

## ENSAYOS CRIOGENICOS SOBRE PROBETAS ENTALLADAS DE HORMIGON

P. Maturana, J. Planas y M. Elices  
Departamento de Física y Física de los Materiales  
E.T.S. de Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Universidad Politécnica de Madrid. España

### RESUMEN

*Se han realizado ensayos estables de flexión sobre probetas de hormigón con carga centrada. Los ensayos han sido efectuados a temperatura ambiente y a  $-170^{\circ}\text{C}$ . Las probetas fueron ensayadas saturadas en agua y se utilizaron cuatro tamaños diferentes con la finalidad de obtener la variación de los parámetros de fractura en función de la temperatura y el tamaño.*

### ABSTRACT

*Stable three point bend test on concrete notched beams have been done. Tests were made at room temperature and at  $-170^{\circ}\text{C}$ . Specimens were water saturated and four sizes have been tested in order to ascertain the influence of temperature and size on fracture parameters.*

## 1.- INTRODUCCION

El hormigón armado y pretensado a temperaturas criogénicas se utiliza en la construcción de grandes depósitos destinados al almacenamiento de gases naturales licuados a presión atmosférica, así como también en grandes contenedores flotantes. Por otra parte, en el Artico se está empleando en plantas exploratorias móviles y en terminales o plantas industriales flotantes. El interés por el uso del hormigón pretensado en estas condiciones queda de manifiesto en una serie de congresos internacionales realizados en los últimos años [1].

Para almacenar gases naturales licuados a presión atmosférica, es necesario que éstos sean enfriados en algunos casos a temperaturas del orden de  $-165^{\circ}\text{C}$ . Estas condiciones de temperatura influyen ostensiblemente en muchas propiedades del hormigón, haciéndolo un material muy interesante para el diseño de estas estructuras. Muchas de las propiedades que posee el hormigón a bajas temperaturas se encuentran resumidas en algunos congresos [2,3] o en un estado del arte hecho por la FIP [4].

Dentro de las características mecánicas que han sido estudiadas en el hormigón es posible resaltar la resistencia a compresión, que puede aumentar (a  $-170^{\circ}\text{C}$  en términos relativos respecto a la de  $20^{\circ}\text{C}$ ) hasta en un 400%. La resistencia a tracción obtenida por ensayos de hendimiento o de flexotracción también aumenta, pero en forma menos acusada que la de compresión. Con relación al diagrama tensión-deformación obtenido en ensayos de compresión éste varía en función de la temperatura y del contenido de humedad del hormigón; sin embargo, a  $-170^{\circ}\text{C}$  es considerado elástico y lineal en el campo ingenieril, presentando una rotura de tipo frágil.

Dado el comportamiento que presenta el hormigón a temperaturas criogénicas, surge de inmediato la inquietud de saber cual es su comportamiento en fractura bajo tales condiciones. De ello no existe información al respecto, sólo hay un trabajo [5] en el cual se han ensayado pequeñas probetas de mortero y se han evaluado los resultados aplicando la Mecánica de Fractura Elástica y Lineal. De ellos se obtuvo que el  $K_{Ic}$  aumenta sustancialmente al disminuir la temperatura. El resultado refleja que para  $22^{\circ}\text{C}$ ,  $-78^{\circ}\text{C}$  y  $-197^{\circ}\text{C}$  los valores de  $K_{Ic}$  fueron 0,9; 2,2 y 1,9  $\text{MPa m}^{1/2}$ .

En el presente trabajo, se presentan los primeros resultados en los cuales se ha medido la energía de fractura  $G_f$ , de acuerdo con el método RILEM, tanto a temperatura ambiente  $20^{\circ}\text{C}$  como a  $-170^{\circ}\text{C}$ , así como se indica la metodología utilizada para obtener ensayos estables en vigas entalladas de hormigón bajo tales condiciones de temperatura.

## 2.- TRABAJO EXPERIMENTAL

El trabajo experimental tiene como objetivo principal medir la energía de fractura del hormigón, siguiendo la metodología propuesta por la RILEM [6], y analizar la influencia de la temperatura en los parámetros de fractura, especialmente en la  $G_f$ . Con esta finalidad se efectuaron ensayos estables sobre probetas entalladas en hormigón. Las características de los materiales utilizados, así como los principales aspectos de la experimentación se detallan a continuación.

### 2.1.- Materiales y probetas utilizadas

#### 2.1.1.- Características del hormigón

El hormigón utilizado en la confección de las probetas de ensayo ha sido obtenido a partir de los componentes cuyas características básicas son las siguientes:

##### CEMENTO

Se ha utilizado un cemento P-450 ARI, clasificado como portland el cual equivale a un ASTM tipo III.

##### ARIDOS

Los áridos empleados en este caso, son de canto rodado y de origen silíceo. La tabla 1 presenta la granulometría de los mismos.

Tamiz ASTM	3/8	4	8	16	30	50	100	200
Abertura (mm)	10	5	2,5	1,25	0,63	0,32	0,16	0,08
Arido Fino	100	99	93	52	27	10	3	1
Arido Grueso	100	44	1					

Tabla 1

Las densidades netas obtenidas para el árido fino y grueso fueron respectivamente  $2,62 \text{ g/cm}^2$  y  $2,67 \text{ g/cm}^3$ .

##### HORMIGON

En este estudio se ha utilizado un hormigón tipo propuesto por RILEM [7]. La dosificación utilizada, referida al contenido de cemento, que en este caso fue de  $400 \text{ Kg/m}^3$ , se tiene en la tabla 2, así como las

características mecánicas medidas a 28 días, según normas ASTM, que aparecen en la tabla 3. La resistencia a tracción se obtuvo de ensayos de hendimiento y el módulo de elasticidad mediante ensayos de compresión.

Tabla 2

Cemento: 1  
 Agua: 0,5  
 Arena: 3,02  
 Grava: 1,35

Tabla 3

Cono (cm)	Resistencias Compresión	(MPa) Tracción	M. de Elasticidad (GPa)
5	33,10	2,80	26,64

### 2.1.2.- Probetas utilizadas

De una misma amasada de hormigón, se han confeccionado probetas cilíndricas de 150 mm de altura y 75 mm de diámetro, así como vigas entalladas de hormigón cuya geometría y dimensiones se ven en la figura 1.

Las probetas cilíndricas se han utilizado para medir mediante ensayos de tracción directa, la resistencia a tracción ( $f_t$ ) y el módulo de elasticidad (E). Estos ensayos han sido realizados a la vez que se ejecutaron los de fractura, de manera que la edad del hormigón fuera la misma, al igual que se realizaron en las mismas condiciones de temperatura: es decir, a temperatura ambiente 20°C y -170°C.

Para ejecutar los ensayos de tracción directa, las bases de los cilindros se pulieron para eliminar la lechada superficial y luego fueron adheridas a los platos de ensayo mediante resina apóxi repelente al agua, porque las probetas se ensayaron saturadas. Esto se consiguió dejando endurecer la resina durante 3 horas y luego sumergiendo las probetas nuevamente durante un periodo mínimo de 12 horas hasta que se realizaba el ensayo.

Las vigas entalladas de hormigón de la figura 1, fueron confeccionadas con moldes de acero, para tener un mejor acabado superficial. Estas fueron hormigonadas en 2 tongadas vertidas desde una de sus caras laterales, para evitar problemas de colocación, luego cada tongada fue compactada mediante vibrado mecánico para obtener la máxima capacidad del material así como una densidad uniforme. Se tuvo especial cuidado en la pieza que se utilizó para preformar la entalla, ésta era de acero con la

longitud de acuerdo a la profundidad de entalla adecuada y terminada en punto con un ángulo de  $30^\circ$ , evitando así que se desviara el plano de la fisura.

Las vigas fueron instrumentadas mediante 5 termopares tipo K. La posición de éstos es la que se detalla en la figura 1, esto permitió conocer la distribución de temperaturas en una zona próxima a la de fractura durante todo el periodo de enfriamiento.

Todos los ensayos se realizaron sobre probetas saturadas. Para este fin se envolvieron en láminas de polietileno inmediatamente después de ser extraídas de la balsa, solamente las áreas donde se apoyaban las vigas o donde se aplicó la carga quedaron descubiertas, ya que previamente fueron pulidas y limpiadas.

## **2.2.- Procedimiento experimental**

Del procedimiento experimental, se pueden destacar tres aspectos: el sistema de enfriamiento utilizado para los ensayos criogénicos, el desarrollo experimental llevado a cabo para la ejecución de ensayos de tracción directa y, por último, los ensayos de flexión estable en tales condiciones.

### **2.2.1.- Equipos y sistemas de enfriamiento**

Para los ensayos a bajas temperaturas se utilizaron dos cámaras criogénicas de flujo continuo, la diferencia entre éstas era solamente el volumen. Una se utilizó para los ensayos de tracción directa y la otra para los ensayos de flexión.

Las cámaras eran refrigeradas por nitrógeno líquido y la convección era forzada mediante un ventilador centrífugo de elevado caudal. El esquema de enfriamiento utilizado para ambas cámaras es el representado en la figura 2, donde aparece el conjunto de equipos que se encuentran interconectados para controlar adecuadamente el proceso. El control es muy importante ya que la velocidad de enfriamiento debe ser constante y adecuada al tamaño de la probeta, con la finalidad de evitar el deterioro del material, dada la baja conductividad térmica que posee el hormigón, todo esto puede incidir en que se generen tensiones elevadas debido al gradiente de temperaturas que se induce durante el enfriamiento [8].

El enfriamiento se realiza de forma automática, esto se logra mediante un controlador de temperatura, que regula el flujo de nitrógeno líquido que se introduce a través de una electroválvula, según la velocidad de enfriamiento predeterminada que es programada en un generador de funciones digital. Para dar paso al nitrógeno líquido, el controlador recibe información de la temperatura real del gas que hay en el interior de la cámara, mediante una termoresistencia de platino.

La precisión en la medida de temperaturas del sensor utilizado es de  $\pm 1^\circ\text{C}$  y la resolución de  $0.1^\circ\text{C}$ , de esta manera la estabilidad de temperatura conseguida con este sistema es de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . La velocidad de enfriamiento puede ser controlada con una precisión mejor del 0,5% para velocidades inferiores a  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ , límite muy superior a las velocidades utilizadas en esta experimentación.

Durante todo el proceso se lleva un registro continuo de la temperatura del gas frente al tiempo. La medida de temperaturas en la probeta se efectúa a través de un sistema automático de adquisición de datos Hewlett Packard 3052A, el cual realiza de forma automática la lectura de la fuerza electromotriz (FEM) de los 5 termopares colocados en la probeta, la temperatura de la soldadura de referencia y calcula la temperatura en grados centígrados mediante un ajuste polinómico. La estabilidad de temperaturas en los puntos de control de la probeta es mejor que  $0,1^\circ\text{C}$ .

Las lecturas de los 5 termopares situados en la probeta se toman a través del sistema de adquisición automática de datos. Cada 30 segundos se hace un bucle de 5 lecturas consecutivas y se efectúa con ello una representación gráfica en tiempo real mediante un registrador gráfico. Este procedimiento permite conocer la distribución de temperaturas en una zona próxima a la entalla y a partir de estos valores se puede estimar el valor del factor de intensidad de tensiones inducido por este motivo [8].

### 2.2.2.- Ensayos a tracción directa sobre probetas cilíndricas

Los ensayos a tracción directa se realizaron en una máquina servohidráulica INSTRON 1270, operada en control de desplazamiento. La velocidad fué ajustada de manera que las cargas máximas se alcanzaran al cabo de 30 a 60 segundos. La carga fué medida con una célula de carga de 250 KN, con una resolución de 12,5 N y una precisión de 0,5%.

La deformación se midió utilizando dos extensómetros especialmente diseñados para ensayos criogénicos. La base de medida era de 75 mm, con una resolución de  $0,025\ \mu\text{m}$  y una precisión de  $0,5\ \mu\text{m}$ . Los extensómetros se colocaron en dos caras opuestas de la probeta lo que permitió promediar la deformación, la carga se aplicó mediante dos rótulas para minimizar la flexión.

En estos ensayos tanto las salidas de la carga como las deformaciones se registraron de forma continua. Simultáneamente el sistema automático de adquisición de datos tomaba lecturas y éstas se almacenaban en una matriz de  $700 \times 3$ . Luego se procesaba la información y se obtenía la curva tensión-deformación, el módulo de elasticidad y la resistencia a tracción.

### 2.2.3.- Ensayos estables a flexión sobre vigas entalladas

Los ensayos estables de flexión se realizaron en una máquina

servohidráulica INSTRON 1275, operada en control de CMOD. La carga se midió con una célula de carga de 25/50 kN con una resolución de 1,25/2,5 N y una precisión del 0,5%. Las velocidades de ensayo fueron ajustadas de modo que se mantuviera constante la relación CMOD/canto, utilizándose una velocidad nominal de 7  $\mu\text{m}/(\text{ms})$ . Cumpliéndose esta condición las cargas máximas fueron alcanzadas entre los 30 y 60 segundos.

La apertura de la entalla (CMOD) fué medida con un extensómetro MTS 632.03C-51 de bajas temperaturas, con una resolución de 0,2  $\mu\text{m}$  y una precisión de  $\pm 2 \mu\text{m}$ .

La flexión se consideró igual al desplazamiento relativo entre el cabezal central de carga y la línea definida por los puntos situados en la parte superior de la probeta sobre la vertical de los apoyos. La línea se materializó mediante un bastidor rígido y una barra corta que cruza por un taladro centrado que se dejó en el cabezal de carga, como se representa esquemáticamente en la figura 3. El desplazamiento fué medido por un extensómetro criogénico que se alojó en el interior del taladro transversal realizado en el cabezal de carga, la precisión del extensómetro fué mejor que 5  $\mu\text{m}$ .

Las salidas de la célula de carga y de ambos extensómetros fueron registradas de forma continua y simultáneamente se fueron tomando lecturas mediante el sistema automático de adquisición de datos, las cuales se almacenaron en cintas magnéticas en forma de una matriz de 500x3. Las curvas fuerza-desplazamiento y fuerza-CMOD, así como los parámetros de fractura se obtuvieron procesando la información almacenada.

### 3.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 3.1.- Ensayos a tracción directa

Los ensayos a tracción directa fueron realizados sobre probetas saturadas, cilíndricas de 75 mm de diámetro por 150 mm de altura. Los valores medios de los resultados obtenidos se resumen en la tabla 4. Se indica entre paréntesis la desviación estándar.

Tabla 4

Temperatura (C)	Edad (Días)	Resistencia a tracción (MPa)		Módulo de elasticidad (GPa)	
20	90	3,14	(0,05)	25,4	(0,35)
-170	90	4,01	(0,12)	47,9	(3,70)

Durante el periodo de enfriamiento la máxima diferencia de temperaturas alcanzada en una sección transversal de la probeta fué de

2,5°C.

### 3.2.- Ensayos estables a flexión sobre vigas entalladas

Estos ensayos se realizaron sobre vigas entalladas, su forma y dimensiones son las indicadas en la figura 1. En la tabla 5, se resumen los valores medios de los ensayos efectuados y entre paréntesis aparecen las desviaciones estándar para los mismos.

TABLA 5

PROBETA Nº	TEMPERATURA (C)	d (m)	$P_u$ (kN)	$f_n$ (MPa)	$B_f$ (N/m)
FT-1	20	0,05	2,89 (0,07)	4,31	57 (3)
FT-2	20	0,10	5,21 (0,09)	4,15	75 (18)
FT-3	20	0,20	9,37 (0,09)	3,92	82 (3)
FT-4	20	0,30	11,25 (0,82)	3,08	94 (7)
FT-1 BT	-170	0,05	6,36 (0,02)	10,84	175 (24)
FT-2 BT	-170	0,10	13,94 (0,87)	11,42	213 (3)
FT-3 BT	-170	0,20	26,70 (3,12)	11,03	289 (7)
FT-4 BT	-170	0,30	35,80	9,76	300

a,b,d,l corresponden a las dimensiones de la figura 1.  
 $P_u$  es la carga máxima y  $f_n = 1,5.P.l/b.(d-a)^2$ .

La diferencia máxima de temperaturas alcanzada durante el periodo de enfriamiento en una sección transversal de la probeta es la indicada para cada geometría en la tabla 6.

Tabla 6

Probeta nº	Máxima diferencia de temperatura
FT-1 BT	6
FT-2 BT	9
FT-3 BT	10
FT-4 BT	11

### 4.- ANÁLISIS DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El efectuar ensayos a temperaturas criogénicas sobre probetas



saturadas de hormigón trae como resultado una serie de dificultades experimentales adicionales que pueden no manifestarse a temperatura ambiente.

Algunos problemas comienzan a surgir con los dispositivos de ensayo que se encuentran en el interior de la cámara, muchos de ellos es posible que tengan un buen funcionamiento a temperatura ambiente pero no así a muy bajas temperaturas, esto puede deberse a variaciones dimensionales considerables en algunos casos; o bien, debido a la posible formación de hielo. Tomando en cuenta las dificultades antes mencionadas, en el sistema experimental utilizado, se han eliminado todo tipo de aparatos mecánicos al igual que la cámara ha sido perfectamente sellada para evitar al máximo la formación de hielo.

Con el dispositivo experimental diseñado, la única fuente potencial de errores está en los rodillos de apoyo de las vigas. En éstos existe la posibilidad de que se traben al formarse hielo, con lo cual al flectarse la viga éstos inducirían unas fuerzas horizontales no consideradas, y que harían un efecto de cierre en la fisura. Sin embargo, esto es difícil que ocurra y más difícil aún es comprobarlo en forma directa. La eficiencia de los rodillos se comprobó en forma indirecta, debido a que las curvas experimentales carga-desplazamiento no presentaron cambios bruscos ("stick-slip") por lo que este efecto no fué contemplado.

Una dificultad adicional surge al realizar ensayos con probetas de hormigón saturadas, ya que aparecen tensiones internas debido a la no uniformidad de temperaturas durante el proceso de enfriamiento. En consecuencia velocidades de enfriamiento deben ser muy bajas para prevenir la aparición de microfisuras y el crecimiento de la zona de fractura en el fondo de la entalla. Este efecto suele ser muy importante en el caso de hormigones saturados, lo cual se ha visto reflejado en estudios de dilatometría para hormigones saturados y con menores contenidos de humedad [9] y [10].

## 5.- ANALISIS DE RESULTADOS

### ENSAYOS DE TRACCION DIRECTA

En estos ensayos se han obtenido el módulo de elasticidad y la resistencia a tracción, todo ello mediante el método directo.

En lo que respecta al módulo de elasticidad, se puede ver claramente que a baja temperatura éste es aproximadamente igual a dos veces el de temperatura ambiente. Este valor concuerda con los resultados publicados [4], en que se ha medido su evolución con la temperatura sobre probetas saturadas pero ensayadas en compresión.

En lo que respecta a la resistencia a tracción, se observa de los resultados que la evolución con la temperatura es solo de un 30%, al

medirla en ensayos de tracción directa a  $-170^{\circ}\text{C}$ . Esto es un valor muy inferior al que aparece publicado en otras investigaciones; sin embargo, es interesante resaltar que en ellas las relaciones se han establecido a partir de ensayos de tracción por métodos indirectos, como es el ensayo de tracción por hendimiento [2,4]. Esto último es muy importante, ya que no existen resultados, o estudios, que permitan efectuar una correlación entre ensayos de tracción indirecta y directa a bajas temperaturas sobre probetas saturadas de hormigón. Por otra parte, los valores obtenidos de resistencia a tracción tanto a temperatura ambiente como a baja temperatura parecen ser bastante consistentes, sobre todo si se analiza la dispersión experimental que fue prácticamente nula, lo cual refleja claramente la tendencia.

### ENSAYOS ESTABLES A FLEXION

Al analizar los valores de la energía de fractura  $G_f$ , (tabla 5), se ve una clara tendencia a aumentar con el tamaño de la probeta, lo cual se manifiesta tanto a temperatura ambiente como a baja temperatura. Más aún, esta tendencia es prácticamente la misma en términos relativos para ambas temperaturas. Este efecto de tamaño que se observa en estos resultados experimentales ha sido reflejado en otra experimentación anterior [12], donde el hormigón ensayado corresponde a otra mezcla diferente. Estos resultados parecen indicar que las hipótesis de los modelos de zona cohesiva no se cumplen en este caso, al no existir una energía de fractura constante para todos los tamaños. Sin invalidar los modelos se puede modificar una de las hipótesis; es decir aceptar que el material que se encuentra próximo a la zona cohesiva y alcanza niveles cercanos a la resistencia a tracción tenga un comportamiento no lineal y contribuya a la disipación de energía con un término proporcional al volumen afectado por el nivel tensional alto. En la actualidad no se dispone de un método que permita analizar las disipaciones volúmicas además de las superficiales, aunque en la actualidad se está trabajando activamente para desarrollarlo.

Los valores de la energía de fractura  $G_f$  a  $-170^{\circ}\text{C}$  respecto a los de temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ), están en todos los casos en la relación aproximada de 3:1, lo cual viene a reflejar que la tenacidad del hormigón saturado aumenta a temperaturas criogénicas, esto había sido observado anteriormente con otra serie de ensayos realizados en este Departamento para un hormigón diferente concordado plenamente con dicha relación.

Si en este caso se calcula la longitud característica del material utilizado el valor medio de  $G_f$ , se obtiene que para este hormigón:

$$\begin{aligned}l_{ch} (20) &= 200 \text{ mm} \\l_{ch} (-170) &= 730 \text{ mm}\end{aligned}$$

Lo anterior viene a indicar que la fragilidad de un elemento estructural es aproximadamente 3,7 veces menor a bajas temperaturas que a

temperatura ambiente, lo que es un resultado muy sorprendente, dado que el comportamiento en compresión de probetas saturadas se suele describir como un proceso elástico y lineal a bajas temperaturas, hasta que ocurre una rotura en forma explosiva [4], indicando así un fallo frágil.

Por último, es interesante destacar que se ha observado que la rotura a bajas temperaturas y a temperatura ambiente presentan una marcada diferencia. En los ensayos criogénicos existía una manifiesta tendencia a producirse la rotura del árido, en cambio en los ensayos a 20°C se producía la descohesión del árido en la matriz, esto pudo observarse tanto en los ensayos a tracción directa como en los ensayos estables de flexión.

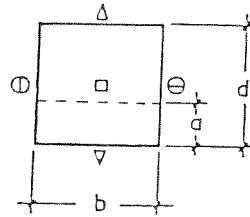
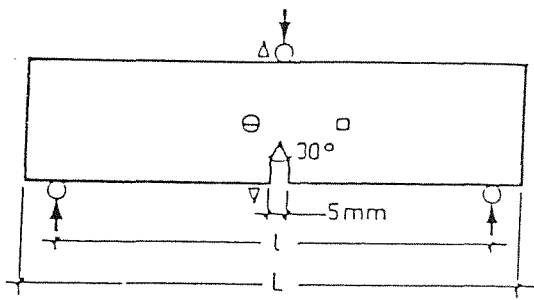
#### 6.- AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Dr. Félix Tamayo R. representante de CIBA-GEIGY en España por su asesoramiento en el tratamiento realizado a las probetas de ensayo. Este trabajo ha sido realizado con la financiación del proyecto del Comité Conjunto Hispano-Norteamericano 83/071.

#### 7.- REFERENCIAS

- [1] Elices, M., "Cryogenic Prestressed Concrete: Fracture Aspects", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 7, N° 1. (1978).
- [2] The Concrete Society, "Cryogenic Concrete", Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference, Newcastle upon Tyne, March 1981, Construction Press, pp. 336, (1982).
- [3] The Concrete Societies of the Netherlands and the U.K., "Cryogenic Concrete", Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference, Amsterdam, Netherlands concrete Society Preprints, (1983).
- [4] Elices, M., Rostasy, F.S., Faas, W.M., Wiedemann, G., "Cryogenic Behaviour of Materials for Prestressed Concrete", FIP State of the Art Report, pp. 84, (1982).
- [5] Arvidson, J.M., Sparks, L.L., Steketee, E., "Mechanical Properties of Concrete Mortar at Low Temperatures", NBS Report 82-1658, (1982).
- [6] RILEM Comité 50-FMC, "Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams", Materials and Structures, Vol. 18, N° 106, pp. 285-290, (1985).
- [7] RIMEL, "Materials and Structures", Vol. 7, 39, pp. 207-224, (1974).

- [8] Planas, J., Maturana, P., Elices, M., "Fractura por enfriamiento en vigas fisuradas", *Anales de Mecánica de la Fractura*, 6, (1987).
- [9] Planas, J., Corres, H., Elices, M., Chueca, R., "Thermal Deformation of Loaded Concrete during Thermal Cycles from 20°C to -165°C", *Cement and Concrete Research* 15, pp. 639-644, (1984).
- [10] Elices, M., Planas, J., Corres, H., "Thermal Deformation of Loaded Concrete at Low Temperatures, 2: Transverse Deformation", *Cement and Concrete Research*, 16, pp. 741-748, (1986).
- [11] Planas, J., Elices, M., "Asymptotic Analysis of the Development of a Cohesive Crack Zone in Mode I Loading, for Arbitrary Softening Curves", to be present in the Proceedings of the International Conference on Fracture of Concrete and Rock, Houston, Texas, (1987).
- [12] Planas, J., Elices, M., "Towards a Measure of  $G_f$ : An Analysis of Experimental Results", *Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete*, ed. F.H. Wittmann, Elsevier, Amsterdam, pp. 381-390, (1986).



L	l	d	a	b
300	125	50	17	100
550	250	100	33	100
550	500	200	68	100
800	750	300	100	100

dimensiones en mm.

⊖ ⊕ — Termopares  
 ▽ Δ □

Fig.1.- Geometría de las probetas entalladas y posición de termopares.

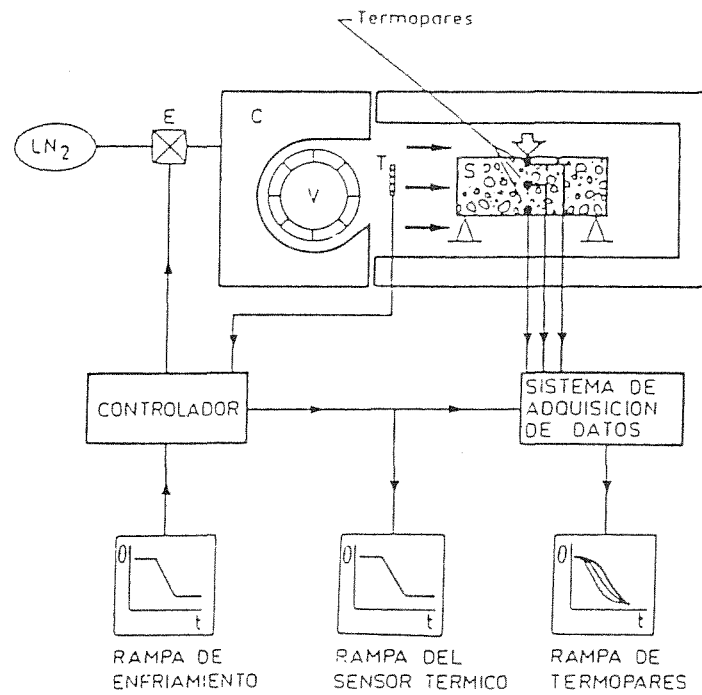


Fig.2.- Sistema de enfriamiento. Diagrama de bloque.

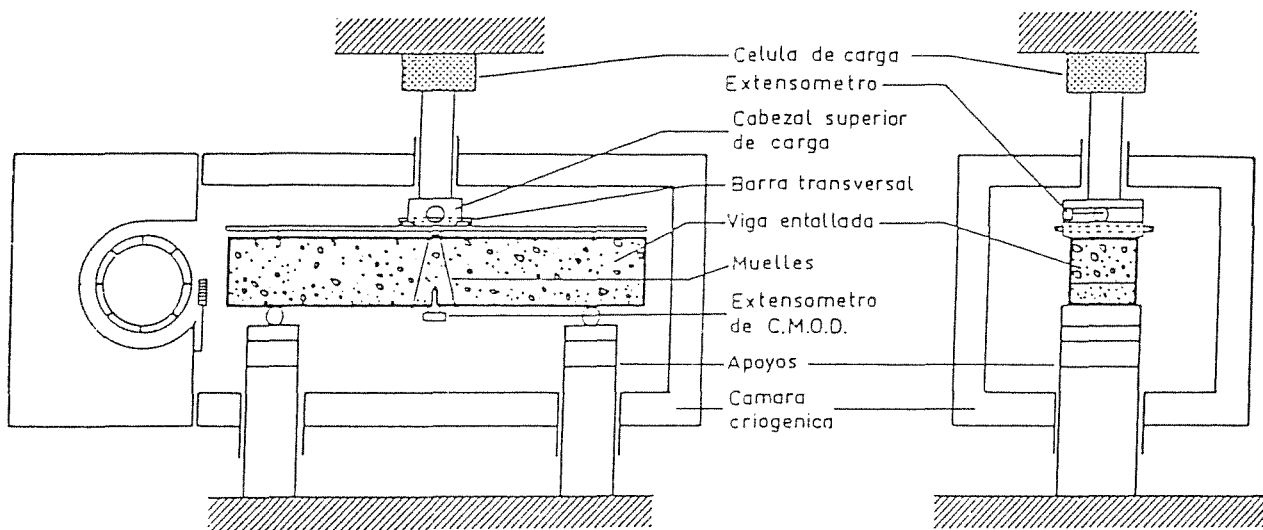


Fig.3.- Dispositivos para ensayos a flexión