

POSIBILIDADES DE UTILIZACION DE ARENAS-CEMENTO EN BASES DE PAVIMENTOS

Mauricio POBLETE R.*

RESUMEN

Para 3 tipos de arenas, de abundante presencia en la costa central de Chile, se presentan las características físicas principales y sus respuestas típicas en ensayos de compactación proctor y en ensayos CBR de laboratorio, teniendo en vista la utilización de estos materiales como sub-bases granulares de pavimentos. Con moderadas cantidades de cemento las arenas logran satisfacer los requerimientos mínimos de resistencia recomendados por la Portland Cement Association, PCA, para bases. Se discute la influencia del contenido de humedad, del grado de compactación y del tiempo de curado. Complementariamente se entrega una correlación empírica entre el módulo de deformación y la resistencia de probetas de arena-cemento.

INTRODUCCION

Ha sido tradicional que las bases de pavimentos se constituyan con materiales granulares gravo-arenosos, estables por sí mismos debido a su buena graduación granulométrica. Al presente, esos mismos tipos de materiales han sido mejorados mediante adiciones de cementos hidráulicos, que les proporcionan una cohesión durable, pasando a constituir las llamadas gravas-cemento de profusa aplicación en sectores de la repavimentación vial de Chile. Es conocido también que en ciertas regiones costeras del país esos buenos materiales no abundan en estado

* Ingeniero Sección Geotecnia, IDIEM, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

natural y deben ser transportados desde distancias considerables, o bien fabricados expresamente en plantas chancadoras que procesan bloques de roca extraídos de canteras. En cualquiera de los casos el costo resultante ha tornado interesantes las posibilidades de utilización de materiales locales arenosos, los que con moderadas cantidades de cemento se estabilizan hasta un grado que resultan aceptables para constituir bases de pavimentos rígidos y flexibles, de acuerdo a los cánones generalmente aceptados.

En el presente trabajo se analizan 3 tipos de arenas representativas de abundantes depósitos de las áreas costeras de Chile Central, como son los *maicillos* arenosos de los cerros que rodean Concepción; las arenas limpias del río Bío-Bío y las arenas de dunas de Ventanas, V^a Región*. Se muestran brevemente las características mecánicas naturales de las arenas en cuanto a composición granulométrica y CBR y se analizan las posibilidades de mejorarlas con adiciones de cementos hidráulicos corrientes, lo cual se hace mediante series de ensayos de compresión en laboratorio, en los que se investigó la influencia del contenido de cemento, cantidad de agua de amasado, grado de compactación y tiempo de curado. Conjuntamente con la resistencia se evaluó también el comportamiento carga-deformación de las probetas, con resultados de módulos de deformación que se correlacionan aceptablemente bien con la resistencia.

Los procedimientos de ensayos utilizados en estas arenas-cemento corresponden a las ya clásicas normas de la Portland Cement Association¹ que dosifican el contenido de cemento de acuerdo a requerimientos preestablecidos de durabilidad de la cohesión, que se gana por el fraguado del cemento en la mezcla después de 7 días de curado húmedo. La misma norma prescribe que las probetas de ensayo se compacten con la humedad óptima y la energía de compactación del ensayo proctor estándar. Como los ensayos normalizados de durabilidad consumen un tiempo real de 45-60 días para obtener resultados, la misma PCA permite que para suelos eminentemente arenosos tales ensayos se reemplacen por ensayos de compresión simple a 7 días de edad, que entregan resultados a más corto plazo. Es lo que se ha hecho en este trabajo, y además se han variado un tanto las normas de ensayo para investigar en cada tipo de suelo las posibilidades de obtener mejores resistencias y por ende mayor durabilidad.

MATERIALES ESTUDIADOS

Maicillo granítico

Se trata del material areno-limoso residual que ha quedado luego de la meteorización en sitio de las rocas graníticas, de abundante presencia en la zona de Concepción y en toda la Cordillera de la Costa Central de Chile. Mineralógica-

* El estudio in-extenso de estos materiales forma parte de 3 memorias de título de ingeniero civil realizadas en el período 1978-81 por Benavente y Ebensperguer², Riquelme y Valenzuela³ y Flores⁴.

mente está constituido por partículas de cuarzo y feldespatos, con algún contenido de micas.

Las características mecánicas de varios de los maicillos de Concepción se encuentran analizadas in-extenso en otro trabajo², de donde se reproducen aquellas relativas a los 3 tipos de maicillos seleccionados para su estudio con cemento. Sus curvas granulométricas se muestran con líneas continuas en la Fig. 1, indicando que se trata de arenas relativamente bien graduadas y con finos de mediana a baja plasticidad. En relación con la representatividad de las muestras usadas en los ensayos, se ha demostrado en el mismo estudio² que las calidades de los maicillos en terreno varían notablemente de un lugar a otro, aun entre puntos cercanos de un mismo cerro, dependiendo del tipo de roca granítica que le dio origen y del grado de meteorización; por ello las propiedades de ingeniería que aquí se presentan pueden no corresponder necesariamente a los lugares geográficos de donde proceden las muestras, sino que se restringen sólo al tipo de suelos utilizado.

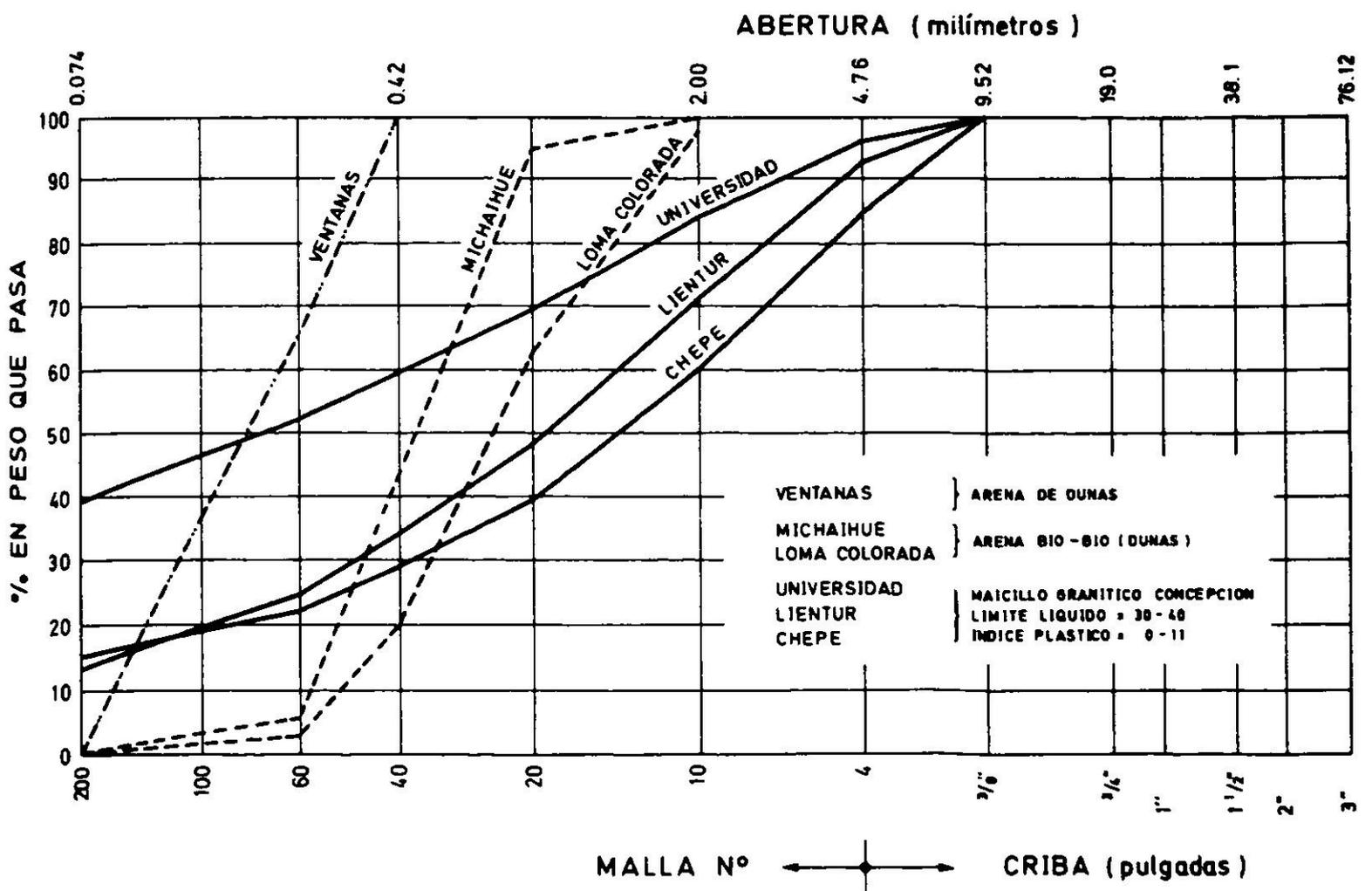


Fig. 1. Características granulométricas de arenas estudiadas.

En ensayos de compactación proctor modificado (ASTM D-1557) las curvas humedad-densidad presentan la forma típica de los suelos arcillosos, con valores de humedad óptima y densidad máxima bien definidos en todos los casos, según se aprecia en el recuadro de la Fig. 2.

Con respecto al CBR de los maicillos compactados, la Fig. 2 muestra las curvas características de cada uno de ellos en función de la densidad seca, con valores que resultan consecuentes con la gradación granulométrica. Se verifica

que la mejor resistencia a la penetración CBR se da en las arenas más gruesas y con menos cantidad de finos, y que por lo mismo pueden lograr la más alta densidad después de compactados (caso de muestras Chepe y Lientur). En esas muestras el CBR estimado para una densificación del 95% proctor modificado es del orden de 30%, lo que permitiría considerar a esos dos maicillos como materiales aptos para subbases de pavimentos, descartando para estos efectos al tipo de maicillo representado por la muestra denominada Universidad, que sólo exhibe un 8-10% CBR compactada al máximo posible de densificación.

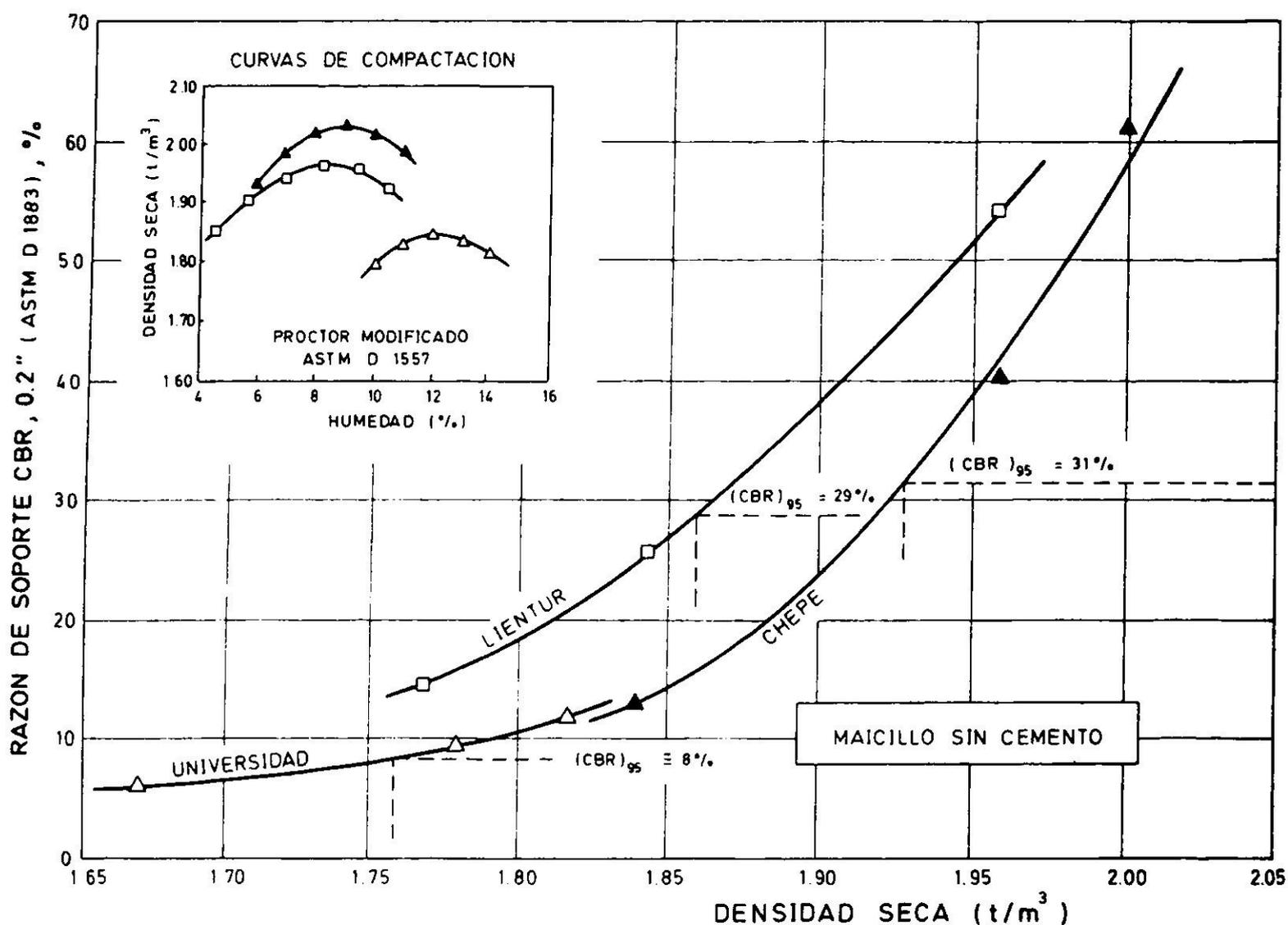


Fig. 2. Características de CBR vs densidad seca. Maicillos de Concepción.

Arenas limpias Bío-Bío

Se trata de las arenas que constituyen depósitos superficiales ubicados próximos al cauce inferior y desembocadura del río Bío-Bío, los cuales por sus características y volúmenes son los empréstitos más usados en la extracción de materiales para rellenos en la zona. Están constituidas por fragmentos subangulares de basalto, magnetita y otros minerales; de color predominante gris oscuro y peso específico relativamente alto ($G: 2.85 - 2.97$).

Las características mecánicas de la mayoría de las arenas explotables como empréstitos se encuentran analizadas por Riquelme y Valenzuela³, de donde se han seleccionado 2 tipos de arenas para su estudio con cemento. Sus curvas granulométricas incluidas en la Fig. 1 permiten apreciar su completa carencia de finos y uniformidad de tamaños, clasificándoseles en consecuencia como

arenas medias y uniformes. De acuerdo a dicho estudio estas dos muestras representarían bien la generalidad de las arenas limpias Bío-Bío.

Arenas de dunas

Se refiere a las arenas que son típicas en las dunas costeras de Chile Central, habiéndose seleccionado de entre ellas a la arena de la localidad de Ventanas, pues sus características constituyen un promedio representativo de un amplio sector de dunas, entre las que se incluyen las de San Sebastian y Reñaca, todas las cuales se encuentran estudiadas en detalle en el trabajo de Flores⁴.

La arena de Ventanas es muy fina y muy uniforme, Fig. 1, y se compone de partículas de cuarzo (40-50%), plagioclasa (20-30%) y ferromagnesianos (20%), con coloración predominante rosada grisácea-anaranjada y peso específico normal ($G: 2.69$).

Tanto las arenas de las dunas de Ventanas como las de los depósitos superficiales de arenas Bío-Bío, tienen en común el ser limpias y uniformes y se comportan similarmente en muchos aspectos; siendo del mayor interés el comportamiento de estas arenas en ensayos de compactación proctor estándar y modificado, que difiere notoriamente del

comportamiento típico de los suelos finos, según puede verse en las curvas de la Fig. 3. Las bajas densidades que se verifican a bajos contenidos de humedad se deben a fuerzas capilares (cohesión aparente) que entorpecen el reacomodo de los granos durante la compactación, y por ello las mejores densidades se obtienen con la arena o completamente seca o muy saturada de agua. Se observa también que a mayor energía proctor se alcanza una mayor densidad final; además, en éstas como en todas las demás arenas limpias estudiadas^{3,4} pudo constatarse que la densidad más alta (densidad máxima) fue siempre la obtenida con el ensayo de vibración (ASTM D-2049) en arena seca.

El citado fenómeno de capilaridad, si bien es conocido desde hace tiempo⁵,

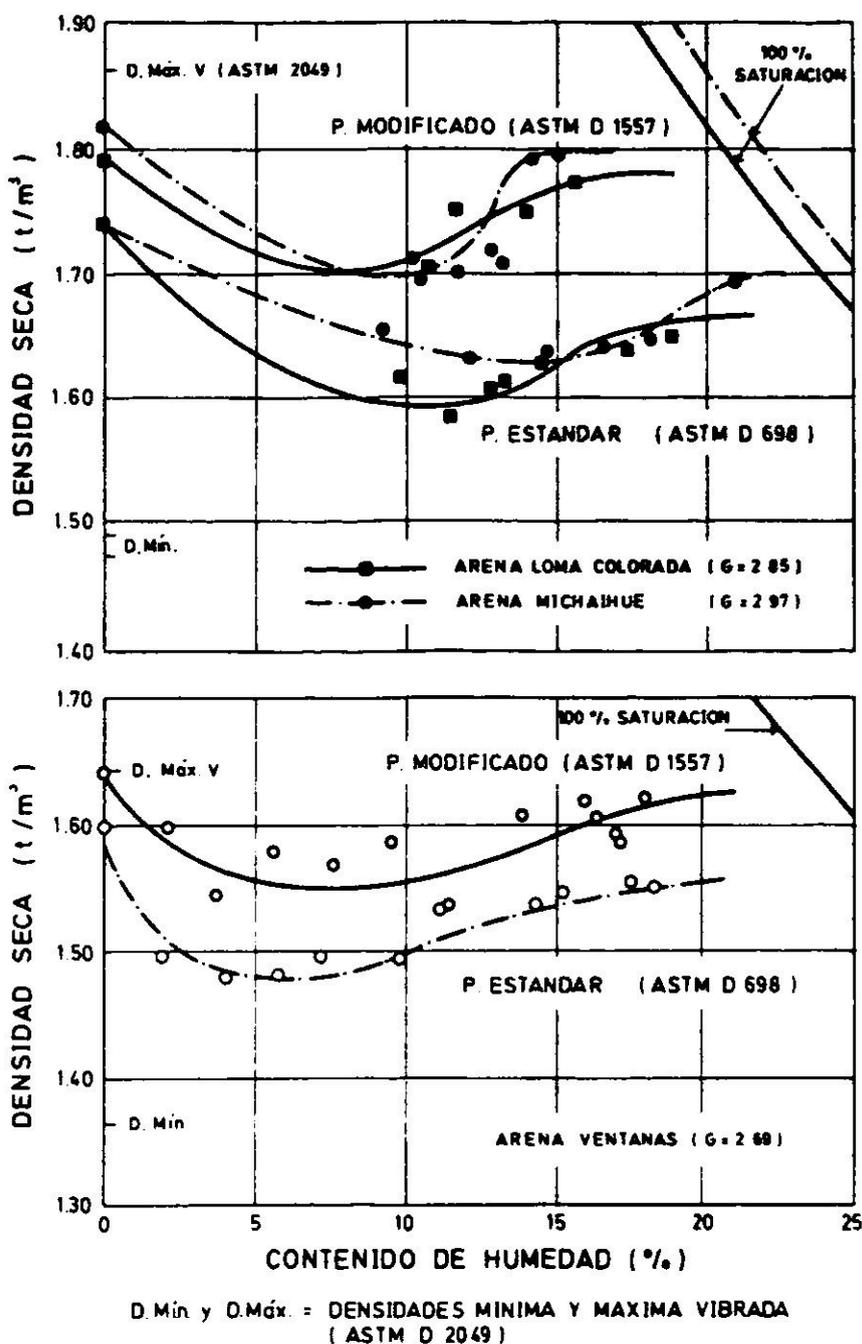


Fig. 3. Curvas de compactación proctor de las arenas limpias.

suele no tenerse en cuenta en la práctica, especialmente en el caso del ensayo CBR. Según ASTM (D-1557) la preparación de probetas debe realizarse con compactación proctor modificado, en tanto que AASHTO (T-193) la especifica según proctor estándar; en cualquiera de los casos es muy probable que la estimación del CBR para una densidad del 95% proctor subestime notablemente la real capacidad de soporte de la arena compactada. Por ello parece razonable estimar el CBR más bien para un cierto grado de densidad relativa.

En la Fig. 4 se muestran las curvas CBR características de cada una de las 3 arenas limpias analizadas. Puede verse que para un 75% de densidad relativa las arenas Bío-Bío desarrollan valores de CBR en torno al 50%, en tanto que la arena fina de Ventanas sería del 40% o más, los cuales superan las expectativas normales en nuestro medio para estos tipos de suelos. Con estos resultados aparece tentadora la idea de utilizar arenas limpias, adecuadamente confinadas, ya no sólo en subbases, sino también en bases de pavimentos rígidos, teniendo presente sin embargo el riesgo o posibilidad latente de inestabilidad al bombeo (pumping). Para solucionar esta dificultad es que resulta apropiado analizar las posibilidades de estabilizar la arena con cemento.

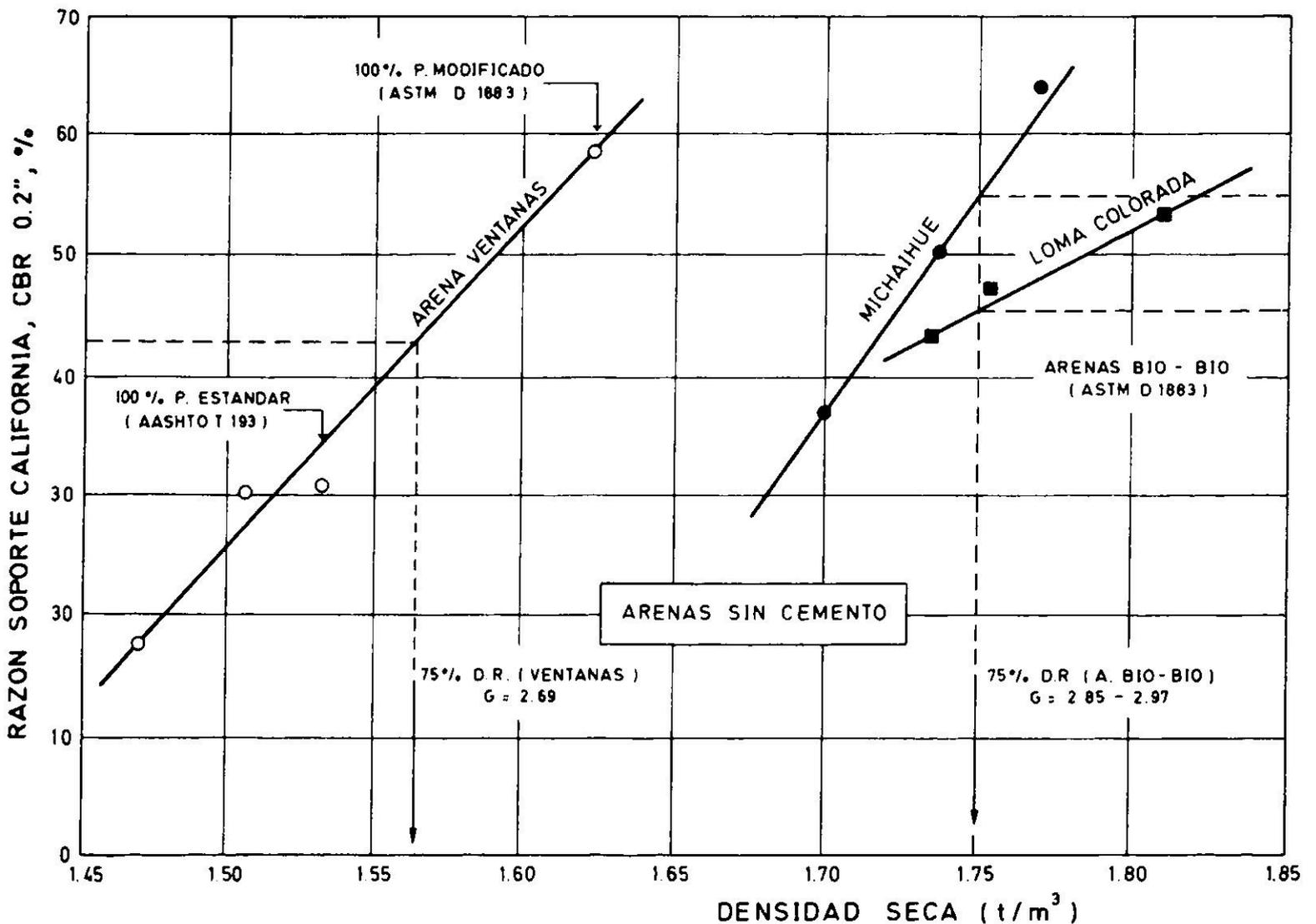


Fig. 4. Características de CBR vs densidad seca en arenas limpias.

ESTABILIZACION CON CEMENTO

Para este objeto se consideró de interés analizar en cada uno de los suelos las

siguientes variables: contenido de cemento; energía de compactación; cantidad de agua y tiempo de curado.

En todos los demás aspectos las probetas de ensayos fueron preparadas y ensayadas a compresión tal como prescribe la norma PCA de suelo-cemento¹; que en lo fundamental establece probetas cilíndricas de $\phi 4'' \times 4,584''$, las cuales luego de compactadas se mantienen en cámara húmeda durante todo el período de curado y hasta 4 horas antes del ensayo, en espera del cual se mantienen sumergidas en agua. La compresión de las probetas cilíndricas se hace axialmente en una máquina de ensayo, con velocidad de deformación controlada al nivel más lento posible, a fin de permitir la apreciación del módulo de deformación próximo al origen de la carga.

Maicillo-cemento

Se usó cemento siderúrgico, Bfo-Bfo tipo corriente. Las probetas fueron compactadas con el pisón del proctor estándar (en 3 capas con 25 y 10 golpes/capa) y humedad aproximadamente igual a la óptima del mismo ensayo. El porcentaje de cemento utilizado para una de las series de probetas fue el determinado por el método simplificado de dosificación PCA; en tanto que para las otras series el % de cemento se obtuvo restando 2% y 4% a aquél. Para cada porcentaje de cemento y cada una de las series se prepararon 3 probetas idénticas para los ensayos de compresión a 7 días; completándose un total de 60 probetas de maicillo-cemento, sin contar algunas series preliminares de práctica. No se realizaron ensayos a mayor edad que 7 días.

Las resistencias obtenidas en todas las series de ensayos se presentan en la Fig. 5, graficadas en función de la densidad seca final de las probetas y del contenido de cemento. Puede observarse que la resistencia aumenta notablemente a medida que crece el contenido de cemento, observándose igual tendencia al mejorar la densidad seca final después de la compactación. Además el conjunto de los datos permite trazar curvas de igual contenido de cemento que resultan más o menos independientes del tipo de maicillo utilizado; verificándose una vez más que, desde el punto de vista de la resistencia a la compresión, la mezcla más económica de maicillo-cemento sería aquella hecha con el material que consiga la más alta densidad después de compactado, ésto es, el maicillo más arenoso y mejor graduado, lo que también es válido para el CBR.

Arena-cemento

Atendido el comportamiento ya descrito de la arena limpia en los ensayos de compactación proctor, se investigó la influencia del contenido de agua en las mezclas de arena-cemento, tanto en lo que se refiere a la densidad-humedad de compactación como a la resistencia obtenida a los 7 días de curado. La energía de compactación empleada en estos ensayos fue la del proctor modificado (ASTM 1557), pues para este tipo de material se la ha juzgado más adecuada

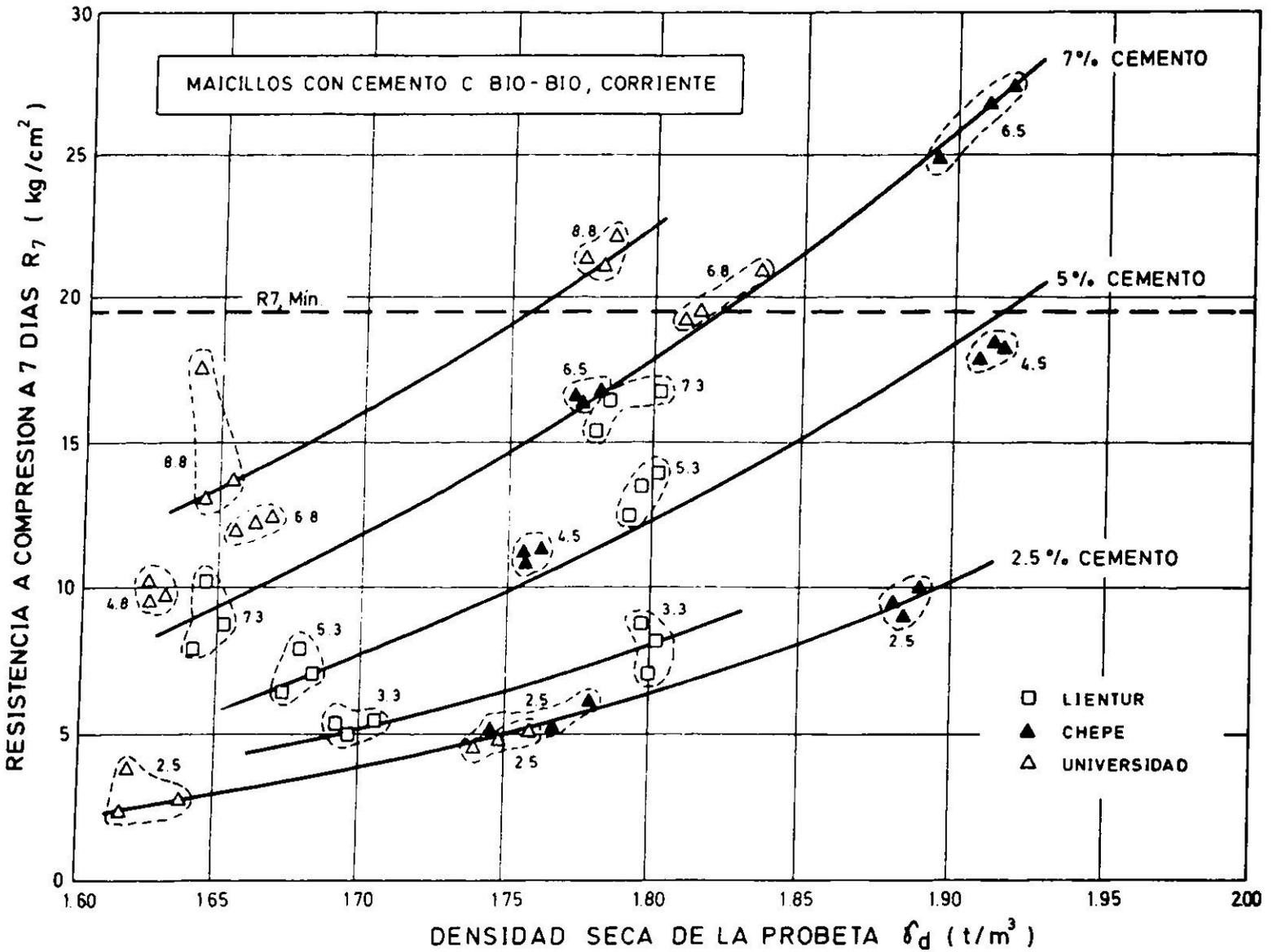


Fig. 5. Resistencia a 7 días en función de la densidad seca y el contenido de cemento. Maicillo con cemento compactado con humedad óptima proctor estándar.

que la del proctor estándar. A modo de ilustración de los resultados obtenidos, en la Fig. 6 se muestran los resultados típicos de una de las arenas; en la que se puede apreciar que sólo a partir de un contenido de cemento relativamente alto (9%) la curva de compactación comienza a mostrar un óptimo similar al habitual en los suelos finos, en tanto que para contenidos bajos de cemento prevalecen los fenómenos de tensión capilar típicos de la arena con pocos finos (Fig. 3).

Las mismas probetas obtenidas del ensayo de compactación se curaron en humedad durante 7 días y ensayadas a compresión arrojaron los resultados de resistencia que se presentan en la misma Fig. 6 en función del contenido de humedad y de ce-

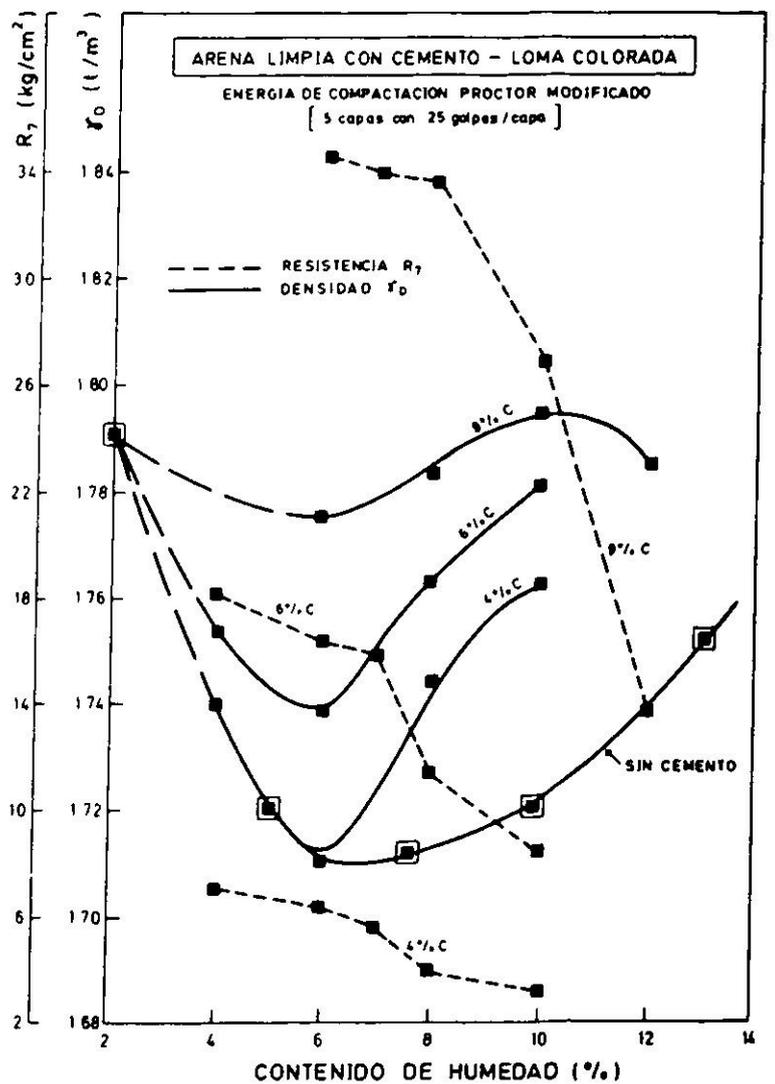


Fig. 6. Influencia de la humedad en la resistencia y en la densidad de probetas de arena-cemento.

mento. Se observa que para 4%, 6% y 9% de cemento las resistencias a 7 días decrecen a medida que aumenta la humedad. Debe hacerse notar que para humedades menores al 4% la mezcla arena-cemento no consigue la cohesión necesaria para permitir el desmolde, y para humedades mayores al 12% se produce una exudación excesiva de lechada que resta homogeneidad a la probeta.

Esta observación empírica, que se repite en cada uno de los ensayos efectuados con arenas limpias^{3,4}, conduce a la importante conclusión de que el contenido de agua en las mezclas de arena-cemento no tiene relación alguna con la humedad óptima conceptuada en ensayos de compactación, sino que está gobernada más bien por consideraciones válidas en los morteros de cemento.

De acuerdo a lo anterior y considerando que la razón agua/cemento necesaria para una adecuada hidratación no excede de 0.5⁶, la cantidad de agua en una arena-cemento no debiera exceder de 4% para conseguir un óptimo de resistencia; sin embargo con ello se cae en los inconvenientes ya anotados.

Por otra parte, en terreno las humedades naturales de los depósitos de arenas oscilan entre 6 y 7%; y como resulta poco práctico pensar en secarlas, se adoptó dicho rango como límite razonable para las humedades de ensayos.

Fijada la humedad en 7% para todos los casos de arenas Bío-Bío y 6% para la arena de Ventanas, se prepararon series de probetas con diferentes grados de compactación y contenidos de cemento, las cuales se ensayaron a compresión después de 7 y 28 días de curado húmedo. Al igual que en el caso de los maicillos, en cada serie de ensayos se prepararon 3 probetas idénticas, completándose un total de 60 probetas de arena Bío-Bío y 24 probetas de arena de Ventanas, sin contar los ensayos preliminares de práctica y de investigación de los contenidos de humedad más convenientes.

Las resistencias obtenidas a los 7 días de edad se presentan en la Fig. 7 graficadas en función de la densidad seca final de las probetas y del contenido de cemento. Como era de esperarse, las resistencias a 7 días aumentan con la densidad y con el contenido de cemento, de una manera similar al caso de los maicillos; sin embargo a diferencia de aquéllos, las curvas para cada contenido de cemento mantienen la individualidad de cada arena.

A los 28 días de edad las resistencias obtenidas en las series de ensayos de arenas limpias muestran tendencias similares a las de 7 días y para ilustrar la relación entre ambas resistencias se ha preparado la Fig. 8, con puntos que representan el promedio de 3 valores obtenidos en probetas idénticamente preparadas. El mejor ajuste de tales valores es casi una línea recta, dentro de una aceptable dispersión, que permite esperar a los 28 días de edad una resistencia a la compresión aproximadamente un 80% más alta que la resistencia a 7 días, independientemente del tipo del cemento corriente utilizado, sea puzolánico o siderúrgico.

Con relación a las características carga-deformación de los suelos-cementos estudiados, en la Fig. 9 se han graficado los valores promedios de los módulos de deformación en función de las resistencias en cada grupo de 3 probetas

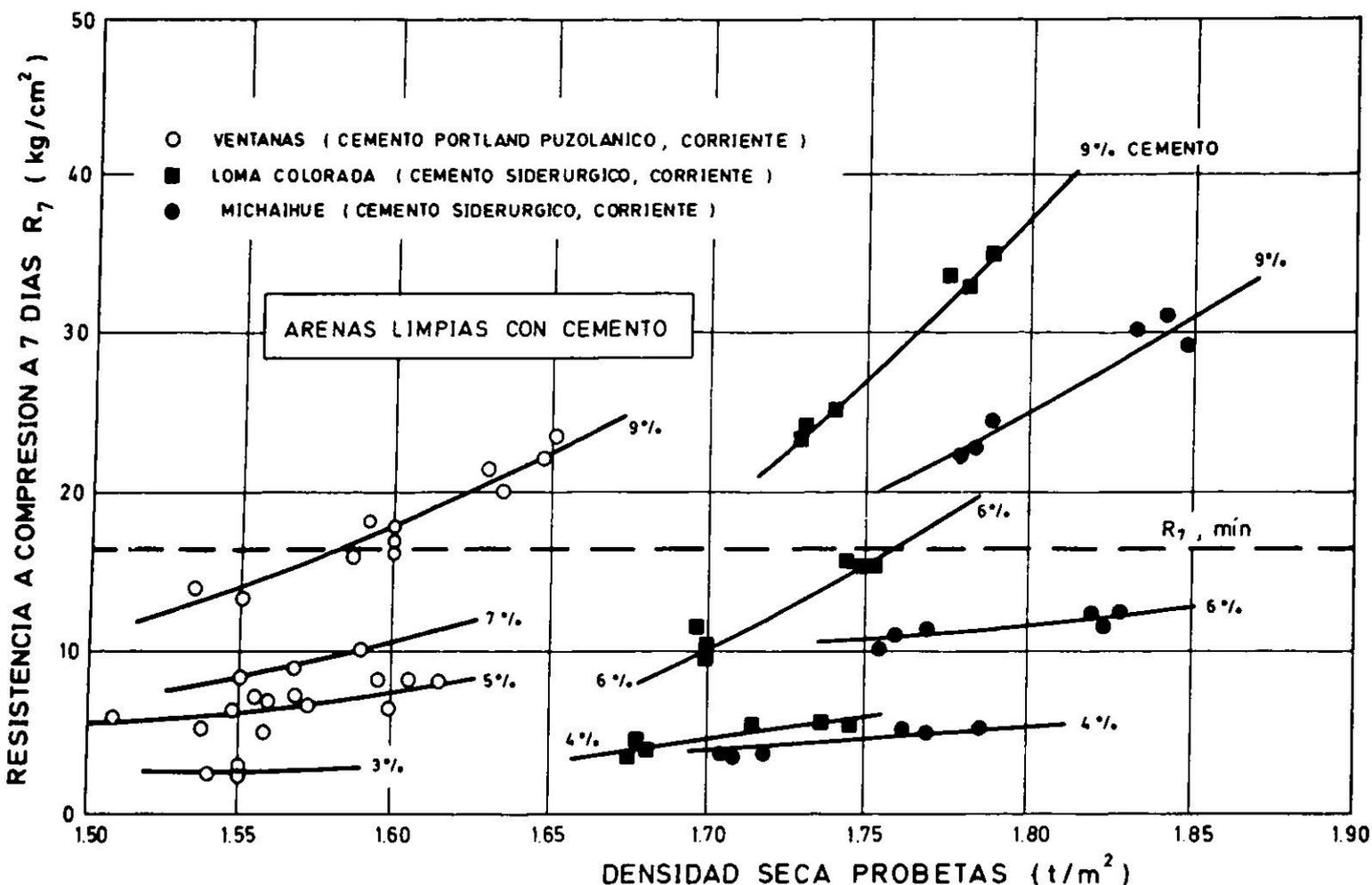


Fig. 7. Resistencia a 7 días en función de la densidad seca y el contenido de cemento. Arenas limpias con cemento, compactadas con 6 - 7% de humedad.

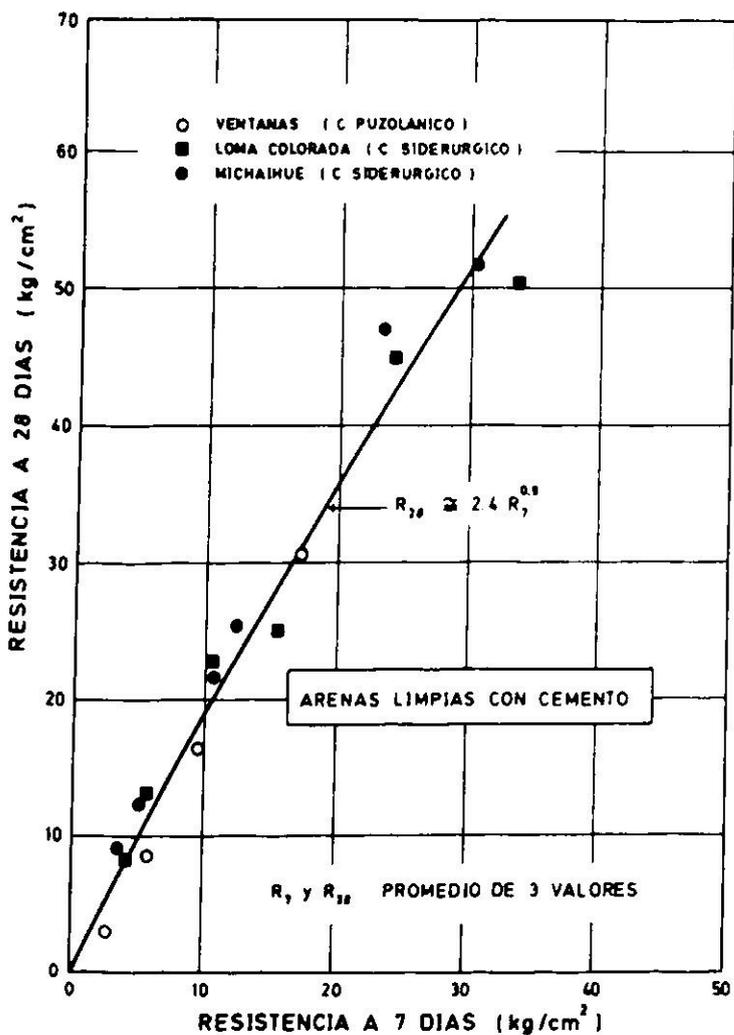


Fig. 8. Relación entre resistencia a 7 y 28 días

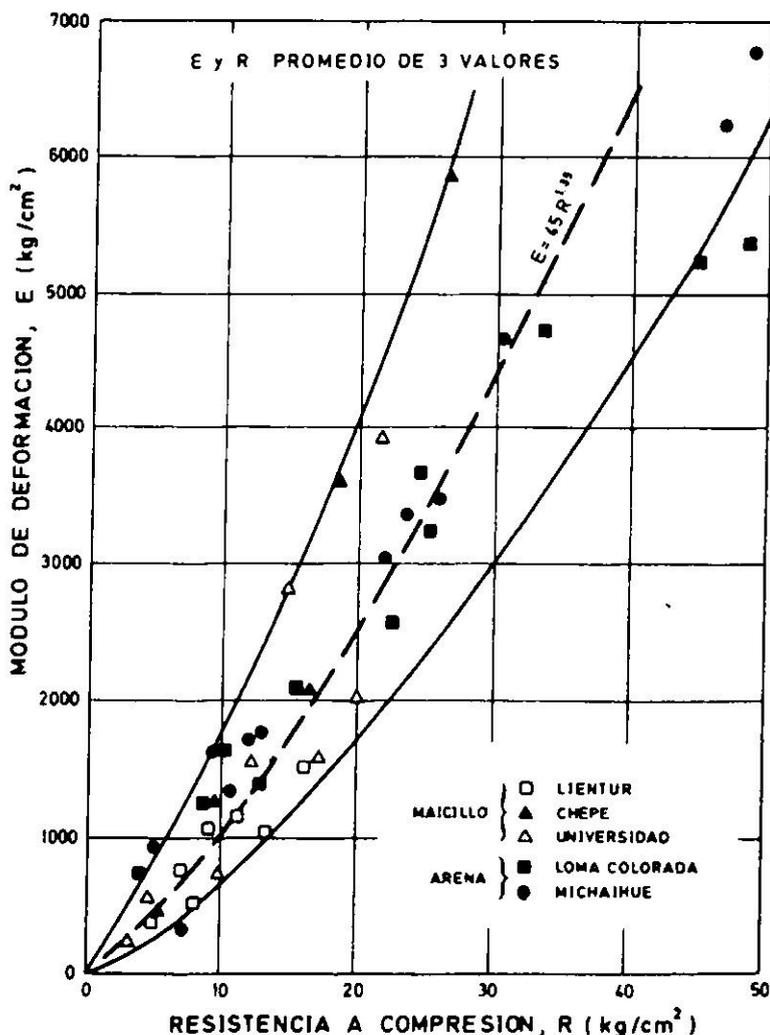


Fig. 9. Relación entre módulos de deformación y resistencia a compresión.

idénticas, incluyendo todas las series de diferentes grados de compactación, edades de curado y contenidos de cemento, para los maicillos y las arenas

Bío-Bío de Concepción. Pese a la alta dispersión de los valores, el abundante número de puntos incluidos muestra una tendencia significativa que permite anticipar los órdenes de magnitud de los módulos en los ensayos de compresión simple realizados sobre probetas cilíndricas de 4" de diámetro por 4.58" de altura. Sin perjuicio de la inevitable variabilidad en los materiales arenosos, que pudieran estar afectando la relación módulo-resistencia, la alta dispersión anotada en el gráfico debe atribuirse en gran medida a las imperfecciones de la medida del módulo a partir de los datos directos de la máquina de ensayo, la cual está diseñada para obtener precisión en las cargas de ruptura, más que en los valores iniciales asociados a pequeñas deformaciones.

CONCLUSIONES

Según los antecedentes recogidos de un ensayo clásico como es el CBR se ha encontrado que tanto los maicillos como las arenas limpias del Bío-Bío y de dunas de Ventanas serían aptos como materiales de subbase para pavimentos. Además de su buena capacidad de soporte, no son susceptibles a los cambios de humedad ni a la acción de las heladas; pero requieren de un adecuado confinamiento, drenaje y protección contra el bombeo⁷, al igual que todos los materiales granulares convencionales.

En el caso de las arenas limpias se ha visto que ellas son capaces de desarrollar CBR significativamente superiores al 40% cuando se les compacta al 75% de densidad relativa, que es un grado de compactación completamente posible de obtener en terreno. Se ha mostrado también que en estos materiales la densidad obtenida por vibración en arena seca es superior a la máxima del proctor modificado en cualquier estado de humedad, postulándose en consecuencia que el CBR queda mejor definido para un cierto grado de densidad relativa (i.e. 75% D.R.) en lugar del tradicional 95% P.M. que puede resultar ambiguo para estos tipos de materiales sin finos.

Con cemento, las resistencias alcanzadas en los maicillos concuerdan con las previsiones de la norma de dosificación PCA, requiriéndose contenidos de cemento del 5-8% según el material, para satisfacer la especificación mínima. Si la energía de compactación se aumenta del nivel del proctor estándar al del proctor modificado, las resistencias aumentan fácilmente en un 25% para el mismo contenido de cemento. Si, además, se prolonga el curado húmedo hasta los 28 días, puede esperarse una ganancia de resistencia adicional que en el caso de las arenas limpias, llega a cerca de un 80%.

Con relación a las arenas limpias con cemento, se ha mostrado que las resistencias quedan controladas por la razón agua/cemento más que por las humedades óptimas de compactación. En laboratorio las resistencias de probetas a 7 días, preparadas con humedad similar a la de los depósitos naturales de arena en terreno (6-7%) y compactadas a niveles equivalentes al proctor modi-

ficado, han superado los requerimientos mínimos PCA ($R_7 = 16.5 \text{ kg/cm}^2$) con contenidos de cemento del 6-7% en las arenas Bío-Bío y del 8-9% en la arena fina de Ventanas. Tales contenidos de cemento son del orden de 60-70% más bajos que los indicados por las normas de dosificación PCA. Si a esto se agrega la ganancia de resistencias con la edad se ve que las arenas con cemento pueden ser utilizadas como bases de pavimentos con interesantes ventajas de costo cuando los materiales gravo-arenoso tradicionales están muy lejos del lugar, lo que deberá evaluarse en cada caso.

BIBLIOGRAFIA

1. NORMAS DE DOSIFICACION DE SUELO-CEMENTO, Asociación Brasileña de Cemento Portland, 1980.
2. BENAVENTE, D. y EBENSPERGER, E. *Estudio de las propiedades ingenieriles del maicillo granítico de Concepción*. Memoria de Ingeniero Civil, Universidad de Concepción, noviembre 1978.
3. RIQUELME, J. y VALENZUELA, M. *Estudio de las propiedades ingenieriles de las arenas Bío-Bío*. Memoria de ingeniero Civil, Universidad de Concepción, enero 1980.
4. FLORES, A. *Estabilización de arenas de dunas con aditivos hidráulicos*. Memoria para Ingeniero Civil, Universidad de Chile, (en preparación).
5. FOSTER, 1962. *Field problems: compaction*. Foundations Engineering, G.A. Leonards (editor). McGraw Hill Book Co.
6. NEVILLE, A. *Properties of Concrete*. Pitman Publishing Ltd. Third edition.
7. HUDSON, R. *Apuntes Seminario diseño de pavimentos: bases estabilizadas*. IDIEM, octubre 1981.

UTILIZATION POSSIBILITIES OF CEMENT TREATED SANDS AS PAVEMENT BASES

SUMMARY

The main physical characteristics of 3 types of coastal sands are presented, together with its responses to proctor compaction and CBR lab tests, regarding the utilization of these materials as granular subbases. With moderate amount of cement the sands satisfy the minimum PCA strength requeriments for pavement bases. The influence of moisture, compaction and curing time of test specimens is also discussed. Accessorily, an empirical correlation is given between deformation modulus and strength.