

Contribución

al estudio de la resistencia a tracción en hormigones de piedra pómez

F. LOPEZ ALONSO, Ing. de Caminos

683 - 5

Desde aquí, mi más sincero agradecimiento a todos los que me han ayudado y muy especialmente a Ramón Sá, Francisco Valencia, Gumersindo de Marco y Manuel Molina, colaboradores inestimables.

sinopsis

Este trabajo ha sido galardonado con el VII premio Luxán 1973, concedido por opinión unánime del Jurado, en base a la originalidad y ordenada exposición de la teoría sustentada.

En él, tras un amplio examen de los fenómenos a considerar, se propone la utilización de una fórmula lineal que defina la resistencia de un hormigón ligero, en función de la de su pasta, de la de su árido y de la fracción volumétrica en que éste interviene. Con esta aportación se pretenden sustituir los habituales modelos exponenciales.



INTRODUCCION

El homigón, en cuanto a su estructura interna y a su comportamiento mecánico íntimo, resulta suficientemente intrincado como para haberse resistido largo tiempo a la aplicación de leyes obtenidas con un cierto fundamento teórico. La homogeneidad e isotropía que casi siempre se toman, con más o menos escrúpulos, como un buen punto de partida en los materiales supuestos ideales, están lejos en el hormigón, como no sea en todo caso en un sentido puramente estadístico (1).

Tradicionalmente el hormigón se ha regido por empirismos y reglas de buena práctica que salían más o menos airosos de la discontinuidad misma que es la probeta, la viga o la presa.

Este carácter del estudio de las propiedades mecánicas se encuentra bien reflejado, por ejemplo, en la forma de los datos del ensayo de resistencia a compresión: un valor final enigmático al que se llega tras un recorrido tensión-deformación que desde el principio no es lineal a causa de las numerosas microfisuras que al empezar a cargar aparecen.

Podemos decir que, aún hoy, todas las predicciones de «resistencia a compresión» son empíricas y la influencia de cualquier factor sólo se puede tener en cuenta mediante ensayos exhaustivos que permitan cubrir el campo de variación.

En el campo del módulo de elasticidad el avance ha sido algo mayor (2). Estamos más cerca de la zona elástica y existen toda una serie de ecuaciones que obtienen el módulo E de un cuerpo compuesto a partir de los módulos de la matriz, del cuerpo disperso y de las fracciones volumétricas respectivas, para diversas condiciones de adherencia. Por supuesto, con todas las limitaciones de áridos esféricos, porosidades nulas y comportamientos ideales de los componentes.

Con este preámbulo vamos a pasar al campo concreto de los hormigones de árido ligero, en los que el comportamiento resistente es esencialmente distinto al del hormigón ordinario.

El árido ligero que podríamos considerar típico, es menos resistente que la pasta de cemento o el mortero que lo envuelve, al contrario de lo que ocurre en el hormigón

ordinario. Con esto, la adherencia árido-matriz, factor fundamental que tradicionalmente se trata de mejorar o al menos conservar por ser el punto débil del hormigón, está siempre asegurada hasta rotura en el hormigón de árido ligero y es la resistencia del propio árido la que cobra importancia. Quedan fuera de este comportamiento hormigones de áridos ligeros especialmente resistentes, como algunos esquistos o arcillas dilatadas, o los de corta edad, en los que la resistencia del mortero es aún baja. Podemos fijar en 2 ó 3 el cociente entre la resistencia del mortero y la del árido en el caso límite del que hemos llamado hormigón ligero típico.

Como consecuencia de esta característica señalada cabe concebir esperanzas concretas acerca del estudio teórico de las propiedades mecánicas de los hormigones de árido ligero, como la piedra pómez. En ellos se puede partir de la importante generalización de que las superficies de fractura no bordean al árido, sino que lo atraviesan y, por tanto, intervienen de forma distinta en su definición.

La tensión necesaria para originar la rotura por un plano que atravesase un grano de árido ligero es menor que la necesaria para producirla por la superficie de contacto con la matriz:

- por ser relativamente débil a la tracción el árido;
- por ser buena la adherencia, incrementada por la porosidad superficial del árido;
- por ser menor el área del plano a través del árido que el de la superficie de contacto.

Como consecuencia, los valores de las resistencias mecánicas de los hormigones de árido ligero quedan limitados únicamente por las resistencias de sus componentes, sin el techo de la adherencia.

Es curioso observar cómo en el hormigón ordinario se ha tendido hacia este aprovechamiento integral de los componentes, reforzando el más débil, el mortero, mediante la polimerización, y se ha conseguido el hormigón polimerizado, en el que el mecanismo resistente hasta rotura es precisamente el mismo que el de los hormigones de árido ligero de que trata este estudio, por lo que

los modelos y las conclusiones generales obtenidas deben ser válidas para ellos, aunque no tenemos corroboración al respecto.



RESISTENCIAS MECANICAS

2.1. RESISTENCIA A COMPRESION

2.1.1. Modelo de Bache (3)

Merece especial atención la ecuación propuesta por H. H. Bache en el Simposio RILEM de Budapest de 1967 y sobre la que ha continuado trabajando hasta la actualidad, que relaciona la resistencia a compresión de un hormigón de árido ligero con la del mortero (σ_0), la del árido (σ_a) y la concentración volumétrica de éste (V):

$$\sigma = \sigma_a^V \cdot \sigma_0^{1-V}$$

Desgraciadamente, el modelo no tiene justificación teórica, pero lo cierto es que numerosos ensayos del autor e incluso confrontaciones realizadas por nosotros se adaptan francamente bien a la ecuación señalada, siempre que el árido sea suficientemente débil respecto de la matriz (relación resistencia del mortero/resistencia del árido comprendida entre 2 y 15) y la concentración volumétrica no sea tan grande que haya dudas acerca de la buena compactación del hormigón.

Si usamos escala natural en abscisas, concentración volumétrica (V), y escala logarítmica en ordenadas, resistencia a compresión (σ), la ecuación de Bache es una recta que une los puntos $(0, \sigma_0)$ y $(1, \sigma_a)$.

El concepto σ_a , resistencia a compresión del árido, es ideal y procedente siempre de una extrapolación, pero da una idea de la contribución del árido en la resistencia de la probeta mucho mejor que la obtenida por métodos directos (ensayo de probetas talladas, compresión con cilindro y pistón de un conjunto de granos o variaciones del módulo de finura por compresión).

El admitir como válido un modelo como el señalado permite estudiar la influencia de la variación de cada uno de los factores tenidos en cuenta en la ecuación. Podemos variar σ_0 con la edad o con el tipo de cemento, o σ_a con el tipo de árido o, contrariamente, podemos decidir la σ_0 o σ_a necesarias para obtener una σ determinada, etc.

Es interesante observar cómo esta ecuación ignora el factor adherencia de acuerdo con lo expuesto anteriormente.

2.1.2. Otros modelos

Existen otra serie de ecuaciones que consideramos ligadas con el problema y de las que vamos a tratar a continuación. Son las que relacionan resistencia mecánica, generalmente a compresión, de un cuerpo sin poros, con la resistencia para una cierta porosidad, en función de esta última, naturalmente.

La debilidad, y la ligereza, de un árido ligero son debidas a su porosidad y, por tanto, en un hormigón de árido ligero, porosidad y concentración de árido son directamente proporcionales. Por ello parecen aplicables ecuaciones de este estilo.

Hemos recopilado las más representativas. En general son empíricas (la debida a Hansen, no) y se han obtenido unas en el campo de la cerámica (6) (Kingery, Duckworth) y otras para morteros y hormigones de cemento (4):

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 \cdot (1 - V_p)^{2.7} \dots \dots \dots \text{Wischers} \\ \sigma &= \sigma_0 \cdot (1 - 1,2 V_p^{2/3}) \dots \dots \text{Hansen (5)} \\ \sigma &= \sigma_0 \cdot (1 - V_p)^6 \dots \dots \dots \text{Auskern} \\ \sigma &= \sigma_0 \cdot e^{-7V_p} \dots \dots \dots \text{Kingery} \\ \sigma &= \sigma_0 \cdot e^{-b \cdot V_p} \dots \dots \dots \text{Duckworth} \end{aligned}$$

donde:

$$\begin{aligned} \sigma &= \text{resistencia del cuerpo poroso.} \\ \sigma_0 &= \text{resistencia del cuerpo sin poros.} \\ V_p &= \text{fracción volumétrica de poros.} \\ b &= \text{constante que toma valores de 3 a 9.} \end{aligned}$$

Precisamente a partir de la ecuación de Duckworth tenemos:

$$\begin{aligned} V_p &= \frac{V_h \text{ (volumen de poros)}}{V_t \text{ (volumen total)}}; \\ V \text{ (Bache)} &= \frac{V_a \text{ (volumen de árido)}}{V_t}; \\ V_p &= \frac{V \cdot V_h}{V_a} = \frac{V}{p \text{ (porosidad del árido)}}; \end{aligned}$$

luego:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-b \cdot V_p} \rightarrow \sigma = \sigma_0 \cdot e^{-(b/p) \cdot V}.$$

El hormigón no es homogéneo y σ_0 es imposible de definir. Si suponemos que σ_0 es la resistencia del mortero o la pasta, resulta:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = e^{-(b/p) \cdot V}.$$

Comparando con la ecuación de Bache, que puede escribirse

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_0} \right)^V,$$

nos resultan identificables, haciendo

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_0} = e^{-b/p},$$

lo cual es aceptable si se pretende estudiar la influencia de V , porque se trata de formas diferentes de expresar una constante del material.

Aunque muy difundidas las ecuaciones de tipo exponencial, desconocemos posibles justificaciones teóricas y esta identificación no sirve de apoyo al modelo de Bache.

2.2. RESISTENCIA A TRACCION

Paralelamente, en el campo de la resistencia a tracción de hormigones de árido ligero no conocemos ninguna ecuación que no sea de interés particular, a excepción de generalizaciones para flexotracción de algunas de las señaladas en 2.1.2.

La norma ACI 318-71, concretando lo señalado en la Guía para hormigón estructural de árido ligero de 1967 (7), fija los coeficientes de minoración que hay que tomar para predecir aproximadamente la resistencia a tracción a partir de la de hormigones ordinarios de la misma resistencia a compresión. Se basa para ello en el simple hecho de las proporcionalidades entre resistencia a tracción y área neta en la sección de rotura (L^2) y peso específico y volumen (L^3), resultando así la resistencia a tracción proporcional al peso específico elevado a la potencia 2/3 (8).

Dada, pues, la ambigüedad existente, este trabajo ha pretendido hacer una aportación al respecto.

Se trató, en primer lugar, de elegir el ensayo de resistencia a tracción de hormigones más idóneo.

Los ensayos más utilizados tradicionalmente se pueden reunir en tres grupos diferentes:

- a) *Ensayos de tracción directa.*
 - b) *Ensayos de flexotracción.*
 - c) *Ensayo brasileño y similares.*
- a) Los ensayos de tracción directa consisten en someter la probeta de hormigón (p. e. $\varnothing 15 \times 30$ cm) a un esfuerzo axial de tracción en la dirección de la dimensión mayor, a semejanza del ensayo de aceros, obteniendo así, en cualquier sección perpendicular al esfuerzo, una tensión de tracción, cociente del esfuerzo por la sección. La idea es elemental, pero muy pocos países lo admiten debido a la dificultad de materializar un esfuerzo de tracción puro en los contactos de la probeta con las cabezas de la prensa.
 - b) Los ensayos de flexotracción utilizan probetas prismáticas biapoyadas, cargadas centradamente o en los tercios y miden la carga necesaria para producir la rotura, deduciendo de ella mediante una distribución de tensiones supuesta lineal en la sección de rotura, la tensión en la fibra más traccionada por la que se inició. El ensayo está muy extendido y las objeciones son: no linealidad del diagrama, influencia de una zona superior comprimida, prefijación de la sección de rotura si la carga es centrada y posibles deformaciones superficiales excesivas en apoyos y puntos de carga.
 - c) El ensayo brasileño, que ha sido el elegido para este estudio (13), se basa en el hecho de que un cilindro sometido a una compresión P , a través de dos generatrices opuestas, soporta en el plano diametral definido por ellas una tensión uniforme de tracción hasta rotura de valor $2P/(\pi \cdot L \cdot D)$, siendo D el diámetro de la probeta y L su longitud. Ensayos similares se realizan con cubos o prismas en los que el plano de rotura es diagonal, cargando en aristas opuestas (9).

La idea del ensayo brasileño es teóricamente perfecta y el ensayo realizable fácilmente, como necesitábamos para poder llevar a cabo gran número de ellos. Los inconvenientes principales son prefijación del plano de rotura, excesiva deformación en el contacto con los platos de la prensa y plastificación bajo las cargas.

El primer inconveniente es teórico, porque se escoge un plano de entre los infinitos diametrales y las diferencias entre ellos son estadísticamente despreciables, ya que todas las posibles influencias anómalas de llenado, compactación o segregación son en el sentido del eje y afectan a todos por igual. La influencia del ambiente progresando desde la superficie también es equiparable en todos ellos.

El aplastamiento en los contactos con la prensa, aumentando la zona de aplicación de carga, es inevitable, sobre todo a primeras edades, cuando el módulo de deformación es aún bajo. Entonces la rotura no es exactamente un plano, sino que aparecen una o dos cuñas orientadas hacia el centro de la probeta. Cuando aumenta la edad y la rigidez es mayor, la interposición de dos placas de palastro suele ser suficiente para que este efecto sea despreciable.

Las zonas plásticas que puedan surgir bajo los puntos de aplicación de las cargas, cambiando el esquema de tensiones obtenido en el campo de la elasticidad, proporcionan inexactitudes a la teoría del ensayo que se han de aceptar y no suponemos importantes.



ENSAYOS REALIZADOS

3.1. VARIABLES Y CONSTANTES

Se han ensayado hormigones compuestos por un árido poroso monogranular y pasta de cemento.

En los ensayos se han utilizado series de 6 probetas cilíndricas de $\varnothing 7,5 \times 15$ cm, hasta un total de 128 series que cubren las siguientes variables:

- a) *Tipo de árido en cuanto a procedencia.*
 - b) *Tamaño del árido.*
 - c) *Edad de rotura.*
 - d) *Adherencia árido-pasta.*
 - e) *Concentración volumétrica de árido.*
- a) El árido usado ha sido piedra pómez procedente de dos partidas: Tenerife y Olot. En ambos casos cumple los requisitos que se fijaron precedentemente para un árido ligero típico, en cuanto a comportamiento dentro de una matriz de pasta. Durante todo el período de fa-

bricación de hormigones el árido se ha almacenado en sacos cerrados de plástico para preservarlo en lo posible de cambios de humedad.

- b) Las fracciones granulométricas ensayadas han sido 4,5/10 mm y 2,5/4,5 mm. Tamaños mayores no son frecuentes en áridos ligeros e incluso harían inadecuado el tamaño de probeta. Tamaños inferiores, según nuestras experiencias, presentan problemas especiales de adsorción que hacen imposibles las conclusiones.
- c) Se han considerado cuatro edades: 3, 7, 28 y 91 días.
- d) En cuanto a adherencia, se han establecido dos posibilidades: árido con el tratamiento de presaturación que más adelante se detalla y árido al que además se le ha impregnado de grasa (valvulina) para eliminar la adherencia.

Según un reciente estudio de Bertacchi (10) sobre adherencia pasta-árido, ésta consta de dos sumandos: uno físico y otro químico. El físico, producido por los micro y macro-rugosidades del árido en contacto con la pasta, y el químico, que proviene de las afinidades del cemento hidratado con el árido, y depende de la naturaleza de éste. En cualquier caso el sumando químico resulta siempre mucho más pequeño que el de naturaleza física.

Con la lubricación del árido mediante una película continua de grasa eliminábamos tanto uno como otro sumandos.

- e) Se han tomado cuatro fracciones volumétricas de árido que corresponden a los porcentajes 0, 17, 33 y 50 %, aproximadamente. Teniendo en cuenta que se trata de árido de tamaño uniforme, el volumen aparente máximo que puede ocupar en la probeta es del orden del 65 %. Sin embargo, cuando envuelto en pasta de cemento películas de ésta separan unos granos de otros, no es posible llegar a porcentajes tan altos, que, por otra parte, no son recomendables porque no permiten un llenado y una compactación adecuados y quedan cantidades de huecos no despreciables de cara a la resistencia que se trata de medir.

En todos los hormigones se ha mantenido constante el proceso operatorio que se detalla en 3.2.

El cemento empleado ha sido del tipo P-350, procedente de dos partidas y la relación agua/cemento neta ha sido 0,40. Entendemos por agua neta la añadida al amasar, que debiera ser la única que interviniese en la pasta o matriz si el proceso de presaturación proporcionase el agua necesaria para que el árido poroso no absorbiese ni segregase agua. Naturalmente esto es una prehumidificación ideal.

3.2. PROCESO OPERATORIO

El proceso de presaturación del árido se hacía sumergiéndole en agua 30 segundos (Olot) ó 1 minuto (Tenerife) y colocándole sobre un tamiz en una corriente de aire caliente un tiempo variable de 5 a 15 minutos, hasta considerar alcanzado el estado superficie seca (16) y (17). Para ellos, como los tamaños empleados eran suficientemente gruesos, no era preciso recurrir al método A.S.T.M. C-128-68 (15) o a fijar estados de free-running, sino simplemente a observar la desaparición del brillo de la película superficial de agua, según A.S.T.M. C-127-68 (14).

A continuación se anotaba el peso como peso humedecido y se mezclaba con la pasta de cemento previamente amasada. En el caso de tratarse de adherencia nula se envolvía el árido en la grasa antes de mezclarlo con la pasta, pero sin eliminar el proceso de prehumidificación, porque se comprobó que el recubrimiento de grasa no resultaba lo suficientemente continuo como para impedir la absorción de agua a causa de la textura esoriácea de la piedra pómez.

El amasado era manual y las probetas se llenaban de tres tongadas, vibrando sobre una mesa de 6.000 r.p.m. tiempos prefijados en cada caso que impidieran la segregación inversa del árido.

El hormigón sobrante de cada serie de 6 probetas se recogía y pesaba; y en caso de descensos notables del nivel de llenado, se rellenaba con pasta pura de relación agua/cemento 0,40, pero no con el excedente de hormigón.

El refrentado se hacía con cemento en polvo, el desmoldado a las 24 horas, pesando enton-

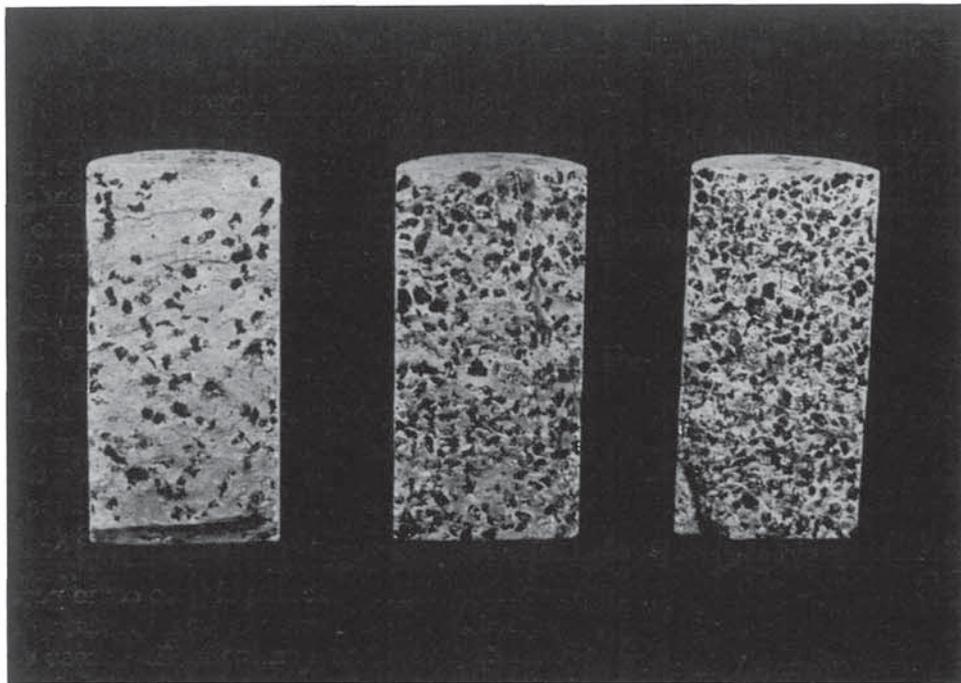
ces todas las probetas, y a continuación se introducían en la cámara de curado ($20^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$, $95 \pm 3 \% \text{ HR}$) hasta el momento mismo de rotura.

Las probetas secadas al aire, más representativas de la realidad, tienen el inconveniente de una resistencia a tracción menor, a causa de las tensiones de tracción en la superficie y de compresión en el interior, que surgen como consecuencia del secado, con

los progresivos movimientos de humedad hacia el exterior. Para evitar este efecto perturbador es por lo que se ensayaron probetas húmedas.

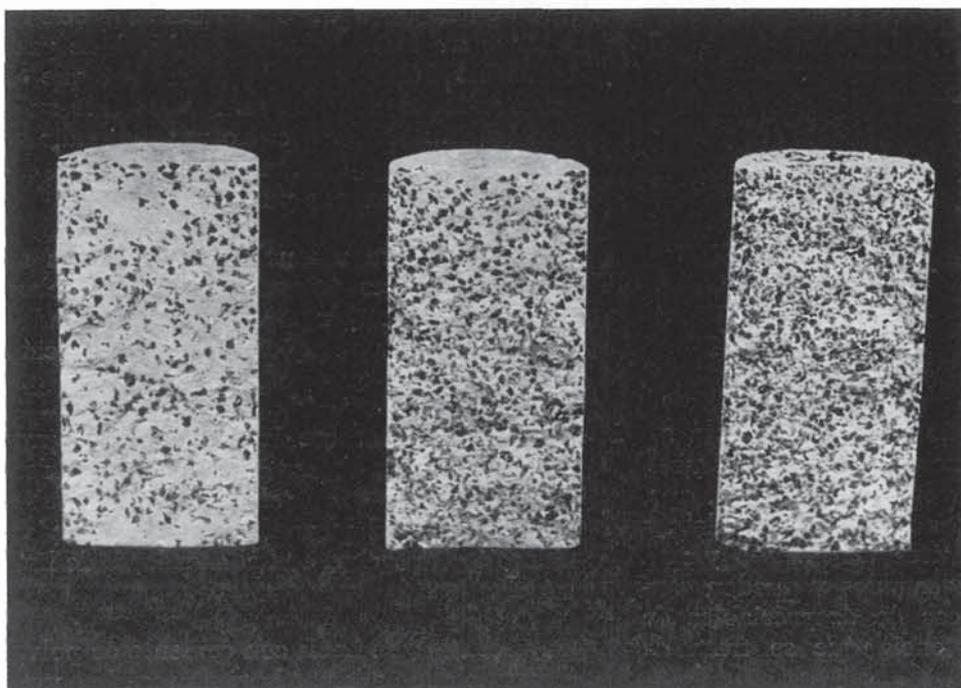
La rotura se hacía a las edades citadas y se conservaban 2 probetas por serie para secarlas en estufa y anotar su peso seco.

En las figuras 1 a 4 pueden verse, después de rotura, probetas con las tres concentraciones de árido para los 4 casos de éste.



1

Probetas con tres concentraciones de árido Olot 4,5/10 mm.



2

Probetas con tres concentraciones de árido Olot 2,5/4,5 mm.

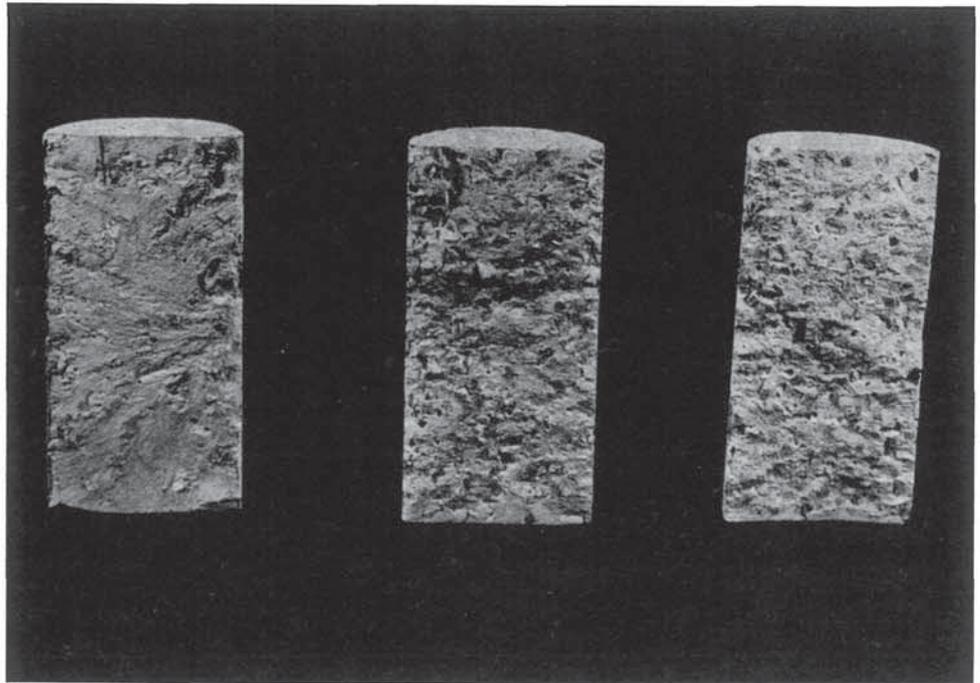
3.3. CONTROL

Durante la fabricación la única posibilidad de variación era el momento en que se consideraba superficie seca. Ciertamente, como en todos los ensayos con áridos porosos, no hay ninguna prueba de que el estado que se tomaba como superficie seca hiciera que el árido no absorbiera ni segregara agua. Pero lo que se controló es que en todas las series este estado fuese semejante, aparte del con-

trol visual, por medio del peso humedecido, ya que las humedades iniciales del árido eran muy parecidas. Concretamente, las variaciones en este peso humedecido fueron siempre menores del 7 % sobre la media y sólo en 4 de las 96 series que incluían árido superaron el 4 %.

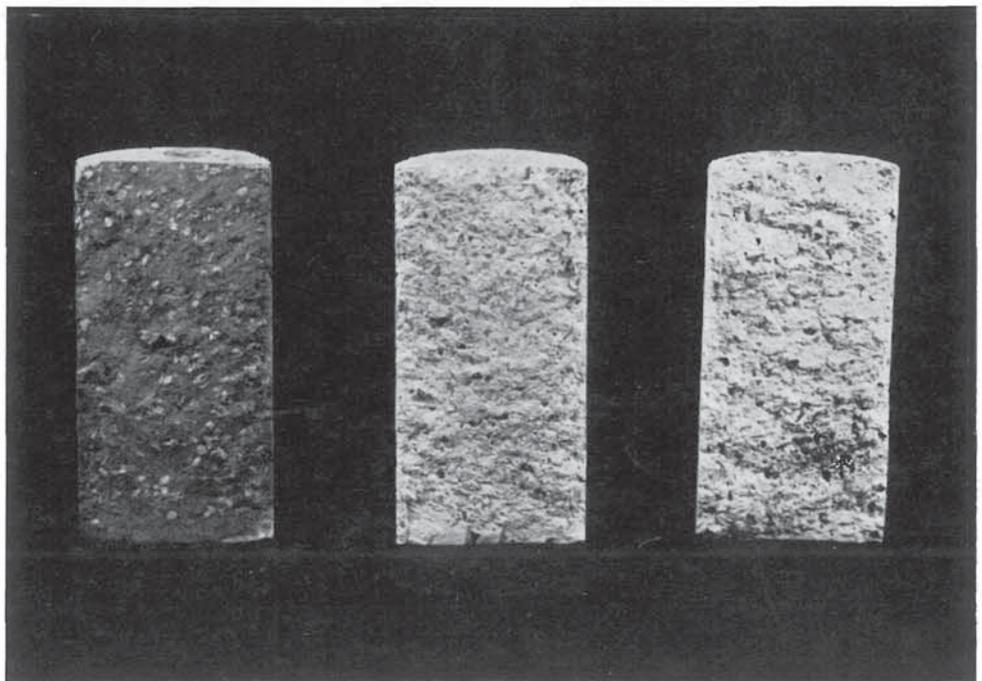
Una vez fabricadas las probetas se controlaba su uniformidad dentro de cada serie por los pesos específicos al desmoldar.

3



Probetas con tres concentraciones de árido Tenerife 4,5/10 mm.

4



Probetas con tres concentraciones de árido Tenerife 2,5/4,5 mm.

Dado que las series eran de 6 probetas no se puede hablar con propiedad de un coeficiente de variación. Sin embargo, se calculaba éste sistemáticamente como un cierto indicador de dispersiones, para anulaciones inmediatas o prevención contra ciertas series.

Se consideraron buenas las series con coeficiente de variación de pesos específicos al desmoldar menor de 1,5 % y tolerables las de los comprendidos entre 1,5 y 2,0 %. Los valores superiores al 2 % quedaban supeditados al valor del coeficiente de variación de las resistencias a tracción, eliminando la serie si éste superaba el 10 %.

El tope fijado para el coeficiente de variación de pesos específicos al desmoldar puede considerarse en principio excesivo. Nuestra experiencia con hormigones de piedra pómez y arena de río como árido fino, utilizando probetas de $\varnothing 15 \times 30$ cm era que, en laboratorio, rara vez se sobrepasaba el 1 %. Sin embargo, en los hormigones de este trabajo las cantidades importantes de pasta, los pesos específicos menores en valores absolutos y la utilización de probetas más pequeñas obligó a ampliar el límite.

El otro control de aceptación de series que se ha hecho, antes de llegar a la interpretación de los resultados, ha sido el de la cantidad de grasa empleada.

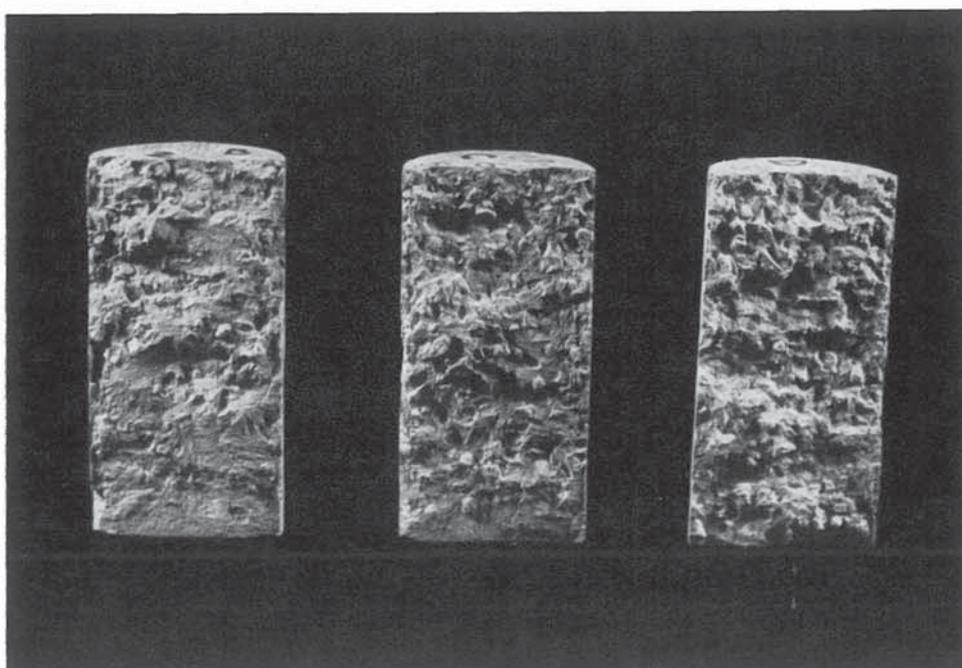
Se utilizaron cantidades de 6 g de grasa / 100 cm^3 de volumen aparente de árido grue-

so y $7,5 \text{ g}/100 \text{ cm}^3$ de volumen aparente de árido fino, fijadas empíricamente, y podemos decir que el funcionamiento como adherencia nula fue bueno con el árido Tenerife 4,5/10 milímetros, algo peor con Tenerife 2,5/4,5 milímetros y bastante malo con el árido Olot, lo cual es obvio por la forma más redondeada del primero.

En ensayos anteriores con gravilla rodada 9,11/18,6 mm vimos que la curva resistencia a compresión versus peso de grasa empleada para lubricar el árido, presentaba una primera zona decreciente para cantidades de grasa de 0 a $2 \text{ g}/100 \text{ cm}^3$ de árido, para pasar a un tramo estabilizado horizontal, hasta que se detectaba la presencia de grasa en la pasta de cemento.

En la figura 5 puede verse el aspecto de tres probetas rotas con árido Tenerife 4,5/10 mm, impregnado de grasa con las tres concentraciones volumétricas ensayadas. Se aproxima a la fractura ideal sin adherencia que se buscaba, pero con el árido Olot gran cantidad de granos aparecieron rotos y no despegados.

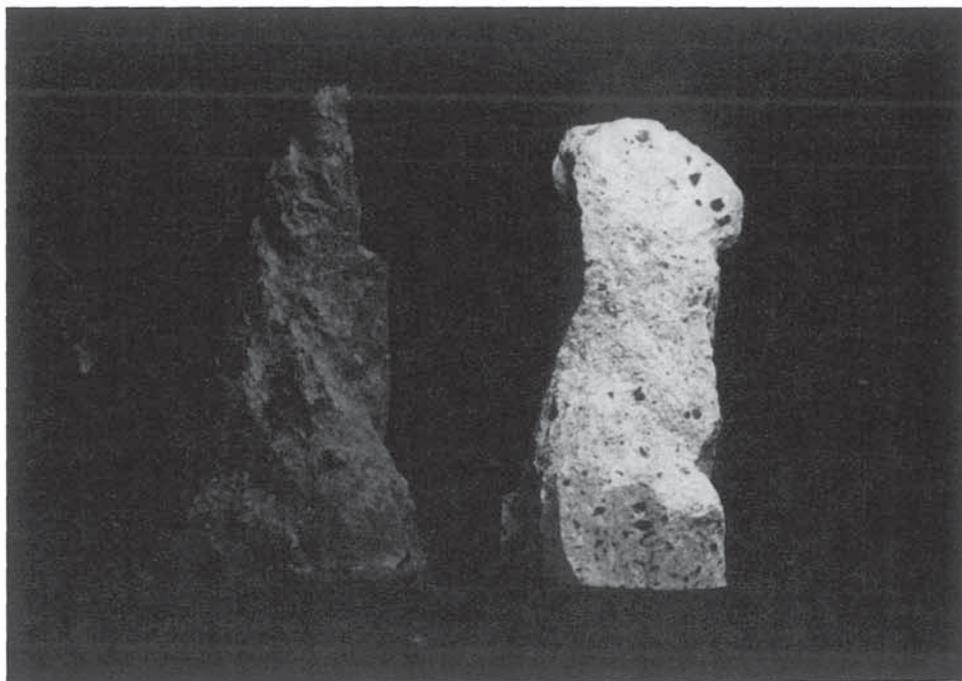
Previamente a la fabricación de las series de probetas habíamos estudiado el efecto contaminante que la grasa empleada podía tener sobre la pasta de cemento. Adiciones de 20 g de grasa por probeta de $\varnothing 7,5 \times 15$ cm de pasta de cemento producían caídas de resistencias del orden del 21 % a 7 y 28 días para una relación agua/cemento de 0,40 y



5

Probetas con tres concentraciones de árido Tenerife 4,5/10 mm, impregnado de grasa.

6



Probetas de pasta, la de la derecha contaminada por grasa, fotografiadas bajo rayos ultravioleta.

del 28 % para 0,45. Por tanto, si la grasa que impregnaba el árido se desprendía y pasaba a la pasta, ésta perdería resistencia por un efecto diferente al de la falta de adherencia.

El control de esta posible contaminación se hizo mediante rayos ultravioleta. Bajo la lámpara, la pasta contaminada fluorescía mientras la no contaminada no lo hacía.

En la figura 6 pueden verse dos probetas fracturadas de pasta de cemento, la de la derecha contaminada por grasa, y fotografiadas bajo rayos ultravioleta.

De esta forma las probetas que incluían árido impregnado de grasa, bajo la lámpara de rayos ultravioleta denotaban un halo resplandeciente alrededor de los granos de débil espesor si la grasa no había pasado a la pasta. En caso contrario toda la matriz presentaba puntos de fluorescencia y podía ser rechazada.

4 RESULTADOS OBTENIDOS

En los cuadros 1 y 2 se resumen los valores obtenidos. Las series defectuosas que se repitieron no se han incluido.

La fracción volumétrica de árido se ha calculado teniendo en cuenta el árido que realmente ha quedado en las probetas, no el dosificado. Para ello se ha descontado el peso

sobrante y se han hecho las oportunas correcciones por humedad inicial y por peso humedecido.

Evidentemente han sido necesarios los pesos específicos aparentes de los distintos áridos utilizados. Los valores adoptados han sido:

Olot:	4,5/10 mm	1,35 kp/dm ³ ;
	2,5/ 4,5 mm	1,47 kp/dm ³ ;
Tenerife:	4,5/10 mm	0,82 kp/dm ³ ;
	2,5/ 4,5 mm	1,01 kp/dm ³ .

Estos valores de los pesos específicos de los áridos se determinaron previamente (16, 17), fijando el estado saturado superficie seca tras saturación por ebullición y vacío, y secado superficial hasta eliminar la película brillante de agua. El volumen se determinó por diferencia entre el peso en el aire y el sumergido.

El peso específico así calculado corresponde ciertamente al árido entumecido, pero es precisamente entumecido como entra a formar parte de cualquier hormigón y, en particular, de los que son motivo de este estudio.

Para paliar posibles errores en el valor del peso específico de un cierto tamaño, se determinaron los de 15 tamaños para así poder definir una curva continua peso específico aparente-tamaño de grano. Esta curva, además, tiene en un extremo el peso específico

	1	2		5	6		9
	3	4		7	8		
OLOT 4,5/10mm SIN GRASA							
3 DIAS	0,0	1,929	0,8	1,559	20,15	12,2	20,15
	18,1	1,896	0,8	1,527	15,85	8,3	15,85
	34,8	1,830	1,6	1,481	14,64	10,8	14,64
	52,4	1,759	3,5	1,414	8,70	9,0	8,70
7 DIAS	0,0	1,894	0,8	1,530	23,84	9,3	23,84
	17,3	1,853	0,8	1,495	24,41	8,1	24,41
	34,6	1,808	1,6	1,461	21,42	10,0	21,42
	50,7	1,749	0,6	1,405	16,61	13,1	17,73
28 DIAS	0,0	1,894	0,7	1,523	36,30	5,1	36,30
	16,9	1,874	0,8	1,512	30,97	5,3	30,97
	34,3	1,825	0,2	1,471	28,54	7,9	28,54
	53,4	1,765	0,5	1,434	20,84	7,8	20,84
91 DIAS	0,0	1,919	1,2	1,578	36,90	3,9	36,90
	17,3	1,870	1,1	1,533	31,12	8,6	31,12
	35,3	1,827	1,6	1,487	27,93	11,2	27,93
	54,7	1,798	1,3	1,444	25,52	8,5	25,52

	1	2		5	6		9
	3	4		7	8		
OLOT 2,5/4,5mm SIN GRASA							
3 DIAS	0,0	1,895	0,9	1,499	23,88	6,2	23,88
	17,1	1,913	1,4	1,520	24,01	3,8	24,01
	35,7	1,880	1,3	1,493	19,22	10,6	19,22
	51,7	1,827	0,7	1,431	13,69	6,9	15,19
7 DIAS	0,0	1,897	0,5	1,465	22,15	9,1	22,15
	17,6	1,882	1,0	1,476	31,99	6,0	33,58
	34,9	1,849	0,5	1,462	28,07	3,8	29,92
	51,5	1,796	1,1	1,407	20,99	1,6	24,55
28 DIAS	0,0	1,918	0,6	1,543	37,93	13,9	37,93
	18,2	1,890	0,8	1,535	37,58	7,1	37,58
	35,3	1,839	1,1	1,491	32,69	5,9	34,06
	53,3	1,813	0,6	1,465	27,92	9,2	29,36
91 DIAS	0,0	1,899	0,8	1,556	35,01	12,0	35,01
	17,3	1,887	1,2	1,543	34,56	16,8	34,56
	34,2	1,850	0,9	1,495	29,62	21,7	32,15
	50,1	1,796	0,7	1,439	27,31	3,3	32,22

1. Fracción volumétrica de árido (%)
2. Peso específico al desmoldar
3. Media (kp/dm³)
4. Coeficiente de variación (%)
5. Peso específico seco (kp/dm³)
6. Resistencia unitaria a tracción
7. Media (kp/cm²)
8. Coeficiente de variación (%)
9. Resistencia unitaria corregida (kp/cm²)

absoluto del árido (tamaños muy finos) y en otro el de las fracciones muy gruesas, ambos determinables por métodos en los que no influyen apreciaciones del estado saturado superficie seca.

En los hormigones «con grasa» se ha tomado como fracción volumétrica del árido, la del árido y la grasa, cuyo peso específico hubo de determinarse y se adoptó 0,93 kp/dm³.

4.1. DISPERSIONES OBTENIDAS

Como se señaló anteriormente, se calculó el coeficiente de variación de cada serie de pesos específicos al desmoldar y de resistencias.

En el siguiente cuadro se resumen los valores obtenidos para las 96 series cuya fracción volumétrica de árido no era nula.

	1	2		5	6		9
	3	4		7	8		
TENERIFE 4,5/10mm SIN GRASA							
3 DIAS	0,0	1,968	0,4	1,608	34,48	8,0	34,48
	17,5	1,773	1,0	1,408	21,75	7,5	21,75
	34,7	1,618	1,4	1,263	13,19	9,6	13,19
	52,0	1,470	0,7	1,153	14,34	7,8	14,34
7 DIAS	0,0	1,928	0,9	1,573	30,18	20,5	30,18
	16,9	1,757	0,7	1,408	23,96	8,2	23,96
	35,0	1,598	1,6	1,272	20,11	6,9	20,11
	52,7	1,455	1,5	1,146	18,50	6,8	18,50
28 DIAS	0,0	1,897	0,8	1,525	29,94	17,1	29,94
	17,4	1,751	1,3	1,411	26,56	10,8	26,56
	34,8	1,590	1,4	1,280	22,75	8,4	22,75
	52,2	1,471	0,9	1,179	23,15	7,6	23,15
91 DIAS	0,0	1,907	0,7	1,566	30,77	2,3	30,77
	17,2	1,758	2,3	1,427	27,03	5,2	27,03
	32,7	1,558	2,8	1,241	21,62	9,1	25,33
	51,5	1,433	1,5	1,135	20,77	6,8	22,34

	1	2		5	6		9
	3	4		7	8		
TENERIFE 2,5/4,5mm SIN GRASA							
3 DIAS	0,0	1,924	1,5	1,523	20,43	6,9	20,43
	17,2	1,759	1,0	1,376	18,17	3,5	20,17
	33,4	1,614	0,5	1,256	15,39	3,4	18,31
	46,8	1,436	1,9	1,083	6,73	1,2	9,73
7 DIAS	0,0	1,932	0,7	1,547	30,45	9,2	30,45
	18,1	1,797	2,2	1,434	26,82	9,4	26,82
	34,6	1,621	1,0	1,295	21,03	8,4	24,11
	49,8	1,441	1,1	1,122	15,19	11,9	20,78
28 DIAS	0,0	1,945	1,2	1,595	33,61	6,8	33,61
	16,8	1,769	0,9	1,426	26,22	12,2	29,13
	33,0	1,628	1,3	1,300	25,71	7,7	30,47
	51,1	1,507	1,1	1,209	24,03	2,6	28,10
91 DIAS	0,0	1,934	1,1	1,602	43,22	14,7	43,22
	16,9	1,724	0,6	1,402	28,67	8,7	33,00
	33,7	1,570	1,7	1,283	24,24	13,9	29,85
	47,1	1,427	0,5	1,134	24,60	9,7	34,62

C. VARIACION PESOS ESPECIFICOS

C. variación resistencias	< 1,5 %	1,5-2,0	> 2,0 %	Totales
< 10 %	63	8	6	77
10-15	10	3	1	14
> 15 %	4	1	0	5
Totales ...	77	12	7	96

Para las series de pasta pura, sobre un total de 32:

C. VARIACION PESOS ESPECIFICOS

C. variación resistencias	< 1,5 %	1,5-2,0	> 2,0 %	Totales
< 10 %	16	0	0	16
10-15	12	0	0	12
> 15 %	4	0	0	4
Totales ...	32	0	0	32

	1	2		5	6		9		1	2		5	6		9
	3	4		7	8			3	4		7	8			
OLOT 4,5/10mm CON GRASA								TENERIFE 4,5/10mm CON GRASA							
3 DIAS	0,0	1,937	1,0	1,533	22,41	13,3	22,41	3 DIAS	0,0	1,911	0,5	1,507	22,67	9,5	22,67
	17,8	1,870	0,9	1,469	19,67	4,8	19,67		18,6	1,768	1,3	1,398	18,09	6,9	18,09
	36,1	1,809	0,8	1,431	16,02	9,2	16,02		36,2	1,604	1,2	1,253	12,58	11,0	12,58
	53,0	1,732	0,7	1,371	11,15	5,8	11,91		53,6	1,464	1,6	1,139	10,11	7,3	10,11
7 DIAS	0,0	1,913	1,1	1,551	29,46	10,4	29,46	7 DIAS	0,0	1,902	0,3	1,511	30,22	8,7	30,22
	18,6	1,866	0,8	1,503	24,03	16,7	24,03		18,3	1,761	0,4	1,403	18,92	5,6	18,92
	37,1	1,816	0,3	1,467	21,28	6,7	21,28		35,3	1,609	1,6	1,267	16,43	9,7	16,43
	55,3	1,746	1,1	1,403	16,90	7,7	16,90		53,4	1,460	1,1	1,153	13,43	6,8	13,43
28 DIAS	0,0	1,911	0,6	1,558	34,37	13,5	34,37	28 DIAS	0,0	1,893	0,4	1,534	25,01	23,0	25,01
	19,2	1,867	0,5	1,525	28,05	12,8	28,05		18,4	1,764	1,1	1,427	24,88	13,2	24,88
	38,4	1,822	0,7	1,494	27,24	5,0	27,24		36,5	1,612	0,7	1,293	20,71	9,9	20,71
	59,6	1,808	1,2	1,484	24,37	9,0	24,37		54,4	1,457	0,8	1,164	16,41	8,7	16,41
91 DIAS	0,0	1,926	0,5	1,599	32,35	8,3	32,35	91 DIAS	0,0	1,932	0,8	1,597	35,83	14,6	35,83
	19,4	1,867	0,9	1,543	33,37	5,2	33,37		19,1	1,761	1,3	1,439	24,16	6,3	24,16
	37,7	1,820	0,7	1,513	31,67	5,5	31,67		37,4	1,587	1,5	1,302	21,13	7,6	21,13
	58,4	1,772	0,3	1,475	27,84	3,9	27,84		53,4	1,439	0,7	1,166	16,54	9,9	16,54
OLOT 2,5/4,5mm CON GRASA								TENERIFE 2,5/4,5mm CON GRASA							
3 DIAS	0,0	1,917	1,0	1,508	19,69	8,2	19,69	3 DIAS	0,0	1,934	0,6	1,542	23,77	3,8	23,77
	20,4	1,847	0,8	1,480	19,84	6,8	19,84		18,3	1,744	2,4	1,389	19,09	6,9	21,21
	39,3	1,805	1,1	1,458	16,11	1,8	16,11		33,8	1,570	1,6	1,232	14,98	9,0	19,07
	57,5	1,744	0,6	1,423	12,32	5,6	13,04		47,3	1,396	1,4	1,085	8,85	7,5	12,99
7 DIAS	0,0	1,929	1,4	1,552	31,99	7,1	31,99	7 DIAS	0,0	1,922	0,5	1,549	24,54	11,9	24,54
	19,3	1,870	0,4	1,510	26,22	9,6	26,22		18,1	1,737	2,3	1,389	20,77	7,6	23,32
	36,9	1,804	0,7	1,447	21,49	12,3	23,57		34,3	1,571	1,4	1,247	15,81	7,2	19,64
	54,0	1,735	1,2	1,388	15,32	15,9	18,12		47,5	1,390	2,1	1,079	11,45	12,5	17,14
28 DIAS	0,0	1,924	0,7	1,552	33,52	14,8	33,52	28 DIAS	0,0	1,937	0,8	1,598	30,65	10,1	30,65
	19,5	1,883	1,1	1,535	29,26	7,5	29,26		18,7	1,783	1,2	1,462	25,05	4,5	25,05
	36,6	1,820	0,9	1,474	29,16	7,7	30,73		35,8	1,657	1,3	1,356	21,47	2,9	22,67
	52,5	1,740	0,9	1,408	21,86	4,8	25,31		52,4	1,503	0,4	1,222	17,67	3,9	19,74
91 DIAS	0,0	1,913	1,2	1,592	32,99	12,6	32,99	91 DIAS	0,0	1,905	1,3	1,581	42,86	20,0	42,86
	19,0	1,887	0,7	1,566	32,63	6,5	32,63		18,1	1,746	1,4	1,431	23,94	14,0	26,18
	37,2	1,827	0,8	1,511	31,35	3,4	31,35		35,3	1,586	1,9	1,307	21,69	8,6	25,19
	54,5	1,795	0,6	1,486	24,94	4,1	24,94		48,7	1,421	1,9	1,143	19,00	6,5	25,74

Lógicamente, las series de pasta son más uniformes, en cuanto a peso específico, que las de hormigón en las que interviene la distribución del árido.

Por el contrario, las resistencias de las series de pasta son más dispersas, lo que permite una cierta tolerancia en las series de hormigones al indicar que las dispersiones propias del ensayo y las debidas al cemento son grandes.

4.2. CORRECCIONES

De cada serie se midieron el peso específico al desmoldar y el seco, que podían ser comparados con sus valores teóricos. Estos valores ideales, para distintas fracciones volumétricas a igualdad de las demás condiciones, estaban colocados sobre una recta en

el sistema peso específico-fracción volumétrica de árido (11) y (12), que unía el peso específico de la pasta de cemento y el del árido aislado:

$$\gamma_v = \gamma_0 + (\gamma_a - \gamma_0) \cdot V ;$$

en la cual:

γ_v = peso específico teórico para la concentración V .

γ_0 = peso específico de la pasta.

γ_a = peso específico del árido.

V = concentración volumétrica del árido en tanto por uno.

En el caso de pesos específicos secos, el valor correspondiente al árido estaba determinado, como ya hemos aclarado antes. El valor de la pasta debería ser el de la serie sin árido que se fabricaba simultáneamente con las de las distintas concentraciones a igual-

dad de las otras variables. Sin embargo, se prefirió aprovechar el respaldo estadístico que proporcionaban las restantes series de la misma partida de cemento rotas a la misma edad.

Para los pesos específicos al desmoldar el valor correspondiente a la pasta de cemento se fijaba de manera análoga, pero ahora sin distinción de edad de rotura. Como valor del árido se tomaba el correspondiente al árido humedecido, que sería el que correspondería idealmente. En la práctica, las discrepancias con este valor provienen de que la prehumidificación no sea la ideal (sin absorciones ni segregaciones de agua) y de que, durante las 24 horas que preceden al desmolde, haya evaporaciones del agua incluida en el árido. Ambos factores han resultado ser despreciables.

Las diferencias entre los valores medidos y los que cabía esperar daban, tanto en el caso de pesos secos como en el de pesos al desmoldar, idea de los huecos ocluidos. Si el punto experimental coincidía con la recta no había más aire ocluido que el de la pasta de cemento, pero, en general, el valor experimental era menor que el teórico. La determinación del aire ocluido se basa en lo siguiente:

$$\gamma_{\text{teórica}} = V_{\text{árido}} \cdot \gamma_{\text{árido}} + (V_{\text{matriz}} + V_{\text{aire}}) \gamma_{\text{matriz}} ;$$

$$\gamma_{\text{medida}} = V_{\text{árido}} \cdot \gamma_{\text{árido}} + V_{\text{matriz}} \cdot \gamma_{\text{matriz}} ;$$

siendo:

γ = peso específico.

V = fracción volumétrica en tanto por uno.

Por tanto:

$$V_{\text{aire}} (\%) = \frac{\gamma_{\text{teórica}} - \gamma_{\text{medida}}}{\gamma_{\text{matriz}}} \cdot 100 .$$

El razonamiento se basa en la observación de que en el peso específico teórico se ha ponderado como matriz (pasta) el aire ocluido. Hay que hacer notar que el aire ocluido sustituye a pasta y no a hormigón, porque la cantidad de árido está totalmente determinada y la concentración es la misma en los pesos específicos teórico y medido.

Como se disponía de pesos específicos al desmoldar y secos, el aire ocluido aceptado fue la media de las determinaciones de ambos, es decir, en tanto por uno:

$$V_{\text{aire}} = 1 - V + \left(\frac{\gamma_{a,\text{seco}}}{\gamma_{0,\text{seco}}} + \frac{\gamma_{a,\text{desmoldar}}}{\gamma_{0,\text{desmoldar}}} \right) \cdot \frac{V}{2} - \frac{\frac{\gamma_{V,\text{seca}}}{\gamma_{0,\text{seca}}} + \frac{\gamma_{V,\text{desmoldar}}}{\gamma_{0,\text{desmoldar}}}}{2} ;$$

V es la concentración volumétrica del árido.

En las figuras 7 a 14 pueden verse las rectas teóricas y los pesos específicos medidos.

Experiencias anteriores demostraron que este aire ocluido podía ser importante, especialmente para valores de V del orden del 50 % y podía acarrear caídas de resistencia. Por ello se procedió a una corrección por este concepto, elaborando mediante ordenador la columna que aparece en el epígrafe 4 como resistencia unitaria corregida.

Para ser aplicada la corrección se exigía $V_{\text{aire}} > 0,015$, ya que el valor 1,5 % puede tomarse como normal en hormigones de árido ligero sin ningún aireante.

Para la corrección se tomó la ecuación de Wischers, antes mencionada,

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{(1 - V_p)^{2,7}} ;$$

que da valores medios entre las ecuaciones reseñadas. Contenidos de aire del 10 % descienden la resistencia al 75 %, y este valor fue tomado como tope, de forma que las series que daban contenidos superiores fueron anuladas (no aparecen en las figuras 18 y 22 de resistencias).

La corrección mediante la ecuación de Wischers no es desde luego satisfactoria en sentido cuantitativo, pero se consigue atenuar el error por huecos cuando se introduce bastante árido en las probetas. Hay que tener en cuenta que se basa en evidencia experimental concreta, parte de cuerpos sin poros para deducir sus caídas de resistencia y ésta no es la situación, y por último se debería aplicar en todo caso a la pasta para averiguar su pérdida de resistencia por oclusión de aire y, a partir de ella, hallar la correspondiente a un hormigón con una determinada concentración de árido. Sin embargo, todas estas objeciones no se pueden subsanar y hubo que contentarse con el efecto conseguido.

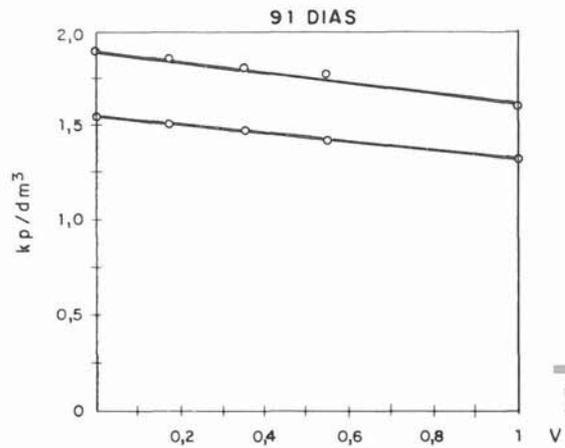
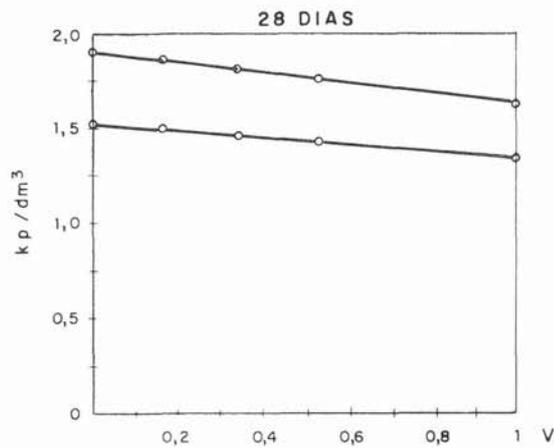
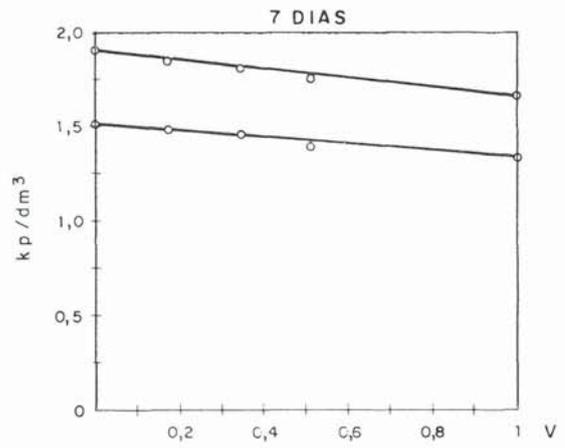
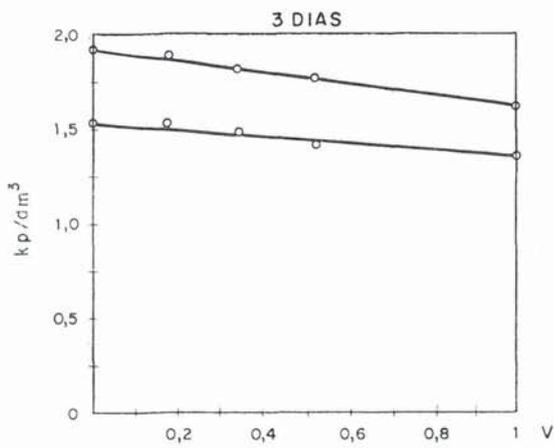


INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

A la vista de los resultados se trataban de aplicar diferentes modelos y obtener conclusiones sobre los ajustes respectivos.

pesos específicos

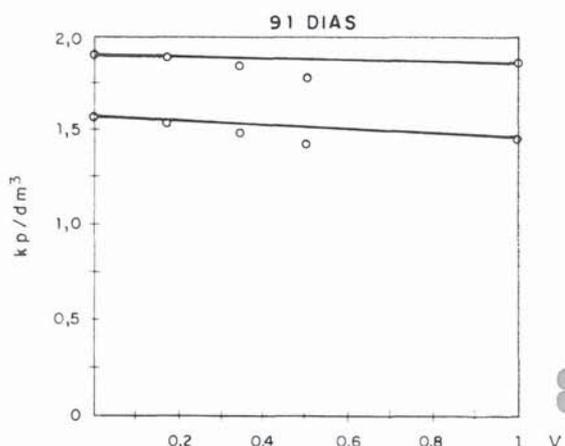
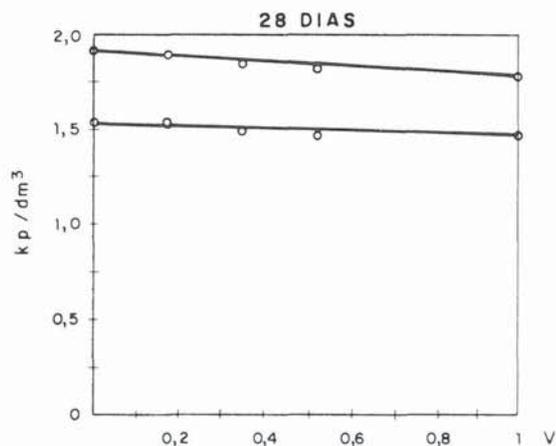
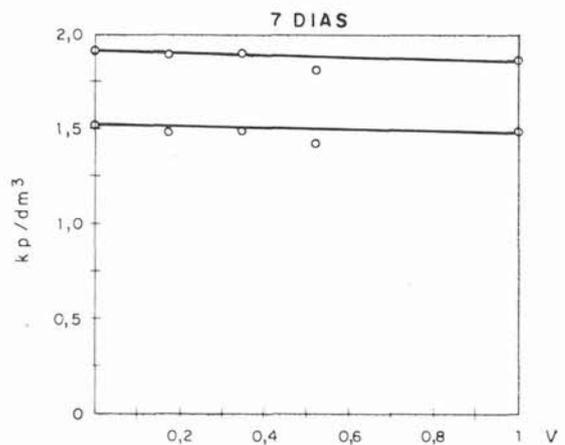
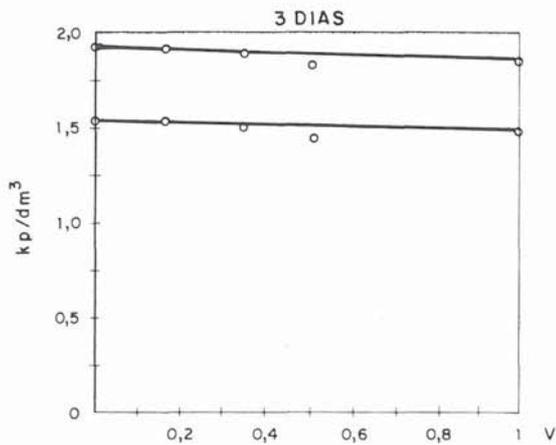
OLOT 4,5 / 10 mm SIN GRASA



7

pesos específicos

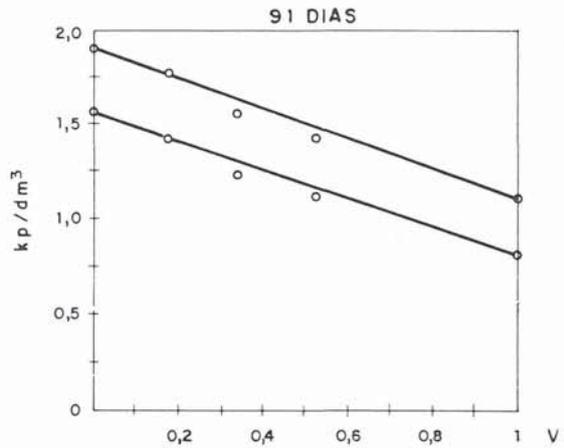
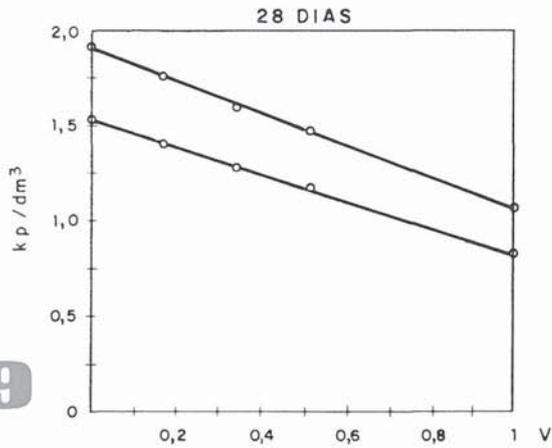
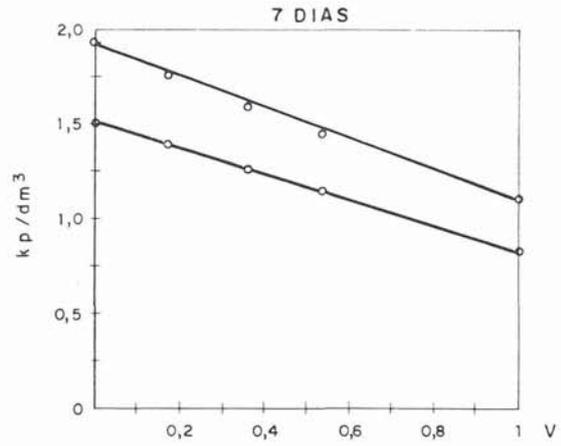
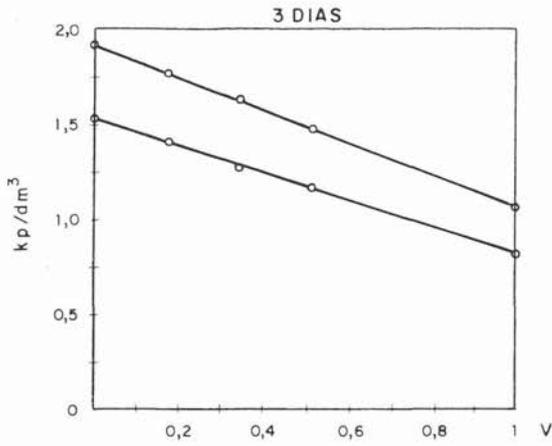
OLOT 2,5 / 4,5 mm SIN GRASA



8

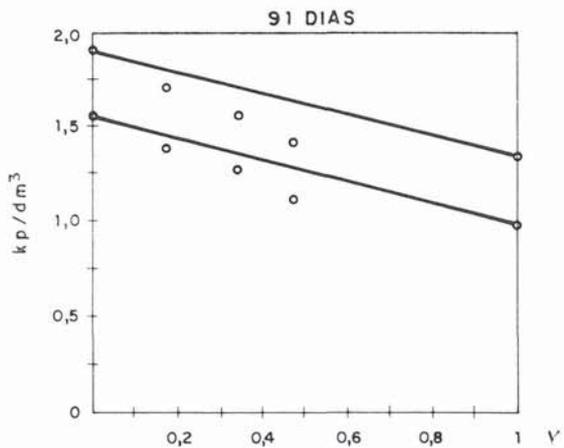
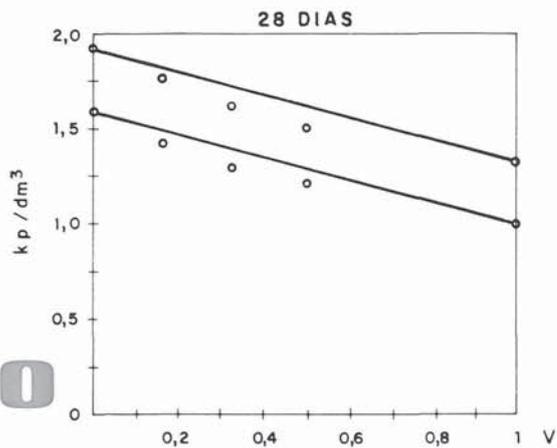
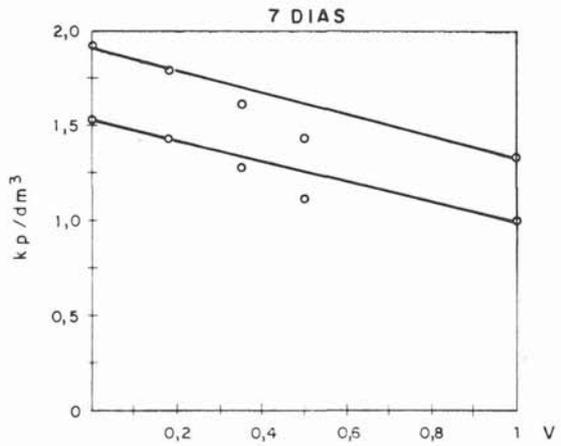
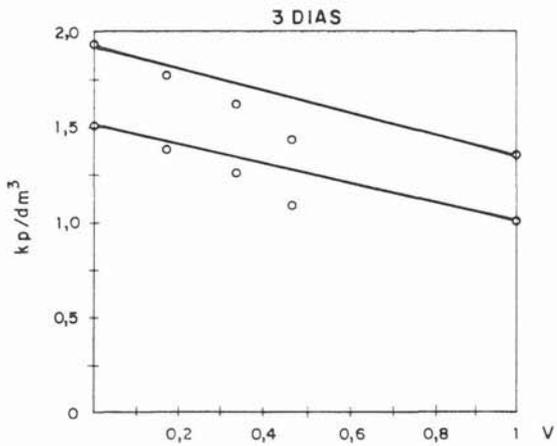
pesos especificos

TENERIFE 4,5/10 mm SIN GRASA



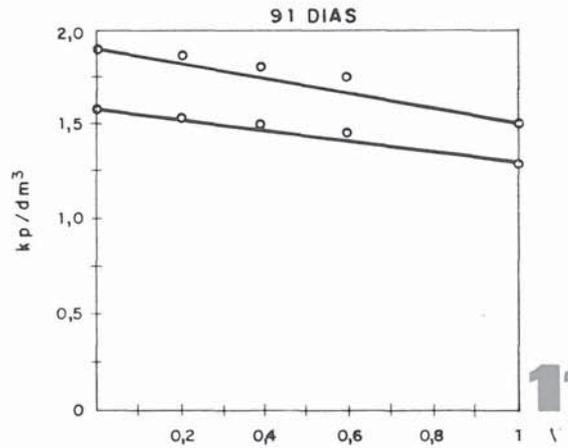
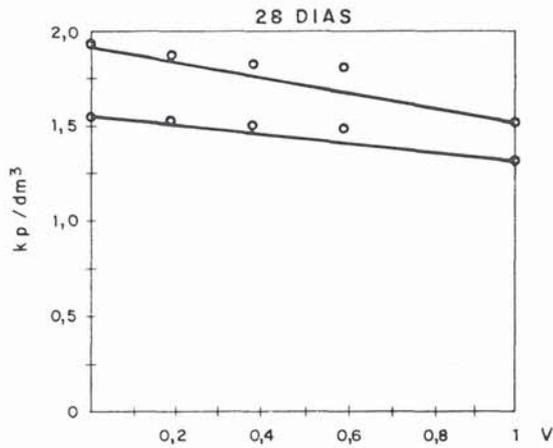
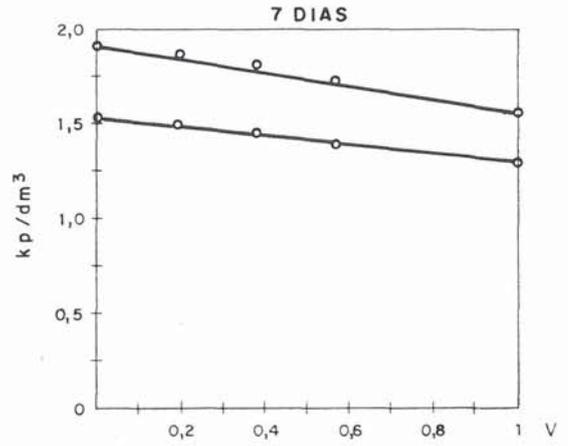
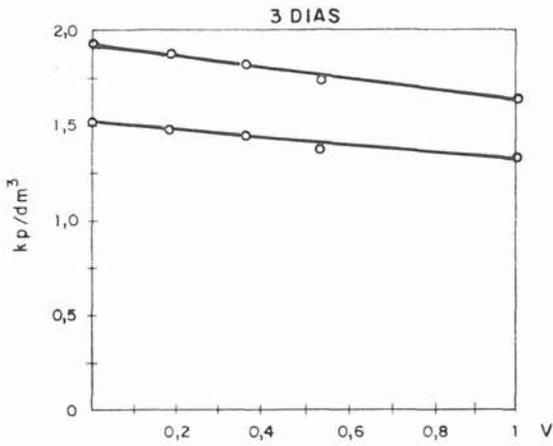
pesos especificos

TENERIFE 2,5/4,5 mm SIN GRASA



pesos específicos

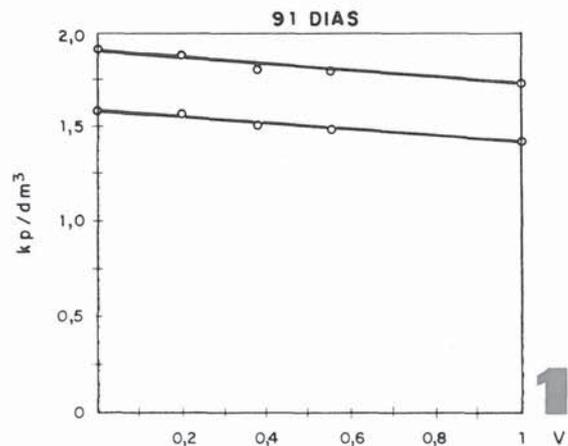
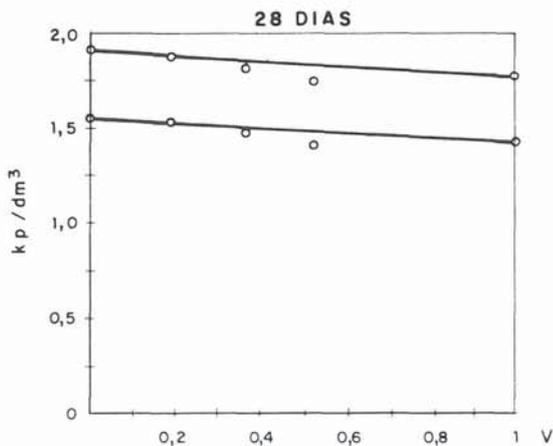
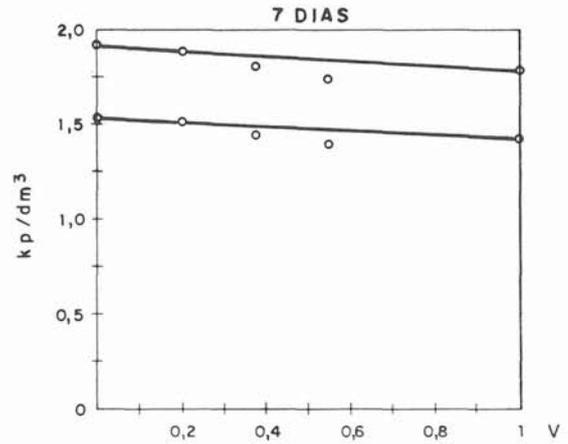
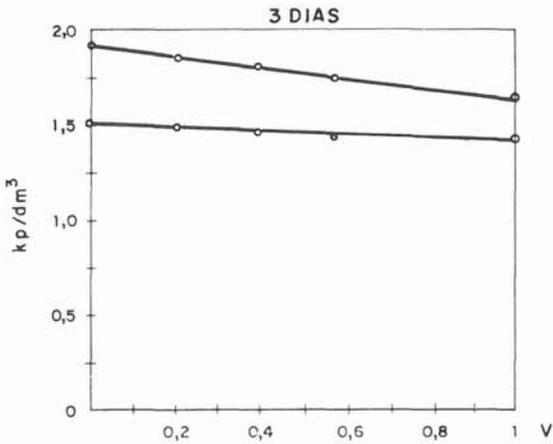
OLOT 4,5 / 10 mm CON GRASA



11

pesos específicos

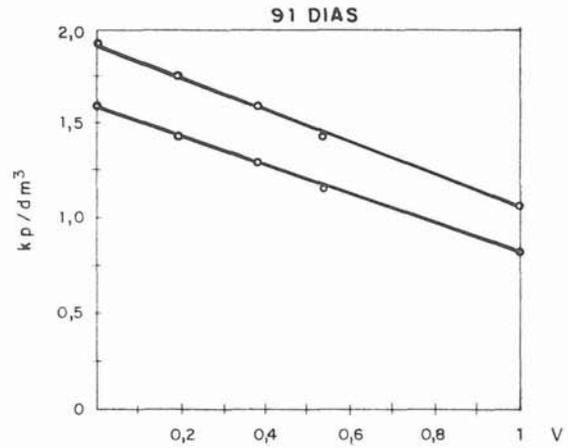
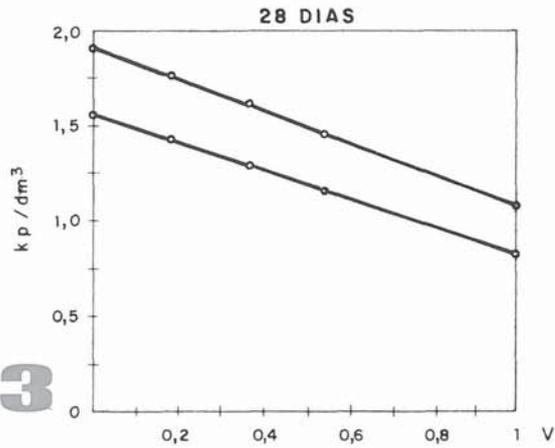
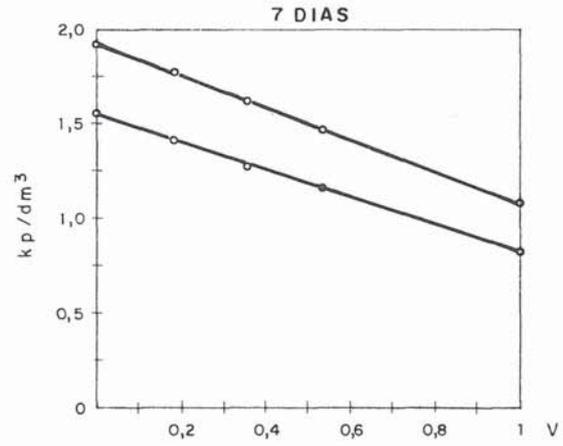
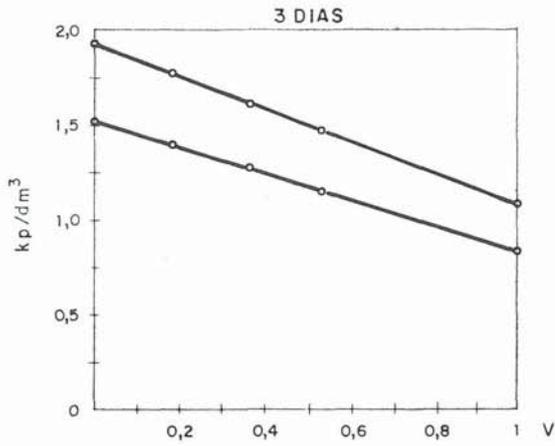
OLOT 2,5 / 4,5 mm CON GRASA



12

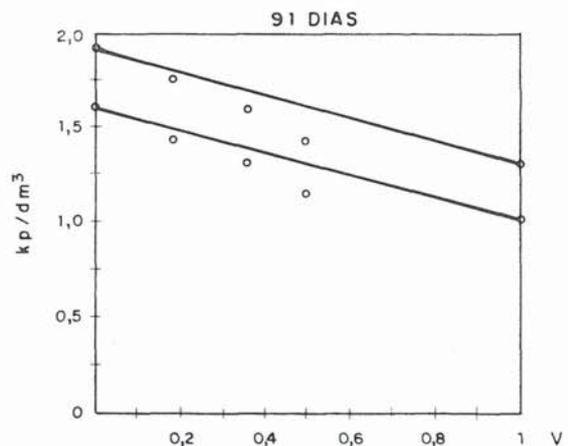
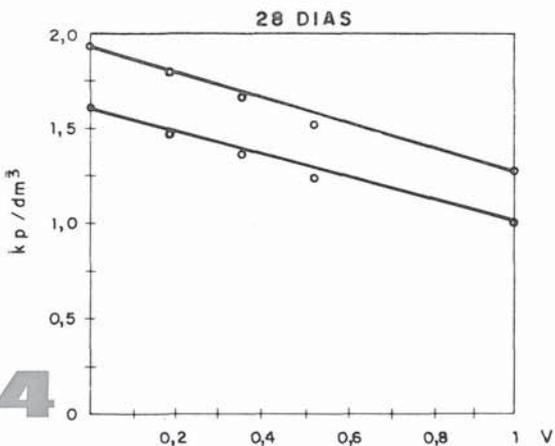
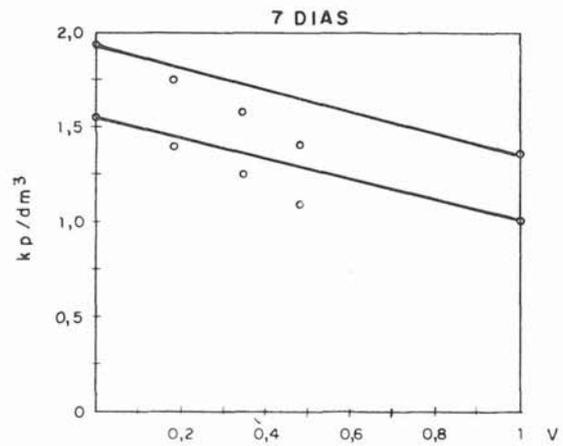
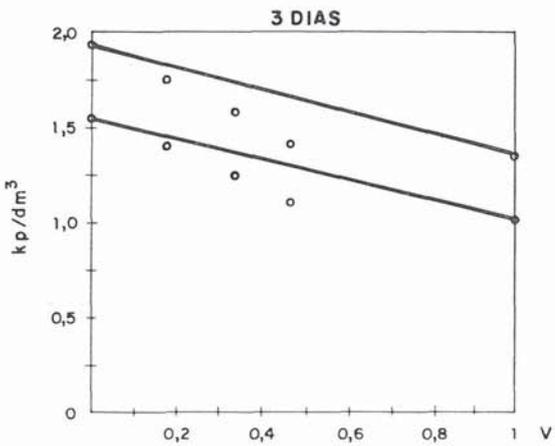
pesos específicos

TENERIFE 4,5/10 mm CON GRASA



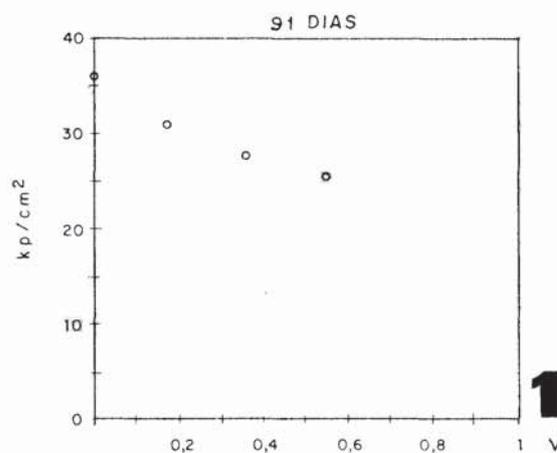
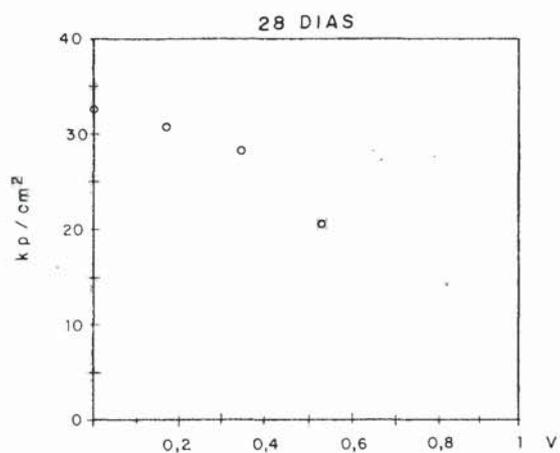
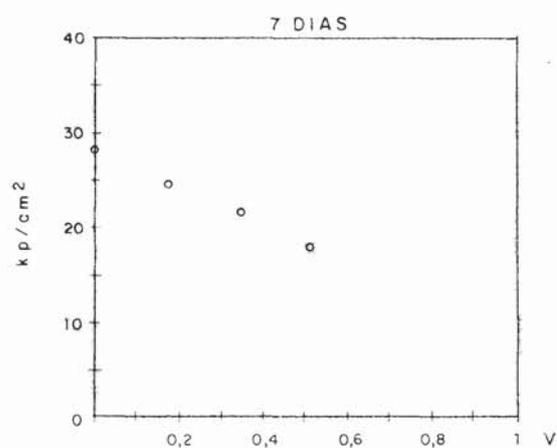
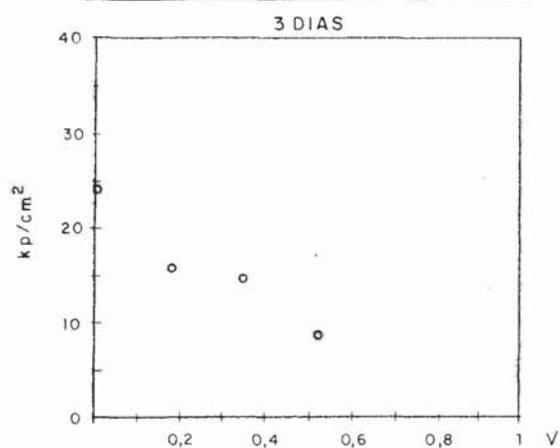
pesos específicos

TENERIFE 2,5/4,5 mm CON GRASA



resistencias

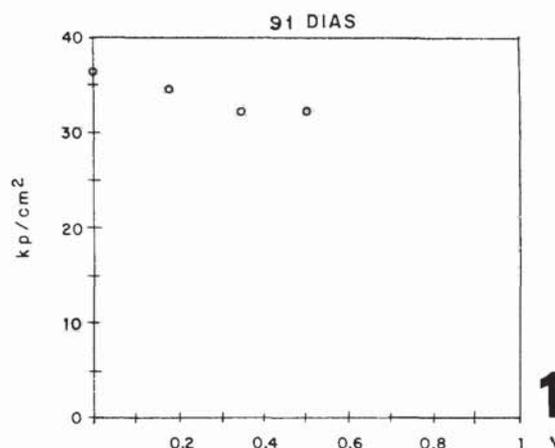
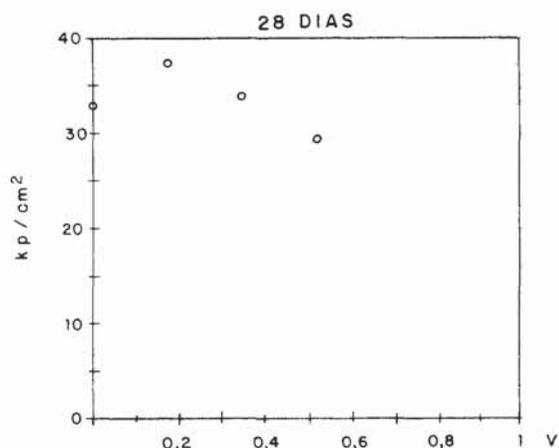
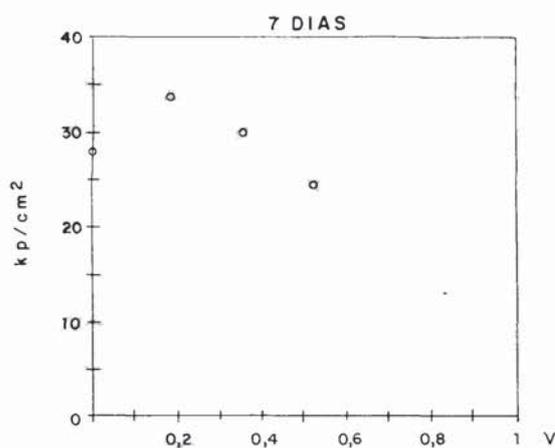
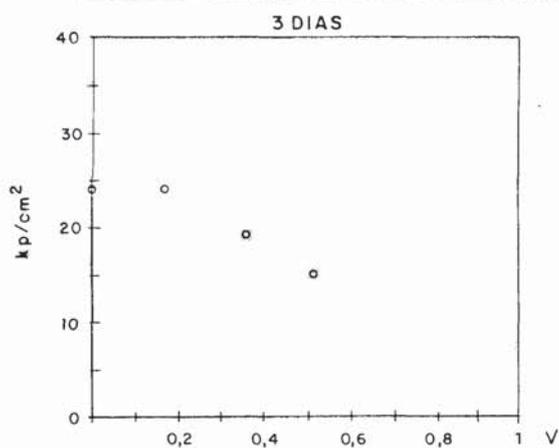
OLOT 4,5/10 mm SIN GRASA



15

resistencias

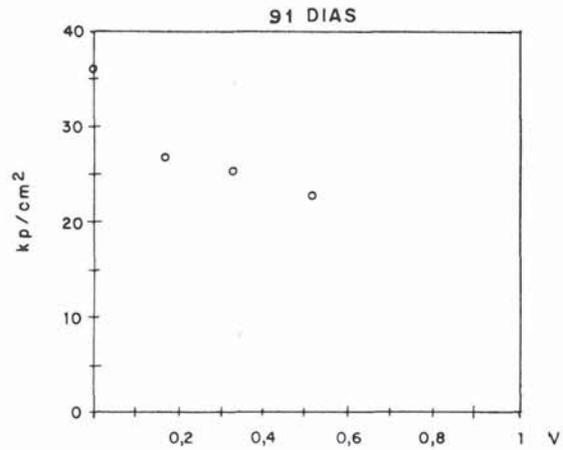
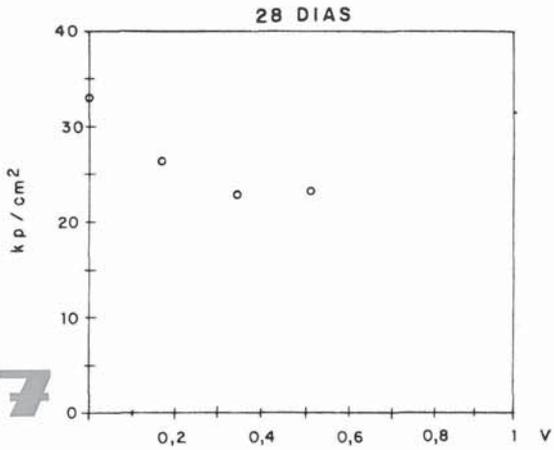
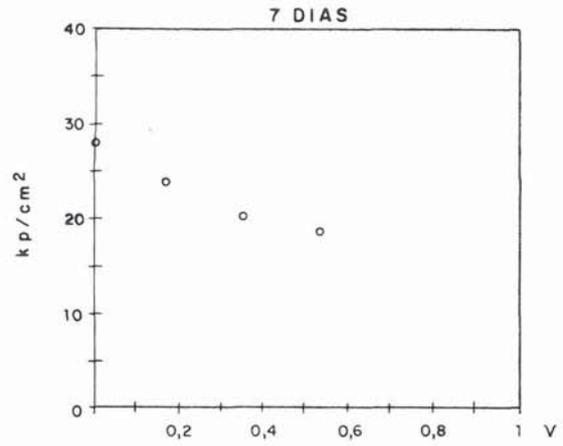
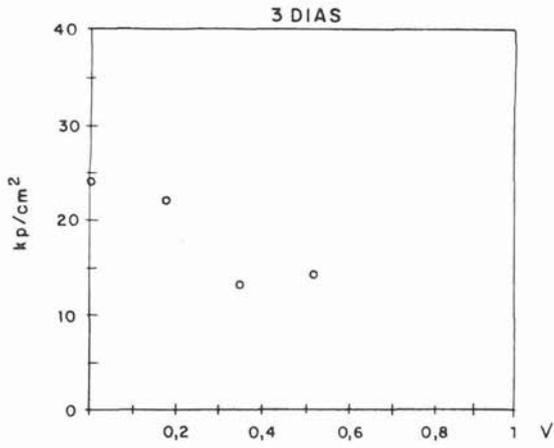
OLOT 2,5/4,5 mm SIN GRASA



16

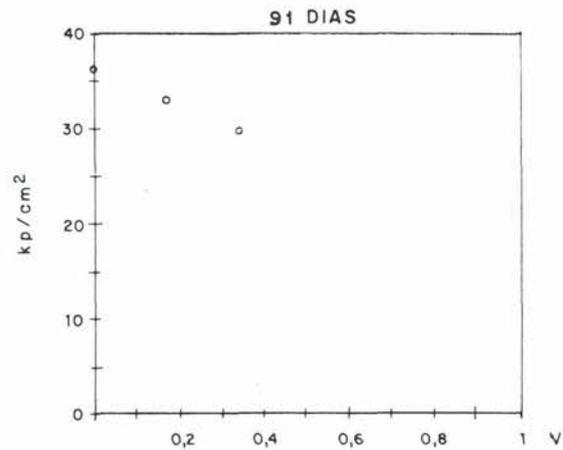
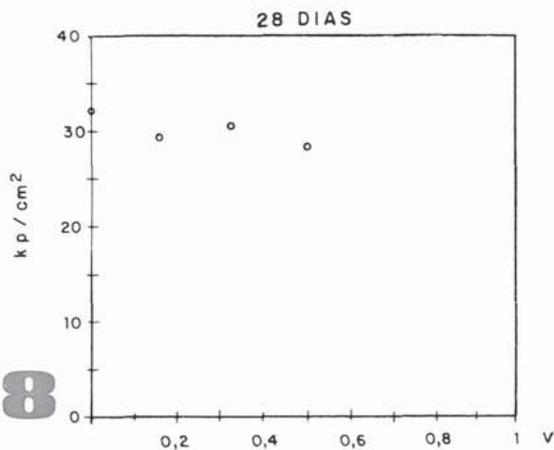
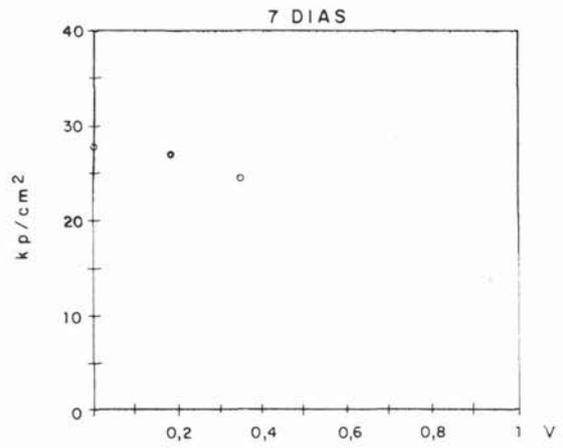
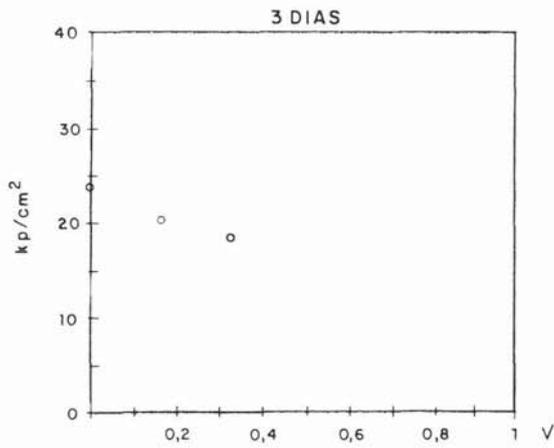
resistencias

TENERIFE 4,5 / 10 mm SIN GRASA



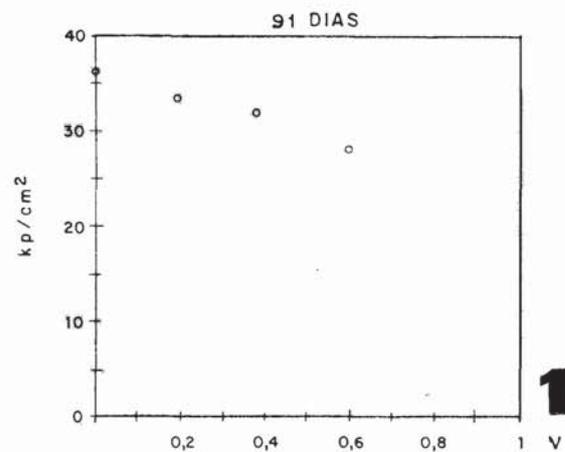
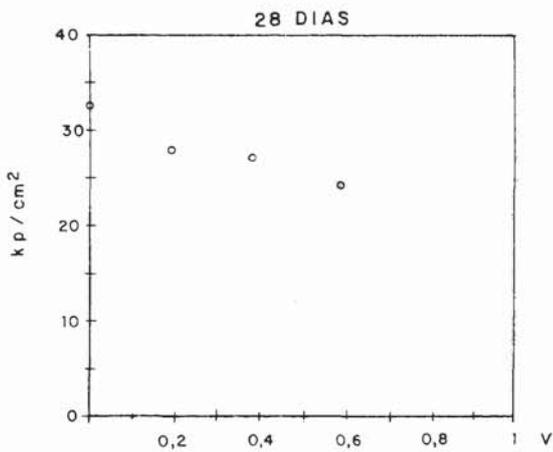
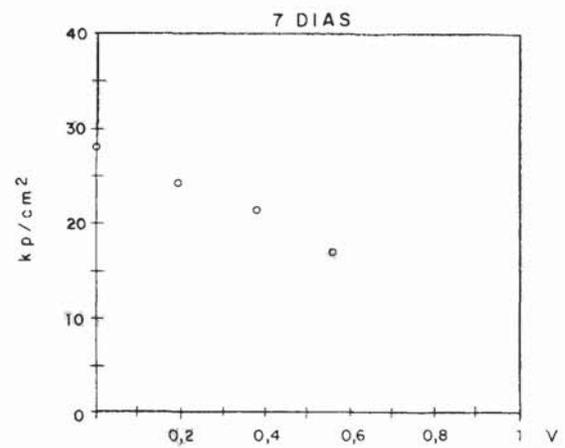
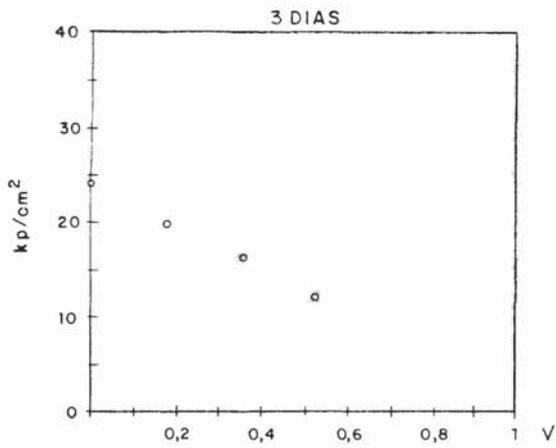
resistencias

TENERIFE 2,5 / 4,5 mm SIN GRASA



resistencias

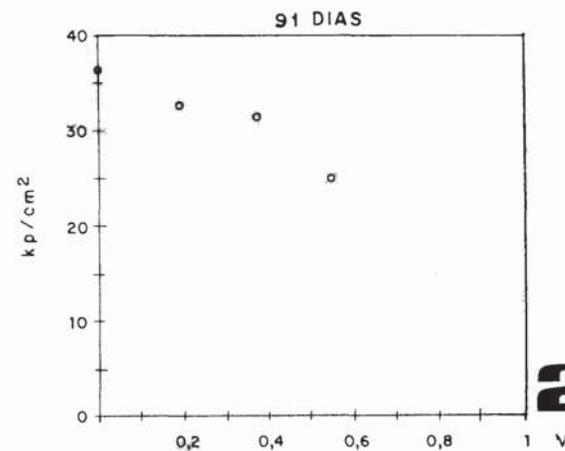
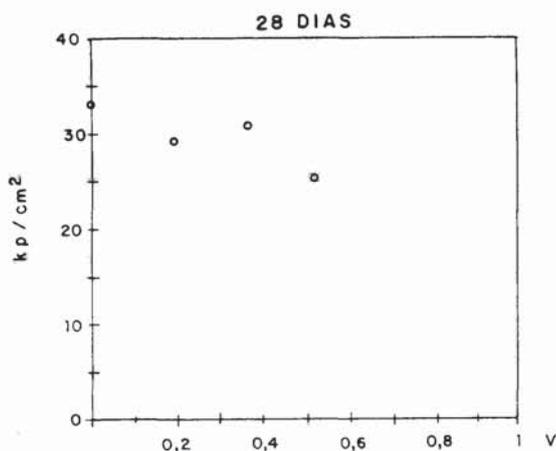
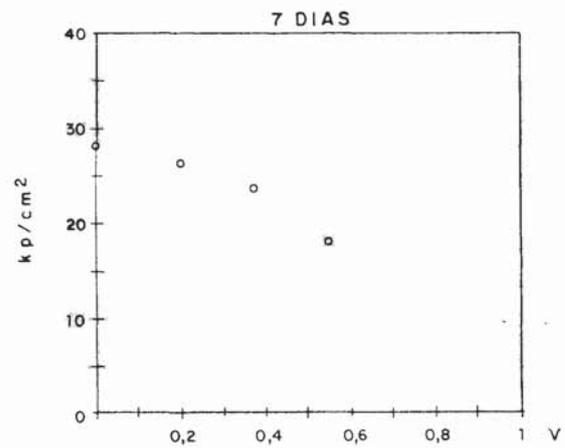
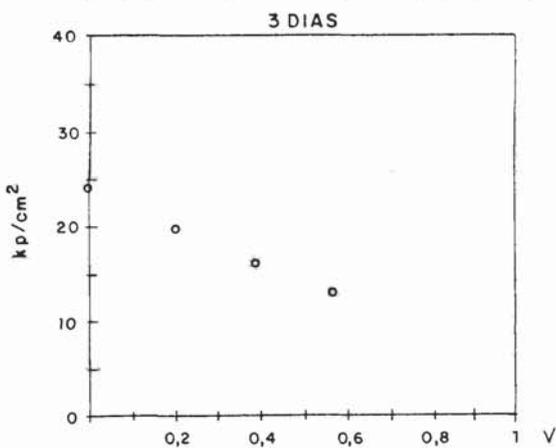
OLOT 4,5/10 mm CON GRASA



19

resistencias

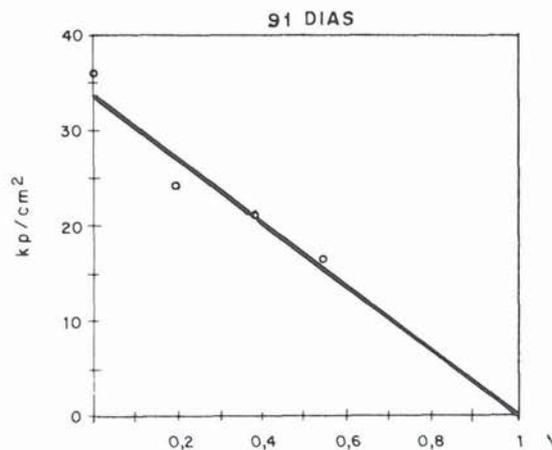
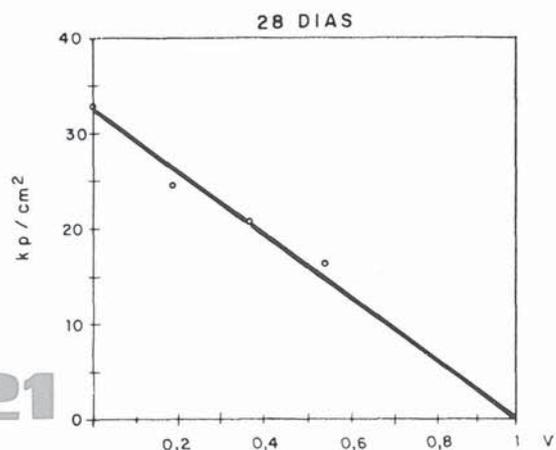
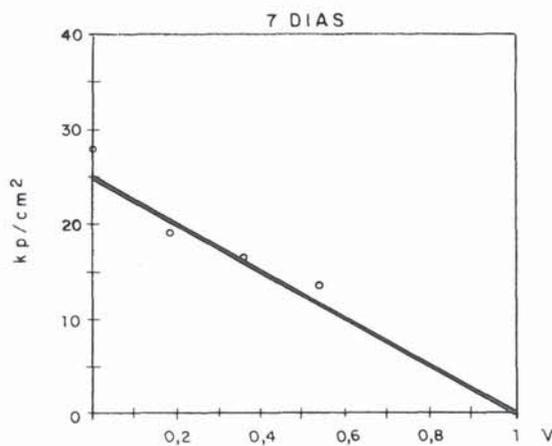
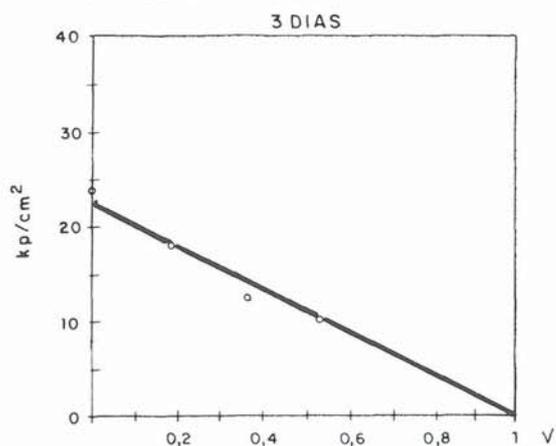
OLOT 2,5/4,5 mm CON GRASA



20

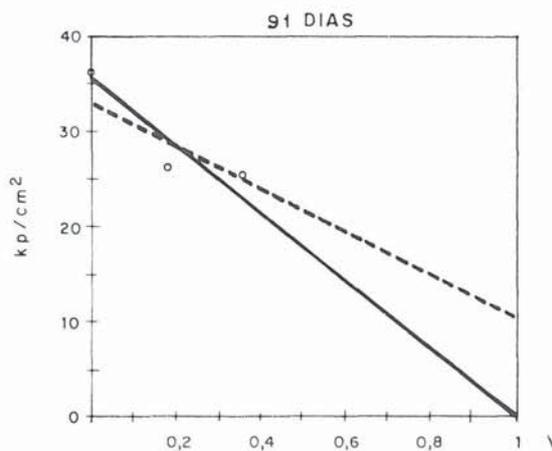
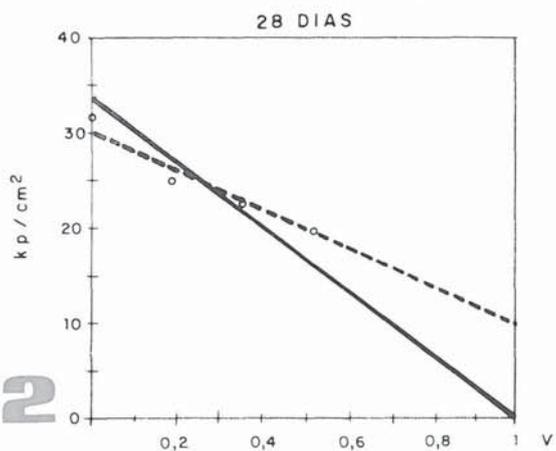
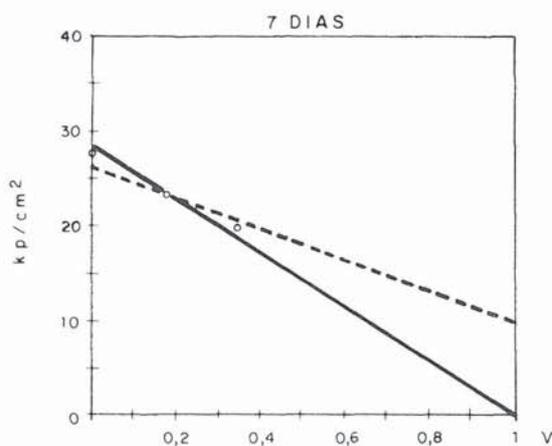
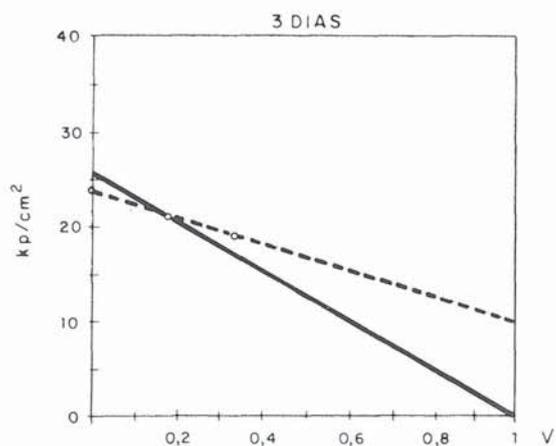
resistencias

TENERIFE 4,5/10 mm CON GRASA



resistencias

TENERIFE 2,5/4,5 mm CON GRASA



Las ecuaciones a tratar han sido:

a) Ecuación de Bache. La variación exponencial observada a compresión se coje a tracción:

$$\sigma = \sigma_a^V \cdot \sigma_0^{1-V}$$

b) Ecuación de la forma de las de pérdida de resistencia por porosidad

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\alpha \cdot V}$$

siendo α una constante a determinar.

c) Ecuación lineal que proponemos $\sigma = \sigma_a \cdot V + \sigma_0 \cdot (1 - V)$.

5.1. ECUACION LINEAL

Se basa en el hecho de que la densidad superficial S de árido en un plano cualquiera es estadísticamente igual a la densidad volumétrica V de árido en el hormigón (e igual también a la densidad lineal).

En efecto, consideremos un cubo de hormigón de arista L . Un plano paralelo a una de las caras intercepta un área L^2 de hormigón, del cual $\rho(z)$ corresponde a superficie de árido, siendo z la coordenada perpendicular al plano en cuestión. En este plano la densidad superficial será

$$S(z) = \frac{\rho(z)}{L^2};$$

y la densidad media en el cubo:

$$S = \int_0^L S(z) \cdot f(z) \cdot dz = \int_0^L \frac{\rho(z)}{L^2} \cdot f(z) \cdot dz;$$

siendo $f(z)$ la función de frecuencias, o sea, la probabilidad de encontrar un plano entre los planos z y $z + dz$, que es $1/L$, con lo cual:

$$S = \int_0^L \frac{\rho(z)}{L^3} \cdot dz = \frac{1}{L^3} \int_0^L \rho(z) \cdot dz = \frac{\omega}{L^3},$$

ω es el volumen de árido contenido en el cubo, y $V = \omega/L^3$ y, por tanto, $S = V$.

Aplicando esto al ensayo brasileño, en el cual, como dijimos en 2.2.c), todos los planos diametrales cabe esperar que por condiciones de fabricación y curado sean estadísticamente iguales, podemos considerar que la concentración superficial de árido en cualquiera de ellos, en particular en el de rotura, sea igual a la volumétrica V del hormigón.

Si suponemos que la adherencia árido-pasta es perfecta $\epsilon_{\text{árido}} = \epsilon_{\text{pasta}}$, entonces la tensión en rotura debiera ser suma de la colaboración de la pasta y de la del árido.

La resistencia aportada por el árido será: $S \cdot \sigma_a = V \cdot \sigma_a$ y la de la pasta $(1 - V) \cdot \sigma_0$; por tanto:

$$\sigma = V \cdot \sigma_a + (1 - V) \cdot \sigma_0 = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_a) \cdot V$$

Según este modelo la resistencia a tracción de un hormigón, en coordenadas naturales concentración volumétrica-resistencia, es una recta que une los puntos $(0, \sigma_0)$, y $(1, \sigma_a)$, de forma análoga a como pasaba en resistencia a compresión con el modelo de Bache en coordenadas semilogarítmicas.

5.2. AJUSTES Y OBSERVACIONES

Vamos a analizar en primer lugar los resultados en que se utilizó árido con grasa.

Independientemente de estos resultados, la ecuación de Bache no es aplicable a este caso, porque no tiene en cuenta la posibilidad de adherencia nula de ninguna forma. Si se pretende tomar $\sigma_a = 0$, resulta $\sigma = 0$ en cualquier caso, por tanto no existe posibilidad de ajuste.

Tampoco la ecuación $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-k \cdot V}$ permite un valor de k que haga para $V = 1$, $\sigma = 0$, pues sería $k = \infty$.

Con el modelo lineal propuesto se puede estudiar este caso perfectamente, pues adherencia nula significa que en el plano de rotura la tensión última será suma de la soportada por la pasta, como siempre, y de la resistencia a tracción de la grasa, que suponemos nula, o sea:

$$\sigma = (1 - V) \cdot \sigma_0,$$

que es como hacer $\sigma_a = 0$.

Conforme lo dicho anteriormente respecto de la eficacia conseguida por la grasa en el fin perseguido, vemos que los hormigones con árido de Olot han dado prácticamente la misma resistencia con y sin lubricación superficial, ratificando el hecho de que la grasa, introducida en las irregularidades superficiales, no consiguió anular la adherencia y el mecanismo de rotura fue el mismo que en los hormigones sin grasa.

Con el árido Tenerife 4,5/10 mm el ajuste es francamente bueno (figura 21) y se puede estimar como valor de la desviación cuadrática media:

$$d_m = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} = 1,6 \text{ kp/cm}^2.$$

Con el árido Tenerife 2,5/4,5 mm el ajuste es aceptable (figura 22):

$$d_m = 1,85 \text{ kp/cm}^2 ;$$

pero podemos comprobar que los hormigones no se han comportado como si $\sigma_a = 0$, ajustando rectas que, en lugar de pasar por (1; 0) pasen por (1; 10), es decir, adoptando el valor estimado $\sigma_a = 10 \text{ kp/cm}^2$. Entonces:

$$d_m = 1,5 \text{ kp/cm}^2 ,$$

lo que es indicativo de lo observado visualmente en los ensayos respecto a las roturas de granos y no despegues.

Para los hormigones sin grasa sabemos que en coordenadas semilogarítmicas:

$$\text{Bache } \ln \sigma = \ln \sigma_0 - (\ln \sigma_0 - \ln \sigma_a) \cdot V ;$$

$$\text{Exponencial ... } \ln \sigma = \ln \sigma_0 - \alpha \cdot V ;$$

o sea, que, como dijimos, teóricamente son idénticas.

El coeficiente b en $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-b \cdot V}$ oscila de 3 a 9 y ahora $V \rightarrow V \cdot p$, siendo p la porosidad del árido, que en los ensayos es de 0,50 a 0,65, luego α puede variar de 1,5 a 6, lo que permite que la identificación $\ln \sigma_0 - \ln \sigma_a = \alpha$, o sea $\sigma_0/\sigma_a = e^\alpha$ no suponga ninguna limitación, pues σ_a puede estar comprendida entre:

$$\frac{\sigma_0}{4,5} \text{ y } \frac{\sigma_0}{400} .$$

Así, pues, contamos con una ecuación de tipo lineal y otra de tipo exponencial. A la vista de los resultados se consigue más aproximación con la primera, aunque las diferencias con la de Bache son del orden del error experimental.

Se pueden ajustar aceptablemente rectas para cada edad fija de rotura, pero el valor extrapolado σ_a no se mantiene constante para las diferentes edades, sino que va aumentando con el tiempo.

Esto significa que los hormigones con mayor porcentaje volumétrico de árido aumentan relativamente más su resistencia con el tiempo que la pasta de cemento o los que contienen menos árido, e implica la necesidad de conocer la concentración de éste para predecir la evolución de la resistencia a tracción. Este fenómeno lo hemos observado asimismo con resistencias a compresión.

La posibilidad de que este hecho no fuese intrínseco a las resistencias, sino consecuencia del ensayo, ha sido estudiada. Efectiva-

mente, si consideramos que el árido segrega o absorbe agua lo hará proporcionalmente a su concentración V ,

$$\Delta a = \gamma \cdot V ,$$

con lo cual variará la relación a/c de la pasta e influirá en su resistencia de la siguiente forma:

Según Neville (18), la resistencia es una función lineal de la relación c/a a una edad dada

$$\sigma_t = \sigma_{1t} + \beta_t \cdot \frac{a}{c} .$$

$$\text{Si } a \rightarrow a + \Delta a , \sigma_t \rightarrow \sigma_t + \Delta \sigma_t =$$

$$= \sigma_{1t} + \beta_t \cdot \frac{c}{a + \Delta a} ,$$

$$\text{luego } \Delta \sigma_t = - \frac{\beta_t \cdot c \cdot \Delta a}{a(a + \Delta a)} ,$$

y la pendiente β_t de la recta es una función decreciente del tiempo, con lo cual, si suponemos que el árido segrega agua $\Delta a > 0$, al aumentar t , $|\Delta \sigma_t|$ decrece, es decir, nos aproximamos más a la resistencia teórica y al contrario si $\Delta a < 0$.

Este mecanismo actúa, pues, en el sentido de la divergencia observada, pero al intentar ajustarlo resultan necesarios Δa del orden del 50 % del agua empleada, y esto, desde luego, no es posible.

En definitiva, la variación de la relación a/c como consecuencia del árido permite justificar la discrepancia entre la ecuación de Bache y la lineal, que es la teóricamente esperada, pero no los incrementos de σ_a mencionados.

Aparte de esta observación, en los gráficos pueden verse mayores resistencias para tamaños finos que para los gruesos del mismo árido y, por supuesto, mayor resistencia a tracción con el árido de Olot que con el de Tenerife.



CONCLUSIONES

- A cada edad de rotura las resistencias a tracción siguen aceptablemente la ecuación lineal propuesta definida por las resistencias de la pasta y del árido.
- Al aumentar la edad es mayor el aumento de resistencia cuanto mayor es el contenido de árido.
- Son mayores las resistencias para tamaños de grano menores del mismo árido.

- Los ensayos con el árido impregnado de grasa se ajustan a lo previsto con el modelo lineal y sirven de comprobación de éste.
- Como aplicación práctica de todo lo expuesto, a partir de los ensayos de hormigón con un árido ligero determinado

y de su mortero se pueden predecir las resistencias para otras dosificaciones, y estudiadas las evoluciones de un hormigón con una concentración de árido dada y de su mortero determinar las de cualquier otro hormigón que emplee otras concentraciones.

BIBLIOGRAFIA

- (1) NEVILLE, A. M.: «From discrete materials — a concrete product». *Concrete*, 5, 8, pp. 243-248, agosto 1971.
- (2) HANSEN, Torben C.: «Influence of aggregate and voids on modulus of elasticity of concrete, cement mortar and cement paste. *J. of the Amer. Conc. Inst.*, 62, 2, pp. 193-216, febrero 1965.
- (3) BACHE, H. H.: «Strength of structural lightweight aggregate concrete». Proceedings of the Symposium Rilem in Budapest, pp. 9-43, 1967.
- (4) HOFF, George C.: «Porosity-strength considerations for cellular concrete». *Cem. and Conc. Res.*, 2, 1, pp. 91-100, enero 1972.
- (5) HANSEN, Torben C.: «Cracking and fracture of concrete and cement paste». *ACI Publication SP-20*, 43, 1968.
- (6) ALEXANDRE, Vicente: «La porosidad y su influencia sobre las propiedades técnicas de los productos cerámicos». *Boletín de la Soc. Esp. de Cerám.*, 10, 2, pp. 163-191, marzo-abril 1971.
- (7) ACI Committee 213, «Guide for structural lightweight aggregate concrete», 64, 8, pp. 433-467, agosto 1967.
- (8) TOBIN, Robert E.: «Tensile strength as a function of concrete weight». *Conc. Facts.*, 16, 4, pp. 8-10.
- (9) HANNANT, D. J.: «The tensile strength of concrete a review paper». *The Struct. Eng.*, 50, 7, pp. 253-258, julio 1972.
- (10) BERTACCHI, Paolo: «Adherencia entre agregados y cemento y su influencia sobre las características de los hormigones». *Téc. de los Prf. de Horm.*, 1, pp. 46-53, mayo 1972.
- (11) OKAJIMA, T.: «Mechanical properties of particulate composites under static compression». *Cem. and Conc. Res.*, 2, 3, 299, mayo 1972.
- (12) LÓPEZ ALONSO, F.: «A discussion of the paper "Mechanical properties of particulate composites under static compression"». *Cem. and Conc. Res.*, 3, 3, pp. 325-334, mayo 1973.
- (13) A.S.T.M. C-496: *Standard method of test for splitting tensile strength of molded concrete cylinders*, part 10, pp. 366-369, octubre 1966.
- (14) A.S.T.M. C-127-68: *Standard method of test for specific gravity and absorption of coarse aggregate*, part 10, octubre 1966.
- (15) A.S.T.M. C-128-68: *Standard method of test for specific gravity and absorption of fine aggregate*, part 10, octubre 1966.
- (16) SAXER, Edwin L.: «A direct method of determining absorption and specific gravity of aggregates». *Rock Prod.*, pp. 78-79 y 87, mayo 1956.
- (17) LANDGREN, Robert: «Determining the water absorption of coarse lightweight aggregates for concrete». *Bull. of the Res. and Develop. Lab. of the P.C.A.*, 179, pp. 846-865, 1964.
- (18) NEVILLE, A. M.: *Properties of concrete*, Pitman, Londres, 1963.

résumé

Contribution à l'étude de la résistance à la traction des bétons à pierre ponce

F. López Alonso, ingénieur des Ponts et Chaussées

Ce travail a remporté la VII^e prix Luxán 1973, décerné à l'unanimité du Jury, en raison de l'originalité et de l'exposé ordonné de la théorie soutenue.

Dans ce travail, l'auteur, après avoir largement analysé les phénomènes à considérer, propose l'utilisation d'une formule linéaire définissant la résistance d'un béton léger, en fonction de sa pâte, de celle de son agrégat et de la fraction volumétrique dans laquelle celui-ci intervient. Cet apport vise à remplacer les modèles exponentiels habituels.

summary

Contribution to the study of the tensile strength in pumice concrete

F. López Alonso, Civil Engineer

This project has been awarded the VII Luxán Prize 1973 by unanimous vote of the Jury for its originality and orderly display of the theory.

After a thorough study of the problems to be considered a linear formula is being suggested that defines the strength of light concrete, in terms of its paste, its aggregate and the volumetric fraction.

This contribution is an attempt to substitute the usual exponential models.

zusammenfassung

Beitrag zum Studium der Zugfestigkeit von Bims Beton

F. López Alonso, Zivilingenieur

Diese Arbeit hat durch Einmütigkeit der Jury den VII Luxán Preis wegen ihrer Originalität und geordnete Darlegung der Theorie erhalten.

Nach einer gründlichen Prüfung der zu beachtenden Probleme schlägt man den Gebrauch einer linearen Formel, die die Festigkeit Leichtbetons definiert, vor, in Bezug auf seine Pâte, das Zuschlagmaterial und die volumetrische Fraktion.

Mit diesem Beitrag hat man es versucht, die gewöhnlichen Exponential-Modellen zu ersetzen.