Ribera, A.; Gonzalez, Horca, S. (2008), “User Manual GID v.9”. International Center for Numerical Methods in Engineering, U.P.C., Barcelona, Spain.

Temez, P., J.R. (1992), “Control del desarrollo urbano en las zonas inundables”. En: inundaciones y redes de drenaje urbano, J.Dolz, M. Gómez, J.P.Martín (editores), Monografías del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos No.10, Madrid,pp.105-115.

Sanchez, M.; Bladé, E.; Puertas, J. (2005), “Hidráulica”. Edicions U.P.C.

Streeter, V.L.; Wylie, B.E. (1998), “Mecánica de los fluidos”. Editorial Mc Garw Hill.