

3 CAPÍTULO

EXPERIMENTACIÓN

ÍNDICE

3	CAPÍTULO: EXPERIMENTACIÓN	262
3.1	INTRODUCCIÓN.....	262
3.2	ELABORACIÓN DE LAS VIGAS	262
3.3	MATERIALES	267
3.4	INSTRUMENTACIÓN.....	270
3.5	MONTAJE Y ENSAYO	274

3 CAPÍTULO: EXPERIMENTACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

Una campaña experimental consta de varias fases: una fase inicial de objetivos y diseño; una fase intermedia y dilatada de desarrollo de la experimentación propiamente dicha; y otra fase final de análisis de resultados. En esta parte del documento se explica todo lo relativo al proceso de experimentación. A priori puede parecer que ensayar unas pocas vigas es un trabajo liviano. Pero en contra de lo que pueda parecer es un trabajo duro, y a la vez gratificante si se saca provecho a los experimentos realizados y se aprende de lo que arrojan los datos. Esta fase es la más larga de las tres, y conllevan una multitud de tareas bastante considerable. Básicamente se puede subdividir en tres subfases importantes, una de elaboración de las vigas, otra de instrumentación y finalmente de montaje y ensayo. Cabe decir que cada subfase no es independiente, en concreto a la vez que se elabora las vigas se van instrumentalizando. Cada una de estas fases se explica en los apartados siguientes.

3.2 ELABORACIÓN DE LAS VIGAS

Todas las vigas se hicieron “in situ” en el laboratorio. Para hacer más instructivo y ameno este apartado, se expone a continuación cronológicamente todas las tareas de las que consta acompañada de alguna fotografía interesante.

- Montaje de la armadura:

Los montajes de las armaduras se hicieron en base a los croquis de armados anteriormente mostrados. A modo de resumen existen dos tipos armados que básicamente se diferencian en el diámetro de las barras longitudinales inferiores, una consta de dos barras de diámetro 8mm de GFRP (que es la viga que rompe por tracción de la armadura), y otra de 12mm (que es la que rompe por compresión del hormigón). Las armaduras transversales son iguales para sendas vigas, colocándose cercos de 6mm de diámetro cada 15cm. Además es necesaria una armadura superior portaestribos compuesta de dos barras de 6mm. En el laboratorio existía un tipo de armadura que encajaba casi exactamente con la disposición requerida. Esto nos supuso un ahorro de tiempo y de trabajo considerable pues sólo se tuvo que cambiar las barras inferiores de acero por las de FRP respectivamente. Véase figura siguiente.



Fig. 3.1: Armadura a modificar

En esta figura se puede ver la armadura con la que se partía. Se tuvo que romper todos alambres que sujetaban las barras inferiores y colocar respectivamente las nuevas barras de GFRP. Además, como estaba previsto en el diseño inicial, se quitaron los cercos de la región central de la viga. A continuación se muestra unas fotografías con la armadura final montada y un detalle de la región media sin cercos.



Fig. 3.2: Armadura final

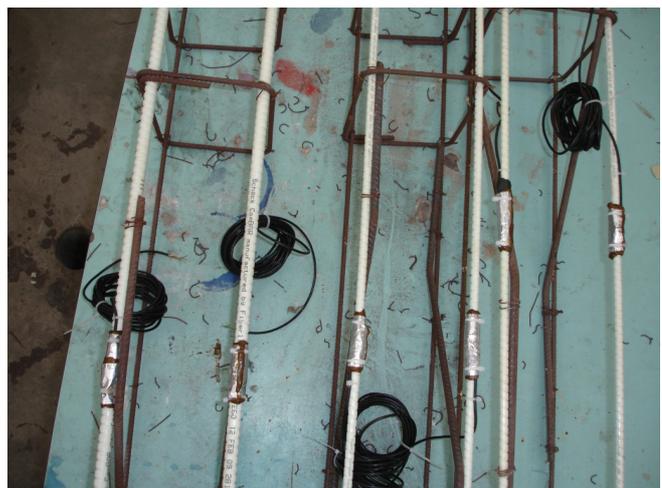


Fig. 3.3: Detalle de región central

Cabe mencionar que una tarea precedente al montaje de la armadura fue la colocación de unas bandas extensométricas en las barras de FRP. En las imágenes anteriores se puede ver éstas ya pegadas y protegidas del hormigón. El objetivo de estas bandas, junto con otras pegadas en el hormigón, es estudiar el comportamiento de las vigas ante cargas de servicio.

– Montaje del encofrado:

El encofrado es un molde formado por chapas de acero que conforman el perímetro de la viga. En él se introduce las armaduras con sus correspondientes separadores y se vierte el hormigón. En el laboratorio se contaba exactamente con cuatro moldes, justo los que los que se necesitaba. Si hubiera habido menos se tendría que haber hormigonado por parte cada una de las vigas y por tanto el proceso de elaboración hubiera tardado más tiempo. A continuación se muestran unas imágenes con los moldes ya montados.



Fig. 3.5: Detalle de sellado

Fig. 3.4: Encofrado

A parte del montaje del encofrado, se sellaron todas las juntas con silicona para evitar la posible pérdida de agua del hormigón fresco (Véase Fig. 3.5). Además, para evitar que el hormigón se adhiriera a las paredes, se impregnaron los moldes con un líquido desencofrante similar al aceite. Este líquido también se utilizó para las probetas de hormigón que se tomaron.

– Colocación de la armadura:

Previo al hormigonado de las vigas, se colocaron las armaduras dentro de los moldes. Para asegurar que los recubrimientos fueran los adecuados se colocaron unos separadores de plástico de 25 cm. Véase figura siguiente.



Fig. 3.6: Colocación de las armaduras en los moldes

En esta imagen se puede ver con todo detalle cómo va montada la armadura con sus correspondientes separadores. Prestar atención a la armadura que sobresale del molde, ésta es una asa que se coloca en la viga para poder trabajar con ellas y levantarlas con el puente grúa, evidentemente en el otro extremo opuesto de la viga se coloca la otra. Por último resaltar el brillo que se aprecia en los moldes, esto es el líquido desencofrante que anteriormente se comentó.

– Hormigonado:

Según el diseño, estaba previsto utilizar dos tipos de hormigón, HA-50 correspondiente a la viga de rotura por tracción de la armadura inferior, y HA-30 correspondiente a la viga de rotura a compresión del hormigón. Los dos tipos de hormigones fueron fabricados “in situ”, utilizando cemento Pórtland con una relación agua cemento de 0.4 y 0.5 respectivamente (Para más detalle de la dosificación véase apartado de materiales). El proceso de fabricación fue artesanal, se utilizó un peso digital de precisión 0.1 kg para medir los componentes y una hormigonera convencional de no se cuanto litros de capacidad 70 l. para elaborar la mezcla. Teniendo en cuenta que el volumen de la viga es de 140 l., era necesario hacer dos hormigonados por cada viga, tomándose una muestra de cada uno de ellos para ensayar. Es decir, de cada viga se obtuvieron 2 probetas cilíndricas para luego comprobar su resistencia real. A continuación se muestran unas fotografías del vertido del hormigón.



Fig. 3.7: Vertido del hormigón

Una vez vertido el hormigón en los moldes se vibró para asegurar que no quedara ningún poro interno. Por último se paso una plana para que la superficie superior quedara lo más homogénea y lisa posible (ver imágenes siguientes)



Fig. 3.8: Plana de la viga

- Desencofrado:

Ésta es la última tarea de elaboración de las vigas. Como su propia palabra indica consiste en quitar los moldes y dejar la viga libre de encofrados. Evidentemente esta



Fig. 3.9: Vibrador

tarea ha de ser desarrollada una vez halla pasado suficiente tiempo y el hormigón halla fraguado. En concreto, en esta campaña se espero aproximadamente 15 para desencofrar. Mencionar que gracias al líquido desencofrante las chapas de acero se deslizaron y quitaron sin muchos problemas. A partir de entonces sólo faltaba esperar 13 días más para que el hormigón adquiriera la resistencia buscada y pudiera ser ensayado. A continuación se muestran unas fotos con las vigas finalmente acabadas.



Fig. 3.10: Vigas ya acabadas

3.3 MATERIALES

Como ya es sabido se diseñaron dos tipos de vigas, uno por rotura del hormigón y otra del refuerzo. Evidentemente para cada una de ellas se utilizaron hormigones y refuerzos diferentes para promover su respectivo fallo. En el caso de rotura por compresión del hormigón se diseñó con un hormigón convencional de 30MPa de resistencia característica, sobre-reforzándose la sección con dos barras de GFRP de diámetro 12mm. Mientras que para el otro tipo de viga se optó por un hormigón de mayor resistencia, 50 MPa, y barras de menor diámetro, esto es, de 8mm.

Entrando en detalles sobre el hormigón, ambos tipos fueron fabricados “in situ”. El hormigón HA-30 presentaba una dosificación de 225 Kg/m³ de agua, 874 Kg/m³ de arena, 989 Kg/m³ de gravas de 20mm de tamaño máximo de árido y 450 Kg/m³ de cemento, con una relación agua cemento de 0.5. Mientras que la dosificación del HA-50 era de 180 Kg/m³ de agua, 674 Kg/m³ de arena, 1052 Kg/m³ de gravas de 20mm de tamaño máximo de árido y 450 Kg/m³ de cemento, con una relación agua cemento de 0.4.

Para el control y caracterización del hormigón se tomaron muestras normalizadas de cada una de las amasadas. Concretamente para cada viga era necesario dos amasadas de las que se tomó una muestra de cada una de ellas, esto es, 2 muestras por viga. Las muestras responden a probetas cilíndricas de dimensiones normalizadas 150x300 mm. Estas se ensayaron al mismo tiempo que las vigas, esto es,

aproximadamente entre los 30 y 38 días, siguiendo por supuesto la norma pertinente UNE-EN 12390. A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos

Probeta N°:	Resistencia f_c (N/mm)
1	39.19
2	39.79
3	29.90
4	2.50
5	41.64
6	49.25
7	47.21
8	48.26

En lo que se refiere al refuerzo principal longitudinal inferior, se utilizaron barras de material compuesto por matriz polimérica de tipo viniléster reforzada con fibras de vidrio (Fabricante SCHOCK COMBAR). Fueron fabricadas mediante un proceso de pultrusión mediante el cual, las fibras se guiaban a través de unas herramientas en un proceso continuo y eran impregnadas con una resina líquida. Antes de su endurecimiento eran perfiladas formándose las corrugas. Como resultado un material reforzado con propiedades químicas y físicas únicas. Destacar su excelente resistencia a la tracción en dirección axial (superior a 1000 MPa) y el relativo alto módulo elástico (60 MPa) respecto al comúnmente utilizado entre 30-45MPa. Se utilizaron dos tipos de barras, una de 8mm y otra de 12 mm de diámetros. Sus propiedades fueron tomadas del fabricante, además de las recomendaciones dadas. A continuación se muestra una tabla con sus más relevantes características.

	8	12
Diámetros de barras (mm)	8	12
Área de la sección (cm ²)	0.5	1.13
Tensión última (f_{fk} en N/mm ²)	1500	1350
Módulo elástico (E_f en N/mm ²)	60000	
Adherencia	Similar acero	
Recubrimiento mínimo (mm)	$\phi + 10$ mm	
Coefficiente de seguridad parcial (γ_m)	1.2	
Densidad (g/cm ³)	2.2	
Temperatura de reblandecimiento (°C)	180	
Coefficiente de expansión térmica radial (1/°C)	$2.2 \cdot 10^{-5}$	
Absorción de agua	< 0.3%	

En el laboratorio se intentó caracterizar las barras, esto es, obtener su resistencia última a tracción y módulo elástico mediante un ensayo a tracción. Se utilizó una máquina tipo Instron 4482 y se empezó por las barras de diámetro 8 mm. El ensayo se controló en posición a una velocidad de 4.9 mm/min. No obstante a unos 1000 kg de carga las barras se empezaron a deslizar de las mordazas. La máquina tenía un sistema de sujeción en cuña que las presionaba a medida que aumentaba la carga a tracción para evitar el deslizamiento. Pero debido a la poca resistencia trasversal llegaba a una presión a la cual destrozaba las barras y deslizaban. Se planteó mecanizar la parte central para que la carga de rotura fuera algo menor, pero aún así se volvió a deslizar y se desistió el ensayo. Aunque no se pudo calcular la tensión última sí que se comprobó que se comportaba elásticamente lineal, hasta al menos la

carga de deslizamiento, pudiendo también estimar su módulo elástico. A continuación se expone la gráfica obtenida y el cálculo del módulo elástico.

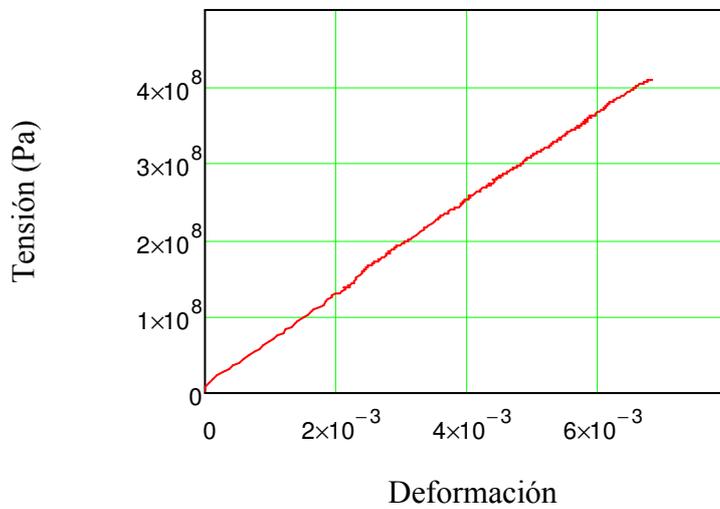


Fig. 3.11: Curva de tensión deformación para una barra de 8 mm mecanizada a diámetro de 5.5 mm.

Para el cálculo del módulo elástico se ha escogido el valor pésimo del mismo, esto es, el más bajo encontrado:

$$E = \frac{\text{Tensión}}{\text{Deformación}} = 60.13\text{GPa}$$



Fig. 3.12: Ensayo de tracción de barras de GFRP



Fig. 3.13: Barra de GFRP mecanizada



Fig. 3.14: Rotura transversal de la barra

Por último recordar que también se utilizó acero para la armadura transversal y superior longitudinal portaestribos. El acero que se utilizó fue uno convencional de 400 MPa de límite elástico y 200 GPa de módulo elástico.

3.4 INSTRUMENTACIÓN

El objetivo de esta experimentación es estudiar el comportamiento de las vigas bajo cargas de servicio. En concreto se pretende estudiar la evolución de la flecha, de la curvatura y de la fibra neutra, además de la carga última soportada y modo de fallo. También sería interesante estudiar la evolución de la abertura de fisura, pero el laboratorio carece de los instrumentos precisos para registrarlo. Obviamente para recoger todos estos datos fue necesario instrumentalizar los experimentos. A continuación se explican las diferentes partes de las que consta el sistema de instrumentación utilizado:

Sensores o transductores: Elementos sensibles a una magnitud física, en función de la cual, generan una señal de otro tipo, ya sea presión, desplazamiento, voltaje o corriente eléctrica. En nuestro caso se utilizaron unos con una salida eléctrica, pues esta señal es fácil de transmitir, acondicionar, digitalizar y registrar para luego ser analizada. Normalmente vienen caracterizados por su rango de medida, sensibilidad y error de linealidad. Existen varios tipos de sensores que pueden clasificarse por el tipo de magnitud a medir y su principio de funcionamiento. Particularmente en nuestro caso se dispuso los siguientes:

- Para registrar la fuerza se utilizó una célula de carga extensométrica, colocada bajo el pistón hidráulico, capaz de medir hasta 250kN. Su error de linealidad es de 0.1% el fondo de escala, siendo su sensibilidad de $4.216 \frac{\text{mV}}{\text{V}} \cdot \frac{1}{250\text{kN}}$

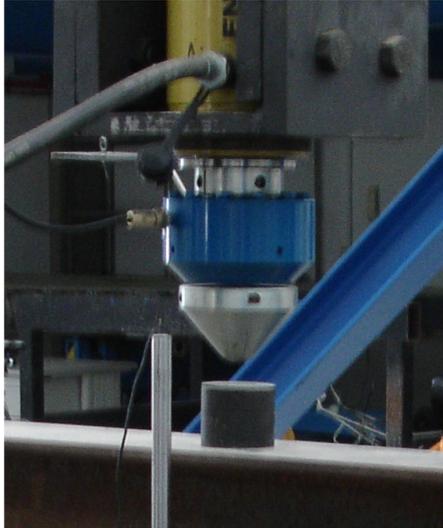


Fig. 3.15: Célula de carga

- Para la flecha se utilizó un transductor de desplazamiento tipo LVDT de rango ± 50 mm. y sensibilidad 0.19862 V/mm. Para registrar la flecha en la mitad de la viga se le pegó una placa, tal como se aprecia en la imagen, en la que se apoyaba la varilla del transductor. Obviamente, para medir la flecha absoluta, el sistema de sujeción de éste era totalmente independiente a la viga.



Fig. 3.16: Transductor de desplazamiento tipo LVDT

- Mientras que para medir la curvatura y fibra neutra se dispuso de una serie de bandas extensométricas pegadas en la sección central. Concretamente se pegaron 4 bandas en la superficie del hormigón, dos en la cara superior repartidas equidistantemente y una en cada lateral de la viga a 2 cm. y 1.5 cm de la cara superior para la viga por rotura del hormigón y rotura de la armadura respectivamente. Todas éstas eran de la marca HBM tipo 50/120LY41 con un factor de banda (K) de 2.11. Además era necesario recoger la deformación de las barras luego se pegaron dos bandas, una en cada una de las barras. Estas últimas también de la marca HBM pero del tipo 6/350LY41 con un factor de 2.06. El montaje de todas ellas fue a 3 hilos para inmunizarlas al ruido, luego

su sensibilidad es propia de esta conexión, esto es, $E_s \cdot K/4$, siendo E_s la excitación eléctrica.



Fig. 3.17: Bandas cara superior del hormigón



Fig. 3.18: bandas cara lateral del hormigón



Fig. 3.19: Bandas cara lateral



Fig. 3.20 Banda GFRP

Sistema de tratamiento y acondicionamiento de la señal: Como la propia palabra indica acondicionan la señal para luego canalizarla al sistema de adquisición de datos. Esto es, tratan la señal, eliminando el ruido, amplificándola o filtrándola para transmitirla correctamente al sistema de adquisición. Está estructurado por canales donde se conectan cada uno de las señales o transductores. Detallar que cada uno de los sensores va conectado a un módulo específico que a su vez se ensambla en un canal determinado. En el caso de las bandas extensométricas el módulo no es más que un puente de wheatstone. Todo el conjunto utilizado pertenece a la marca National Instruments, en concreto el modelo S2345. El número de canales analógico máximo que posee es de 15, mientras que los utilizados en la experimentación fue de 8 Véase la imagen siguiente.



Fig. 3.21: Acondicionador

Sistema de adquisición de datos: En nuestro caso consta de una tarjeta de adquisición de datos, que convierte la señal analógica (voltaje o corriente eléctrica) en digital (Valor codificado en binario) y un ordenador que registra y procesa los datos. La tarjeta utilizada también era de la marca National Instruments con una capacidad de hasta 16 señales de entrada. Obviamente acompañado todo esto con el software indicado para procesar correctamente los datos.



Fig. 3.22: Tarjeta de adquisición

A modo aclaratorio, a continuación se muestra un croquis con el diseño de la instrumentación necesaria de cada una de las vigas ensayadas:

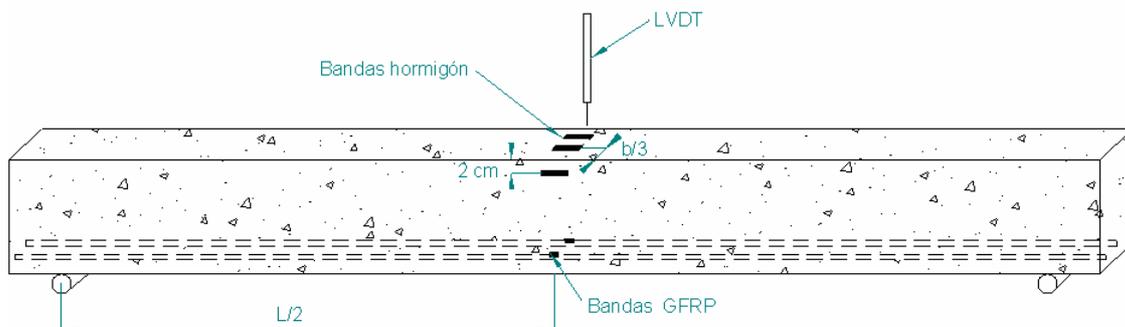


Fig. 3.23 Croquis de colocación de los transductores

3.5 MONTAJE Y ENSAYO

Aunque parezca contradictorio, el montaje del ensayo conlleva mayor tiempo y trabajo que el propio ensayo en sí. Para hacerse una idea, en montar una viga se podía tardar aproximadamente entre 2 a 3 horas, mientras que el propio ensayo duraba tan solo unos 30 a 40 minutos, dependiendo de la velocidad de carga.

El montaje se podía dividir en tres etapas: la primera de ellas es la colocación y posicionamiento correcto de la viga en el pórtico de carga. A través del puente grúa se colocó la viga entre dos apoyos a una distancia exactamente la diseñada, un ligero desajuste de la colocación podría provocar que la carga y rotura no fueran los planeados. Estos apoyos debían de permitir el giro, así que se materializó en apoyos de rodillo soldados a unas vigas metálicas y a su vez atornillados a unos macizos de hormigón para que estos no se desplazaran. Mientras que para transmitir la carga a la viga se utilizó una viga metálica de reparto que apoyaba, también, sobre dos rodillos separados a la distancia diseñada; La segunda etapa consistía en el montaje de todo el cableado necesario para registrar en el ordenador todas las señales de los transductores. Estaba diseñado registrar 8 señales analógicas, 4 correspondientes a las bandas del hormigón, 2 de las bandas de las barras, la fuerza y el desplazamiento. Cada una de ellas obviamente fue montada en un canal diferente con sus correspondientes módulos acondicionadores. Este conjunto de señales era transmitido a un sistema de adquisición de datos que a su vez se conectaba al ordenador; Por último, la tercera etapa consistía en la comprobación y calibración de todos los sistemas de medidas. Se comprobó que la resistencia de las bandas era la correcta, el transductor de desplazamiento se encontraba dentro de rango y la señal de la fuerza era la correcta. Una vez hecho esto, se equilibró los puentes de wheatstone y se comprobó que la digitalización de las señales eran las adecuadas. A partir de entonces ya todo estaba listo para empezar a ensayar.

El ensayo diseñado es uno de flexión en cuatro puntos hasta la rotura. Se disponía de dos ordenadores, uno de ellos controlaba el pistón hidráulico y otro registraba los datos de los transductores. El ensayo fue controlado en posición, es decir, el pistón iba aplicando la fuerza justa para que la velocidad del desplazamiento fuera constante. De esta manera se obtenía unas gráficas más claras, a la vez que se podía registrar cualquier pérdida de rigidez, ablandamiento o incluso rotura parcial. La velocidad de carga se calculó en base a que los ensayos duraran aproximadamente unos 20 min. Para el caso de la viga de rotura por tracción de la armadura la flecha máxima esperada era de 7cm aproximadamente, luego la velocidad de carga fue de 70mm/20min., mientras que para la otra fue de 50mm/20min. Mencionar que previamente se tuvo que desarrollar un programa para registrar todas las señales. Además, este programa era capaz de monitorizar en tiempo real la lectura de todas las bandas y mostrar gráficamente la evolución de la flecha, fibra neutra, e incluso curvatura. Esto último a parte de instructivo fue bastante útil pues nos ayudó a detectar y subsanar cualquier tipo de anomalía durante el ensayo. Concluir, que excepto pequeños problemas localizados, los ensayos fueron un éxito rotundo y en general se comportaron como se esperaba.

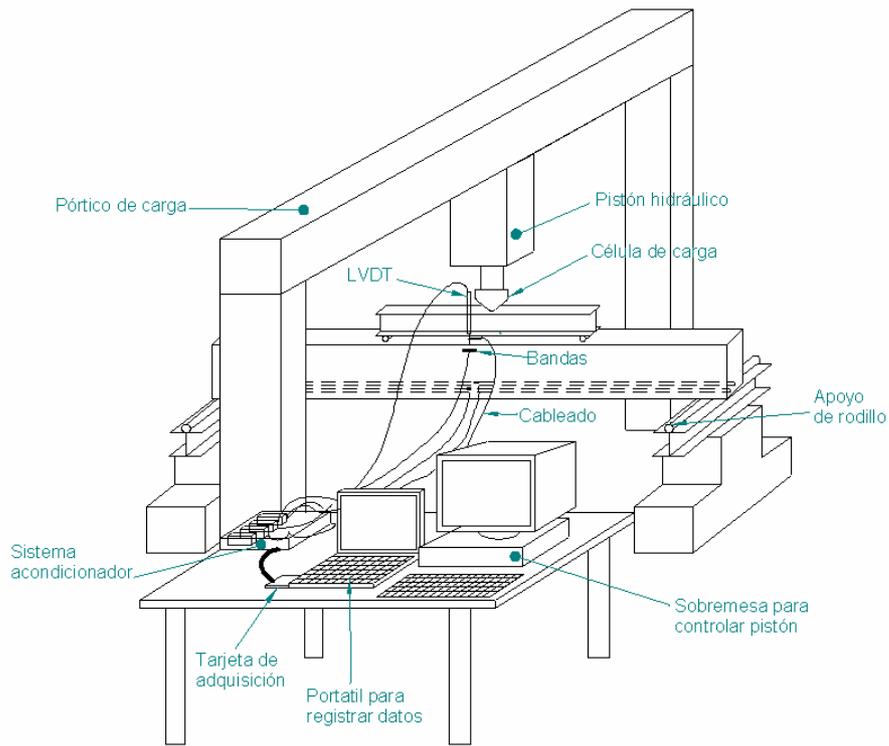


Fig. 3.24: Croquis del montaje experimental