

## **Capítulo 2. Descripción de la infraestructura y de la metodología experimental**



## 1. Introducción

La experiencia se ha llevado a cabo en el Laboratorio de Hidráulica y Mecánica de Fluidos del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la U.P.C (Sección de Ingeniería Hidráulica e Hidrológica).

Para describir detalladamente el modelo objeto del estudio habrá que distinguir fundamentalmente dos partes diferenciadas:

1. Infraestructura propia del Laboratorio. Siendo interesante distinguir a su vez, en este caso:
  - Sistema de suministro de agua al modelo.
  - Estructura soporte del modelo.
2. Modelo reducido de un vertedero escalonado.

## 2. Infraestructura propia del Laboratorio

### 2.1. Sistema de suministro de agua

Este sistema está constituido por una instalación clásica de bombeo, que se esquematiza en la Figura 2.1:

- Depósito acumulador que se encuentra bajo la solera del laboratorio. Constituye el depósito principal de la instalación, y dispone de  $30 \times 10 \times 4.5 \text{ m}^3$  ( $1350 \text{ m}^3$ ) de capacidad.
- Tubería de aspiración de hierro galvanizado de 300 mm de diámetro interior, y 320 mm de diámetro exterior. Tiene una longitud, hasta la bomba, de 3.45 m. Dispone en su extremo inicial, dentro del depósito acumulador, de una válvula de pie de 300 mm que impide el paso de elementos extraños que puedan afectar a la bomba mediante una rejilla perimetral (o alcachofa) existente en la base de la válvula. A su vez dicha válvula funciona como válvula de retención para evitar el vaciado de la tubería de aspiración.
- Bomba de la marca “Ingersol - Rand Pumps LTD”. Modelo 250 - 400 Mc. Con un rodete de 360 mm de diámetro, es capaz de impulsar  $257.7 \text{ l/s}$  a una altura geométrica de 27.4 m con un rendimiento del 77%, lo que significa una potencia de 89.96 Kw. Se encuentra situada en el pasillo inferior del Laboratorio.
- Tubería de impulsión constituida por dos tramos, uno de 37.5 m de tubería de hierro galvanizado de 300 mm de diámetro interior y 320 mm de exterior y el segundo de 16 m de tubería de PVC rígido de 300 mm de diámetro interior y 315 mm de exterior.
- Depósito regulador situado en la azotea del edificio con su solera a la cota 20.10 m respecto la solera del depósito acumulador. Está formado por dos tanques conectados entre sí por tres tubos de PVC rígido de 300 mm de diámetro interior. El primer tanque de  $3.90 \times 2.90 \times 1.50 \text{ m}^3$ , recibe la tubería de impulsión, y a través de los tres tubos mencionados se conecta al segundo tanque de  $2.00 \times 3.00 \times 1.40 \text{ m}^3$  desde el cual sale la tubería de suministro al Laboratorio. Este segundo tanque dispone de un rebosadero con un vertedero de labio grueso a la cota 21.16 m, desde el que retorna el agua sobrante en cada momento al depósito acumulador inferior.
- Tubería de suministro al Laboratorio, está constituida por dos tramos. El primero de 19 m, que va desde el depósito regulador hasta el suelo del Laboratorio, es una tubería de hierro galvanizado de 300 mm de diámetro interior y 320 mm diámetro exterior. El segundo tramo está constituido por unos 25 m de longitud de tubería de PVC rígido, de 300 mm de diámetro interior y 315 mm de exterior.
- Tubería de retorno al depósito acumulador formada también por dos tramos, el primero a la salida el depósito regulador de unos 19 m de longitud de hierro galvanizado de 220 mm de diámetro interior y

224 mm de diámetro exterior, para terminar accediendo al depósito acumulador mediante un tramo de 16 m de PVC rígido de 220 mm de diámetro interior.

- **Automatismo** en la tubería de suministro, al llegar a la solera del Laboratorio, se encuentra una válvula de compuerta, junto con una válvula de ajuste fino. Ambas están automatizadas y permiten, junto con el caudalímetro electromagnético ubicado unos metros aguas arriba, controlar el caudal circulante por el sistema. Igualmente, las maniobras de accionamiento, cierre y dispositivos de seguridad se controlan de manera automática desde un panel de control.

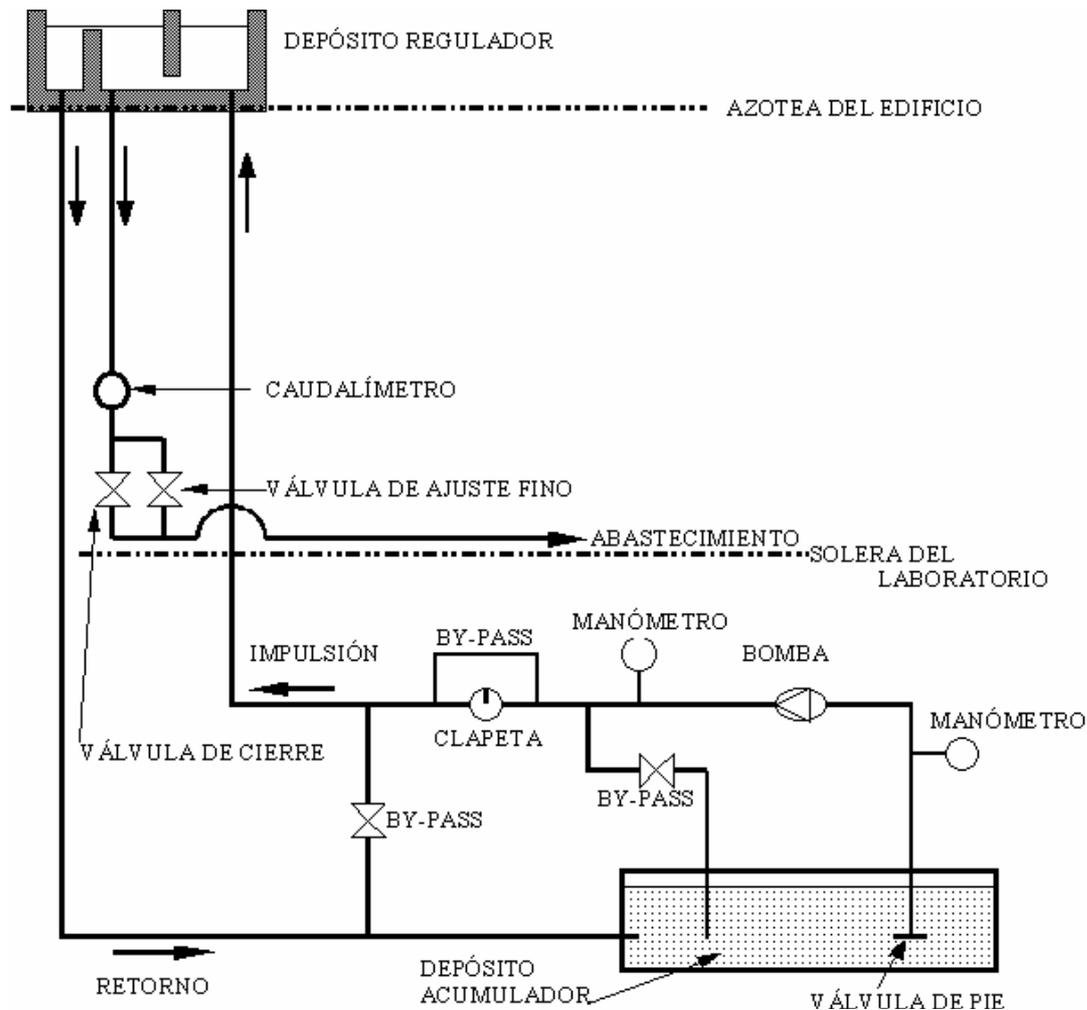


Figura 2.1. Sistema de bombeo: circuito depósito acumulador inferior - depósito regulador superior (Puertas (1994)).

## 2.2. Estructura soporte del modelo

El modelo del vertedero escalonado ensayado, parte de un depósito elevado situado sobre una estructura metálica, fija en el Laboratorio, que tiene como cometido recibir el agua a una cota de 4.17 m sobre el suelo, tranquilizarla y, finalmente, distribuirla convenientemente a los modelos conectados a ella. El depósito elevado se sitúa sobre una plataforma de  $6.8 \times 5 \text{ m}^2$ , tiene una superficie de  $5.8 \times 3.95 \text{ m}^2$ , una altura de 4.17 m y es alimentado desde el depósito regulador (caudal máximo 250 l/s). La estructura se esquematiza en la Figura 2.2

En el lateral derecho (siguiendo el sentido del flujo), de la piscina, se colocó una compuerta cuadrada de  $0.55 \times 0.55 \text{ m}^2$ , que conduce el agua al canal de aproximación del vertedero escalonado.

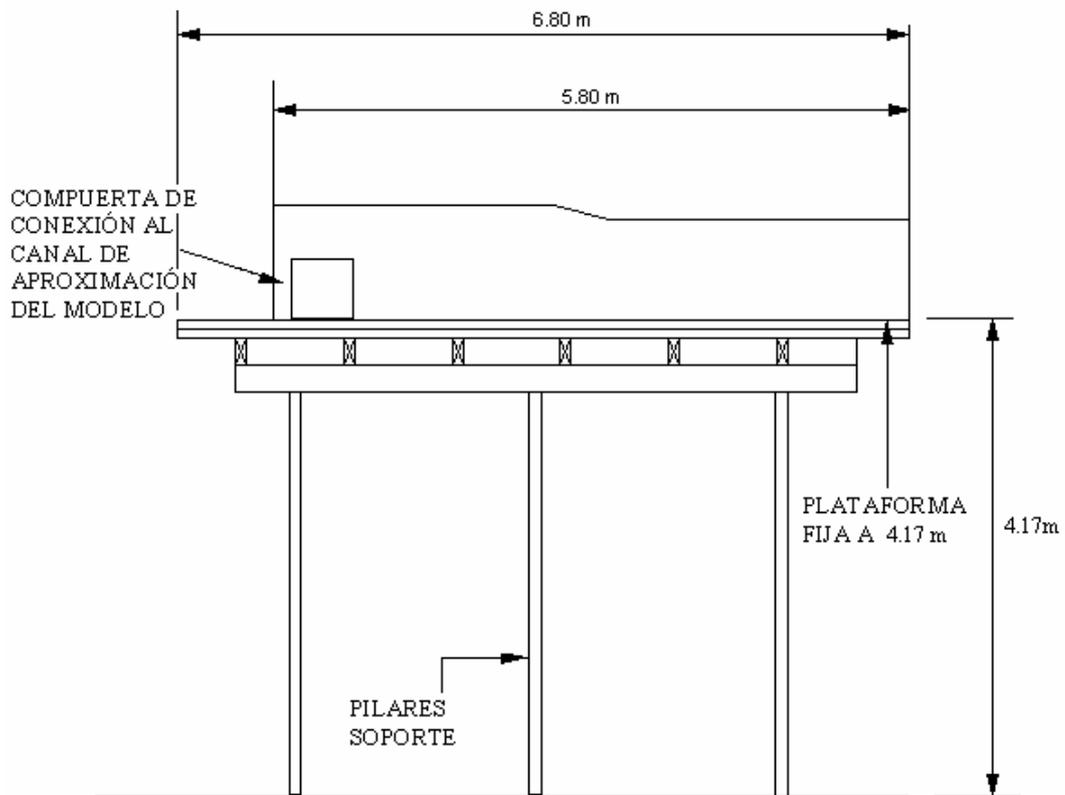


Figura 2.2. Esquema de la estructura soporte del modelo.



Figura 2.3. Detalles de la entrada del suministro de agua en la estructura soporte del modelo. Detalle del cajón cuadrado de sección  $0.55 \times 0.55 \text{ m}^2$  por el que entra el agua al canal de aproximación a la rápida.



Figura 2.4. Entrada del suministro de agua en la estructura soporte del modelo en funcionamiento.

### 3. Vertedero escalonado

El modelo se esquematiza en la Figura 2.5. Siguiendo el sentido del flujo consiste en:

- Canal de aproximación. El agua proveniente de la plataforma elevada, entra a través de una compuerta de sección cuadrada a este canal. Aquí unas sencillas estructuras tranquilizarán el flujo, y lo distribuirán de manera uniforme sobre todo el ancho del canal para asegurar una incorporación correcta (que asegure un comportamiento simétrico) a la estructura escalonada.
- Rápida escalonada. Está realizada en metacrilato transparente, para permitir visualizar el flujo desde cualquier posición. Consta de 40 escalones idénticos de 100 mm de alto por 80 mm de huella, y 6 escalones en su coronación, también de 80 mm de huella aunque estos de altura variable.
- Cuenca amortiguador. El agua sale de la estructura escalonada hacia otra estructura cuyo único cometido es el de recoger el flujo para retornarlo al depósito acumulador del Laboratorio.

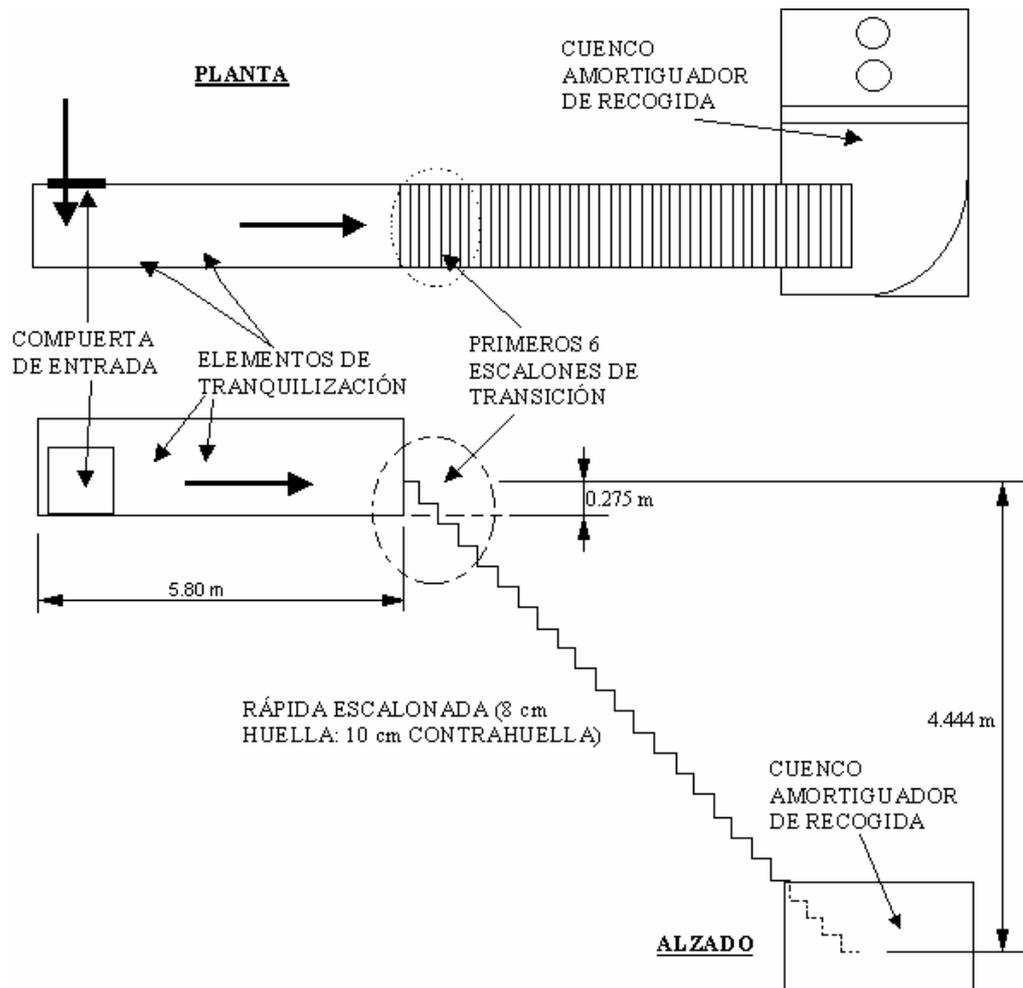


Figura 2.5. Esquema en planta y alzado del modelo del vertedero escalonado construido.



Figura 2.6. Vista general del modelo reducido en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la UPC.



*Figura 2.7. Vista general del modelo reducido en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la UPC, en funcionamiento.*

### 3.1. Canal de aproximación

En la Figura 2.5 se ha mostrado de manera esquemática dicho canal. En la Figura 2.8 se presentan las características geométricas exactas.

Consiste en un canal de obra de 5.80 m de largo por 0.60 m de ancho, adosado al depósito y elevado, que se ha descrito de manera esquemática (ver Figura 2.2) en el apartado 2.2.

Como puede apreciarse, y ya se ha citado, el canal recibe el agua a través de una compuerta lateral cuadrada de  $0.55 \times 0.55 \text{ m}^2$ , ubicada en el extremo más aguas arriba de su margen izquierdo. Se entiende por consiguiente que el agua debe girar  $90^\circ$ , para adquirir la que será la dirección longitudinal de la estructura escalonada.

Para favorecer el flujo uniforme en el canal, se situaron una serie de elementos diseñados a tal efecto. En el apartado 5 del capítulo 3, se describirán con detalle dichos elementos, así como el proceso que se siguió hasta alcanzar su diseño definitivo.

### 3.2. Rápida escalonada

Tal y como ya se ha citado anteriormente, el modelo mide 4.30 m de alto y 0.60 m de ancho, y está constituida por:

- Seis escalones en coronación de 80 mm de huella y altura variable, de manera que adaptan sus vértices a un perfil Creager, y
- Cuarenta escalones idénticos de 80 mm de huella por 100 mm de contrahuella, lo que le confiere una pendiente 1.25:1 (v:h) con la horizontal.

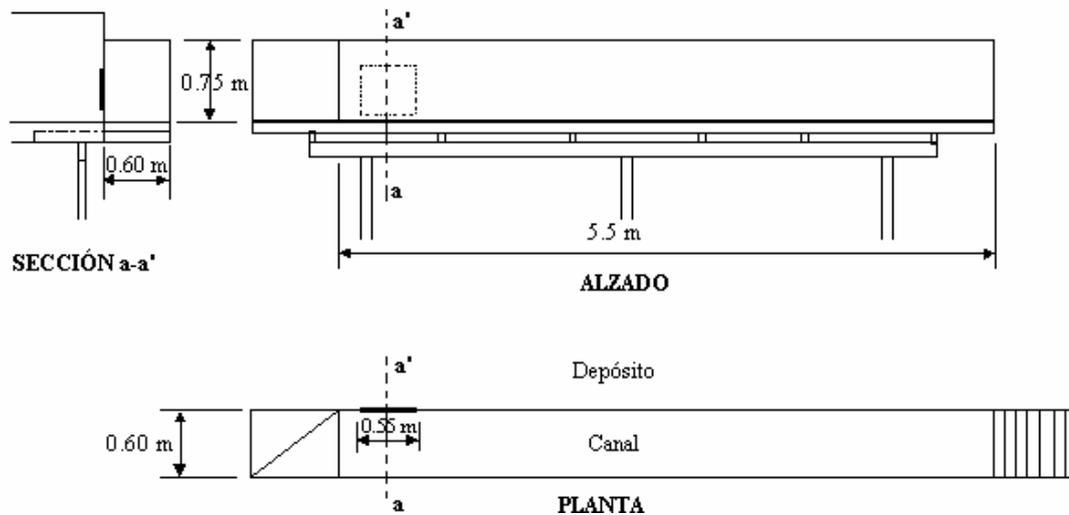


Figura 2.8. Esquema del canal de aproximación a la estructura escalonada.

### 3.2.1. Diseño de los seis escalones de transición a la rápida

Los seis primeros escalones sirven de transición desde el umbral del vertedero hasta los escalones de tamaño uniforme, y tienen la finalidad de evitar que, para un caudal de diseño de 200 l/s, el flujo se separe del vertedero. Los vértices de estos escalones se ajustaron a un típico perfil Creager dado por la ecuación (1) (Scimeni, 1964), manteniendo su huella de tamaño constante e igual a 80 mm.

$$\frac{y}{H_d} = 0.47 \cdot \left( \frac{x}{H_d} \right)^{1.80} \quad (2.1)$$

Donde  $x$  e  $y$  definen la curva del perfil y  $H_d$  corresponde a la carga existente para el caudal de diseño sobre la cresta del aliviadero.

La carga  $H_d$ , se estimó en 0.282 m a partir de la relación altura – caudal que Chow (1959) presenta para este tipo de aliviaderos de perfil estricto. De esta manera se ajustó el perfil que se presenta en la Figura 2.9. Una vez construida la estructura se comprobó que la carga disponible para el caudal de diseño fue de 0.279 m, hecho que permitió aceptar las estimaciones teóricas.

### 3.3. Cuenco amortiguador

Sirve para recibir el flujo y devolverlo al depósito almacenador del Laboratorio para poder ser recirculado a través del sistema de impulsión. Cabe decir que las dimensiones de este cuenco no son las adecuadas para permitir la formación en el de un resalto hidráulico al pie de la estructura. De manera que únicamente este último detalle no podrá ser correctamente determinado con este modelo. De cualquier modo, éste no es un aspecto importante para el desarrollo de la presente investigación, si se tiene en cuenta que el objetivo fundamental de ésta se encuentra en el análisis del flujo sobre la estructura y no en lo que suceda al pie de ésta.

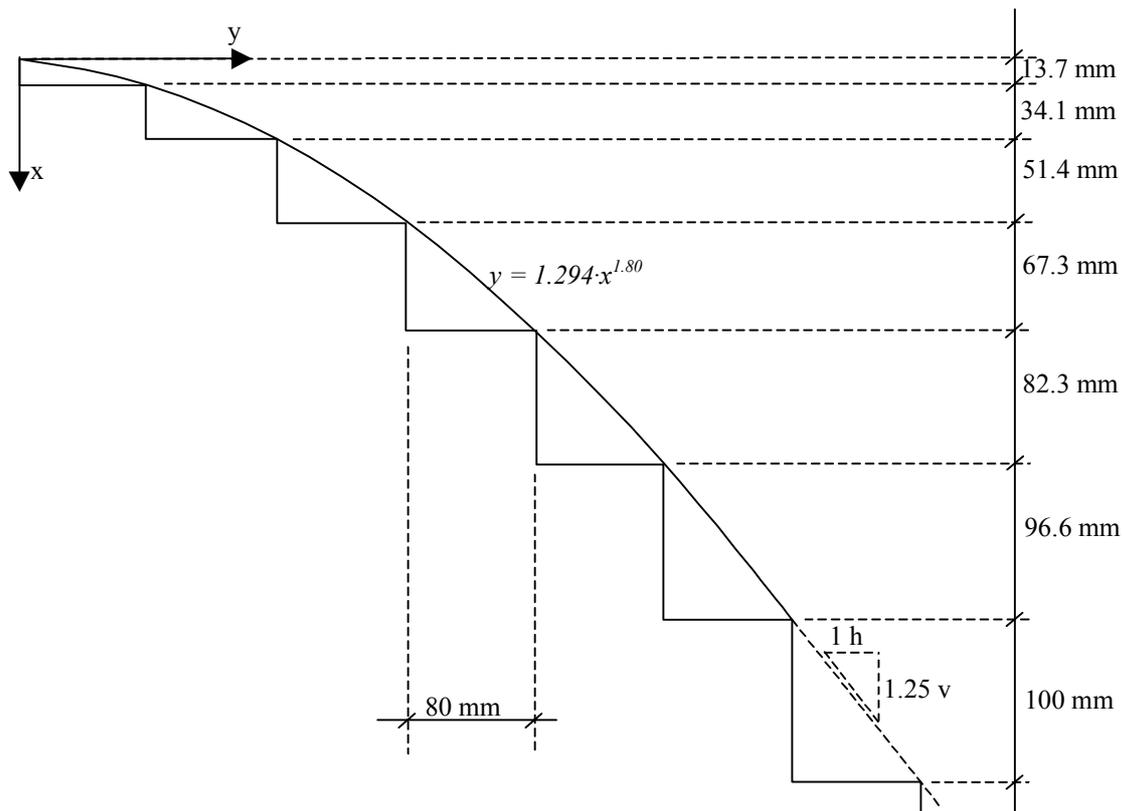


Figura 2.9. Diseño de los seis escalones de transición a la rápida de pendiente 1h:1.25v, según un perfil Creager (Scimeni, 1964).

## 4. Adquisición de datos en el laboratorio

### 4.1. Instrumentos para la medida de presiones

Se ha dispuesto de cuatro sensores de tipo piezorresistivo para llevar a cabo toda la labor de registro de presiones, todos ellos de la marca británica DRUCK, del modelo PTX 1830. El fabricante garantiza un rango de medida entre  $-1.5$  m.c.a. y  $2.0$  m.c.a., con un error de no-linealidad e histéresis de  $\pm 0.1\%$  del fondo de escala, es decir, la desviación máxima esperable respecto un comportamiento no lineal de los sensores es de  $\pm 0.0035$  m.c.a.

En la Tabla 2.1 se presentan las características técnicas facilitadas por el fabricante.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas de los sensores piezorresistivos utilizados, facilitadas por el fabricante.	
	PTX 1830
<b>Rango de medida</b>	-150 mbar a +200 mbar relativa
<b>Alimentación</b>	9 V a 30 V
<b>Rango de la señal de salida</b>	4 mA a 20 mA
<b>Error de no-linealidad e histéresis</b>	$\pm 0.1\%$ fondo de escala
<b>Temperatura ambiente admisible</b>	$-20^{\circ}\text{C}$ a $60^{\circ}\text{C}$

En la Figura 2.10 pueden observarse los sensores utilizados. En ella puede apreciarse el tamaño de la superficie sensible de cada modelo. Este será un aspecto crucial que condicionará la metodología de la campaña de toma de datos en el laboratorio.



Figura 2.10. Transductor piezorresistivo PTX 1830 utilizados en la campaña de registro de datos en el laboratorio.

Estos sensores se conectan al sistema de adquisición de datos que consiste, tal y como se muestra en la Figura 2.11, en:

- Una fuente de alimentación que permite la conexión de los sensores a la red eléctrica.
- A continuación, la señal de salida de los sensores (en intensidad, ver Tabla 2.1) se transforma mediante una resistencia de  $250\Omega$  a voltaje, cambiando su rango de salida (4 a 20 mA) a 1 a 5 V.
- El proceso sigue a través de un filtro analógico de 2º orden que permite eliminar todas las frecuencias superiores a los 1600 Hz. El esquema de dicho filtro se muestra en la Figura 2.12. Éste consiste en dos filtros de primer orden, en serie, formados cada uno por una resistencia de 2.2 K $\Omega$ , junto con un condensador de 0.3 $\mu$ F. En la Figura 2.13 se muestra la capacidad de atenuación de las frecuencias que presenta.
- Una vez la señal ha sido filtrada analógicamente, es transformada a código binario interpretable por el ordenador mediante una tarjeta analógico – digital con capacidad de recoger señal entre 0 y 5 V.
- Finalmente un ordenador, modelo PENTIUM a 75 MHz, con 40 Mb de memoria RAM, permitirá la gestión de los ensayos a través del paquete de software adecuado.

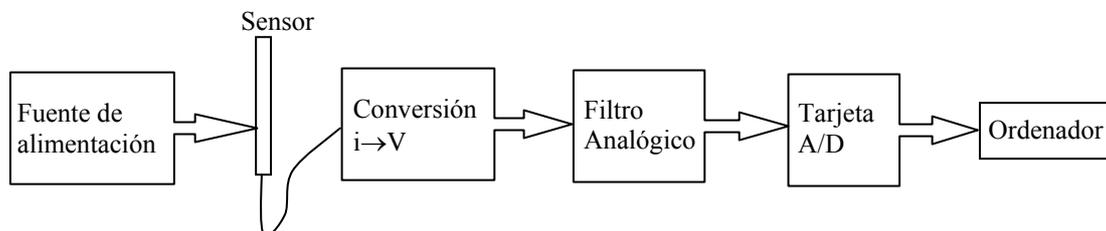


Figura 2.11. Esquema del sistema de adquisición de datos.

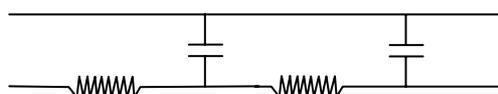


Figura 2.12. Esquema del filtro analógico de 2º orden utilizado.

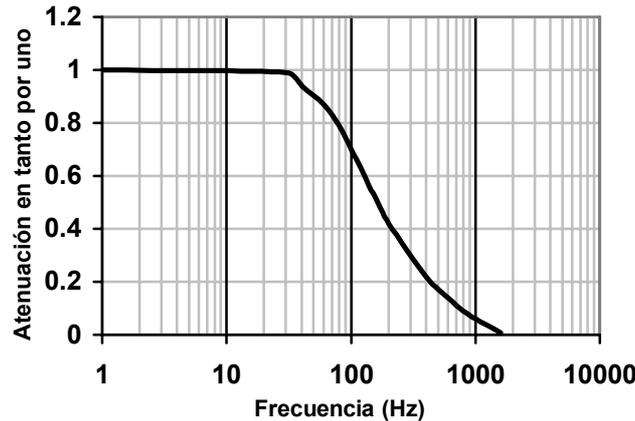


Figura 2.13. Atenuación de las frecuencias que permite el filtro analógico esquematizado en la Figura 2.12.

Si bien las frecuencias de los registros por encima de 40 Hz, se verán atenuadas de manera significativa por causa del filtrado analógico, ello no debe suponer mayor problema puesto que no es de esperar que el fenómeno físico que se pretende estudiar presente frecuencias propias tan elevadas. La capacidad de atenuación de las frecuencias de este filtro, permite la adquisición de datos a la máxima frecuencia que soporta el ordenador de que se dispone, precisamente 1600 Hz. Posteriormente, se procederá a filtrar digitalmente las frecuencias que se encuentren por encima de los citados 40 Hz.

El proceso de registro de los cuatros sensores, una vez conectados a la estructura, no es simultáneo sino secuencial. Así, siendo la frecuencia de muestreo  $f$ , si el primer sensor toma el primer dato en el instante  $0$ , el siguiente sensor lo hará en el instante  $1/cf$  segundos, donde  $c = 4$  es el número de sensores conectados, el tercero lo hará por tanto en  $2/4f$  segundos y el cuarto tomará su primer dato  $3/4f$  segundos después del inicio del ensayo. El segundo dato tomado por el primer sensor, corresponderá al instante siguiente  $4/4f = 1/f$ , tal y como cabía esperar según la frecuencia de muestreo deseada. De este modo el sistema procede hasta el final el registro.

## 4.2. Gestión de la toma de datos

El programa utilizado para dirigir desde el ordenador la toma y gestión de los registros de presión, ha sido el paquete HP VEE versión 3.12 de Julio de 1995 con el Copyright de la compañía Hewlett – Packard. En la Figura 2.14 se muestra el formato que se dio al programa realizado para la adquisición de registros mediante cuatro sensores simultáneamente.

El programa consta de tres tipos de objetos diferenciados por los colores de fondo:

- Con fondo blanco los objetos que requieren la interacción del usuario, cuyos campos pueden ser:
  - Prescindibles: tan solo requeridos como información adicional del ensayo registrado, para completar la información correspondiente al archivo que se generará en ese ensayo. Son los objetos que se encuentran en la columna de la izquierda, que corresponden a los datos de:

Caudal: que circulará en ese ensayo, en litros por segundo. Variará entre 0 y 200 l/s.

Ubicación: tan solo se permite la entrada de los términos HUELLA o CONTRAHUELLA. Para mayor simplicidad, un ensayo se realizará siempre con todos los sensores en la huella o en la contrahuella de un escalón.

Número de escalón: peldaño en el que se ha situado cada sensor, contado desde el extremo aguas abajo.

Puntos de medida (x, y) o (x, z): coordenadas (x, y) o (x, z), en las que se sitúa cada sensor, siendo el origen el vértice exterior del margen derecho del escalón, tal y como se esquematiza en la Figura 2.20.

- Imprescindibles. Sin ellos el archivo de resultados carecería de sentido, o se produciría algún error en la ejecución del programa. Se trata de:

Duración del ensayo: tiempo en segundos que durará el ensayo. Durante los ensayos preliminares de la campaña se trabajó con una duración de 25.6 s que, posteriormente y de manera definitiva, se redondeó a 30 s. El ensayo mostrado en la Figura 2.14 corresponde a uno de los preliminares.

Frecuencia de filtrado en Hz: número entero que define la frecuencia por encima de la cual se filtrará digitalmente el registro realizado. Ello responde al hecho que no es de esperar, que las presiones que se van a registrar muestren altas frecuencias. Más aun, otros investigadores analizando el campo de presiones en cuencos de presas bóveda con vertidos por coronación (Pueras (1994), Armengou (1991)) registraron frecuencias dominantes entre los 0 y los 5 Hz. Por este motivo se pensó en facilitar la gestión de los datos reduciendo el tamaño de los archivos resultantes, puesto que registrando a 1600Hz durante 30 s (ó 25.6 s) se obtenían 48000 (ó 40960) datos por cada sensor, y ello conducía a archivos de tamaño considerable. Así, se optó por filtrar digitalmente las frecuencias superiores a los 40 Hz, lo que equivaldría a frecuencias de muestro de 80 Hz, según el teorema de muestreo.

Pendiente: vector real cuyas cuatro componentes corresponden a las pendientes de las rectas de transformación de la señal en voltaje a presión (en m.c.a.) para cada canal de registro.

Término independiente: de nuevo se trata de un vector real cuyas cuatro componentes completan la recta de transformación citada.

Blanco a restar: un nuevo vector real de cuatro componentes que permite substraerle a la presión, calculada con la recta definida en los dos anteriores objetos, una cierta constante.

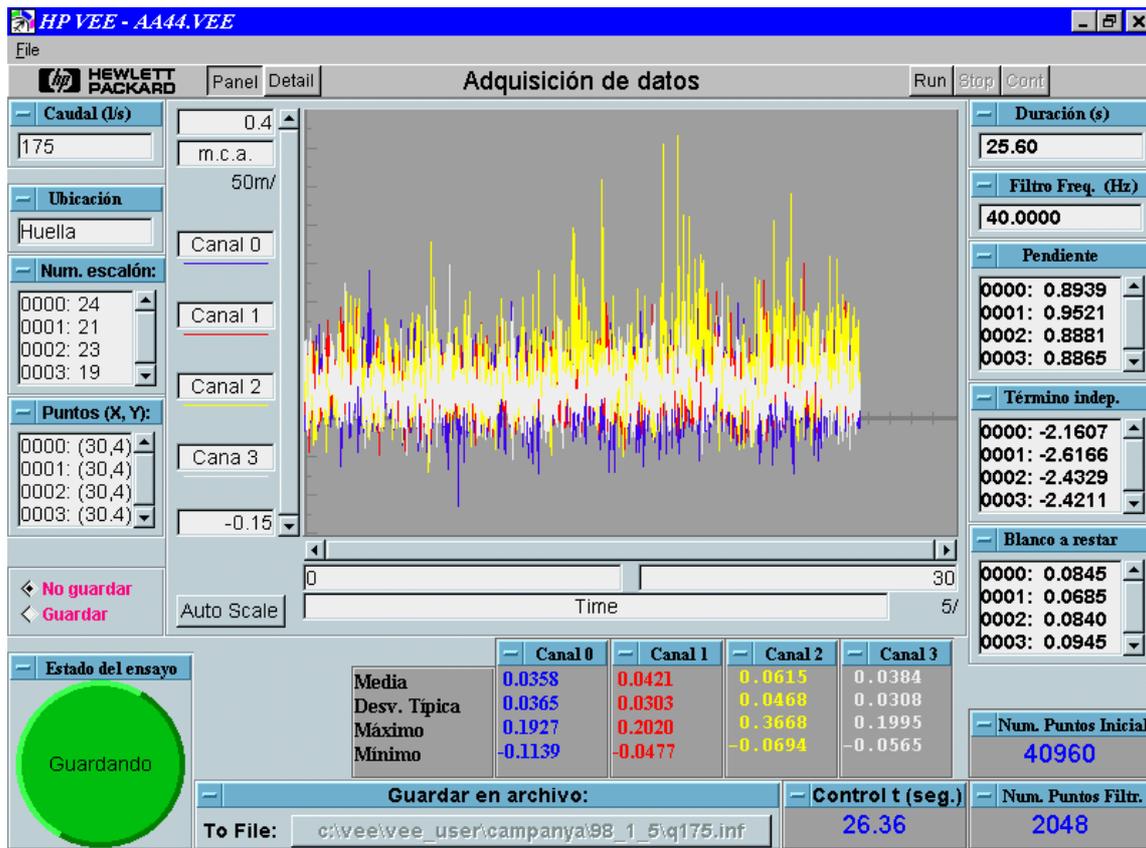


Figura 2.14. Formato de la pantalla del programa realizado para la adquisición de presiones mediante cuatro sensores simultáneamente. El programa ha sido desarrollado con el paquete HP VEE versión 3.12 de Julio de 1995 con el Copyright de la compañía Hewlett – Packard.

- Con fondo gris aquellos objetos que muestran los resultados obtenidos en el ensayo realizado. De arriba abajo se observan:

Gráfico: en el que se representa la evolución temporal de las medidas tomadas por los cuatro canales.

Resumen estadístico de los registros de cada canal. Se da para cada uno la media, la desviación típica, el máximo y el mínimo.

Control de la duración del ensayo. A fin de verificar que durante la ejecución del ensayo no ha existido ningún problema interno en la máquina que haya modificado la longitud del mismo, el programa, de una manera aproximada, mide el tiempo que éste ha durado. Para ello controla tanto el instante en que se inicia como el que finaliza la captura de la presión. La diferencia entre ambos instantes será el tiempo que, aproximadamente, ha durado el ensayo y que debe acercarse a la duración que se haya introducido antes de su inicio. La estimación de la duración muestra sistemáticamente un error por exceso, siempre inferior a un segundo, puesto que las instrucciones de captura de los instantes de tiempo, además de llevar consigo un cierto tiempo de ejecución, no pudieron colocarse exactamente antes ni después de las instrucciones de inicio y fin de toma de datos.

Número de puntos tomados durante el ensayo. Valor igual al tiempo de duración, según el caso 30 s ó 25.6 s, multiplicado por la frecuencia de adquisición del ensayo, 1600 Hz, resultando en cada caso 48000 ó 40960 puntos.

Número de puntos archivados, después del filtrado digital. Este valor es igual al número total de puntos tomados (48000 ó 40960) por el cociente entre dos veces la frecuencia de filtrado y la frecuencia de adquisición (normalmente 2·40/1600 Hz). Así, con los valores que habitualmente se han usado durante la campaña deberá resultar 2400 ó 2048 puntos almacenados en un archivo.

- Con fondo azul y letra roja se seleccionará la posibilidad de guardar un ensayo en un archivo. Ello permitirá la adquisición de datos, evitando su almacenamiento en el disco del ordenador, hasta que se considere que la presión llegó a un valor estacionario. En este instante se podrá ejecutarse un ensayo y ser almacenado en un archivo. Entonces, al iniciarse el ensayo, el programa pregunta por el nombre y ubicación del archivo en el cual éste será almacenado, requiriendo de un nombre, a lo sumo de 8 caracteres. Así se crearán dos archivos con el mismo nombre y distintas extensiones –INF y PRS–:

– ENSAYO.INF: en el que se almacenará la información específica del ensayo en cuestión: instantes de inicio y final del ensayo, caudal, ubicación de los puntos de medida, frecuencia de filtrado, ecuación de transformación de la señal en voltaje a presión y un resumen estadístico del ensayo llevado a cabo. En la Figura 2.15 se muestra el aspecto de dicho archivo.

– ENSAYO.PRS: en éste se guardarán todos los puntos registrados en dicho ensayo por cada canal. En la Figura 2.16 se muestra el formato de estos archivos. En total debe haber almacenados un número de puntos ( $n$ ) igual a:

$$n = T \cdot f \quad (2.2)$$

donde  $T$  es la duración del ensayo y  $f$  la frecuencia de filtrado digital. Es de interés recordar que la toma de datos no es simultánea en todos los sensores, sino que entre ellos existe un desfase igual a:

$$\frac{1}{c \cdot f} \quad (2.3)$$

donde  $c$  es el número de sensores utilizados en el ensayo y  $f$  es la frecuencia de adquisición. En el último párrafo del anterior apartado 4.1 se ha descrito el proceso de registro del sistema.

- Asimismo en la esquina inferior izquierda el programa informa al usuario del proceso en el que se encuentra el ensayo, mediante un círculo que cambia de color cuando el ensayo supera sus diversas fases:

- Color rojo: mientras el sistema está adquiriendo los datos correspondientes a ese ensayo.
- Color amarillo: una vez a empezado el proceso de filtrado digital de la señal registrada.
- Color verde: mientras guarda el ensayo, ya filtrado, en el archivo que inicialmente se la haya especificado.

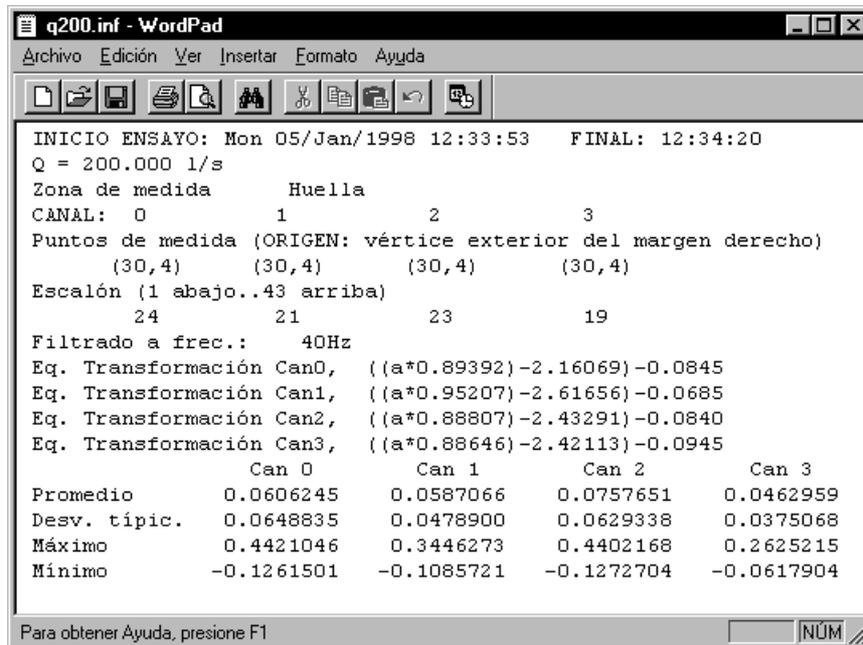


Figura 2.15. Formato típico del archivo de extensión INF en el que se almacena un ensayo.

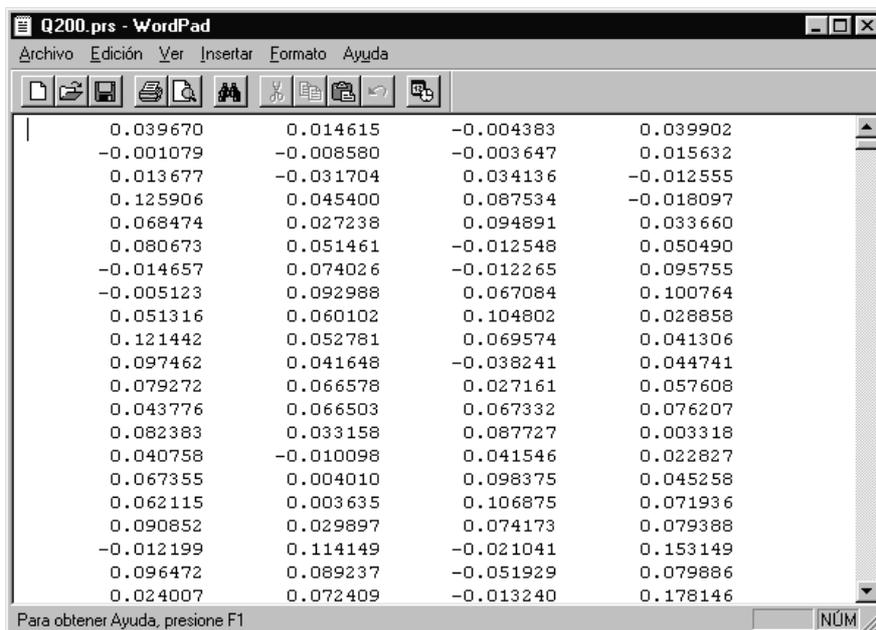


Figura 2.16. Formato típico del archivo de extensión PRS en el que se almacena un ensayo. Cada columna corresponde, por orden, a cada uno de los cuatro canales utilizados en la campaña de ensayos.

El programa se ejecutará presionando el botón “RUN” ubicado en la zona superior de la pantalla, o bien mediante la combinación de teclas CTRL+G.

Las Figura 2.17 y Figura 2.18 presentan los diagramas de flujo del programa de adquisición de datos, y del proceso de filtrado digital, respectivamente.

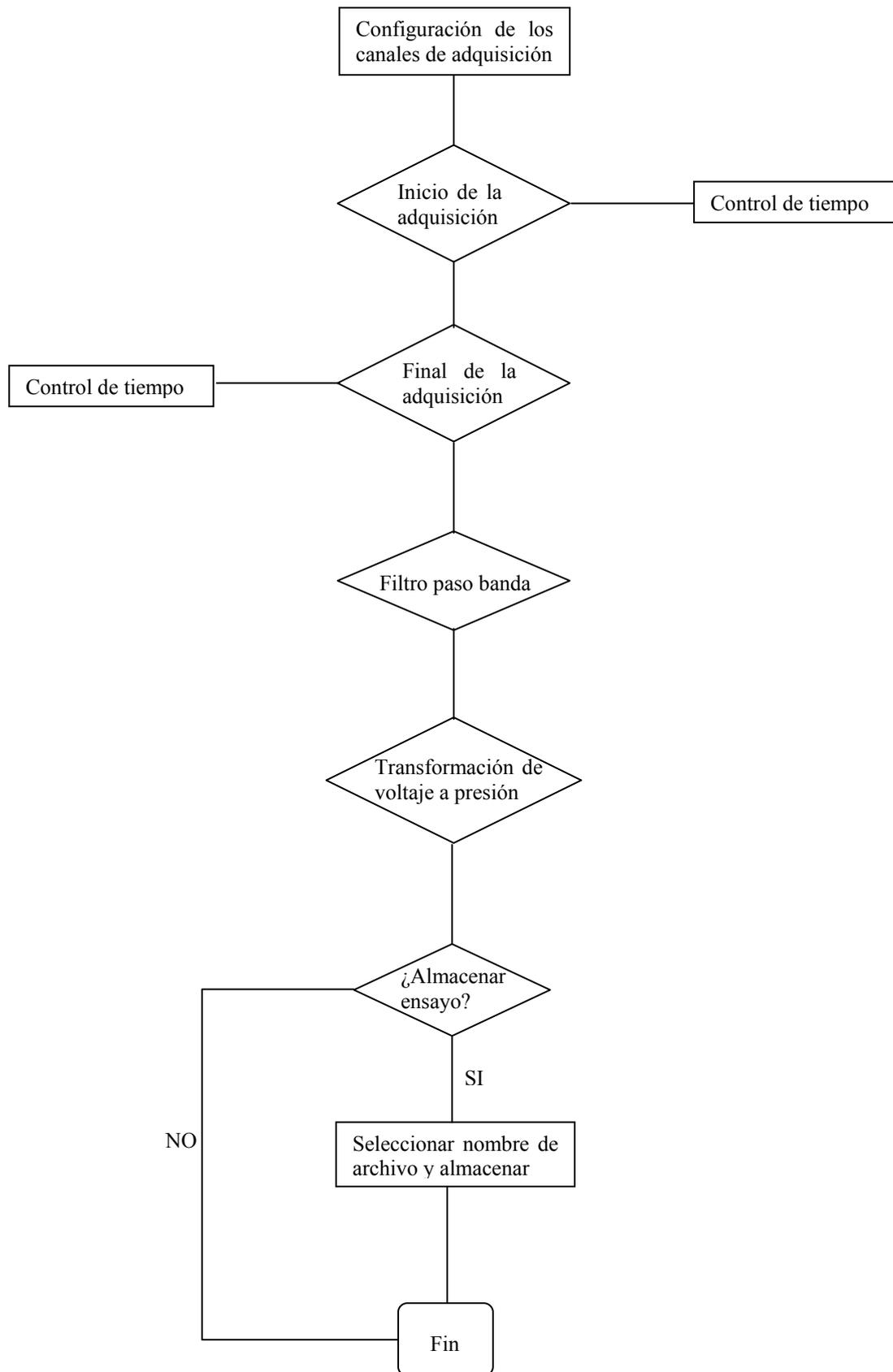


Figura 2.17. Diagrama de flujo correspondiente al programa de adquisición de datos.

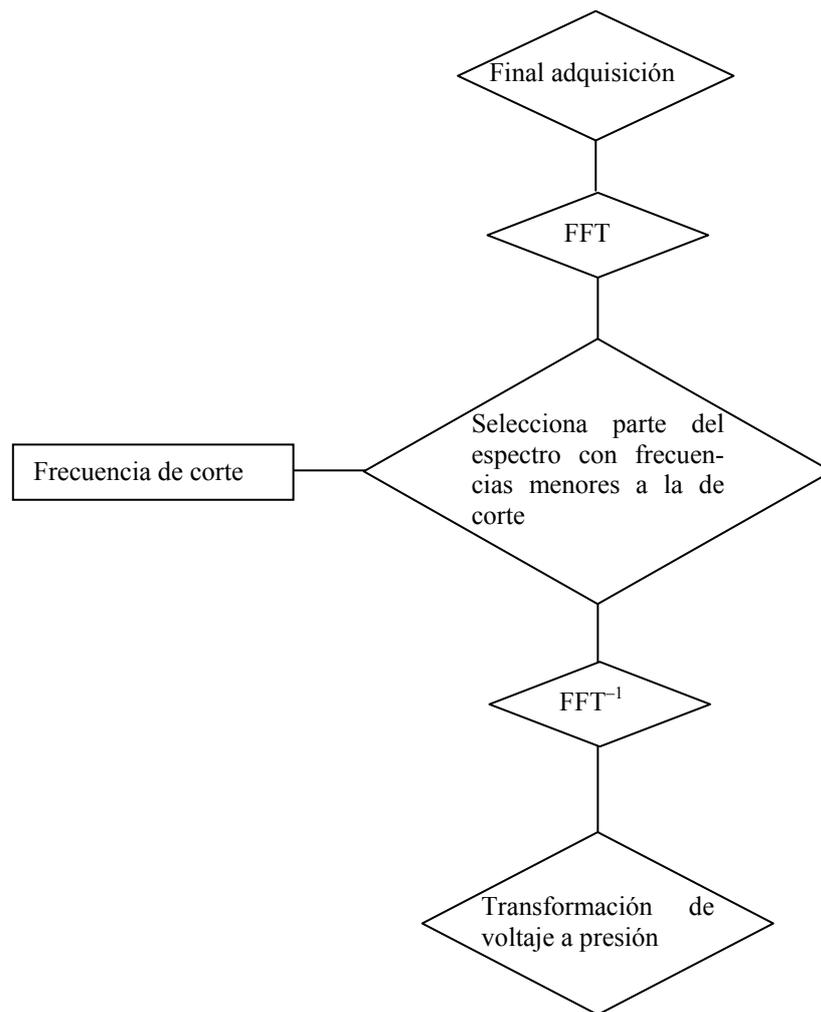


Figura 2.18. Diagrama de flujo del filtrado digital al que son sometidos todos los ensayos durante el proceso de adquisición de datos.

### 4.3. Gestión de los archivos registrados

Durante las sesiones de ensayos los archivos son almacenados en el disco duro del ordenador en carpetas nombradas según el día en que se realizó la sesión. Para tener controlados todos y cada uno de los registros que se han llevado a cabo se organizó una base de datos, que iba completándose al final de cada sesión, en la que se detallan las principales características de los registros que se han ido tomando. En la Figura 2.19 se puede apreciar el formulario tipo, de dicha base de datos.

Posteriormente, ya en gabinete, se procedió a reordenar y renombrar cada uno de los casi 600 registros que se tomaron durante las largas sesiones de ensayos que se llevaron a cabo. La reordenación de los archivos se estableció según objetivos. Así se han establecido 4 tipos diferentes:

1. Grupo Adaptadores: ensayos a partir de los cuales se fijó el mejor diámetro de conexión entre los adaptadores de los sensores piezorresistivos y los puntos de medida (ver apartado 4 del Capítulo 3).
2. Grupo Bidimensionalidad: sesiones de ensayos correspondientes al análisis de la bidimensionalidad del modelo (ver Capítulo 3 apartado 5). Éste fue dividido en tres subdirectorios más, que contienen los registros llevados a cabo bajo diferentes condiciones de tranquilización del flujo en el canal de aproximación al aliviadero:

- Subgrupo *EnsayosPrevios*: primeros registros que permitieron constatar un dudoso comportamiento bidimensional del flujo. El canal de aproximación del flujo a la rápida estaba libre de cualquier elemento tranquilizador.
- Subgrupo *DeflectLaterales*: sesiones correspondientes al primer intento de corregir la no bidimensionalidad del flujo mediante la instalación en los cajeros del canal de aproximación de unos elementos que evitaran la concentración del flujo en un margen del canal.
- Subgrupo *ParrillaDisipa*: presiones captadas después de completar los anteriores deflectores laterales con dos estructuras tranquilizadoras del flujo en la aproximación a la rápida. Ello permitió corregir los problemas observados en el estudio previo de la bidimensionalidad del flujo.

The screenshot shows a window titled "Resumen de los ensayos" with the following fields and values:

- Fecha:** 30/12/97 11:00:00
- Descripción de la sesión de ensayo:** Análisis de la presión a lo largo del aliviadero. Medida en el centro de simetría de las huellas.
- Directorio de trabajo:** c:\Vee\Vee\_user\Campanya\97\_12\_30
- Archivo ASCII:** q75f80.inf
- Archivo ZIP:** 97\_12\_30.zip
- Frecuencia Muestreo:** 80
- Caudal (l/s):** 75
- Situación del sensor:** P
- Posición Canal 0:** (30,4,39)
- Posición Canal 1:** (30,4,37)
- Posición Canal 2:** (30,4,35)
- Posición Canal 3:** (30,4,32)
- Posición Canal 4:** (empty)

At the bottom, there is a status bar: "Registro: 150 de 593".

Figura 2.19. Formulario resumen de los distintos registros llevados a cabo.

3. Grupo Uniformidad: se ha registrado la presión a lo largo del aliviadero, midiéndose en el centro de simetría de las huellas y contrahuellas. Esta carpeta se dividió en dos subdirectorios:
  - Subgrupo *Huella*: correspondiente a las medidas sobre las huellas, y que a su vez se subdividió en dos carpetas más, a saber:
    - Subgrupo *CrestaLibre*: medidas de la presión que permitieron un completo análisis de su evolución a lo largo del aliviadero, con condiciones “normales” de caída libre en el umbral de la estructura.
    - Subgrupo *CrestaPresión*: cubriendo mediante una plancha de madera el entorno del umbral de la estructura, se provocó la entrada en carga del flujo en la cresta de la rápida. Se pretendía analizar si se modificaban los registros de las presiones aguas abajo del modelo.
      - Subgrupo *Contrahuella*: correspondiente a las medidas sobre las contrahuellas. Este grupo de ensayos se llevó a cabo únicamente con el umbral funcionando en lámina libre.
4. Grupo Perfiles: se agrupan en este directorio todos los ensayos que permiten caracterizar los perfiles de presiones sobre los peldaños. Se ha dividido según la ubicación en:
  - Subgrupo *Huella*.
  - Subgrupo *Contrahuella*.

## 5. Metodología experimental

### 5.1. Introducción

Definido el campo de presiones como la variable a investigar, éste dependerá de dos variables independientes:

- Caudal específico ( $q$ ), que se encuentra limitado por la propia infraestructura del Laboratorio y está comprendido entre 0 y  $0.333 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (caudal máximo ensayado 200 l/s).
- Posición del punto de medida ( $x, y, z$ ) en cada escalón. Se referirá a un sistema de ejes cartesianos con origen en el vértice exterior del margen derecho del escalón, siendo el eje  $x$  la recta coincidente con la arista exterior (sentido positivo hacia el margen izquierdo), el eje  $y$  perpendicular a esta arista en el plano de la huella y su sentido positivo hacia la contrahuella del escalón de aguas arriba, y finalmente el eje  $z$  corresponderá a la perpendicular en el plano de la contrahuella con sentido positivo hacia la huella de aguas abajo (ver Figura 2.20). Para localizar en cada caso el escalón de medida se utilizará la distancia del correspondiente origen de coordenadas a la cresta del aliviadero, medida como la longitud ( $L$ ) que recorrería una gota de agua que se moviera sobre una rápida lisa equivalente a la escalonada.

Se justificará más adelante que el flujo es bidimensional a lo largo de la rápida, con lo cual el comportamiento de la presión deberá resultar simétrico respecto el eje longitudinal de simetría  $ss'$  (recta  $x = 0.30 \text{ m}$ ) de la estructura. Ello permitirá extender a todo el ancho las medidas llevadas a cabo sobre puntos situados en el eje  $ss'$  citado.

### 5.2. Análisis dimensional del campo de presiones

Así pues, el campo de presiones dependerá del caudal unitario  $q$  circulante y de la posición ( $x, y, z$ ) del punto de registro. Para terminar de caracterizar el campo de presiones habrá que introducir, además, aquellas variables que definan las características del fluido y del contorno. Así, se establecerá el campo de presiones como una función:

$$p = p(q, \alpha_i, \xi_j, \rho, g) \quad (2.4)$$

donde las nuevas variables introducidas<sup>1</sup> son:

- $\alpha_i$ , cualquiera de las cuatro variables que permiten caracterizar la posición del punto de medida ( $L, x, y, z$ ).
- $\xi_j$ , que representa cualquiera de los parámetros que definan el contorno del modelo. Pueden considerarse en total tres parámetros que, tal como se ha descrito en el apartado 3, serán constantes:
  - $h$ , corresponde a la altura de la contrahuella de un escalón. En el presente estudio toma el valor 0.10 m.
  - $l$ , será la longitud de la huella de un escalón. Adoptará en este caso el valor 0.08 m.
  - $B$ , es el ancho de la rápida construida en el Laboratorio. Fijada en 0.60 m.
- $\rho$ , densidad del fluido.
- $g$ , aceleración de la gravedad, que es el único campo de fuerzas exteriores actuantes sobre el flujo.

A continuación se aplicará el teorema  $\Pi$  cuya justificación puede encontrarse en Langhaar (1951). Para llevar a cabo el citado análisis, la función dada por la expresión (2.4) se escribirá como:

$$f(p, q, \alpha_i, \xi_j, \rho, g) = 0 \quad (2.5)$$

<sup>1</sup> Es de destacar que no han sido consideradas en el análisis ni la tensión superficial ni la viscosidad. Ello es debido a que las velocidades y la elevada turbulencia que se presentan en el flujo, hacen que el efecto sobre éste de las fuerzas debidas a ambas, pueda considerarse despreciable frente a las fuerzas gravitatorias y de inercia.

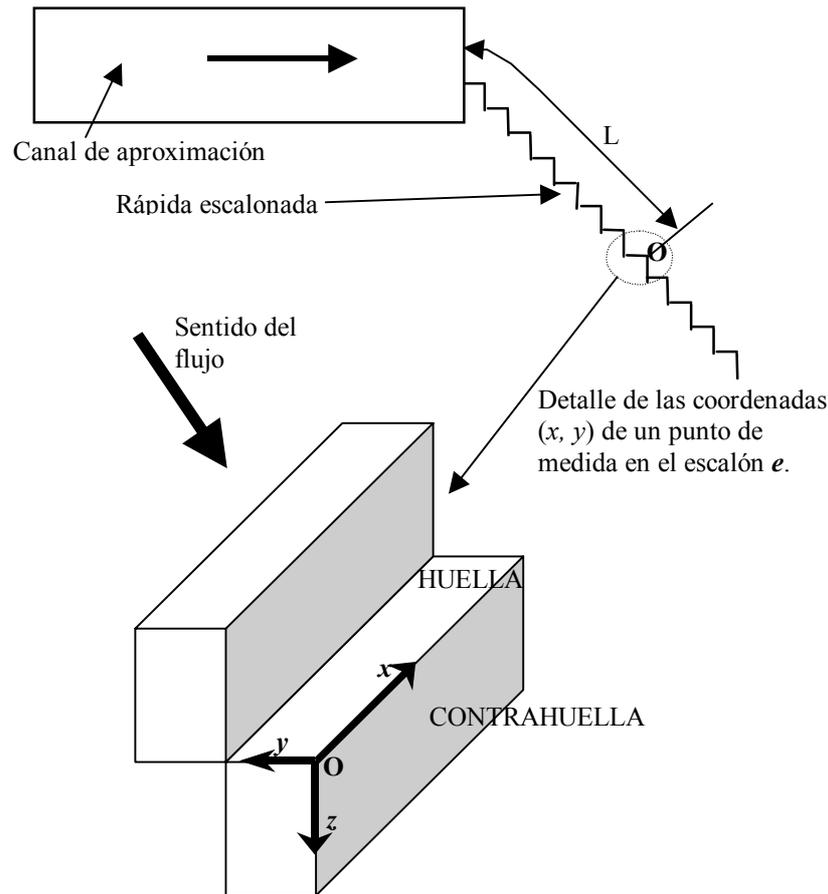


Figura 2.20. Coordenadas utilizadas para referir cada punto de medida.

y se escogerá como sistema fundamental de magnitudes la longitud ( $l$ ), la masa ( $m$ ), y el tiempo ( $t$ ). La expresión (2.5) relaciona magnitudes que dependen de estas 3 magnitudes fundamentales. El teorema  $\Pi$ , permite, entonces, afirmar que se podrá establecer una relación funcional:

$$\Psi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = 0 \quad (2.6)$$

que incluye tres magnitudes adimensionales independientes. Estas magnitudes se definen a continuación. Cada una de las variables de las que depende el problema puede escribirse como magnitudes derivadas del sistema fundamental como:

$$[p] = \frac{[m] \cdot [l] \cdot [t]^{-2}}{[l]^2} = [m] \cdot [l]^{-1} \cdot [t]^{-2} \quad (2.7)$$

$$[q] = \frac{[l]^3 \cdot [t]^{-1}}{[l]^1} = [l]^2 \cdot [t]^{-1} \quad (2.8)$$

$$[\alpha_i] = [l] \quad (2.9)$$

$$[\xi_i] = [l] \quad (2.10)$$

$$[\rho] = [m] \cdot [l]^{-3} \quad (2.11)$$

$$[g] = [l] \cdot [t]^{-2} \quad (2.12)$$

Tomando de estas expresiones los exponentes que relacionan las variables del problema con el sistema base elegido ( $[l]$ ,  $[m]$  y  $[t]$ ), podrá escribirse la matriz:

$$\begin{array}{c|ccc|ccc}
 & \mathbf{p} & \mathbf{q} & \boldsymbol{\alpha}_i & \boldsymbol{\xi}_j & \boldsymbol{\rho} & \mathbf{g} \\
 \hline
 \mathbf{l} & -1 & 2 & 1 & 1 & -3 & 1 \\
 \mathbf{M} & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 \mathbf{t} & -2 & -1 & 0 & 0 & 0 & -2
 \end{array} \quad (2.13)$$

De esta matriz, puede escogerse el menor formado por las columnas correspondientes a las magnitudes  $\xi_i$ ,  $\rho$  y  $g$ , cuyo rango se observa que es igual a 3, con lo que se concluye que el resto de las magnitudes podrá expresarse como combinación lineal éstas. Mediante las operaciones de fila en la matriz (2.13) se puede diagonalizar el menor citado:

$$\begin{array}{c|ccc|ccc}
 & \mathbf{p} & \mathbf{q} & \boldsymbol{\alpha}_i & \boldsymbol{\xi}_j & \boldsymbol{\rho} & \mathbf{g} \\
 \hline
 \mathbf{l} & 1 & 3/2 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 \mathbf{M} & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 \mathbf{t} & 1 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \quad (2.14)$$

Podrá escribirse, entonces que:

$$[\mathbf{p}] = [\boldsymbol{\rho}] \cdot [\mathbf{g}] \cdot [\boldsymbol{\xi}_p] \quad (2.15)$$

$$[\mathbf{q}] = [\boldsymbol{\xi}_q]^{3/2} \cdot [\mathbf{g}]^{1/2} \quad (2.16)$$

$$[\boldsymbol{\alpha}_i] = [\boldsymbol{\xi}_{\alpha_i}] \quad (2.17)$$

O bien en forma de parámetros adimensionales:

$$\Pi_p = \frac{p}{\rho \cdot g \cdot \xi_p} \quad (2.18)$$

$$\Pi_q = \frac{q}{g^{1/2} \cdot \xi_q^{3/2}} \quad (2.19)$$

$$\Pi_{\alpha_i} = \frac{\alpha_i}{\xi_{\alpha_i}} \quad (2.20)$$

### 5.2.1. Significado físico de los números adimensionales $\Pi_j$

Obsérvese como en las expresiones (2.15) a la (2.20) el factor de forma  $\xi_j$ , se ha substituido en cada caso por  $\xi_p$ ,  $\xi_q$  y  $\xi_{\alpha}$ . Con ello pretende ponerse de manifiesto, de manera explícita, la definición que se ha establecido del factor  $\xi_j$  al inicio del apartado anterior, según la cual éste puede representar hasta cuatro parámetros distintos que caracterizan la geometría del modelo reducido. Para cada número adimensional  $\Pi_j$  se fijará un factor de forma  $\xi_j$  distinto, en función de la consistencia que le confiera al significado físico del número  $\Pi_j$  en cuestión.

- Número de presión  $\Pi_p$ . El análisis dimensional desarrollado anteriormente, condujo al parámetro  $\Pi_p$  de la ecuación (2.18). En este caso, se adoptará  $\xi_p = h = 0.100$  m, altura de un escalón.
- Número de caudal  $\Pi_q$ . El parámetro adimensional  $\Pi_q$  establecido en la expresión (2.19) aparece conceptualmente como un número de Froude. Si el factor de forma  $\xi_q$  se toma como la altura de los escalones ( $h = 0.10$  m), el parámetro  $\Pi_q$  pasa a representar el cociente entre el calado crítico asociado al caudal circulante y dicha altura –salvo una potencia 3/2–.

$$\frac{y_c}{h} = \frac{\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}}{h} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g h^3}} = \sqrt[3]{\Pi_q^2} \quad (2.21)$$

Si el flujo que se produce sobre la rápida fuera escalón a escalón al considerar  $\xi_q = h = 0.10$  m,  $\Pi_q$  estaría representando –salvo un factor  $1/\sqrt{2}$ – el cociente entre el espesor del chorro que impacta en la huella inferior ( $b = q/v$ ), y la altura de la caída ( $h$ ), puesto que  $v = \sqrt{2gh}$  es la velocidad de un chorro de fluido en caída libre desde una altura  $h$ :

$$\frac{b}{h} = \frac{q/v}{h} = \frac{q/\sqrt{2gh}}{h} = \frac{\Pi_q}{\sqrt{2}} \quad (2.22)$$

- *Número de posición  $\Pi_\alpha$ .* Bajo la notación dada por la expresión (2.20), se podrá adimensionalizar cualquiera de las tres coordenadas –definidas en el apartado 5.2 y en la Figura 2.20– que determinan un cierto punto de medida. Así con este número adimensional podrá describirse la posición de los puntos de medida según las coordenadas adimensionales siguientes:

$$\Pi_x = \frac{x}{B} \quad (2.23)$$

$$\Pi_z = \frac{z}{h} \quad (2.24)$$

$$\Pi_y = \frac{y}{l} \quad (2.25)$$

$$\Pi_L = \frac{L}{k_s} \quad (2.26)$$

Los parámetros con los que se adimensionalizarán dichas coordenadas respectivamente son: el ancho del modelo ( $B = 0.600$  m), la longitud de la huella ( $l = 0.080$  m), la altura de la contrahuella ( $h = 0.100$  m) y la altura ( $k_s$ ) del triángulo rectángulo que tiene por catetos la altura ( $h$ ) de la contrahuella y la longitud ( $l$ ) de la huella del mismo. El número adimensional  $\Pi_L$  corresponde a la extensión, a un aliviadero escalonado, de la variable propuesta por Knight (1979) sobre una rápida lisa.

