

# **BASES EXPERIMENTALES PARA UTILIZACION DE LA ANHIDRITA EN OBRAS CIVILES**

**Eugenio RETAMAL\***

**Gustavo BINDER\*\***

## **RESUMEN**

*Se presentan las características químicas de la anhidrita provenientes del salar de Cototos en Arica, Chile y los resultados de ensayos para establecer características de resistencia - deformación, tanto de pastas puras como de morteros con diversas proporciones de arena. Se analizan los efectos de diferentes grados de finura en la molienda, de diversos activadores y del cloruro de sodio, indicando los procedimientos usados para disminuir el contenido de sal original en el mineral. Se estudian, además, las deformaciones que se producen durante el fraguado en diversos ambientes.*

## **INTRODUCCION**

La anhidrita ha sido empleada en varios países en la construcción de viviendas y en las terminaciones de edificios. En Chile, a pesar de existir grandes yacimientos y de haberse llevado a cabo varias investigaciones sobre la anhidrita, ésta no ha sido empleada en forma sistemática y continuada en la construcción de viviendas u otras obras civiles. Posiblemente la reticencia al empleo de este material se ha debido a ciertas dificultades que presenta su uso, las que no habían sido hasta ahora resueltas, ya que los estudios realizados no fueron lo suficientemente completos y concluyentes.

Con el objeto de subsanar, a lo menos en parte, estas deficiencias, se realizó

---

\*Profesor de Mecánica de Suelos, Universidad de Chile, Ingeniero Investigador del IDIEM, Universidad de Chile

\*\*Estudiante Graduado, Magister en Mecánica de Suelos, IDIEM

un estudio sistemático de las propiedades de la anhidrita proveniente de un yacimiento específico y se elaboraron especificaciones para su eventual uso en pavimentos.

La anhidrita es sulfato de calcio anhidro, vale decir, sus cristales no contienen, a diferencia del yeso o dihidrato, moléculas de agua. Se encuentra en grandes yacimientos profundos o superficiales en condiciones de pureza muy disímiles y variables. Al mezclarla con agua, algunas partículas se transforman en yeso, la pasta fragua y forma una masa compacta y resistente. Esta cualidad de la anhidrita es la que permite su utilización, en forma pura o con agregados, en la construcción de obras civiles.

Sus propiedades mecánicas, tales como la resistencia, velocidad de fraguado, cambios volumétricos, etc. dependen de una variedad de factores, como la pureza del mineral, su finura, la adición de un activador y de agregados inertes, la edad y otros. En relación a esto, es importante una conclusión de varios estudios realizados en el extranjero y en Chile<sup>1,2</sup> que se resume en que las propiedades del aglomerante deben ser analizadas individualmente para anhidrita proveniente de un yacimiento determinado. Por esta razón en el presente trabajo se estudió la influencia de los factores indicados utilizando anhidrita proveniente de un yacimiento factible de ser explotado a gran escala.

### Propiedades de la anhidrita natural

En los yacimientos la anhidrita se encuentra ya sea en forma compacta o en forma pulverulenta. La roca de anhidrita es monomineral y homogénea en su composición química. La anhidrita pulverulenta es, por lo general, menos pura.

La anhidrita natural presenta una estructura cristalina bien definida llamada anhidrita II (o  $\text{CaSO}_4 - \beta$ ) para diferenciarla de las anhidritas I o *de altas temperaturas* y de la anhidrita III o hemianhidrita. Las propiedades físicas y químicas más importantes de estos 3 tipos de anhidrita se indican en Tabla I.

TABLA I

#### PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DE LOS 3 TIPOS DE ANHIDRITA

| Tipo de anhidrita        | Anhidrita I                                                         | Anhidrita II                                               | Anhidrita III                                    |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Otras denominaciones     | De altas temperaturas                                               | Natural o insoluble                                        | Hemianhidrita o soluble                          |
| Sistema cristalino       | Monoclínico                                                         | Rómbico                                                    | Monoclínico                                      |
| Peso específico relativo | —                                                                   | 2,90                                                       | 2,61                                             |
| Estabilidad              | Inestable a temperaturas inferiores a $1.180^{\circ}\text{C}$       | Estable a humedad relativa inferior a 100%.                | Estable sólo a bajas humedades relativas         |
| Obtención                | Por calcinación a elevadas temperaturas del yeso o de la anhidrita. | Natural o por calcinación del yeso a $500^{\circ}\text{C}$ | Por calcinación del yeso a $200^{\circ}\text{C}$ |

La anhidrita natural presenta partículas de las más diversas formas y tamaños. En cuanto a la estructura mineral se distinguen 2 grupos extremos:

- a) la anhidrita fibrosa-radiada con agrupación preponderante radial de cristales cauliformes, y
- b) la anhidrita granular con partículas de forma rectangular o irregular.

Su distribución en un yacimiento es variable.

La anhidrita natural no es pura, contiene muchos minerales secundarios en proporciones variables. Los más importantes, desde el punto de vista de la ingeniería, son las sales (cloruro de sodio, potasio o magnesio), el yeso, los carbonatos (dolomita, magnetita y espato calcáreo) y los silicatos. Otras impurezas (sustancias orgánicas, cuarzo, minerales aluminosos, mica, etc.) tienen menor importancia.

### Yacimientos de anhidrita en Chile

De acuerdo a textos de geología<sup>3,4</sup> y a trabajos en terreno de los autores existen en la zona norte del país grandes yacimientos de anhidrita, la mayoría de los cuales se indican en la Fig. 1.

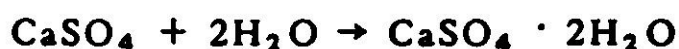
El yacimiento de mayor extensión se encuentra en el Salar de Llamara, el cual, de acuerdo a exploraciones efectuadas 30 a 40 años atrás, contiene unos 300 millones de metros cúbicos de anhidrita de una pureza superior al 70%.

### Usos del aglomerante de anhidrita

Gracias a la sencillez y economía de elaboración de la anhidrita, su uso se ha difundido desde 1930 en Alemania, Inglaterra, Unión Soviética y EE.UU en la confección de revoques interiores y exteriores no expuestos a la lluvia, de bloques, ladrillos y de radieres<sup>5</sup>. En la ciudad de Arica se han utilizado aglomerantes de anhidrita en la construcción de algunas viviendas económicas constituídas principalmente por paneles prefabricados. Además se elaboran pinturas de anhidrita.

### Fundamentos físico-químicos del fraguado

La propiedad aglomerante de la anhidrita se basa en la reacción



El proceso de fraguado tiene lugar debido a la diferencia entre las solubilidades de la anhidrita y del yeso y se efectúa en dos etapas. En primer lugar, se produce una disolución de la anhidrita en el agua y su transformación en yeso, posteriormente el yeso contenido en la solución sobresaturada decanta.

De acuerdo a estudios realizados por Roller y Hill<sup>5</sup> a temperaturas inferiores a 42°C la anhidrita es más soluble en agua destilada que el yeso, es decir, en una cierta cantidad de agua se disuelve una mayor cantidad de sulfato de calcio

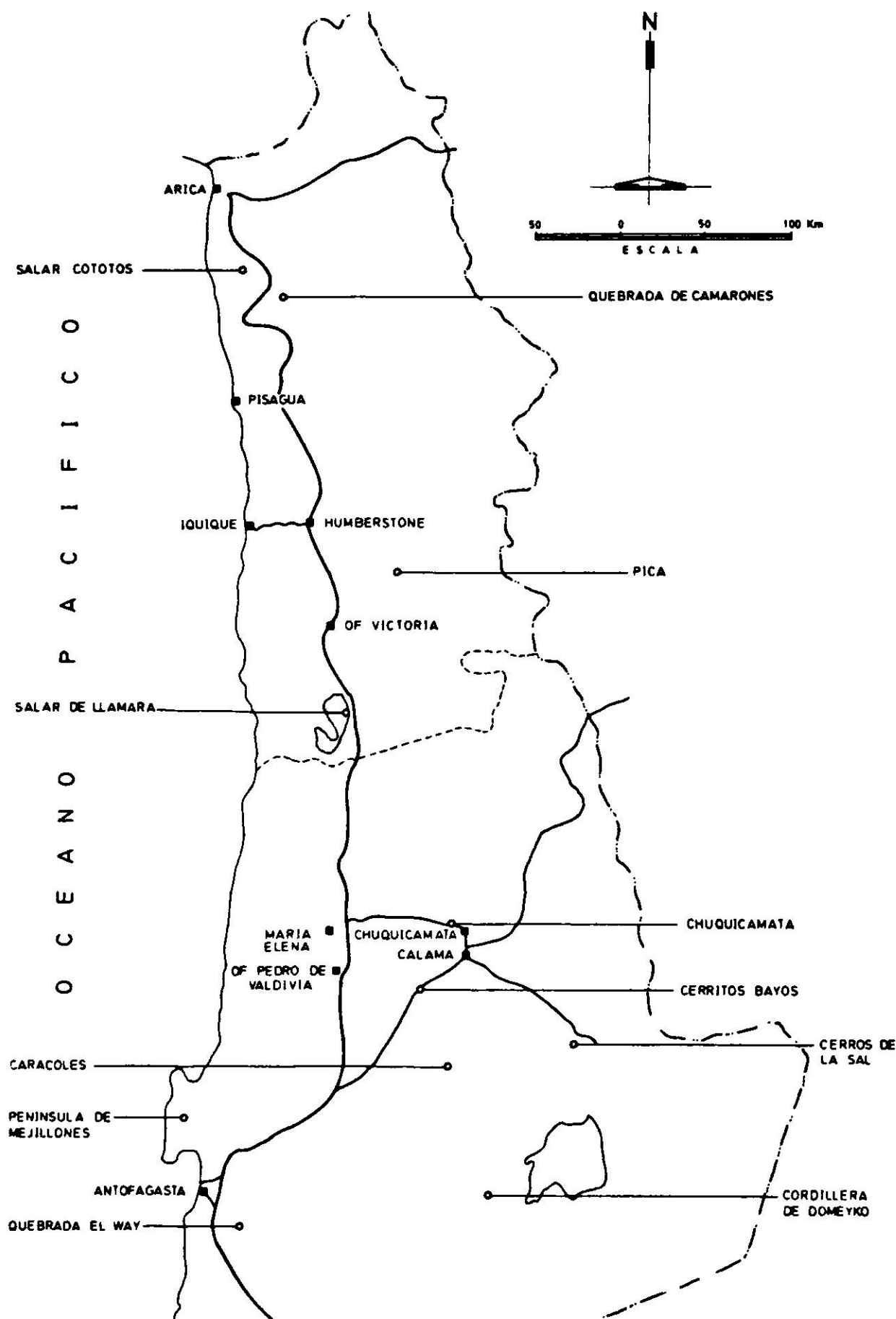


Fig. 1. Yacimientos de anhidrita en la primera y segunda región.

en estado anhidro que en el de bihidrato\*. Debido a esta diferencia de solubilidades, la cual aumenta para temperaturas decrecientes, el yeso formado por la hidratación de la anhidrita y presente en la solución, decanta por sobresaturación. El yeso forma una matriz que une las partículas de anhidrita no hidratadas y otras partículas presentes en la pasta la cual, en consecuencia, fragua.

\* Esto no debe confundirse con la velocidad de disolución, que en el caso de la anhidrita natural es  $1/3$  a  $1/4$  de la del yeso y que le ha dado el nombre de anhidrita insoluble. Esta lentitud de disolución es un obstáculo para el fraguado del aglomerante, el cual es eliminado utilizando los llamados activadores. Ellos tienen la función de acelerar la disolución de la anhidrita en agua.

A temperaturas superiores a 42°C la anhidrita es menos soluble que el yeso y por ello el aglomerante no fragua.

El proceso de formación de gérmenes o cristales de yeso no ha podido esclarecerse aún, pero se ha comprobado que es de naturaleza coloido-química. A pesar que tanto en el cemento (portland, siderúrgico, puzolánico), como en la anhidrita, el fenómeno de endurecimiento es de naturaleza coloidal, existe una diferencia fundamental entre ellos. La masa coloidal del cemento endurece bajo agua y es insoluble en ellas, se trata por lo tanto de un aglomerante hidráulico. En la anhidrita, en cambio, la masa coloidal no endurece si hay exceso de agua e incluso ya endurecida se disuelve bajo acción del agua, es decir, constituye un aglomerante no hidráulico.

### Factores que inciden en la resistencia de morteros de anhidrita

Las resistencias determinadas en pasta pura y morteros de anhidrita dependen de una gran cantidad de factores. Los más importantes son el contenido de impurezas en la anhidrita natural, la finura de molienda, la cantidad y tipo de activador, la razón agua-aglomerante, la cantidad y el tipo de agregado inerte y las condiciones de almacenamiento de las probetas. Desgraciadamente estos factores no actúan en igual medida en anhidritas de yacimientos distintos e incluso de dos partidas distintas de un mismo yacimiento<sup>5</sup>. Esto se debe a diferencias en la estructura y en el contenido de impurezas de las anhidritas naturales.

Dependiendo de las variables citadas se pueden obtener pastas de anhidrita de resistencias similares e incluso superiores a las de morteros ricos (500 a 600 kg de cemento por m<sup>3</sup> de mortero) de cemento portland.

### ESTUDIO DE ANHIDRITA DEL SALAR COTOTOS

Los autores analizaron, con el fin de obtener un aglomerante óptimo, la influencia de los factores indicados utilizando anhidrita proveniente de un yacimiento susceptible de ser explotado, como lo es el Salar Cototos en el departamento de Arica. Este salar, que está situado a 60 km al sur de Arica y 20 km al oeste de la Carretera Panamericana, contiene unos 800.000 m<sup>3</sup> de anhidrita de una pureza superior al 75% y un contenido máximo de 6% de cloruros, ubicada entre 0,5 m y 8m de profundidad<sup>6,7</sup>.

Aprovechando los pozos excavados para la exploración de dicho yacimiento se extrajo anhidrita de 3 de ellos. Para los ensayos preliminares se mezcló material proveniente de los 3 pozos y se molió en un molino de bolas con ciclón de aire.

La composición química de la anhidrita así obtenida y que se denominó anhidrita tipo I, se indica en la Tabla II.

En la tabla se observa que sólo 77% del material era sulfato de calcio,

TABLA II  
ANÁLISIS QUÍMICO DE LA ANHIDRITA TIPO I

| Componente                                                | °/o   |
|-----------------------------------------------------------|-------|
| Humedad a 45°C                                            | 0,56  |
| Agua combinada a 220°C                                    | 1,27  |
| Carbonatos expresados como CO <sub>2</sub>                | 0,22  |
| Sílice y otras materias insolubles en HCl                 | 8,48  |
| Oxidos de fierro y aluminio R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,06  |
| Calcio expresado como CaO                                 | 32,20 |
| Magnesio expresado como MgO                               | 0,76  |
| Sulfatos expresados como SO <sub>3</sub>                  | 45,17 |
| Cloruros expresados como NaCl                             | 8,05  |

incluyendo 6°/o de yeso y que el material contenía una gran cantidad (8°/o) de cloruros.

Del análisis por difracción de rayos X efectuado sobre una muestra de este mineral se concluyó que era anhidrita bastante pura.

### Ensayos de resistencia

La anhidrita indicada fue molida a 4 finuras distintas (superficies específicas según Blaine de 3.600, 5.900, 8.100 y 9.500 cm<sup>2</sup>/g) y fue mezclada con una amplia gama de activadores en distintos porcentajes. Estos activadores pertenecían a los 3 grupos en que son clasificados según el ión que acelera el proceso de disolución de la anhidrita: activadores catiónicos (ejemplo sulfatos y bisulfatos de sodio y potasio, sulfatos de zinc, fierro, cobre, etc.), activadores básicos (ejemplos cales) y activadores mixtos (cemento portland y mezcla de activadores de los 2 grupos anteriores). Los aglomerantes así obtenidos fueron utilizados en la confección de probetas de pasta pura de 4 x 4 x 16 cm siguiendo el procedimiento indicado para el control de cemento (probetas RILEM). Las probetas fueron ensayadas a 3, 7 y 28 días a la flexión y cada una de las partes resultantes a la compresión.

Las resistencias obtenidas con la anhidrita tipo I fueron bajas, muy inferiores a las obtenidas en otras investigaciones. Ello se atribuyó al alto contenido de cloruros, razón por la cual se decidió analizar su efecto sobre la resistencia.

De estos ensayos pudieron, sin embargo, sacarse algunas conclusiones valiosas respecto a la influencia de los activadores y de la finura de molienda en la resistencia.

Los activadores más eficientes para la anhidrita Tipo I resultaron ser el cemento portland, la cal (viva o apagada) y un mineral denominado sulfato o sulfato de aluminio constituido por 48°/o de pickeringita, 12°/o de yeso y otros compuestos, provenientes de una mina situada en el Valle del Lluta.

La finura de la molienda demostró ser de gran importancia para el desarrollo de resistencias de las pastas, siendo éstas 3 a 5 veces mayores para la anhidrita con una superficie específica de  $8100 \text{ cm}^2/\text{g}$  que las de la anhidrita con el mismo activador pero de una superficie específica de  $3600 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Esto se debe principalmente a que la solubilidad y la velocidad de disolución de la anhidrita aumentan notablemente al aumentarse la finura del material, acelerándose la hidratación del sulfato de calcio y la decantación del yeso.

### Reducción del contenido de sal de la anhidrita

Con el fin de mejorar la calidad de la anhidrita se estudiaron algunos métodos para reducir su contenido de sal. El primer método consistió en lavar la anhidrita en bruto o molida y el segundo en cernirla a través de tamices.

El lavado de la anhidrita se basó en la disolución de la anhidrita sin activador en agua (aproximadamente 2 kg de anhidrita en 5 l de agua). Una vez decantada la anhidrita, se procedió a eliminar el exceso de agua, repitiéndose dos veces el proceso con agua fresca. El producto final contenía una proporción muy baja de sal ( $0,15\%$  al  $1\%$ ), la cual dependía del contenido en la muestra original y de la finura de la anhidrita. Para su uso posterior la anhidrita fue secada primero en un horno y posteriormente molida. La efectividad del método descrito se basa en la alta solubilidad y rapidez de disolución de la sal en el agua de lavado.

El método del cernido consistió en descartar por medio del proceso de tamizado las partículas de mayor tamaño contenidas en la anhidrita en bruto. Estas partículas, que contienen una mayor cantidad de sal que las partículas pequeñas, se forman por efecto de la humedad debido a las propiedades higroscópicas tanto de la anhidrita como de la sal. En los ensayos realizados se utilizaron tamices comprendidos entre la malla N° 10 y la criba de 2". Los resultados obtenidos fueron satisfactorios. Por ejemplo, al tamizar dos muestras utilizando la malla N° 10 (2 mm de abertura) y desechar las partículas retenidas en dicha malla (22 y  $35\%$ , en peso, del total de la anhidrita), los productos finales contenían sólo  $36\%$  del contenido de sal de las muestras originales. Para los tamices de abertura mayor las reducciones de los contenidos de sal fueron inferiores a los valores indicados y similares para las dos muestras.

Se analizaron además combinaciones de los métodos descritos con las cuales fue posible reducir el contenido de sal de  $2,2\%$  a  $0,08\%$  y de  $6,9\%$  a  $0,05\%$  para las dos muestras citadas en el ejemplo.

### Análisis de la influencia de las sales en la resistencia

Una muestra de anhidrita tratada según los procedimientos indicados anteriormente y que contenía  $0,2\%$  de cloruros fue molida a una superficie específica según Blaine ( $S_e$ ) de  $3700 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

Con esta anhidrita, activada en una primera serie de ensayos con  $5\%$  de cemento y con  $3\%$  de sulfato en una segunda serie de experiencias, se confeccionaron probetas de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$  agregándole al agua de amasado distintas

cantidades de cloruro de sodio. Ellas fueron ensayadas a los 7 días a flexión y compresión.

Las resistencias máximas obtenidas fueron satisfactorias ( $37$  y  $146 \text{ kgf/cm}^2$  para la anhidrita con  $5^\circ/\text{o}$  de cemento portland y  $37$  y  $193 \text{ kgf/cm}^2$  para anhidrita con  $3^\circ/\text{o}$  de sulfato). Las Figs. 2 y 3 muestran la variación de las resistencias a flexión y compresión con la cantidad de sal. Las resistencias están normalizadas con respecto a los valores máximos determinados para cada aglomerante. La validez del método utilizado de agregar sal a la anhidrita para determinar la influencia del contenido de cloruros se puede calificar como confiable, porque las resistencias determinadas con anhidrita tipo I (contenido de sal de  $8^\circ/\text{o}$ ) de similar finura y con el mismo activador ( $5^\circ/\text{o}$  de cemento) concuerdan con las curvas dentro de límites razonables.

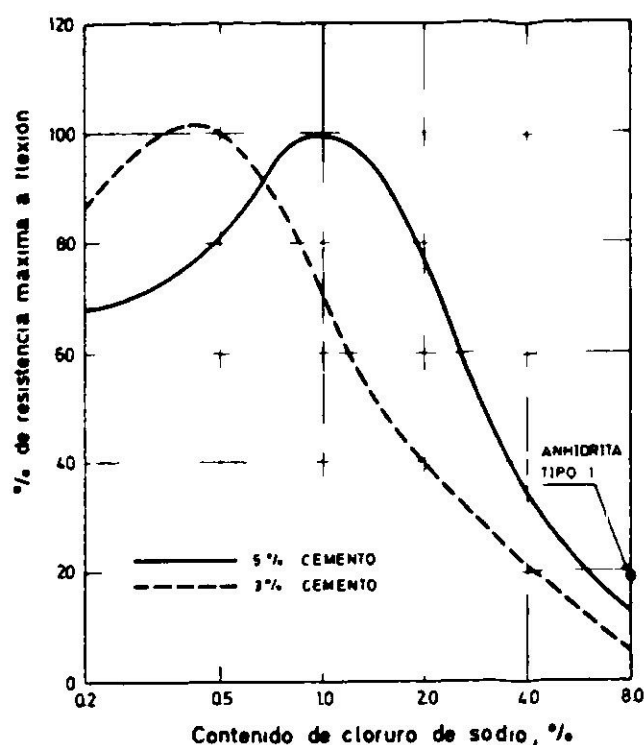


Fig. 2. Influencia del contenido de sal en la resistencia a la flexión a los 7 días de pasta pura.

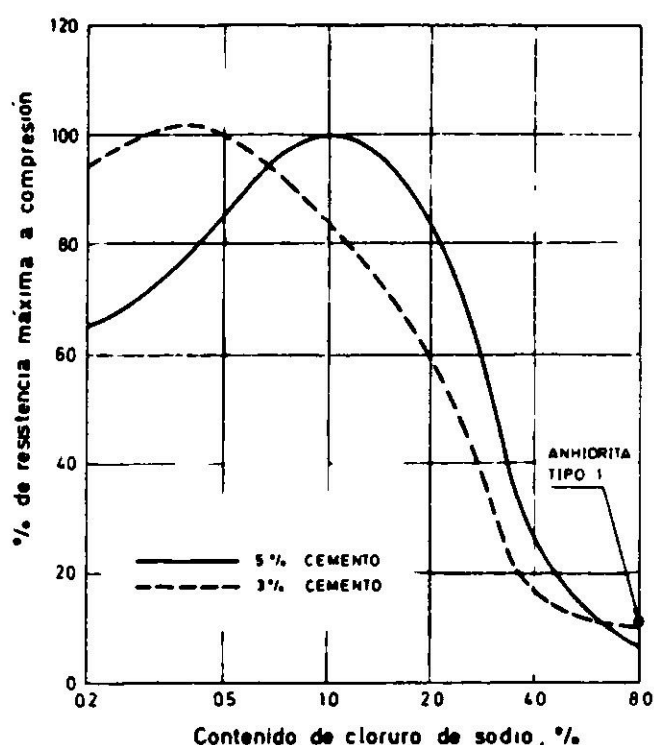


Fig. 3. Influencia del contenido de sal en la resistencia a la compresión a los 7 días de pasta pura.

Se ha evidenciado de la manera descrita la gran influencia que sobre la resistencia de la pasta tiene el contenido de sal. Para concentraciones inferiores a  $0,4^\circ/\text{o}$  los cloruros aceleran la disolución de la anhidrita, es decir, actúan como activadores, aumentando la resistencia del aglomerante. En cantidades superiores al  $1^\circ/\text{o}$ , en cambio, los cloruros son perjudiciales, produciendo un rápido descenso de la resistencia. Es así como para cantidades superiores a  $6^\circ/\text{o}$ , la resistencia es sólo de  $20^\circ/\text{o}$  a  $10^\circ/\text{o}$  de la máxima. Esta disminución de la resistencia se debe a que por una parte los cloruros disminuyen la solubilidad de la anhidrita, la cual puede llegar a ser inferior a la del yeso para temperaturas ambientes, impidiéndose así la formación de este último material y, por otra parte, a la formación de cloruro de calcio, el cual fija el agua de la pasta e impide su solidificación.

El activador de sulfato da resistencias máximas mayores que el activador de cemento. Sin embargo, dichas resistencias se producen a contenidos muy bajos de sal en la anhidrita ( $0,4^\circ/\text{o}$  en comparación con  $1,0^\circ/\text{o}$  de cemento). A bajos

contenidos de sal (menores que 0,7°/o), la activación por sulfato es más eficiente y produce resistencias mayores. Para contenidos de sal mayores que 1,5°/o la activación por cemento es más efectiva. En el rango intermedio (contenidos de cloruros entre 0,7°/o y 1,5°/o) el sulfato produce resistencias a la compresión levemente mayores y a la flexión menores que el cemento. Esta aparente contradicción pudo comprobarse en ensayos posteriores.

También se realizaron ensayos con esta anhidrita de bajo contenido de sal activada por 3°/o de cemento, 5°/o de sulfato y 2°/o de cal (hidróxido de calcio). Sus resistencias fueron muy inferiores a las resistencias con 5°/o de cemento y con 3°/o de sulfato. Por ello se seleccionaron en definitiva estos últimos activadores, fijando en estos últimos porcentajes su proporción para los ensayos restantes.

### Ensayos con morteros de anhidrita

Para determinar la disminución de la resistencia de la anhidrita con crecientes cantidades de arena y así poder analizar la factibilidad de utilizar morteros en vez de pasta pura en la construcción, se programó una serie de ensayos de morteros.

Para la confección del aglomerante se utilizó anhidrita de uno de los pozos del Salar Cototos, la cual fue tamizada empleando una criba de 3/8", de acuerdo a lo descrito anteriormente. La composición química de la anhidrita utilizada (material que pasó criba de 3/8") y que se denominó anhidrita Tipo II, se indica en la Tabla III.

TABLA III  
COMPOSICION QUIMICA ANHIDRITA TIPO II

| Componente                                  | °/o   |
|---------------------------------------------|-------|
| Humedad a 45°C                              | 0,21  |
| Agua combinada a 220°C                      | 0,16  |
| Sílice y otros materiales insolubles en HCl | 7,40  |
| Oxidos de fierro y aluminio                 | 0,74  |
| Oxidos de calcio                            | 37,12 |
| Oxidos de magnesio                          | 1,43  |
| Anhídrido sulfúrico                         | 51,55 |
| Cloruro de sodio                            | 1,05  |

De los valores indicados se deduce que esta anhidrita tenía una pureza de aproximadamente 87°/o de sulfato de calcio (con menos de 0,8°/o de yeso) y un contenido de cloruro de 1°/o que, como se indicó anteriormente, sería el ideal para la activación por cemento.

La anhidrita fue molida en un molino de bolas a una superficie específica

de 4100 cm<sup>2</sup>/g. Durante este proceso se le agregó el activador consistente en 5°/o de cemento o 3°/o de sulfato.

Los morteros fueron confeccionados con arena normal especificada por la norma de cemento y en proporciones anhidrita-arena de 2 a 1, 1 a 1, 1 a 2 y 1 a 3. Además, se confeccionaron probetas de pasta pura.

Las razones agua-aglomerante de pasta pura y de morteros 1 a 3 fueron determinadas realizando ensayos de consistencia normal con la mesa de fluidez. Para los demás morteros la razón fue fijada por interpolación.

Las dimensiones de las probetas fueron de 4 x 4 x 16 cm e inmediatamente después de su confección se almacenaron por 48 horas en una cámara húmeda (90°/o de humedad relativa) y posteriormente a temperaturas y humedad relativa ambiente. El desmolde se efectuó 24 horas después de la confección de las probetas.

Las probetas fueron ensayadas a los 3, 7, 28 y 60 días. Los resultados se indican en las Figs. 4 a 7.

Las resistencias máximas obtenidas (sobre 70 y 300 kgf/cm<sup>2</sup> para flexión y compresión respectivamente y pasta pura) se consideran buenas, dada la poca finura del aglomerante ( $S_e = 4100 \text{ cm}^2/\text{g}$ ). Sin embargo, la disminución de la resistencia con el aumento de la proporción de arena es marcada y es aproximadamente lineal hasta una relación aglomerante-arena de 1:2. Para morteros más pobres la resistencia disminuye más violentamente como puede verse en las figuras. Este brusco descenso de la resistencia de los morteros se debe a que el aglomerante de por sí ya está empobrecido. En efecto, estudios de pastas puras endurecidas han demostrado que sólo alrededor de un 50°/o de la anhidrita se transforma en yeso. El otro 50°/o de la anhidrita no actúa como aglomerante propia-

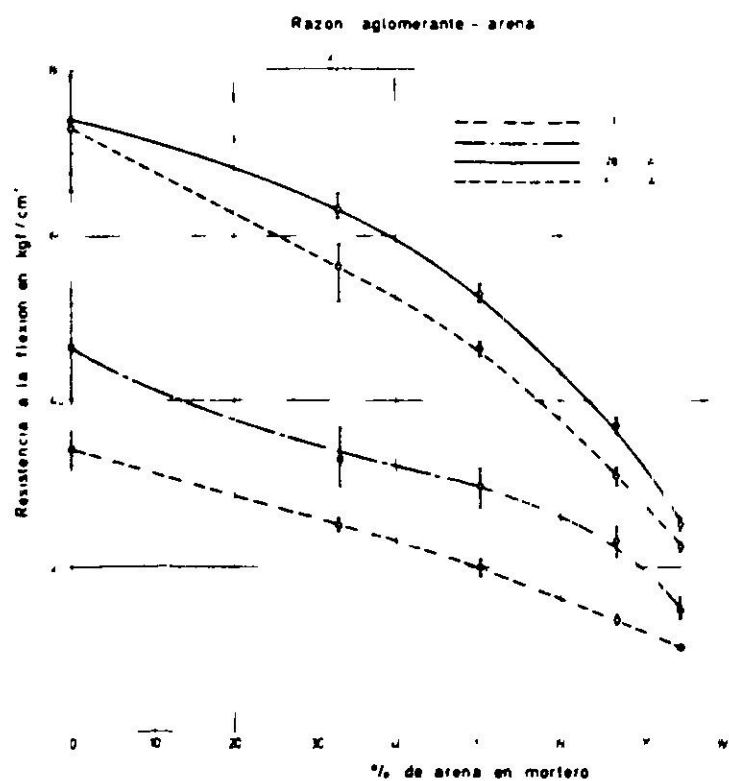


Fig. 4. Resistencias a la flexión de morteros de anhidrita Tipo II activada por 5°/o de cemento portland.

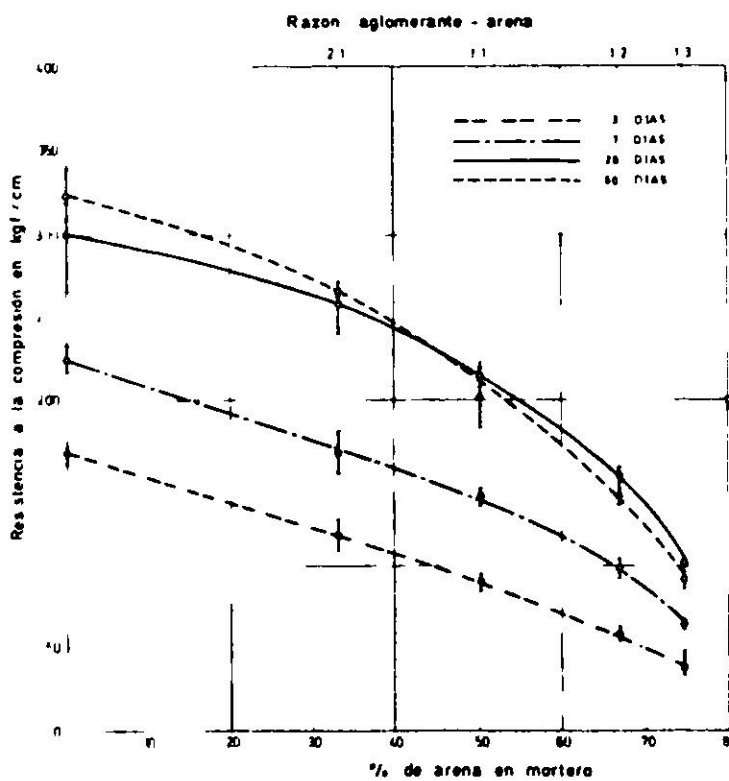


Fig. 5. Resistencias a compresión de morteros de anhidrita Tipo II activada por 5°/o de cemento portland.

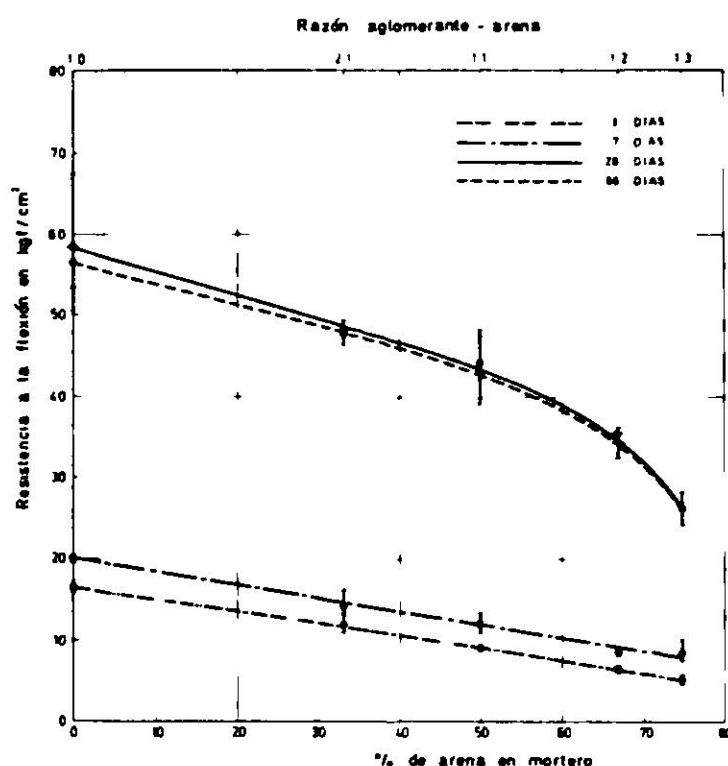


Fig. 6. Resistencias a la flexión de morteros de anhidrita Tipo II activada por 3% de sulfato.

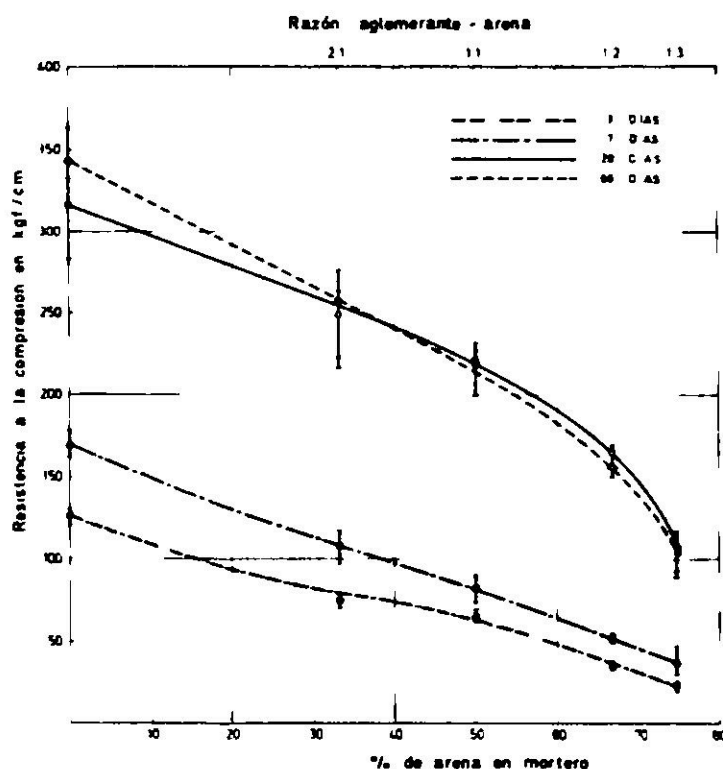


Fig. 7. Resistencias a la compresión de morteros de anhidrita Tipo II activada por 3% de sulfato.

mente tal. Esta es, por lo tanto, una característica desfavorable de la anhidrita.

Tal como era de esperar, por el contenido de sal de aproximadamente 1%, las resistencias del aglomerante con activación por cemento son superiores a las de aglomerantes con activación por sulfato. Constituyen excepciones las resistencias a flexión de mortero 1:3 a edades de 28 días o superiores y las resistencias a compresión a 28 días y más. Son notables, sin embargo, las bajas resistencias de la anhidrita activada por 3% de sulfato a 3 y 7 días. Ellas son en algunos casos inferiores a la mitad de la anhidrita con cemento. La activación por sulfato produce, por lo tanto, un endurecimiento más lento que la activación por cemento. A 28 días los morteros con activación por cemento tienen resistencias a la flexión superiores y a compresión similares a los morteros con activación por sulfatos.

Puede observarse que, en general, las resistencias disminuyen entre los 28 y los 60 días. Estas disminuciones son apreciables para el aglomerante que contiene cemento y despreciable para pastas puras, y reflejan una cierta tendencia a la disminución de resistencias para edades altas, la que debería considerarse en el diseño hasta, por lo menos, tener mayores datos experimentales y estudios al respecto.

Los cuocientes de resistencias de pastas puras y morteros de anhidrita determinados en probetas de 4 x 4 x 16 cm están comprendidos entre 1,5 y 8,4 siendo normalmente de 4 a 5 (para el cemento dicho cuociente varía entre 5 y 6).

Las densidades aparentes de las probetas variaron entre 1,9 kg/dm<sup>3</sup> para pasta pura y 2,2 kg/dm<sup>3</sup> para mortero 1:3.

### Influencia de la razón agua-aglomerante

Se confeccionaron probetas de morteros 1:3 de anhidrita Tipo 2 activada por sulfato con distintas razones agua-aglomerante y se ensayaron a 3, 7 y 28 días.

Los resultados, que se indican en la Tabla IV, demuestran una gran importancia de dicha razón en el endurecimiento del mortero.

TABLA IV

RESISTENCIAS DE MORTEROS 1:3 PARA DISTINTAS  
RAZONES AGUA-ANHIDRITA, (Ag/Anh), ANHIDRITA  
TIPO II CON 3°/o DE SULFATO

| Ag/Anh | Consistencia | Resistencias en kgf/cm <sup>2</sup> |     |    |            |    |     |
|--------|--------------|-------------------------------------|-----|----|------------|----|-----|
|        |              | Flexión                             |     |    | Compresión |    |     |
|        |              | 3                                   | 7   | 28 | 3          | 7  | 28  |
| 0,40   | seca         | 7,2                                 | 13  | 32 | 34         | 68 | 75  |
| 0,45   | normal       | 4,9                                 | 8,2 | 26 | 20         | 36 | 105 |
| 0,50   | líquida      | 3,5                                 | 5,3 | 21 | 12         | 22 | 77  |

La anhidrita requiere para su transformación en yeso de una razón agua-anhidrita de 0,264. Considerando que sólo la mitad de la anhidrita se hidrata y que para la trabajabilidad del mortero se requiere una razón agua-aglomerante mayor (0,40 a 0,45 para mortero 1:3), se deduce que el mortero posee un gran exceso de agua, que al evaporarse deja poros causando una disminución de la resistencia. Esta disminución sería tanto mayor cuanto mayor sea el exceso de agua. Puede concluirse, por lo tanto, que en la confección de morteros de anhidrita debe agregarse la cantidad mínima de agua que permita emplear la pasta\*.

### Ensayos de vigas y cilindros

Con el fin de disponer de datos de resistencias de probetas de anhidrita de mayor tamaño, se confeccionaron vigas de 10 x 10 x 30 cm y cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura de pasta pura y mortero 1:1 de anhidrita con 5°/o de cemento y pasta pura de anhidrita con 3°/o de sulfato. Los ensayos de flexión de las vigas con cargas centradas y de compresión de cilindros con medición de deformación se realizaron a los 28 días. Los resultados de los ensayos se indican en la Tabla V.

Los descensos de cono determinados en las pastas puras reflejan mal las condiciones de trabajabilidad, ya que siendo altos los valores obtenidos la pasta era muy viscosa y difícil su revoltura. El descenso medido en el mortero se considera correcto.

\* En ensayos con pastas puras de anhidrita Tipo I se comprobó que para razones agua-aglomerante muy bajas (0,20) las resistencias decrecen debido a que por no haber exceso de agua que incentive la hidratación, se hidrata solo una proporción inferior al 50°/o de la anhidrita.

**TABLA V**  
**RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE VIGAS Y**  
**CILINDROS DE ANHIDRITA TIPO II**

| Propiedades                                            | Pasta pura de anhidrita |              | Mortero 1:1  |
|--------------------------------------------------------|-------------------------|--------------|--------------|
|                                                        | Activador               |              |              |
|                                                        | 5°/o cemento            | 3°/o sulfato | 5°/o cemento |
| Descenso de cono, cm                                   | 8,7                     | 12,0         | 4,2          |
| Densidad aparente, kg/dm <sup>3</sup>                  | 1,94                    | 1,90         | 2,15         |
| Resistencia a flexión, kgf/cm <sup>2</sup>             | 47,2                    | 30,6         | 24,7         |
| Resistencia a compresión, kgf/cm <sup>2</sup>          | 224                     | 187          | 211          |
| Módulo de Young, 10 <sup>3</sup> · kgf/cm <sup>2</sup> | 120                     | 80           | 160          |
| Coefficiente de Poisson                                | —                       | —            | 0,23         |

La densidad aparente se determinó a 25 días; las resistencias, a 28 días.

La cantidad de aglomerante necesaria para la confección de las probetas fue alta y alcanzó a 1650 kg de aglomerante por m<sup>3</sup> de pasta pura y a 980 kg por m<sup>3</sup> de mortero. Las densidades aparentes resultaron similares a las de probetas de 4 x 4 x 16 cm.

Las resistencias de las probetas prismáticas y cilíndricas resultaron inferiores a las probetas de 4 x 4 x 16 cm siendo en algunos casos iguales a sólo la mitad de éstas. Las resistencias a la flexión de pasta pura activada por cemento fue satisfactoria ya que ningún valor quedó bajo 44 kgf/cm<sup>2</sup>. Las resistencias a la flexión de la pasta pura activada por sulfatos y la del mortero fueron bajas y del orden de 40 a 50°/o inferiores a las resistencias de pasta pura con 5°/o de cemento y 45°/o inferiores a sus resistencias determinadas en probetas de 4 x 4 x 16 cm.

Las resistencias a compresión no acusaron bajas tan importantes: en las pastas fue de 25°/o y 40°/o para las activaciones por cemento y sulfato respectivamente. En el mortero dicha disminución fue de sólo 4°/o lo cual se debe a las diferentes cualidades (granulometría y forma de partículas) de las arenas utilizadas.

En Figs. 8 a 10 se indican las curvas compresión-deformación longitudinal de las probetas de pasta pura y morteros. Se aprecia que las rigideces de los 3 tipos de probetas difieren notablemente, determinándose módulos de Young de  $80 \cdot 10^3$  kgf/cm<sup>2</sup> y  $120 \cdot 10^3$  kgf/cm<sup>2</sup> para pastas puras activadas con 3°/o de sulfato y 5°/o de cemento respectivamente y de  $160 \cdot 10^3$  kgf/cm<sup>2</sup> para el mortero.

Sólo se midieron deformaciones transversales en los ensayos de probetas de mortero. Las curvas compresión-deformación transversal se indican en la Fig. 11 a partir de la cual se calculó un coeficiente de Poisson de 0,23.

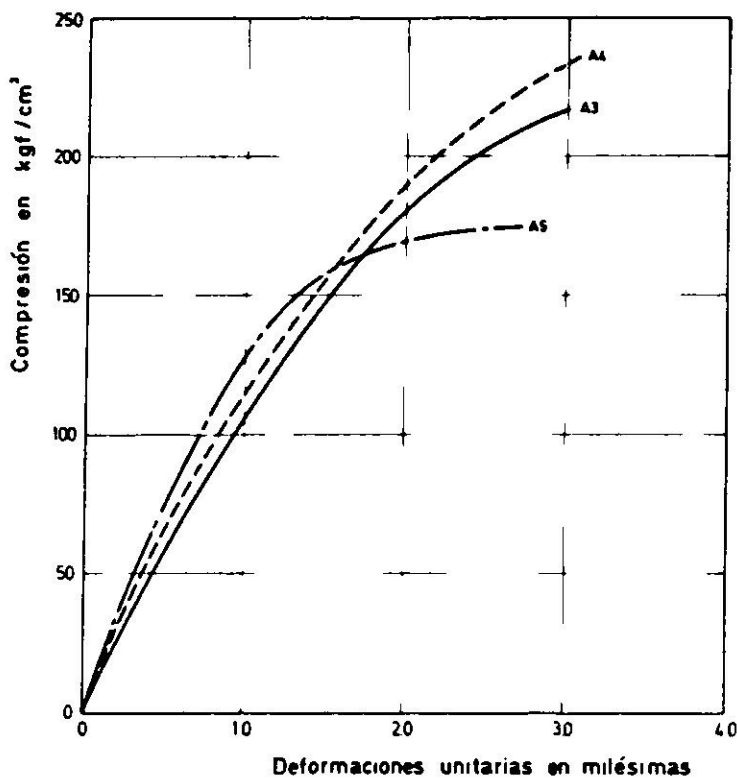


Fig. 8. Curvas compresión-deformación longitudinal para 3 probetas de pasta pura de anhidrita Tipo II activada por 5% de cemento.

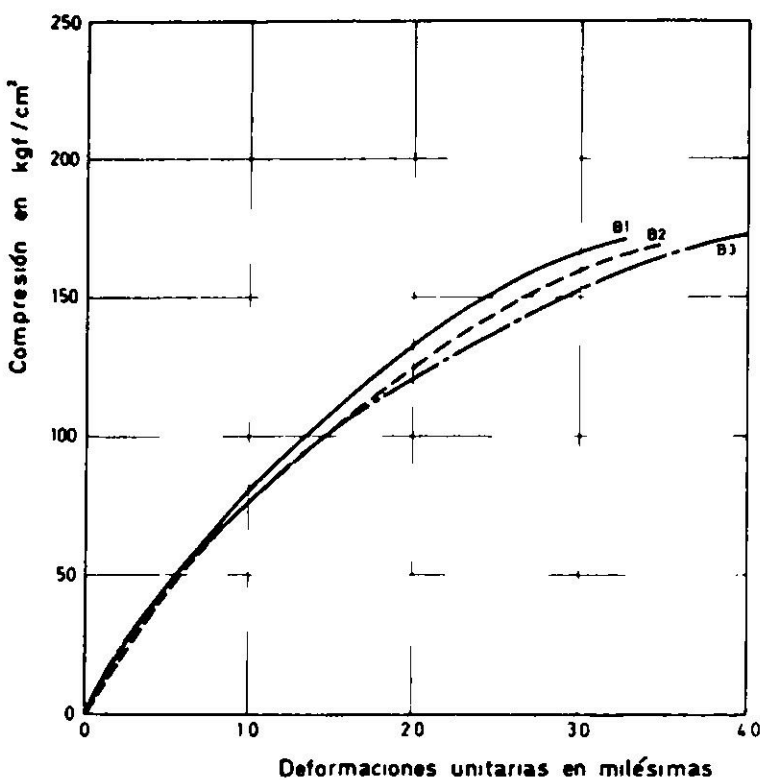


Fig. 9. Curvas compresión-deformación longitudinal de 3 probetas de pasta pura de anhidrita Tipo II activada por 3% de sulfato.

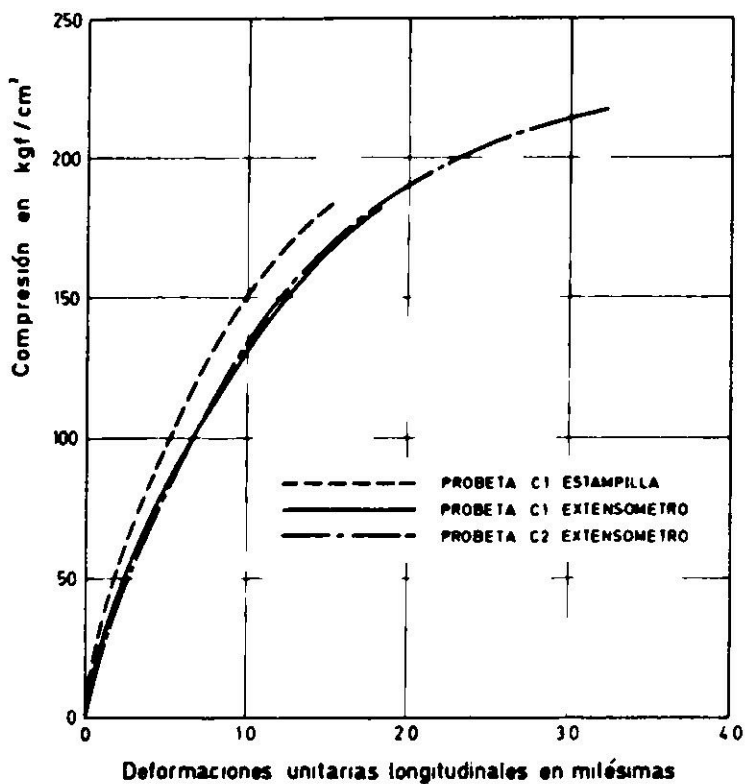


Fig. 10. Curvas compresión-deformación longitudinal para mortero de anhidrita Tipo II activada por 5% de cemento.

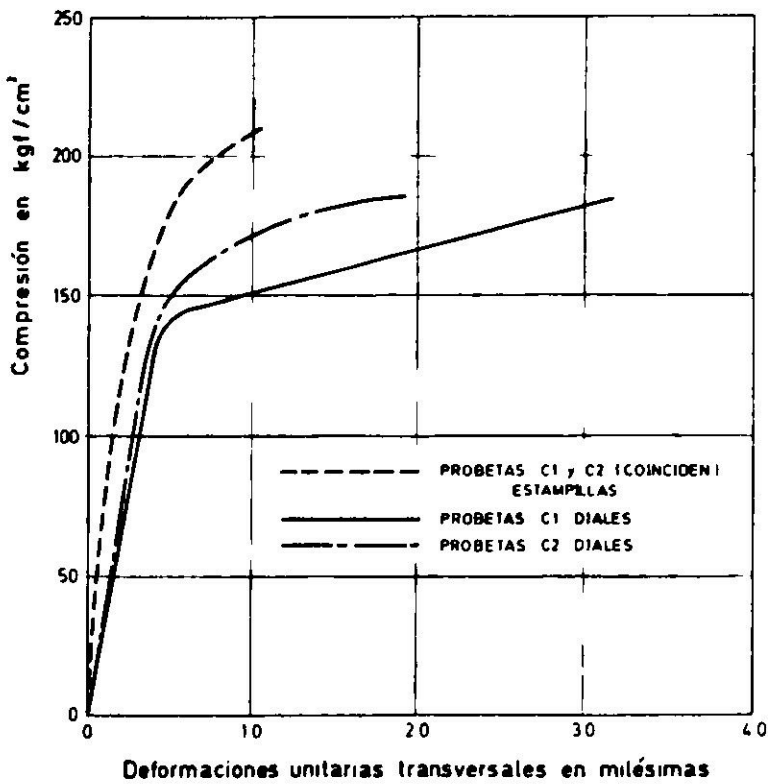


Fig. 11. Curvas compresión - deformación transversal de mortero de anhidrita Tipo II activada por 5% de cemento.

### Expansiones y retracciones de fraguado

Una propiedad favorable de la anhidrita es que sufre sólo pequeños cambios de volumen durante el endurecimiento, en comparación con pastas puras y morteros de cemento.

Conjuntamente con la confección de las probetas indicadas anteriormente, se confeccionaron probetas de 2,5 x 2,5 x 27 cm de pastas puras y morteros. Estas

probetas fueron desmoldadas a las 24 horas y medidas diariamente con un calibrador. Las probetas fueron almacenadas en las siguientes condiciones:

Las probetas A1 y A2 de pasta pura con 5°/o de cemento se mantuvieron los 2 primeros días en cámara húmeda ( $91 \pm 2^\circ$ /o humedad relativa). Posteriormente fueron guardadas en cámara controlada (a  $60 \pm 4^\circ$ /o de humedad relativa y  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura). Sólo se sacaron las probetas de esta cámara para sumergirlas durante 24 horas en agua; ello sucedió a los 34 días.

La probeta A3 (iguales a A1 y A2) se mantuvo constantemente en cámara húmeda y se sacó a los 34 días para sumergirla en agua.

La probeta B4 de pasta pura con activación por 3°/o de sulfato fue almacenada en las mismas condiciones que A1 y A2 (se sumergió en agua a los 33 días). De las 10 probetas de mortero 1:1 de anhidrita con 5°/o de cemento, 3 (probetas C2, D2 y E2) se mantuvieron 2 días en la cámara húmeda y posteriormente en la cámara controlada; 3 (probetas C3, D3 y E3) se almacenaron en una pieza sometidas a cambios de temperatura y humedad ( $22 \pm 6^\circ\text{C}$ ,  $53 \pm 7^\circ$ /o); 2 (probetas D4 y E4) se mantuvieron indefinidamente en la cámara húmeda, y 2 (C1 y C4) estuvieron 14 días en la cámara húmeda, 14 días en la cámara controlada, 24 horas sumergidas en agua y posteriormente en la cámara controlada.

Las variaciones de longitud determinadas se indican en Fig. 12 para las pastas puras y en Fig. 13 para el mortero.

Los resultados de esta experiencia confirman las conclusiones de otros estudios<sup>2,4</sup> relativas a las expansiones o retracciones de fraguado. Estas son de poca importancia si el curado del mortero o de la pasta pura se lleva a cabo en aire de baja humedad (inferior a 80°/o de humedad relativa). En estas condiciones se encontró que la pasta pura y el mortero activados por cemento experimentan retracciones muy similares, las que no sobrepasan 0,5 milésimas (o 0,5 mm/m) a 28 días. La pasta pura activada por sulfato sufre expansiones de 0,5 milésimas en los primeros días, retrayéndose posteriormente. Estas variaciones de longitud son superiores a las del hormigón (0,3 milésimas), pero inferiores a las de pasta pura y mortero de cemento (1,3 y 0,65 milésimas respectivamente)<sup>8</sup>.

Si el curado se realiza en aire muy húmedo (90°/o o más de humedad relativa) las pastas puras o morteros se expanden paulatinamente sin límite (al menos hasta los 50 días). Ello se debe a la hidratación de nuevas partículas, lo cual produce aumentos de volumen.

Es interesante analizar el efecto de la acción directa del agua sobre las probetas. Las 5 probetas sumergidas durante 24 horas en agua se expandieron rápidamente en ese lapso. Estas expansiones fueron de 0,55 milésimas en la pasta pura activada por cemento, mayores (0,66 milésimas) en la pasta pura activada por sulfato y menores (0,4 milésimas) en el mortero\*. A dicha expansión siguió una retracción de las probetas.

Se realizaron además ensayos de dilatación térmica que permitieron estimar el coeficiente de dilatación térmica en  $10^{-5}/^\circ\text{C}$ .

\* Las probetas se reblandecieron por la acción del agua, pero aún eran resistentes



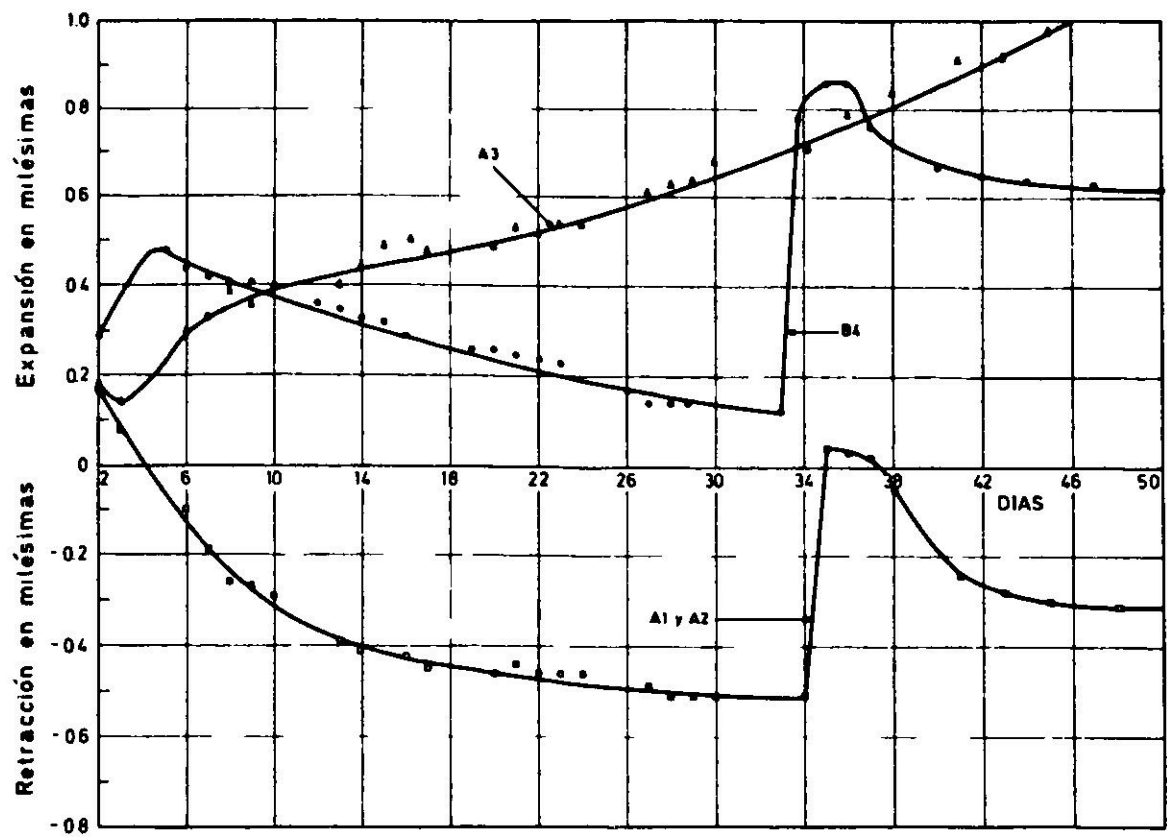


Fig. 12. Cambios de volumen de pasta pura de anhidrita Tipo II con distintos activadores y humedades durante el curado.

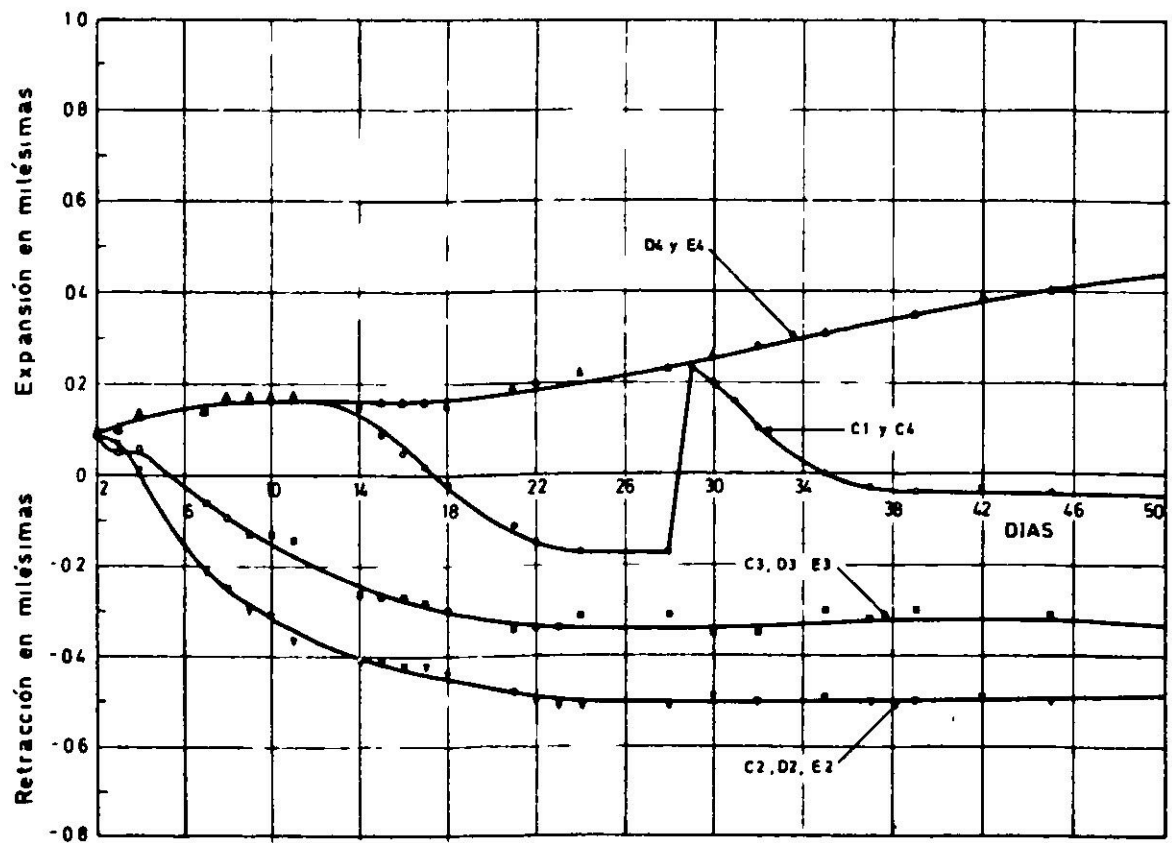


Fig. 13. Cambios de volumen de mortero de anhidrita Tipo II activada por 5% de cemento para distintas humedades relativas del aire.

CONCLUSIONES

El contenido de sal en la anhidrita tiene una gran influencia sobre el desarrollo de resistencias del aglomerante. Porcentajes de sal superiores a 1°/o son dañinos y deben ser evitados.

La anhidrita natural del Salar Cototos (anhidrita Tipo I) tiende a tener resistencias bajas debido a la gran cantidad de sal que contiene (8°/o).

Si por lavado, tamizado o algún otro procedimiento, se elimina la sal, la anhidrita adquiere resistencias satisfactorias. Así, por ejemplo, anhidrita Tipo II ( $S_e = 4100 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) con 5°/o de cemento tiene resistencias a los 28 días de 74 y 300  $\text{kgf/cm}^2$  a flexión y compresión respectivamente medidas en probetas de 4 x 4 x 16 cm.

La finura de molienda tiene una gran importancia en la resistencia del aglomerante. Ella es 3 o 4 veces mayor para anhidrita con una superficie específica Blaine ( $S_e$ ) de 8000  $\text{cm}^2/\text{g}$  que para anhidrita con  $S_e = 3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

Las resistencias de morteros de anhidrita disminuyen apreciablemente al aumentar el contenido de arena. Como promedios aproximados para ambas resistencias y activadores (5°/o cemento y 3°/o sulfato) se pueden indicar los siguientes porcentajes aproximados de resistencia con respecto a pasta pura:

| Mortero<br>relación aglomerante-arena (en peso) | $\frac{\text{resistencia mortero}}{\text{resistencia pasta pura}} \cdot 100$ |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 2:1                                             | 85                                                                           |
| 1:1                                             | 70                                                                           |
| 1:2                                             | 55                                                                           |
| 1:3                                             | 35                                                                           |

Las resistencias a la flexión determinadas en vigas de 10 x 10 x 30 cm y a compresión determinadas en cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura fueron muy inferiores a las determinadas en probetas de 4 x 4 x 16 cm.

Los módulos de Young de probetas de anhidrita variaron según el activador utilizado y según se tratara de pasta pura o mortero. Para pasta pura de anhidrita Tipo II se determinaron valores de  $80 \cdot 10^3$  y  $120 \cdot 10^3 \text{ kgf/cm}^2$  (activador: 3°/o sulfato y 5°/o cemento respectivamente) y de  $160 \cdot 10^3 \text{ kgf/cm}^2$  para el mortero.

El coeficiente de Poisson determinado para el mortero de anhidrita fue de 0,23.

Los cambios de volumen experimentados por probetas de anhidrita dependen de la humedad del aire durante el curado. Ellos son pequeños (+ 0,5 a - 0,5 milésimas para anhidrita Tipo II) si el aire que las rodea tiene una humedad no superior al 80°/o. En aire con humedad alta (90°/o o más) o en agua las probetas sufren grandes expansiones.

El consumo de aglomerante en la confección de elementos de anhidrita es alto y asciende a 1650 kg por  $\text{m}^3$  de pasta pura y 980 kg por  $\text{m}^3$  de mortero 1:1.

De las conclusiones expuestas se puede inferir que con la utilización de la anhidrita en la construcción de viviendas y de pavimentos se podría impulsar fuertemente el desarrollo del norte de Chile. Esto cobra mayor énfasis si se considera la casi total ausencia de otros materiales de construcción autóctonos propios de la zona y la reactivación en el uso de otros recursos zonales y de mano de obra que ello significaría.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos, entre otras a las siguientes instituciones y personas: a la Junta de Adelanto y Municipalidad de Arica por su ayuda en la extracción y envío de muestras a Santiago, a la Oficina de Desarrollo Científico y Creación Artística de la Universidad de Chile por la asignación de fondos para financiar parcialmente las investigaciones realizadas, al Laboratorio Zonal del IDIEM en Arica por la entusiasta colaboración y trabajo conjunto de todo su personal, al Instituto de Investigaciones Geológicas y al geólogo Sr. Jaime Sayes por su aporte en la prospección de recursos y ayuda en terreno, al arquitecto Sr. Teodoro Schmidt por algunas de sus informaciones logradas en construcciones experimentales con anhidrita y a los profesores ingenieros Sres. Ernesto Gómez y Atilano Lamana por sus valiosas sugerencias y comentarios.

### REFERENCIAS

1. IDIEM. *Informe sobre la anhidrita*. Laboratorio de caminos, Santiago, 1950
2. HEILBRAUM, R. L. *Estudio de morteros y bloques de anhidrita*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile, 1971.
3. VILA, T. (padre). *Recursos minerales no-metálicos de Chile*. 3ª edición, Universitaria, 1953
4. KLOHN, C. *Informe sobre los yacimientos de anhidrita y yeso en la provincia de Antofagasta*, 1961.
5. OTTEMANN, J. *Baustoff Anhydrit*. Berlín, 1952.
6. SAYES, J. *Yacimiento de anhidrita Salar Cototo*. IIG Arica, 1975.
7. BINDER, G. *Procesamiento, características de resistencia y algunos usos de la anhidrita en la ingeniería civil*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 1976.
8. PAPADAKIS, M. y VENUAT, M. *Fabricación, características y aplicaciones de los diversos tipos de cementos*. Barcelona, 1968.

### EXPERIMENTAL STUDY FOR USING ANHYDRITE IN CONSTRUCTIONS

#### SUMMARY

*Anhydrite from the Salar de Cototos, Arica, Chile was analysed to obtain its chemical composition, compressive and bending strength together with its strain properties using pure paste and mortars with different sand anhydrite proportions. The effects of anhydrite fineness, accelerators employed, sodium chloride content and methods for its reduction were analysed.*