

### 3. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el dispositivo experimental que se usó para realizar la campaña de ensayos.

Se utilizó un dispositivo experimental ya existente al que se le realizó un cambio en los anchos de calles. Está compuesto por dos canales que se cruzan y que simulan un cruce de calles simplificado. Fue construido en el laboratorio de modelos reducidos del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la E. T .S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de Catalunya.

#### 3.2 DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE ORIGEN

Como se describió en el punto 2, el cruce de calles está definido por el ancho, la sección transversal, la pendiente, el ángulo en planta de las calles que lo constituyen y por la existencia o no de chaflanes en las esquinas. Como primera simplificación geométrica se supondrá que no existen chaflanes. Otra simplificación que se tendrá en cuenta será considerar que la sección transversal de cada calle es la misma en toda su longitud y además es rectangular, para situaciones en las que por ejemplo la acera y la calzada posean la misma cota, la calle tenga un bordillo alto en una calle en la que no haya bombeo, etc... Esta asunción se basa en el supuesto de que la diferencia de cotas entre acera y calzada sea despreciable con respecto al calado de la escorrentía en la calle, suposición que no se cumplirá en muchos de los casos, pero que en principio facilitará en gran medida el estudio del problema.

Las dimensiones del dispositivo experimental fueron fijadas teniendo en cuenta ciertas restricciones. Los factores que limitaron el tamaño máximo fueron:

- Espacio y caudal disponible en el laboratorio: el caudal máximo se estableció en 100 l/s por calle.
- Factibilidad técnica: la necesidad de que las pendientes de las calles pudieran ser modificadas de forma rápida y económica. El rango de pendientes que se trabajarían quedó establecido entre 1% y el 4 % en la dirección del flujo.

Los factores que limitaron el tamaño mínimo fueron:

- Precisión de medida de los calados.
- Minimización de la influencia relativa de la tensión superficial.

A la hora de definir la longitud de las calles de entrada, ésta no plantea inconvenientes, puesto que se procura que el flujo sea unidimensional ya a la entrada de la misma calle, sin embargo se estimó oportuno que tuviera una longitud mínima de un ancho de calle. Con respecto a la de salida, se determinó una longitud que permitiera un flujo unidimensional de salida, aunque a posteriori, al llevar a cabo la campaña de ensayos se observó que la longitud no había sido suficiente.

Así pues, las dimensiones del dispositivo experimental quedaron fijadas en:

Ancho inicial de calles: 1.50 metros

Longitud de las calles de aproximación al cruce: 2.00 metros.

Longitud de las calles de salida del cruce: 5.00 metros.

Altura de los cajeros: 0.35 metros.

Originalmente, las calles formaban entre sí un ángulo recto en planta quedando la superficie propia del cruce como un cuadrado de 1,50 metros. El cambio realizado a la sección del canal (dado que el estudio realizado es para secciones de calles con anchos diferentes) da lugar a que la superficie del cruce quede ahora formada por un cuadrilátero de 1,50m x 0,75m para la primera campaña, y de 1,50m x 1,00 para la segunda. Las calles pivotan sobre cada una de las aristas del cuadrado original, permitiendo cambiar las pendientes de las calles desde un mínimo de 0 hasta un máximo del 4% en la dirección del flujo. El dispositivo pero, no permite la inclinación de la superficie cuadrangular del cruce inicial, por lo que nos queda en esa zona del cruce un tramo fijo y horizontal. Así pues, en consecuencia de lo explicado anteriormente, la zona del cruce así como la más próxima al cruce de la calle de salida en la dirección en la cual no se realiza el estrechamiento, estará siempre horizontal. La influencia de esta zona sobre las características del flujo no es determinante en el comportamiento hidráulico de éste ya que al tratarse el estudio de regímenes de entrada supercríticos la zona de salida no es un punto de toma de medidas. En la figura 3.1 se presenta un esquema del dispositivo experimental y sus dimensiones. En la figura 3.2 se presenta una fotografía del modelo.

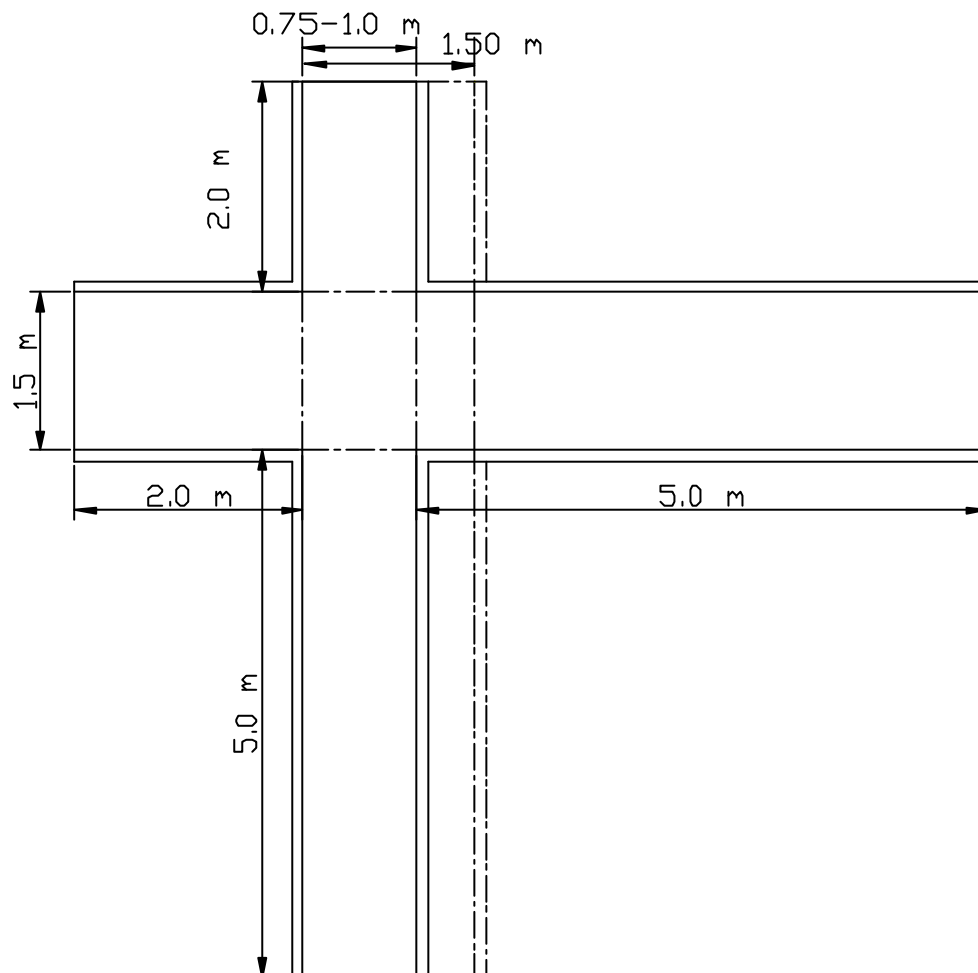


Figura 3.1: Esquema en planta del dispositivo experimental



Figura 3.2: Fotografía del dispositivo experimental en su conjunto

### 3.3 INFRAESTRUCTURA DE LABORATORIO

#### 3.3.1 Provisión de agua al dispositivo y medición de caudales

El laboratorio cuenta con un depósito principal de unos 200 m<sup>3</sup> de capacidad, esquematizado con las siglas DP en la figura 3.3. Mediante un bombeo que se lleva a cabo con un conjunto de tres bombas (B) en función del caudal que se desee elevar (100-200-300l/s), el agua accede a un depósito de nivel constante (DNC), desde el cual el agua puede pasar a dos canales de gran profundidad a través de sendas válvulas de compuerta (VC). Dichos canales están dotados de vertederos triangulares (VT) en sus extremos aguas abajo que sirven para aforar el caudal que entrará luego a la tubería perimetral (TP). La provisión de agua al dispositivo experimental se realiza a través de esta tubería que es de asbesto cemento, de 35 cm de diámetro y que rodea perimetralmente al recinto del laboratorio a cielo abierto. Esta tubería se divide por medio de una válvula de mariposa (VM) de manera que los dos tramos a cada lado de la misma quedan independientemente alimentados por uno de sus extremos. Los caudales de entrada pueden medirse por separado por medio de los vertederos triangulares (VT) que tienen una abertura de vértice de 90°. El agua pasa de la tubería a las calles por medio de arquetas o cámaras de carga (AEX, AEY), una por cada calle de entrada, donde se efectúa la tranquilización y uniformización del flujo. Una vez que el agua entra en las calles realiza su tránsito por el cruce y cae a dos nuevas arquetas (ASX, ASY) desde donde retorna al depósito principal pasando previamente por el desarenador (DES) a través de los canales de recogida (CR) del agua.

En una de las arquetas de salida (ASX) se mide el caudal por medio de un vertedero triangular en "V" que tiene una capacidad máxima de medida de 138 l/s. Sin embargo, debido a los elementos de tranquilización y disipación de energía que se han dispuesto en ella, la capacidad máxima útil disminuye hasta unos 100 l/s. Se puede pensar que esta capacidad de medida del caudal de salida podría ser insuficiente; sin embargo, se planificaron los ensayos de forma que siempre se espere un caudal menor a 100 l/s en la dirección en la cual se realiza la medida.

La tubería perimetral posee una válvula de purga de aire (VPA).

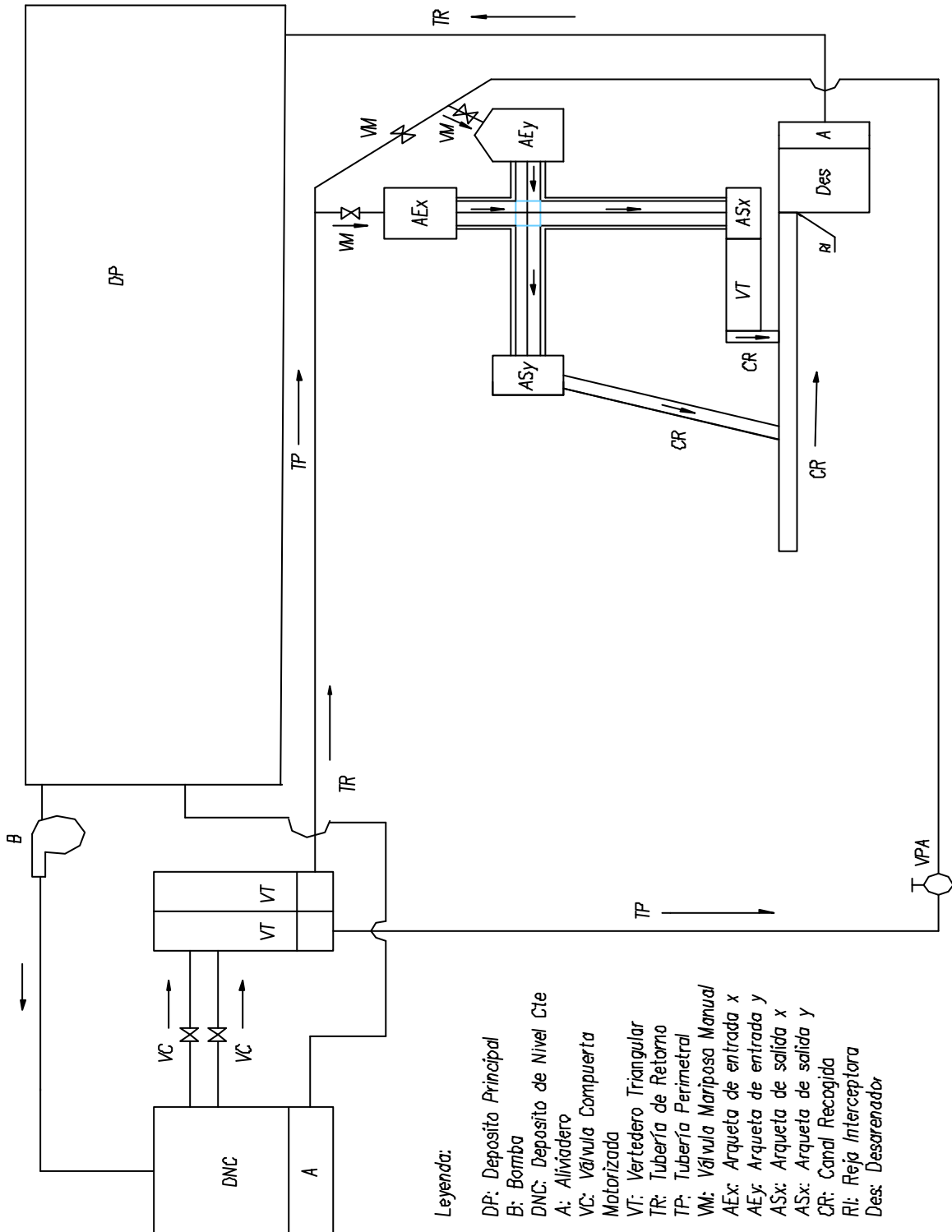


Figura 3.3: Esquema general de la infraestructura de laboratorio

### 3.3.2 Arquetas o cámaras de carga

Las arquetas o cámaras de carga son elementos intermedios que se ubican entre la tubería de provisión y el dispositivo experimental y entre éste y los canales de recogida. El primer caso corresponde a las arquetas de entrada, que sirven para conducir convenientemente el agua que proviene de la tubería hacia el dispositivo. El segundo caso pertenece a las de salida y sirven más bien como nexo de unión entre el dispositivo y los canales de recogida.

#### 3.3.2.1 Arquetas de entrada

Estas arquetas son de forma poligonal, aprovechando al máximo el espacio disponible. Una vez que se ubicó el elemento principal del dispositivo como son las calles, se construyeron las arquetas, quedando como resultado una arqueta de forma aproximadamente cuadrada de 2,60 m de largo por 2,30 m de ancho y por 1,30 m de profundidad, siendo éstas las dimensiones interiores y otra de forma más alargada que la anterior y cuyas dimensiones interiores resultaron ser de 3,00 m de ancho por 1,70 m de largo y 1,30 m de profundidad.

Ambas arquetas constan de dos zonas diferenciadas como son la zona de llegada y la zona de uniformización del flujo. La zona de llegada es en donde se efectúa la tranquilización del flujo, es decir, donde el agua pierde una cantidad importante de la energía de velocidad que lleva. Hay que tener en cuenta que el agua llega por una tubería de 35 cm de diámetro, y que para un caudal de 100 litros por segundo se tendrá una velocidad de más de 1 metro por segundo. En la arqueta donde se realizó el estrechamiento fue necesario la colocación de dos planchas alineadas con los cajeros para garantizar una entrada unidimensional del flujo en la calle ya que de lo contrario éste no era así debido a la disminución brusca de sección entre la arqueta y la calle que provocaba la existencia de direcciones preferenciales para el agua. En las figuras 3.4 y 3.5 se presentan fotografías de ambas arquetas.

*Junta de unión entre las arquetas y las calles:* Debido a que el flujo debe pasar desde las arquetas de entrada, que son fijas, hacia las calles, que son de pendiente variable, se dispuso una junta flexible entre ambas. Se diseñó esta junta de manera que interfiera lo menos posible en la alineación del flujo de entrada en el dispositivo. También se colocaron juntas en las secciones de unión de las calles con el cruce para permitir la inclinación de la calle con respecto al cruce, que tal como se ha comentado era fijo y horizontal.

#### 3.3.2.2 Arquetas de salida

Existen dos arquetas que recogen el agua de salida de las calles: una es donde se realiza la medida del caudal y la otra sirve sólo de recolección del agua. Se eligió medir el caudal en la dirección que hay más diferencia de cota entre la solera de la calle de salida y el canal de recogida final del agua para que se pudiera colocar el vertedero de medida lo más bajo posible sin que se ahogara la vena líquida y conseguir a la vez que la pendiente de la calle donde se estaba efectuando la medición pueda ser la máxima fijada del 4 %.

La arqueta de medida, que es la de la dirección "x", consta de dos zonas, una es donde se recoge el agua y la restante es donde se produce la tranquilización, uniformización y medición del flujo. En la figura 3.6 se presenta una fotografía de la arqueta descrita.

La arqueta restante quedó dimensionada de 1,80 metros de ancho y 1,50 metros de largo, produciéndose el desagüe de la misma en dirección perpendicular a la dirección de llegada. El canal se dimensionó con un ancho cercano a los 60 cm. En la figura 3.7 se presenta una fotografía de la arqueta de salida en la dirección "y".



Figura 3.4: Fotografía de la arqueta de entrada en la dirección x



Figura 3.5: Fotografía de la arqueta de entrada en la dirección y



Figura 3.6: Arqueta de salida en la dirección x y vertedero de medida



Figura 3.7: Fotografía de la arqueta de salida y canal de desagüe en la dirección y

### 3.4 OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS

El objetivo principal de la campaña de ensayos es encontrar una relación entre todas las variables que influyen en la división del flujo en el cruce de calles. De acuerdo con la formulación anterior, las variables involucradas después de hacer las pertinentes simplificaciones quedan reducidas a cinco: el cociente entre los caudales de entrada, el cociente entre los caudales de salida, los números de Froude y la relación de anchos de las calles.

Los caudales que llegan en cada dirección serán variables a analizar dado que se espera que la distribución del flujo dependa de ellos. Igualmente lo serán los números de Froude. Dentro de estas dos variables quedan incluidas todas aquellas que definen a estas dos, como son la velocidad y el calado.

El ratio de anchos de calles experimentado es de 1/2 y 2/3, reflejándose así con el caso ya estudiado previamente en la tesis doctoral de Leonardo S. Nanía para una relación 1/1, las combinaciones de anchos de calles que mayormente se dan en la realidad de nuestras ciudades (cruces de calles de 1 con 2 carriles, 2 con 4, 4 con 6, y combinaciones múltiples de éstas). Se decidió usar unos rangos para las variables que fueran similares a los utilizados en la campaña previa de relación de anchos 1/1 para así poder aunar los resultados en función de las relaciones de anchos.

Para las combinaciones de caudales se decidió escoger las mismas combinaciones de caudales probadas para la relación de anchos 1/1 pero en términos de caudales unitarios para reflejar así la influencia del ancho de calle. Dichas combinaciones se detallan en la tabla 3.1, en la que aparecen los valores de los caudales de entrada en las dos direcciones,  $Q_{ex}$  y  $Q_{ey}$  y el cociente entre el valor del caudal unitario de entrada en la dirección x y el caudal total unitario,  $q_{ex} / q_{et}$ .

Tabla 3.1: Combinaciones de caudales de entrada para la campaña de ensayos con los anchos de calles  $B_x = 1.50$  m,  $B_y = 0.75$  m y  $B_x = 1.50$  m,  $B_y = 1.0$  m.

$Q_{ex}$ (l/s)	$Q_{ey}$ (l/s)	$q_{ex}/q_{et}$	$Q_{ex}$ (l/s)	$Q_{ey}$ (l/s)	$q_{ex}/q_{et}$
8,33	37,50	0,10	8,33	50,00	0,13
10,45	25,00	0,17	12,50	33,33	0,20
11,11	50,00	0,10	11,11	66,67	0,10
12,50	25,00	0,20	18,75	50,00	0,20
18,75	37,50	0,20	21,43	33,33	0,30
25,00	12,50	0,50	25,00	16,67	0,50
25,00	21,43	0,37	25,00	28,57	0,37
25,00	30,00	0,29	25,00	38,89	0,30
25,00	50,00	0,20	25,00	66,67	0,20
32,14	37,50	0,30	37,50	50,00	0,33
33,33	25,00	0,40	33,33	33,33	0,40
37,50	12,50	0,60	37,50	16,67	0,60
42,86	50,00	0,30	42,86	66,67	0,30
50,00	6,25	0,80	50,00	8,33	0,80
50,00	10,72	0,70	50,00	14,29	0,70
50,00	16,67	0,60	50,00	22,22	0,60
50,00	25,00	0,50	50,00	33,33	0,50
58,33	12,50	0,70	58,33	16,67	0,70
66,67	50,00	0,40	66,67	66,67	0,40
80,00	4,17	0,91	75,00	5,55	0,90
80,00	9,38	0,81	75,00	12,50	0,80
80,00	16,07	0,71	75,00	21,43	0,70
80,00	36,50	0,52	75,00	50,00	0,71



100,00	5,56	0,90	100,00	7,41	0,90
100,00	12,50	0,80	100,00	16,67	0,80
100,00	21,43	0,70	100,00	28,57	0,70
100,00	33,34	0,60	100,00	44,33	0,60
100,00	50,00	0,50	100,00	66,67	0,50

Esta planificación barre un amplio rango de caudales, desde la proporción de caudal de entrada del 10% hasta la del 90%, utilizando caudales desde 8.33 l/s hasta 100 l/s. Se tienen dos combinaciones para 10% y 90% y como mínimo 3 para las demás combinaciones, barriendo todo el rango en saltos de 10% en 10%.

Los regímenes tanto para la entrada como la salida de calles son supercríticos.

El hecho de probar rangos de caudales similares se hacía también con el objeto de que los rangos de Froude probados fueran también similares a los experimentados en la campaña de Nania 99. La variación de los números de Froude se consiguió variando las pendientes de las calles. Las combinaciones de pendientes probadas intentan reflejar las existentes en las calles, si bien vienen limitadas por las condiciones físicas del dispositivo experimental. Mediante esta variación de las pendientes se varía la velocidad del flujo de entrada en las calles de entrada, o lo que es lo mismo, los números de Froude. Debido a la condición de estudio de régimen de entrada en las calles supercrítico, se decidió trabajar con una pendiente mínima de 0.01. Se analizaron también otras pendientes de 0.02 y 0.04.

Se combinaron estas pendientes para cada combinación de caudal y para los dos casos de anchos de calles estudiados. Las combinaciones de pendientes se recogen a continuación en la tabla 3.2, en las que aparecen los valores en ambas direcciones como  $S_x$ , pendiente en la dirección x, y  $S_y$  pendiente en la dirección y.

Tabla 3.2: Combinaciones de pendientes longitudinales de las calles para la campaña de ensayos realizada.

<b>S<sub>x</sub></b>	<b>S<sub>y</sub></b>
0.01	0.01
	0.02
	0.04
<b>S<sub>x</sub></b>	<b>S<sub>y</sub></b>
0.02	0.01
	0.02
	0.04
<b>S<sub>x</sub></b>	<b>S<sub>y</sub></b>
0.04	0.01
	0.02
	0.04

### 3.4.1 Parámetros de medida

Los parámetros que se midieron fueron:

- Caudales de entrada en ambas direcciones por medio de vertederos triangulares.
- Caudal de salida en la dirección "x" por medio de vertedero triangular.
- Calados en el centro de la calle como medida representativa del calado en toda la sección transversal.

Las secciones de entrada al cruce son lugares clave para la medición de calados ya que interesa conocer las características del flujo en el cruce. Conociendo el calado medio del flujo entrante, el caudal y el ancho

de la sección, podemos conocer su velocidad y su número de Froude. Dado que el régimen estudiado es supercrítico la distribución de caudales a la salida del cruce no dependerá de las condiciones del flujo aguas abajo del mismo, por lo que no se consideró necesario realizar mediciones del calado en estos puntos.

Tanto la altura del agua sobre el vértice de los vertederos como los calados se midieron con limnímetros que poseían una precisión de 0.1 mm.

El esquema de la figura 3.8 presenta los lugares donde se realizaron las medidas de los calados. Dado que los anchos de las calles ya están definidos a partir de este momento y en todo el texto que sigue se denominará  $B$  al ancho de calle mayor y  $b$  al ancho de calle menor. Se identificará además la dirección  $x$  como aquella en la que la calle es de mayor ancho y dirección  $y$ , aquella en la que el ancho es menor.

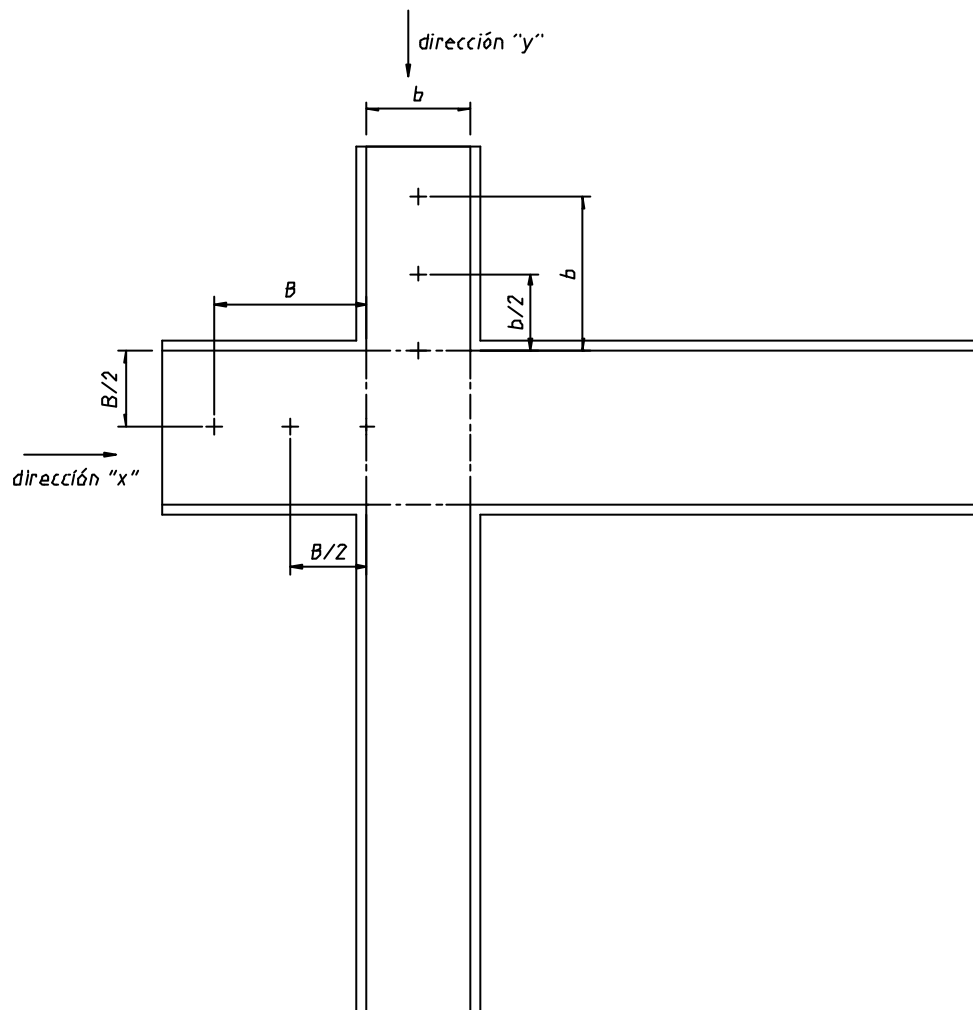


Figura 3.8: Lugar geométrico de los puntos de medida de los calados en la campaña preliminar