

HORMIGONES LIVIANOS CON ARCILLAS EXPANDIDAS CHILENAS

Ernesto GOMEZ*

RESUMEN

Se exponen las experiencias hechas en IDIEM para estudiar las posibilidades de confeccionar hormigones livianos con áridos de arcillas expandidas de la zona de Santiago. Se describen los procedimientos de fabricación de los áridos, se presentan las propiedades de los hormigones obtenidos y se concluye que serían aptos para usos estructurales.

INTRODUCCION

Ya a comienzos de este siglo se conocían procedimientos para obtener áridos livianos por expansión de arcillas, de escorias, de vidrios volcánicos, de pizarras, etc. Sin embargo, debieron pasar algunos años para que hicieran su ingreso en la tecnología del hormigón y algunas décadas para que se asentaran en ella con creciente uso. Primero, usos en que se aprovechaba su buena aislación térmica y más tarde como áridos en hormigones estructurales, sin dejar de lado los anteriores.

Se duele dividir a los hormigones con áridos livianos en tres categorías¹ sobre la base de sus aplicaciones y funciones. Están aquellos en que el factor predominante es una buena aislación térmica: sus pesos unitarios son inferiores a 1450 kg/m^3 y sus resistencias van de 7.5 a 50 kgf/cm^2 . Hay un grupo inter-

* Investigador de IDIEM.

medio, que se utiliza cuando interesan a la vez la capacidad de carga y la aislación térmica: pesan menos de 1600 kg/m^3 y tienen resistencias entre 100 y 200 kgf/cm^2 . En aplicaciones estructurales, por último, se requieren hormigones con resistencias entre 200 y 700 kgf/cm^2 y los pesos unitarios correspondientes van de 1600 a 2000 kg/m^3 .

La clasificación anterior no es ni rigurosa ni única. En ciertas aplicaciones estructurales, por ejemplo, pueden bastar resistencias inferiores a 200 kgf/cm^2 , si así lo justifica el cálculo. En el segundo respecto, existen otras clasificaciones con límites diferentes, entre ellas la de la ACI², que considera un grupo de bajo peso, entre 400 y 800 kg/m^3 , y con resistencias por debajo de 70 kgf/cm^2 ; un segundo, de resistencia moderada, entre 70 y 175 kgf/cm^2 y hasta 1400 kg/m^3 de peso unitario y uno de hormigones estructurales, con resistencias de más de 175 kgf/cm^2 y pesos de hasta 1850 kg/m^3 .

Entre los muchos tipos de áridos livianos que ya se conocen, son aptos para hormigones estructurales los de granos duros y cuyas resistencias a la compresión sean por lo menos suficientes para alcanzar las mínimas que se le exigen al hormigón, sin tener que recurrir a contenidos excesivos de cemento. Entre ellos están los que provienen de ciertas arcillas o esquistos arcillosos que, sometidos a cocción hasta un estado pirolástico, producen gases que expanden la masa y la transforman en una estructura alveolar de paredes delgadas, que da lugar al enfriarse a un producto final de partículas livianas vitrificadas.

Este tipo de material ha tenido gran desarrollo y se fabrica en grandes cantidades en la actualidad en EUA, en Europa y en otras regiones, con diversas denominaciones comerciales, como haydita, rocklita, gravelita, keramzita, LECA, etc. En Europa se producen más de $30\,000\,000$ de metros cúbicos al año de estos áridos¹.

En Chile no se producen ni se han utilizado en construcciones áridos livianos de la clase estructural, pero sí se han hecho estudios experimentales de la aptitud de las arcillas de la zona cercana a Santiago para producirlos y de las propiedades que caracterizan a los áridos producidos y en este trabajo nos referiremos a los resultados obtenidos en IDIEM.

ARCILLAS EXPANDIBLES DE LA ZONA DE SANTIAGO

Las arcillas más abundantes de los alrededores de Santiago corresponden al grupo denominado montmorrillonita y son de sedimentación. L'Huillier y Vergara³ emprendieron en 1959 un estudio de algunos de los yacimientos de arcillas de las cercanías de Santiago con el propósito de analizar su aptitud para la fabricación de áridos livianos. Ellos estimaron que de los ocho depósitos vistos, el más importante era el de la Laguna de Batuco, situada a unos 30 km

al norte de Santiago, que tiene un espesor de más de 25 metros y una extensión de varios kilómetros cuadrados. Fue éste el único que consideraron de interés desde el punto de vista de una probable utilización industrial y lo estudiaron en forma preferente.

No es posible predecir, sin margen de duda, las propiedades de expansión de una arcilla a partir de su composición química. Hay muchos factores que influyen en el fenómeno. El más importante es la presencia de una adecuada proporción de materias extrañas que se descompongan formando gases a la misma temperatura en que la fase cerámica de la arcilla alcance el estado pirolástico. En un estudio de 81 muestras de arcilla publicado por el Bureau of Mines de EUA en 1948, sus autores J.E. Conley y otros⁴, comparando la composición media del grupo de arcillas expandidas con la de las no expandibles dejan de manifiesto que los contenidos de óxidos alcalinos, alcalino térreos y de hierro y el pH difieren significativamente entre ambos grupos, y señalan niveles de composición que, sin ser excluyentes, separan a uno de otro. La arcilla de Batuco, con 43°/o de SiO₂, 21°/o de Al₂O₃, 6.4°/o de Fe₂O₃, 4.1°/o de CaO, 3.8°/o de MgO, 3.1°/o de álcalis y pH 5.0 está situada dentro de los límites de expansibilidad. Varias de las otras arcillas analizadas están también en el mismo grupo. Para confirmar las conclusiones previas deducidas de la composición, a la arcilla de Batuco se le determinó las temperaturas de expansión y de fusión en un microscopio de punto de fusión y tomando estos datos como puntos de partida, se sometió a procesos de expansión en probetas prismáticas pequeñas en un horno eléctrico de laboratorio. Los resultados fueron satisfactorios y dejaron abierto el camino para una etapa en planta piloto, en la cual se reprodujeron condiciones muy parecidas a las de tratamientos industriales.

La arcilla se graduaba a forma aproximadamente esférica y a tamaños que cubrían la granulometría que se intentaba reproducir. Después se introducía a un horno rotatorio de 29 cm de diámetro interior, del cual se podía variar la longitud, la inclinación y el número de revoluciones. Operando con algunas de esas variables y además con la humedad de la arcilla y con los tiempos y temperaturas máximas de calentamiento, se establecieron las condiciones más favorables para la expansión.

Morandé y Larraín⁵, en 1970, hicieron trabajos muy semejantes a los anteriores con respecto a otras arcillas de los alrededores de Santiago, entre las cuales estaba incluida la de Batuco, y encontraron en los estudios previos, hechos en horno eléctrico de laboratorio con calentamiento rápido, que tenían condiciones de expansión natural las de Macul, Chena, Batuco y Peldehue, en un rango de temperaturas entre 1100°C y 1200°C. Sólo las tres últimas fueron consideradas para tratamiento en planta piloto.

La arcilla de Peldehue es la que dio mejores resultados en horno rotatorio, ya que expandió naturalmente, sin necesidad de aditivo, a 1100°C, produciendo un material de peso específico 0.8. Se eligieron condiciones de fabricación para

medio, que se utiliza cuando interesan a la vez la capacidad de carga y la aislación térmica: pesan menos de 1600 kg/m^3 y tienen resistencias entre 100 y 200 kgf/cm^2 . En aplicaciones estructurales, por último, se requieren hormigones con resistencias entre 200 y 700 kgf/cm^2 y los pesos unitarios correspondientes van de 1600 a 2000 kg/m^3 .

La clasificación anterior no es ni rigurosa ni única. En ciertas aplicaciones estructurales, por ejemplo, pueden bastar resistencias inferiores a 200 kgf/cm^2 , si así lo justifica el cálculo. En el segundo respecto, existen otras clasificaciones con límites diferentes, entre ellas la de la ACI², que considera un grupo de bajo peso, entre 400 y 800 kg/m^3 , y con resistencias por debajo de 70 kgf/cm^2 ; un segundo, de resistencia moderada, entre 70 y 175 kgf/cm^2 y hasta 1400 kg/m^3 de peso unitario y uno de hormigones estructurales, con resistencias de más de 175 kgf/cm^2 y pesos de hasta 1850 kg/m^3 .

Entre los muchos tipos de áridos livianos que ya se conocen, son aptos para hormigones estructurales los de granos duros y cuyas resistencias a la compresión sean por lo menos suficientes para alcanzar las mínimas que se le exigen al hormigón, sin tener que recurrir a contenidos excesivos de cemento. Entre ellos están los que provienen de ciertas arcillas o esquistos arcillosos que, sometidos a cocción hasta un estado pirolástico, producen gases que expanden la masa y la transforman en una estructura alveolar de paredes delgadas, que da lugar al enfriarse a un producto final de partículas livianas vitrificadas.

Este tipo de material ha tenido gran desarrollo y se fabrica en grandes cantidades en la actualidad en EUA, en Europa y en otras regiones, con diversas denominaciones comerciales, como haydita, rocklita, gravelita, keramzita, LECA, etc. En europa se producen mas de $30\ 000\ 000$ de metros cúbicos al año de estos áridos¹.

En Chile no se producen ni se han utilizado en construcciones áridos livianos de la clase estructural, pero sí se han hecho estudios experimentales de la aptitud de las arcillas de la zona cercana a Santiago para producirlos y de las propiedades que caracterizan a los áridos producidos y en este trabajo nos referiremos a los resultados obtenidos en IDIEM.

ARCILLAS EXPANDIBLES DE LA ZONA DE SANTIAGO

Las arcillas más abundantes de los alrededores de Santiago corresponden al grupo denominado montmorrillonita y son de sedimentación. L'Huillier y Vergara³ emprendieron en 1959 un estudio de algunos de los yacimientos de arcillas de las cercanías de Santiago con el propósito de analizar su aptitud para la fabricación de áridos livianos. Ellos estimaron que de los ocho depósitos vistos, el más importante era el de la Laguna de Batuco, situada a unos 30 km

al norte de Santiago, que tiene un espesor de más de 25 metros y una extensión de varios kilómetros cuadrados. Fue éste el único que consideraron de interés desde el punto de vista de una probable utilización industrial y lo estudiaron en forma preferente.

No es posible predecir, sin margen de duda, las propiedades de expansión de una arcilla a partir de su composición química. Hay muchos factores que influyen en el fenómeno. El más importante es la presencia de una adecuada proporción de materias *extrañas* que se descompongan formando gases a la misma temperatura en que la fase cerámica de la arcilla alcance el estado pirolástico. En un estudio de 81 muestras de arcilla publicado por el Bureau of Mines de EUA en 1948, sus autores J.E. Conley y otros⁴, comparando la composición media del grupo de arcillas expandidas con la de las no expandibles dejan de manifiesto que los contenidos de óxidos alcalinos, alcalino térreos y de hierro y el pH difieren significativamente entre ambos grupos, y señalan niveles de composición que, sin ser excluyentes, separan a uno de otro. La arcilla de Batuco, con 43°/o de SiO₂, 21°/o de Al₂O₃, 6.4°/o de Fe₂O₃, 4.1°/o de CaO, 3.8°/o de MgO, 3.1°/o de álcalis y pH 5.0 está situada dentro de los límites de expansibilidad. Varias de las otras arcillas analizadas están también en el mismo grupo. Para confirmar las conclusiones previas deducidas de la composición, a la arcilla de Batuco se le determinó las temperaturas de expansión y de fusión en un microscopio de punto de fusión y tomando estos datos como puntos de partida, se sometió a procesos de expansión en probetas prismáticas pequeñas en un horno eléctrico de laboratorio. Los resultados fueron satisfactorios y dejaron abierto el camino para una etapa en planta piloto, en la cual se reprodujeron condiciones muy parecidas a las de tratamientos industriales.

La arcilla se graduaba a forma aproximadamente esférica y a tamaños que cubrían la granulometría que se intentaba reproducir. Después se introducía a un horno rotatorio de 29 cm de diámetro interior, del cual se podía variar la longitud, la inclinación y el número de revoluciones. Operando con algunas de esas variables y además con la humedad de la arcilla y con los tiempos y temperaturas máximas de calentamiento, se establecieron las condiciones más favorables para la expansión.

Morandé y Larraín⁵, en 1970, hicieron trabajos muy semejantes a los anteriores con respecto a otras arcillas de los alrededores de Santiago, entre las cuales estaba incluida la de Batuco, y encontraron en los estudios previos, hechos en horno eléctrico de laboratorio con calentamiento rápido, que tenían condiciones de expansión natural las de Macul, Chena, Batuco y Peldehue, en un rango de temperaturas entre 1100°C y 1200°C. Sólo las tres últimas fueron consideradas para tratamiento en planta piloto.

La arcilla de Peldehue es la que dio mejores resultados en horno rotatorio, ya que expandió naturalmente, sin necesidad de aditivo, a 1100°C, produciendo un material de peso específico 0.8. Se eligieron condiciones de fabricación para

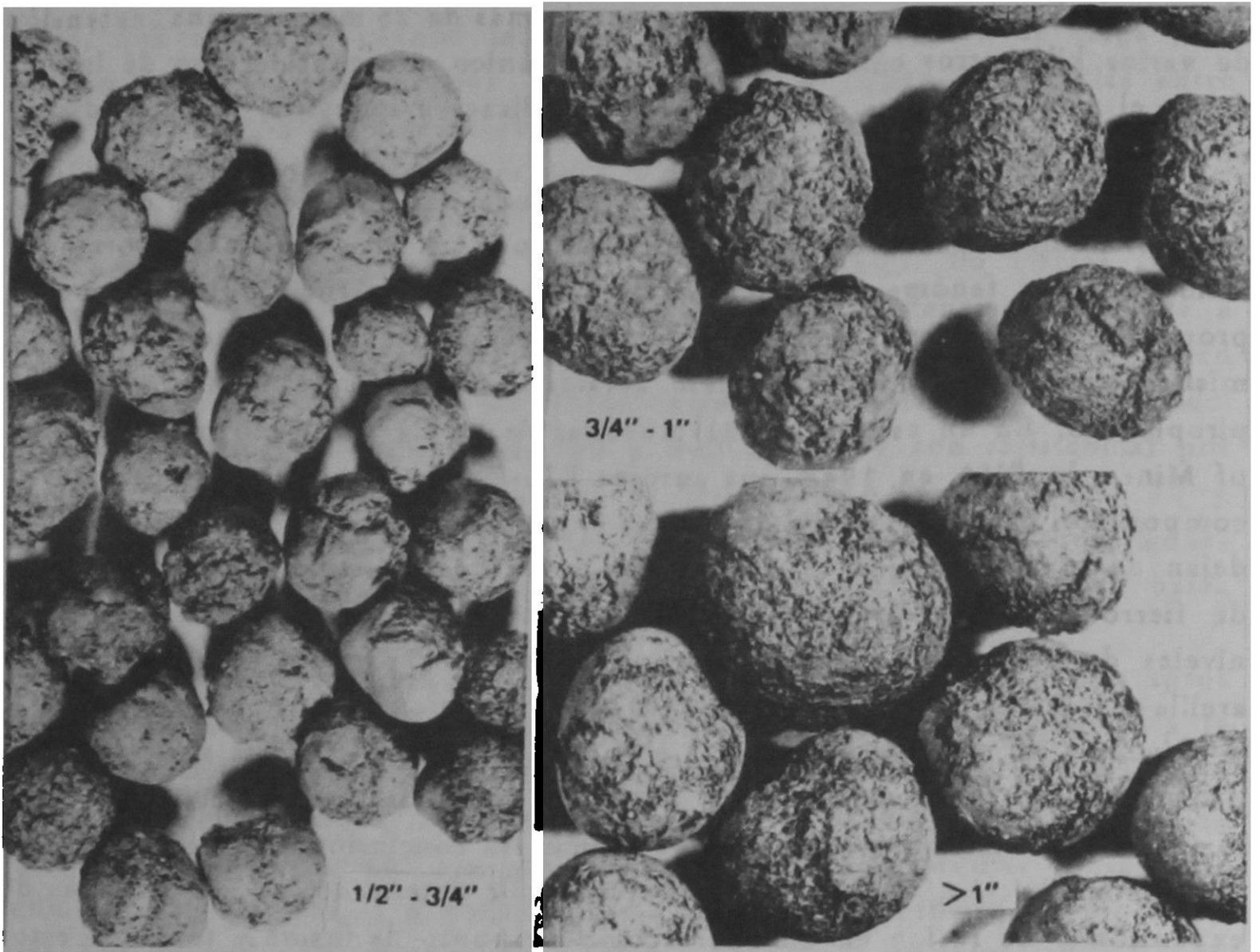


Fig. 1. Forma de los gramos de áridos livianos.

obtener partículas redondeadas, como se ve en Fig. 1 y con poros pequeños uniformemente repartidos y una envoltura vitrificada. La Fig. 2 muestra que efectiva-

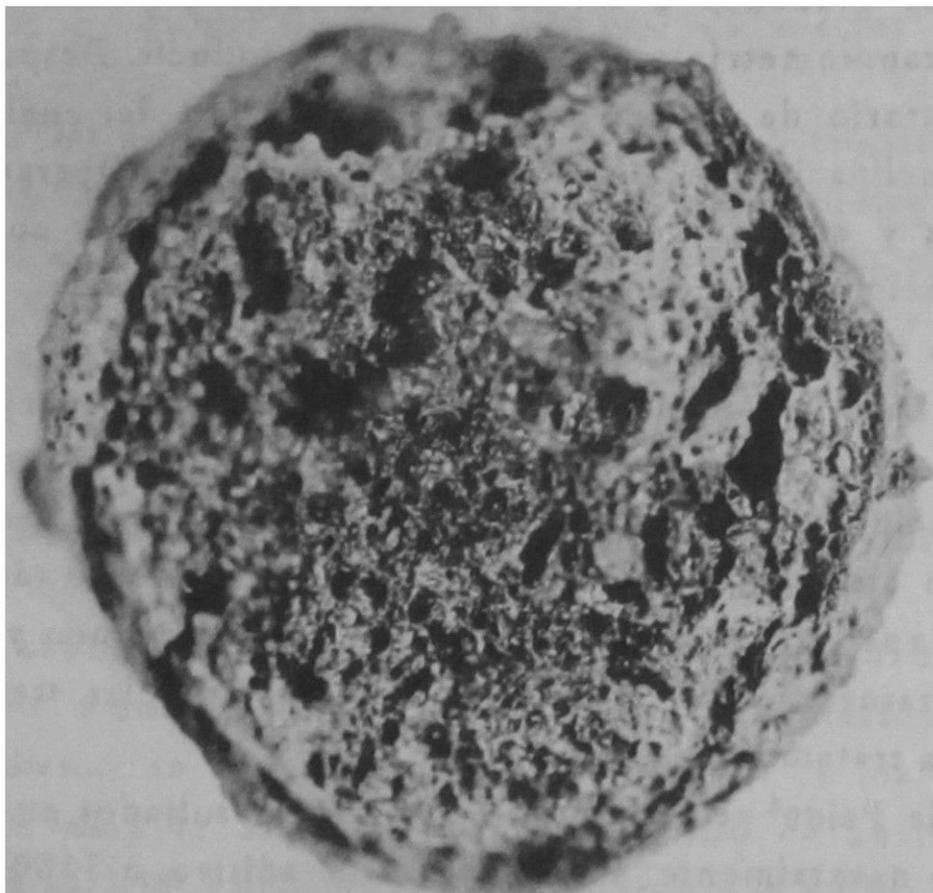


Fig. 2. Vista interior de un grano de arcilla expandida.

mente se logró la película exterior vitrificada, pero la porosidad no fue tan uniforme como se pretendía.

La arcilla de Batuco expandió bastante bien, adicionándole melaza, a 1150°C , mientras que para expandir sin aditivos requiere más de 1200°C .

El conjunto de los resultados comentados anteriormente dejó en claro que la arcilla de Peldehue era una fuente potencial de producción de áridos livianos a partir de arcillas expandibles y el resto de los estudios experimentales tuvieron por objeto determinar las propiedades de hormigones fabricados con estos áridos.

PROPIEDADES DE LOS HORMIGONES LIVIANOS HECHOS EN IDIEM

Generalidades

Se han realizado muchos estudios experimentales sobre las propiedades de los hormigones confeccionados con áridos de arcilla expandida. Hay documentación profusa sobre el tema^{1,2,6,7}.

Se puede afirmar que tanto las experiencias como las aplicaciones prácticas han señalado que el comportamiento de estos hormigones no difiere en ningún aspecto sustancial del de los hormigones de áridos normales. Hay sólo diferencias cuantitativas que en algunos casos están en favor de éstos y en otros de aquéllos. Es bueno revisar comparativamente las propiedades de uno y otro y para hacerlo nos servirá de guía El manual del hormigón con áridos livianos¹ de CEB-FIP, que presenta una excelente visión de conjunto, actualizada a la fecha de su publicación, de la información y de los criterios que priman sobre este material.

Hay que referirse en primer lugar a la resistencia a la compresión, que se considera generalmente como el índice característico de la calidad del hormigón. Está claramente establecido que los hormigones de áridos livianos tienen un tope de resistencia a la compresión que está determinado por la resistencia del árido, debido a que ésta es inferior a la resistencia de la pasta de cemento. Ese tope depende en forma aproximadamente lineal de la densidad de las partículas y por eso es que, como lo hicimos ver en la introducción, cuanto mayores son las resistencias requeridas en los hormigones mayor densidad deben tener los áridos. El caso es distinto con respecto a los áridos de densidad normal, pues éstos tienen resistencia a la compresión mayor que la pasta, aun para pasta de muy baja razón agua cemento y de ahí resulta que el tope de resistencia de los hormigones normales depende de la calidad de la pasta y no de los áridos. El cálculo de las dosificaciones de hormigones con áridos livianos debe tener en cuenta esta diferencia con los áridos normales.

Se ha establecido también que la densidad de las partículas de estos áridos depende del tamaño de ellas: son más livianas cuanto más grande y paralelamente sus resistencias a la compresión son menores. Este hecho hace necesario limitar el tamaño máximo de los áridos livianos cuando se requiere resistencias elevadas.

Es natural suponer que la deformabilidad de estos áridos livianos también va a parejas con la densidad y esto se ha comprobado en mediciones directas del módulo de elasticidad de las partículas por el método dinámico. Se ha encontrado que el módulo aumenta en proporción al cuadrado de la densidad¹. Como consecuencia de lo expuesto anteriormente, los hormigones confeccionados con estos áridos tienen, a igual resistencia a la compresión, módulos de elasticidad más pequeños que los hormigones normales, en general del orden de la mitad. Son por lo tanto más deformables. Particularmente en flexión, a igualdad de los demás factores que intervienen, se producen flechas más grandes, aunque, como veremos más adelante, el aumento de la deformación es menor que el que se pudiera deducir de la disminución del módulo.

La resistencia a la tracción del hormigón se considera de poca importancia y se desprecia su colaboración en la resistencia a la flexión de las vigas, sin embargo en lo que respecta al corte se acepta que la capacidad resistente está determinada por ella, ya que las llamadas fallas por corte son, en realidad, fallas por tracción diagonal. Este criterio que ya fue enunciado en 1899, en los comienzos del hormigón armado⁸, y que posteriormente fue dejado un poco de lado, ha sido claramente verificado por la evidencia experimental. En él se basan la mayor parte de las proporciones para el cálculo y comprobación al corte de vigas de hormigón armado de la norma ACI-318-77⁹.

Esta norma hace distinción entre los hormigones normales y los de áridos livianos. Mientras que a los primeros les reconoce una resistencia a la tracción en función de su resistencia a la compresión, de los segundos exige determinar experimentalmente esta resistencia con ensayos de hendimiento y a falta de ellos acepta sólo el 0.75 de la calculada para hormigones corrientes de igual resistencia a la compresión. Experiencias europeas señalan que la resistencia a la tracción por hendimiento de hormigones livianos muestra mayor dispersión y puede ser, con algunos áridos livianos, hasta un 30% inferior a la de los hormigones normales.

La resistencia a la tracción es también determinante en los fenómenos de adherencia, anclaje y fisuración y por esto, además de lo expuesto anteriormente, es importante determinar esta resistencia para cada árido en particular.

Con respecto a la adherencia se debe esperar deslizamientos mayores para iguales cargas en hormigones livianos, como consecuencia de que la resistencia a la tracción es menor. Hay varias experiencias que confirman esta afirmación, pero también hay resultados opuestos. Las diferencias que se han encontrado son más netas en barras con resaltes que en barras lisas.

La fluencia lenta (creep) tiene importancia en el hormigón, porque el peso propio, que es la carga permanente más importante, es una fracción considerable de la carga total de servicio. El hormigón liviano no se diferencia significativamente, en este respecto, del hormigón normal¹, especialmente para contenidos altos de cemento⁶, pero lo aventaja por el hecho de que reduce el peso propio. Tampoco se señalan diferencias importantes entre ambos en

contracción por secado y por hidratación^{1,6} (shrinkage) que también disminuye a mayores contenidos de cemento⁶.

Por último, hay que señalar que los hormigones livianos conducen menos el calor que los normales y por ello proporcionan mejor aislación térmica, dan también mejor protección contra el fuego.

Para los áridos livianos elaborados en IDIEM con carácter experimental se determinaron algunas de las características mencionadas anteriormente y en el capítulo que sigue se presentan los resultados obtenidos.

Ensayos hechos en IDIEM

Los hormigones con áridos livianos de arcilla expandida preparados en IDIEM en diversas oportunidades^{3,10,11}, tuvieron características diferentes; los ensayos realizados no fueron los mismos en todas las oportunidades, pero algunos de ellos, los más importantes, fueron comunes. Esto hace que sean comparables y se puedan analizar en conjunto.

En la Tabla I aparecen tanto las características de los hormigones confeccionados como los resultados de las determinaciones de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción directa, resistencia a la tracción por hendimiento, módulo de elasticidad por compresión, adherencia de barras de acero y conductividad térmica, según corresponde a cada caso.

TABLA I

RESULTADOS OBTENIDOS EN ENSAYOS DE HORMIGONES LIVIANOS

Densidad kg/m ³	Dosis cemento kg/cm ³	Resistencia compresión kgf/cm ²	E_{sec} para $\sigma = 1/3 R$ kgf/cm ²	Resistencia tracción kgf/cm ²	Resistencia hendimiento kgf/cm ²	Adherencia máxima kgf/cm ²	Conductividad Wm ⁻¹ K
950	182	38	39.000				0.22
1060	242	61	39.700				
1100	268	81	57.000				0.21
1190	333	104	57.000				
1230	352	124	78.000				0.22
1290	407	142	80.000				
1730	450	237	128.000	19		80	
1780	340	238	129.000		27		

Según se ve en la Tabla I, L'Huillier y Vergara³, a quienes corresponden los primeros seis resultados, que usaron exclusivamente áridos livianos de arcilla expandida de Batuco tanto en la fracción gruesa como en la fina, obtuvieron densidades en el rango de 900 de 1300 kg/m³; por su parte, Correa y Lecaros¹⁰ y Richard¹¹ usaron la fracción gruesa de áridos livianos de arcilla de Peldehue y finos de arena corriente y sus hormigones tuvieron densidades de 1700 a 1800 kg/m³.

También fueron diferentes los contenidos de cemento por metro cúbico

de hormigón, pero todos trabajaron con consistencias semejantes.

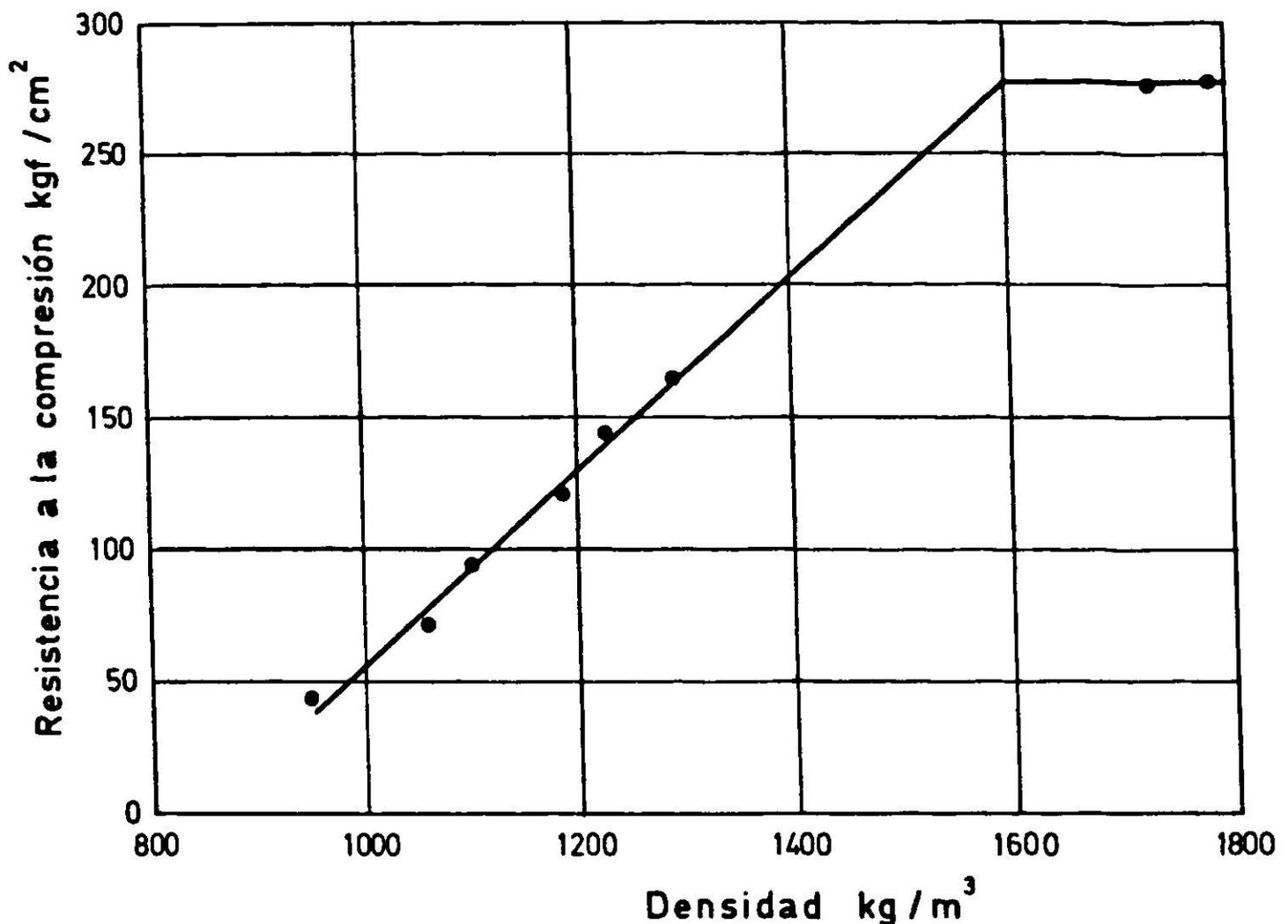


Fig. 3. Relación entre la resistencia a la compresión y la densidad del hormigón liviano.

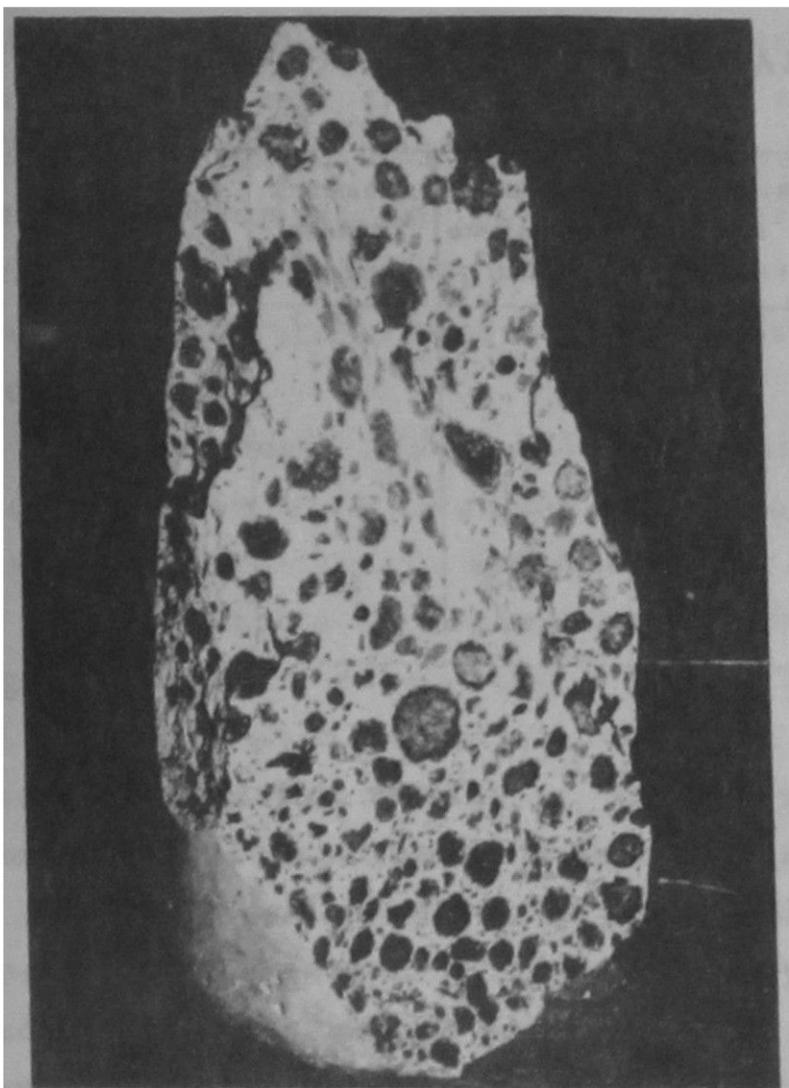


Fig. 4. Zona de rotura de una probeta cilíndrica sometida a compresión.

En la Fig. 3 se representan los resultados de compresión en función de las densidades del hormigón.

En ella se observa que, tal como se podía prever, hay primero un crecimiento lineal de la resistencia con la densidad del hormigón, el que corresponde a dosis crecientes de cemento, o sea, a mejoramiento de la calidad de la pasta, que es la que controla la resistencia en esa etapa. Después la resistencia permanece constante en un valor límite, marcado por la línea horizontal de la figura. El aspecto de la rotura de las probetas en esa última etapa muestra que ella se produce a través de los granos del árido liviano, Fig. 4. Por eso es que la resistencia del hormigón tiene un tope, que es el de la rotura por compresión de los áridos.

Resulta, entonces, que con estos áridos livianos de Peldehue, combinados con arena corriente como finos, se pueden alcanzar resistencias cúbicas a la compresión del orden de 300 kgf/cm² a 28 días. En fabricación industrial del árido con procedimientos perfeccionados, se podría esperar un límite algo más alto, comparable al que se logra en Europa, p. ej.

Módulo de elasticidad

En todos los casos se determinó el módulo de elasticidad secante entre el origen y un tercio de la tensión de rotura.

Los resultados de L'Huillier y Vergara corresponden claramente a hormigones no estructurales, tanto según la clasificación ACI como según la del manual CEB/FIP, y no tiene mayor interés analizarlos. Los otros quedan dentro del campo de los hormigones estructurales y los compararemos con resultados obtenidos en otros países con hormigones livianos de arcilla expandida.

En la Fig. 5, tomada del Manual CEB/FIP, se han colocado todos los

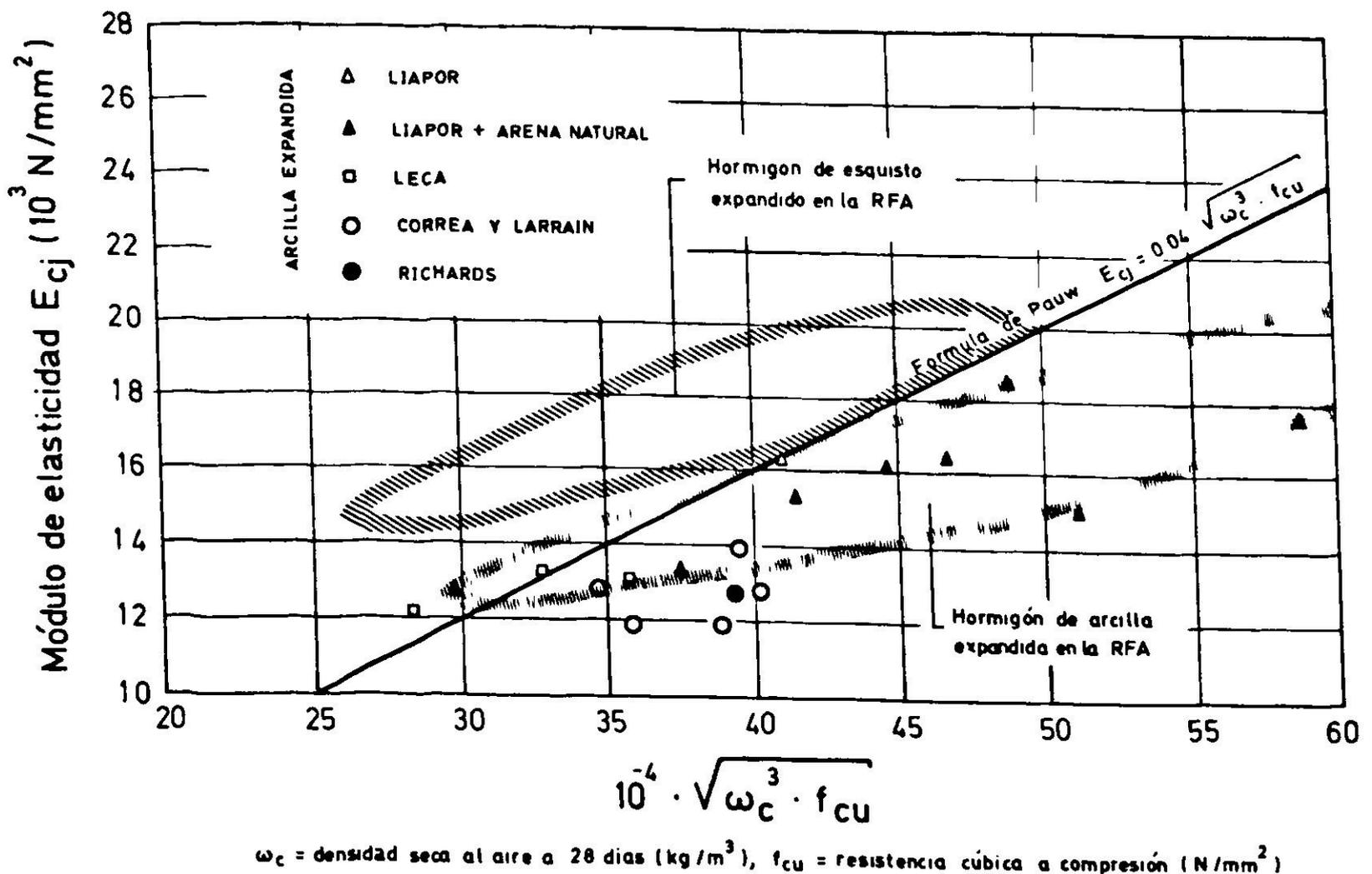


Fig. 5. Módulo de elasticidad del hormigón liviano en relación con su densidad y su resistencia a la compresión

resultados individuales de Correa y Lecaros y de Richards, de los cuales en la Tabla I aparecen sólo los términos medios, contra un campo de resultados de la República Federal Alemana para la misma naturaleza de áridos. Se ve que nuestros valores están muy cerca, pero por debajo del límite inferior de los valores alemanes. Hay que atribuir esta falta a una estructura alveolar deficiente que está de manifiesto en la Fig. 2 y que es perfectible con mejores procedimientos de fabricación.

En todo caso, los valores de E para estos hormigones son inferiores a los de hormigones corrientes de igual resistencia. Richards, que hizo una serie comparativa de hormigones corrientes de resistencias semejantes pero un poco mayores, obtuvo una relación 0.6 entre módulos. Si la fórmula de Pauw, que aparece representada en la línea recta de la Fig. 5, fuera válida, la relación sería 0.67.

Resistencia a la tracción y adherencia

El ensayo de hendimiento, conocido como ensayo brasileño, es el que más se usa actualmente como índice de la resistencia a la tracción del hormigón.

Richards hizo ensayos de hendimiento con todas sus mezclas. Obtuvo como término medio de once hormigones 27 kgf/cm^2 para una media a compresión cúbica de 260 kgf/cm^2 .

En la Fig. 6 se han colocado los valores individuales obtenidos por Richards

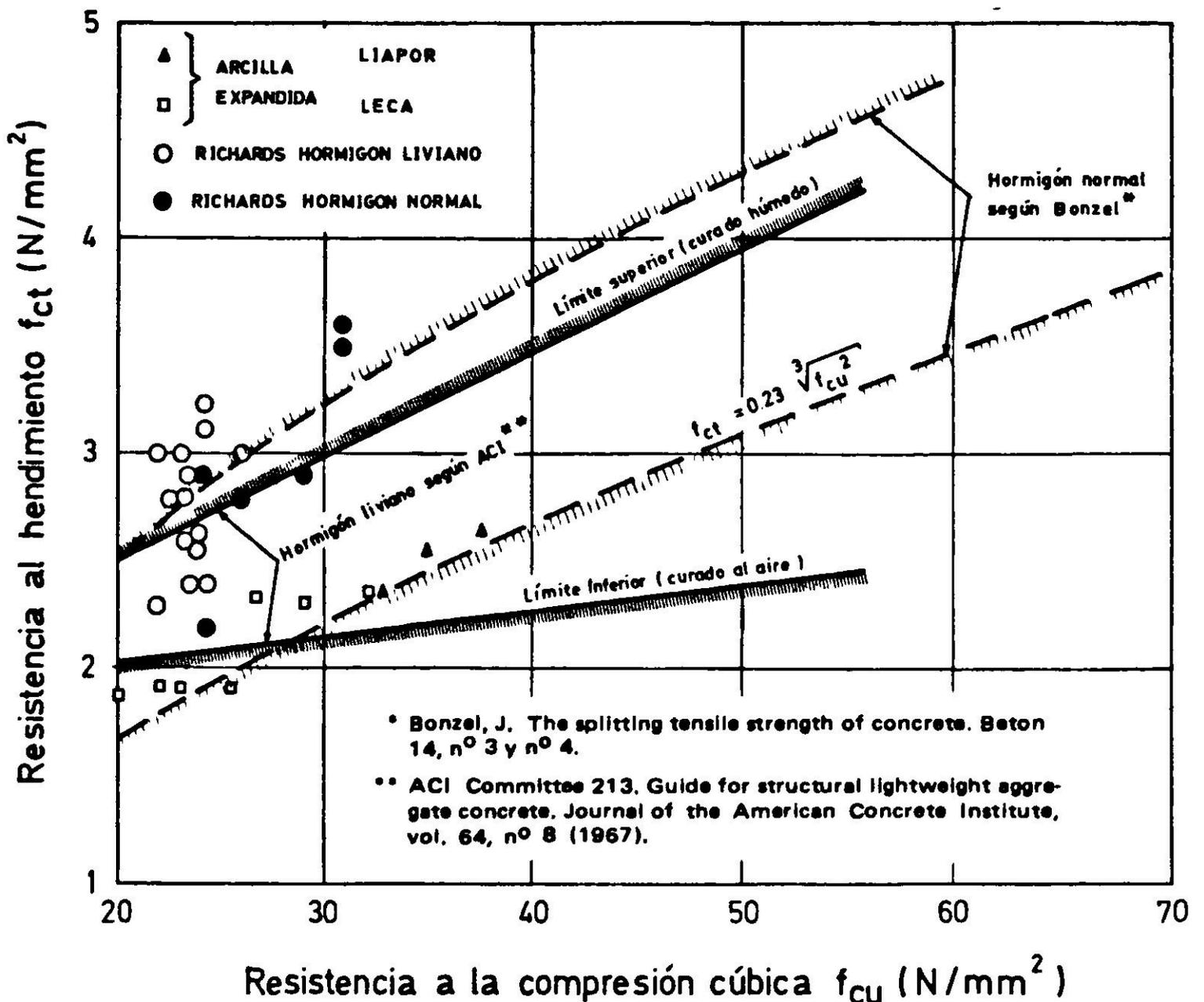


Fig. 6. Resistencia al hendimiento del hormigón liviano en relación con su resistencia a la compresión.

y se han dibujado también las líneas límites de resistencia al hendimiento y el límite superior de hormigones normales, según ACI². Se observa que los áridos de arcilla expandida de Peldehue dan lugar a resistencias a la tracción bien dentro del rango y con tendencia al límite superior.

Los valores de adherencia se obtuvieron por arrancamiento de barras de acero con resaltes de 18 mm en cilindros de hormigón de 15 cm de altura. Si bien este ensayo no es totalmente significativo, sirve como base de comparación y se pueden calificar de buenos los resultados obtenidos, frente a los de hormigones corrientes. El valor medio alcanzado, 80 kgf/cm², es alto y está en concordancia con la buena resistencia a la tracción de estos hormigones.

Resistencia al corte

Las experiencias de Richards¹¹ tenían por objeto estudiar la resistencia al corte, o a tracción diagonal, de vigas hechas con hormigón liviano de arcilla expandida de Peldehue, para compararla con las de hormigón normal de resistencias a la compresión semejantes y ver hasta qué punto eran aplicables las recomendaciones ACI⁹ sobre cálculo y comprobación al corte de vigas de hormigón liviano.

Puesto que la sollicitación por corte es determinante en las vigas llamadas cortas, o vigas altas, sin armadura transversal, en que la razón a/d , entre la distancia de la carga al apoyo más cercano y la altura efectiva de la viga es menor que 6, las vigas se confeccionaron con razón a/d de 1.48, 2.96 y 4.4; con dos cuantías diferentes las de hormigón liviano y la cuantía más alta de las dos, las comparativas de hormigón normal y sin armadura transversal.

En la Tabla II se anotan algunas de las características significativas de las vigas.

TABLA II
CARACTERISTICAS DE LAS VIGAS ENSAYADAS A FLEXION

Hormigón	Luz, cm	a/d	p, %	Nº de vigas
Liviano	130	1.48	1.12	3
Liviano	210	2.96	1.12	2
Liviano	290	4.44	1.12	2
Liviano	130	1.48	2.51	3
Liviano	210	2.96	2.51	2
Liviano	290	4.44	2.51	2
Normal	130	1.48	2.51	2
Normal	210	2.96	2.51	2
Normal	290	4.44	2.51	2

Las vigas eran de 30 cm de altura total y 27 cm efectiva, y de 20 cm de ancho. El hormigón liviano era de 238 kgf/cm² de resistencia cilíndrica a la compresión con desviación estándar de 24 kgf/cm² (en 24 probetas) y resistencia al hendimiento de 27 kgf/cm² con desviación de 3.6 kg/cm². Por su parte, el hormigón normal era de 278 kgf/cm² de resistencia a la compresión con desviación de 32 kgf/cm² (en 11 probetas) y resistencia al hendimiento de 29.6 kgf/cm² con desviación de 5.42 kgf/cm².

Las vigas se sometieron a flexión con carga al tercio de la luz entre apoyos y se midieron flechas al centro y a plomo de cada carga y deformaciones unitarias en el hormigón, en la fibra extrema de compresión, y en el acero. Los resultados más relevantes obtenidos se resumen en la Tabla III.

TABLA III
RESULTADOS DE ENSAYOS DE FLEXION

Vigas	a/d	p, %	⁽¹⁾ f_c , kgf/cm ²	⁽²⁾ f_h , kgf/cm ²	⁽³⁾ P_u , kgf	⁽⁴⁾ P_f , kgf
HL 5- 9-13	1.48	1.12	249	27	4920	10100
HL 6 3	2.96	1.12	231	29	3380	4100
HL: 1- 2	4.44	1.12	237	29	3000	3750
HL: 4-10-14	1.48	2.51	249	27	5650	14100
HL: 8-11	2.96	2.51	230	24	3880	5400
HL: 7-12	4.44	2.51	237	27	3500	4000
HN: 3- 4	1.48	2.51	302	32	8120	14500
HN: 2- 5	2.96	2.51	254	29	4750	5250
HN: 1- 6	4.44	2.51	278	28	4890	5500

- (1) f_c resistencia a la compresión
 (2) f_h resistencia al hendimiento
 (3) P_u carga a que se observó la 1ª grieta diagonal
 (4) P_f carga final, o de rotura

Si se representan los resultados de la Tabla III según el criterio de ACI⁹, en función de $P_u/(bd\sqrt{f_c})$ en ordenadas y $pP_u d/(M_u\sqrt{f_c})$ en abscisas, como se ha hecho en la Fig. 7, se observa, aparte de una gran dispersión, que los puntos correspondientes a las vigas de hormigón liviano quedan por debajo de los de hormigón normal. La tendencia general es la misma en ambos casos: superación holgada de la resistencia supuesta por el criterio ACI (indicada en línea continua en la Fig. 7) en las vigas más cortas y diferencias bastante menores en las vigas más largas. Comparando las sumas de todos los valores de igual cuantía, se ve que las vigas de hormigón liviano alcanzaron un 75% de las de hormigón normal.

La carga a la primera grieta puede ser un índice de comparación inseguro por la dificultad de apreciar exactamente cuándo se produce aquélla. La carga de rotura está, en cambio, claramente definida y la suma de valores de las vigas de hormigón liviano alcanzaron un 90% de las de hormigón normal a la rotura.

De estos resultados se puede concluir que las vigas de áridos livianos obtenidos por expansión de las arcillas de Peldehue se comportan en sollicitaciones de corte en la forma que es característica y muy conocida para este tipo de árido. El aspecto más importante es que, a igualdad de resistencia a la compresión, la resistencia al corte de las vigas livianas es claramente inferior a las de

hormigón normal, aunque la resistencia al hendimiento no lo sea tanto.

Si se acepta como criterio de rotura la aparición de la primera grieta diagonal, a pesar del margen de incertidumbre en su detección, la resistencia de estas vigas estuvo por debajo del 85% de la de vigas normales; es decir, fue inferior al nivel que ACI fija para las vigas livianas. Creemos que perfeccionando la fabricación del árido, se podría cumplir el nivel ACI con relativa holgura.

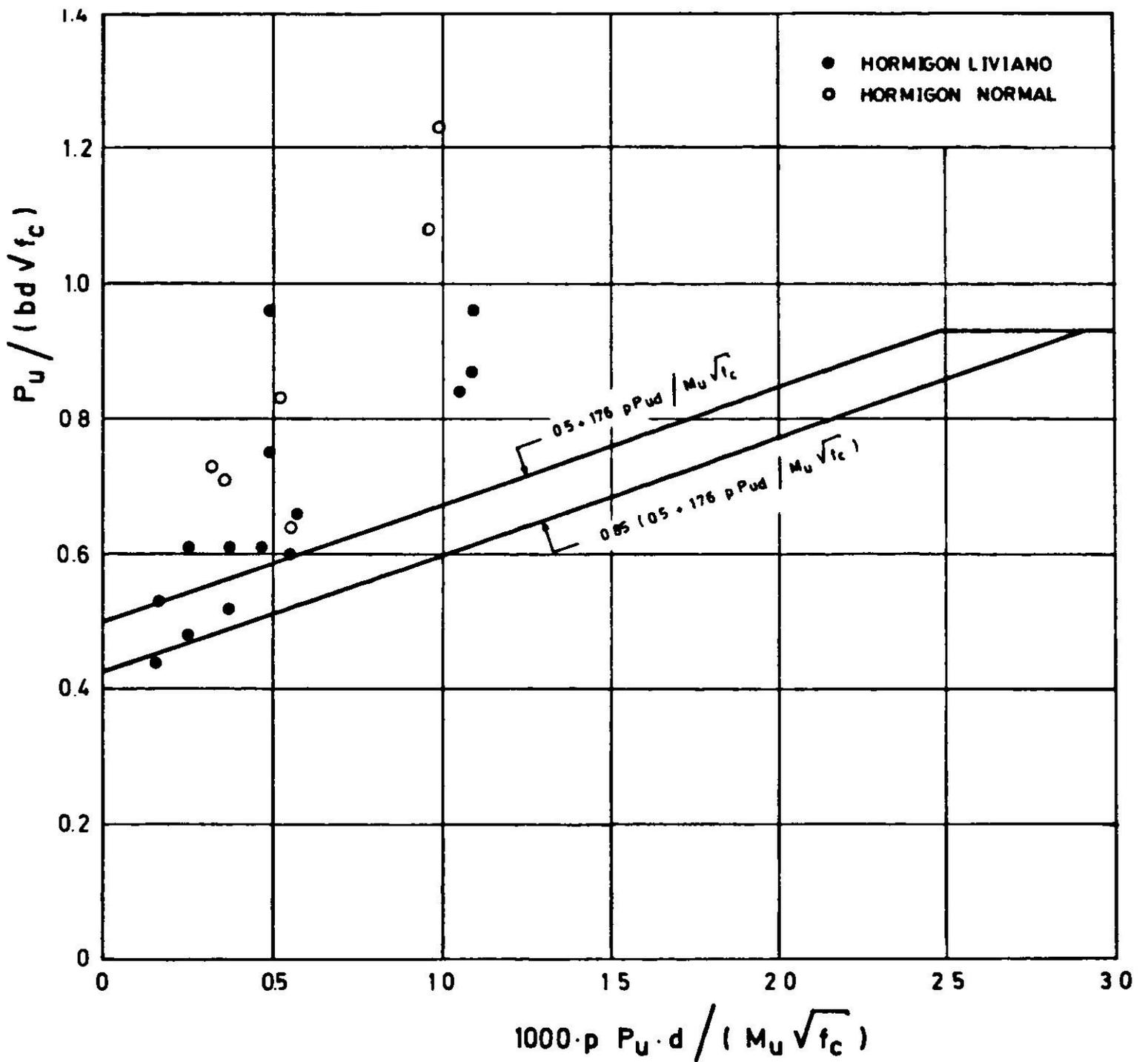


Fig. 7. Resistencia al corte por flexión de vigas de hormigón liviano representada según ACI⁹.

Flechas

En la Fig. 8 se presentan las flechas al centro en función de las cargas. En ella se ve que las vigas de hormigón liviano son más deformables que las de hormigón normal, y esto es consecuencia natural de que el módulo de elasticidad de aquél es más pequeño. Ya hemos anotado que la relación entre módulo en las experiencias de Richards fue de 0.56 y si las flechas fuesen proporcionales a los inversos de los módulos, como se pudiera pensar en un primer análisis, entre ellos habría una relación de 1.79:1. Los valores experimentales están,

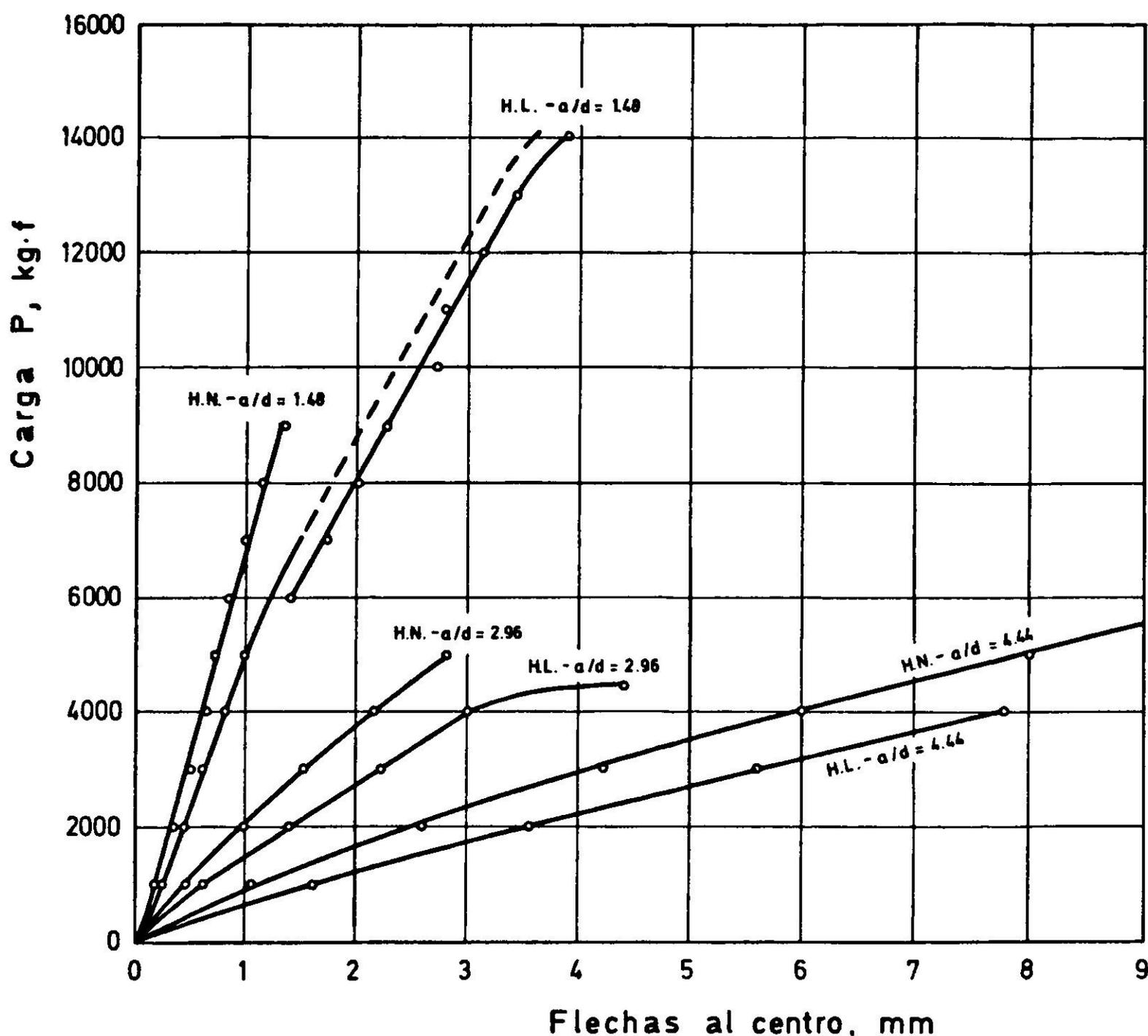


Fig. 8. Flechas al centro de las vigas de hormigón liviano en función de las cargas.

sin embargo, en las relaciones 1.59:1 para $a/d = 1.48$; 1.45:1 para $a/d = 2.96$, y 1.31:1 para $a/d = 4.44$.

Un análisis teórico del problema, en que se toma en cuenta que, a igualdad de momento flector, simultáneamente con el aumento de deformación unitaria del hormigón se incrementa la profundidad de la fibra neutra, lleva a la conclusión de que el aumento de la flecha por flexión pura es más bien proporcional a la raíz cuadrada de la relación inversa entre módulos. Si además se considera la contribución del esfuerzo de corte en las flechas se encuentra que para los casos presentes la relación entre flechas debe ser 1.52:1 para $a/d = 1.48$; 1.38:1 para $a/d = 2.96$, y 1.32:1 para $a/d = 1.44$; relaciones que son muy semejantes a las experimentales.

Los resultados comentados confirman el hecho conocido de que las vigas de hormigón liviano son más deformables que las de hormigón de densidad

normal. Sin embargo, el aumento en las flechas no es tan grande como el que se deduce de la relación entre los módulos de elasticidad de ambos hormigones. En el caso de flexión pura el aumento queda mejor representado por la raíz cuadrada de la relación inversa entre módulos y en vigas cortas, con influencia importante del corte, se acerca a la relación inversa simple. En ambos influyen también la cuantía y las características de las vigas.



CONCLUSIONES

Esta publicación es una recopilación de los trabajos experimentales realizados en IDIEM en diversas oportunidades, los cuales han sido la fuente de origen de las informaciones, datos y resultados presentados. Aunque entre estos distintos trabajos hay algunas diferencias de criterios y de procedimientos de ensayos, la orientación general de ellos es bastante coincidente y aun hay una continuidad de objetivos que los enlaza. Por estas razones se analizaron en conjunto como una unidad y se extrajeron algunas conclusiones que pueden servir de base para evaluar la posibilidad de uso de áridos livianos, desde el punto de vista de sus propiedades, como material para hormigón estructural.

Se puede afirmar que las arcillas de los alrededores de Santiago, y en especial la de la zona de Peldehue, y con gran probabilidad las de Batuco, Macul y Chena podrían usarse para la fabricación de áridos livianos expandidos con características variables según el procedimiento de fabricación. De todas ellas sólo la primera se sometió a un estudio de las propiedades principales.

La arcilla de Peldehue sometida a un proceso en un horno rotatorio en planta piloto dio lugar a áridos apropiados para la obtención de hormigones estructurales. Se piensa que con un proceso más perfeccionado, con mejor control de temperatura y tiempos de expansión y de enfriamiento, puede mejorarse el tamaño y distribución de los poros internos de los gramos y alcanzar las superiores exigencias de los hormigones de alta resistencia.

Los hormigones que se prepararon con estos áridos no difieren en ningún aspecto sustancial de los hormigones normales, en consecuencia el cálculo de estructuras de hormigón liviano puede hacerse basándose en las mismas hipótesis y directrices que sirven de base para el cálculo de hormigón normal.

Las diferencias están en los valores cuantitativos de las propiedades y éstas sí que tienen que tomarse en cuenta en los cálculos.

Los hormigones de áridos livianos tienen un módulo de elasticidad menor que los hormigones normales de igual resistencia a la compresión y esto los hace más deformables, tanto en compresión como en flexión. Su resistencia al esfuerzo de corte también es menor y ello requiere tomar las providencias correspondientes en los cálculos respectivos.

BIBLIOGRAFIA

1. CEB-FIP. *Manual of lightweight aggregate concrete*. Boletín de información N° 121 (octubre 1977), 169, pp.
2. ACI Committee 213. Guide for structural lightweight aggregate concrete. *Concrete International: Design & Construction*, vol. 1, n° 2 (febrero), pp. 33-62.
3. L'HUILLIER, G. y VERGARA, R. *Estudio experimental de hormigones livianos a base de arcilla expandida*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago 1959, 196 pp.
4. CONLEY, J.E., WILSON, H. y KUNEFELTER, T.A. *Production of lightweight aggregates from slags, shales, slates and other materials*, R.I. 4401 Bureau of Mines, 1948, 121. pp.
5. MORANDE, A. y LARRAIN, A. *Caracterización de agregados livianos en base a arcillas expandidas*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, 1970, 149 pp.
6. MOMMENZA, A. *Les propriétés des béton légers de structure*. Centre National de recherches scientifiques et techniques pour l'industrie cimentiere, CRIC, 47-f-1977, 49 pp.
7. CORMON, P. y Otros, Bétons de granulats légers artificiels. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, n° 231 (octubre 1974), pp. 2-103.
8. ACI-ASCE Committee 326. Shear and diagonal tension. *Journal of the American Concrete Institute Proceedings*, vol. 59, n° 1 (enero 1962), pp. 1-30.
9. ACI 318-77. Building code requirements for reinforced concrete. *ACI Manual of Concrete Practice. Part 2*.
10. LECAROS, J.P. y CORREA, J. *Hormigones estructurales livianos con agregados de arcillas expandibles de la zona de Peldehue*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, 1974, 100 p.
11. RICHARDS, L.E. *Estudio experimental del comportamiento al corte de vigas de hormigón liviano*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, 1978, 153 pp.

LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH CHILEAN EXPANDED CLAYS

SUMMARY

Expanded clay lightweight aggregates were prepared at IDIEM out of clays coming from Santiago nearby natural deposits in order to see how well they performed as concrete aggregates. The results of test for compression, modulus of elasticity, splitting tensile strength, and flexural strenght of short beams show that these aggregates combined with natural sand as fine aggregate are well suitable for structural concrete making.