

otra área donde los aditivos se diseñarán para trabajar ventajosamente en favor del productor de concreto.

Al principio de esta presentación se hizo ver que el concreto es el material para construcción del que más se abusa de todos los que tenemos que usar en estos días. El grado de abuso ha sido en alguna forma aliviado con el uso de los aditivos de hoy en día. Mientras que podría extenderse nuestra imaginación, no está más allá del dominio de lo posible para esperar que estos abusos se eliminarán por completo con los futuros avances tecnológicos en materia prima, métodos de mezclado, colado y acabado del concreto y en aditivos químicos.

El desarrollo de un aditivo que actúe de tal forma que elimine la necesidad de usar yeso, produce un concreto con mayor estabilidad dimensional. Este tipo de aditivo es producido en un horno de pólvora, debido a la reacción que ocurre entre el óxido de calcio y el óxido de aluminio. Este tipo de aditivo es producido en un horno de pólvora, debido a la reacción que ocurre entre el óxido de calcio y el óxido de aluminio.

Este otro aspecto de este problema que merece comentarios. Uno de los dolores de cabeza que está atacando a la industria del concreto hoy en día es el problema de la expansión del concreto. Este tipo de aditivo es producido en un horno de pólvora, debido a la reacción que ocurre entre el óxido de calcio y el óxido de aluminio.

Una de las razones básicas para mantener un nivel bajo de alcalinidad en el concreto es el problema de la expansión del concreto. Este tipo de aditivo es producido en un horno de pólvora, debido a la reacción que ocurre entre el óxido de calcio y el óxido de aluminio.

La segunda razón por la que hay que mantener bajo el nivel de alcalinidad en el concreto es el problema de la expansión del concreto. Este tipo de aditivo es producido en un horno de pólvora, debido a la reacción que ocurre entre el óxido de calcio y el óxido de aluminio.

Como una gran parte de nuestros futuros trabajos serán hechos por el hombre usando materiales de desperdicio, la posibilidad de interacción entre estos aditivos y el cemento es un problema que debe ser considerado. Este tipo de aditivo es producido en un horno de pólvora, debido a la reacción que ocurre entre el óxido de calcio y el óxido de aluminio.

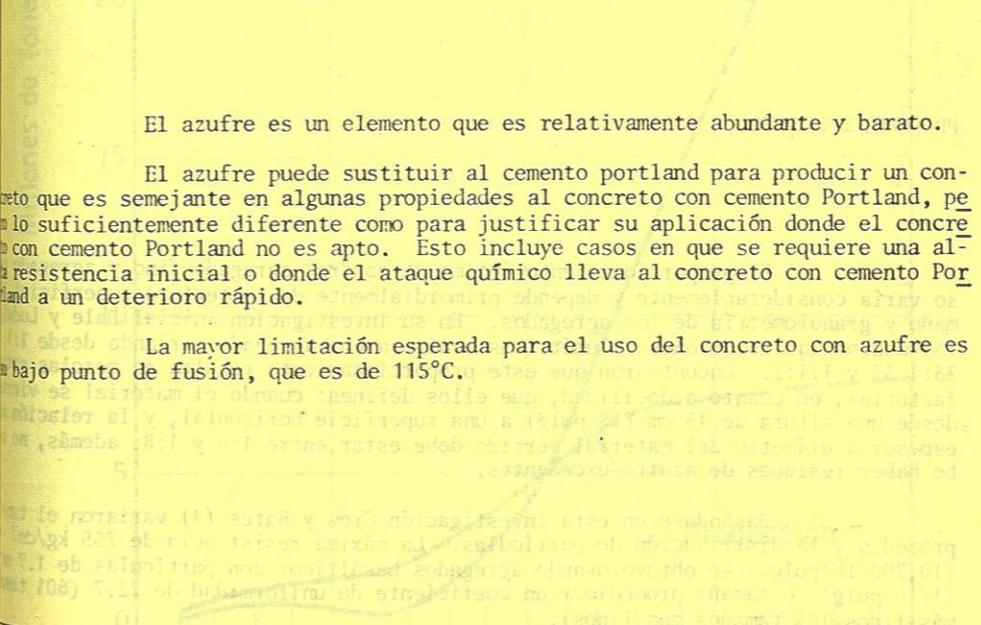
Traducción: Ing. Carlos Macías Campirán.

Figura 1

CONCRETO CON AZUFRE.

PRODUCCION Y ALMACENAMIENTO

El azufre es un elemento que es relativamente abundante y barato. El azufre puede sustituir al cemento portland para producir un concreto que es semejante en algunas propiedades al concreto con cemento Portland, pero lo suficientemente diferente como para justificar su aplicación donde el concreto con cemento Portland no es apto. Esto incluye casos en que se requiere una alta resistencia inicial o donde el ataque químico lleva al concreto con cemento Portland a un deterioro rápido. La mayor limitación esperada para el uso del concreto con azufre es el bajo punto de fusión, que es de 115°C.



Profesor Asociado en la Facultad de Ingeniería Civil en la Universidad de Calgary en Alberta, Canadá. Miembro activo del comité A 23.1 de la Asociación Canadiense de Estándars. Director del Capítulo Albertense del Instituto Americano del Concreto. Miembro del Grupo de Investigación de la Universidad de Calgary.

ESTADO ACTUAL DE CONOCIMIENTOS SOBRE CONCRETO CON AZUFRE.

Concreto con azufre o "concreto sulfuroso" es el nombre que generalmente se aplica a mezclas de agregados minerales, gruesos y finos, cementados con azufre. A principios de siglo hubo un gran interés en el uso de azufre, en combinación con varios materiales "de relleno"; este interés se extendió en un período hasta de 150 años antes (1). El interés sobre concreto sulfuroso se inició hace 10 años aproximadamente con una investigación desarrollada por Dale y Ludwig en el Southwestern Research Institute de San Antonio, Texas (2, 3); esta investigación fue seguida por otra desarrollada por Crow y Bates en el U.S. Bureau of Mines en Spokane, Washington (4). Durante los últimos años, las investigaciones más importantes con concretos sulfurosos han sido desarrolladas en Guatemala (5, 6 y 7) utilizando azufre y piedra pómez de la localidad, y en Canadá (8 al 14); en este último lugar, debido al bajo precio del azufre y a una gran cantidad de este material almacenado en la Provincia de Alberta y que corresponde a 14.5 millones de toneladas al finalizar 1974, (35) Figura 1. Se ha encontrado que el concreto sulfuroso es un material con posibilidades de aplicación en un gran número de situaciones -- que puede elaborarse con una gran variedad de agregados. Este material tiene atributos que sin duda son de gran valor en ciertos casos pero que al mismo tiempo tiene un gran número de desventajas que probablemente evitarían su utilización en la mayoría de los casos en que actualmente se usa concreto a base de cemento Portland. Antes de utilizar este material es necesario considerar sus ventajas potenciales y desventajas posibles y comparar éstas con los ahorros en costos provenientes de su utilización. Antes de utilizar este material en forma extensa es también necesario desarrollar un programa de ensayos de laboratorio y de campo.

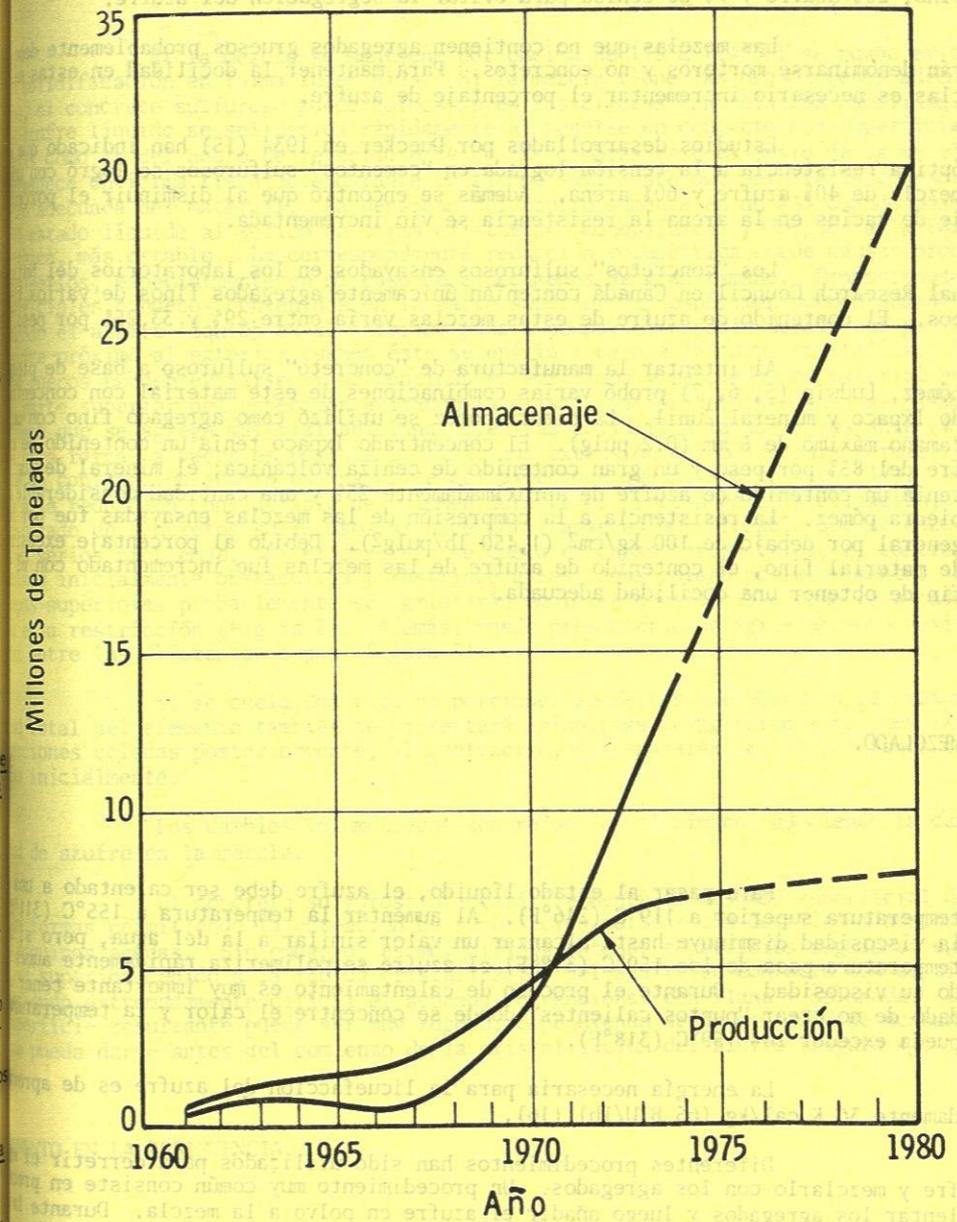
PROPORCIONAMIENTO.

El proporcionamiento óptimo de azufre, agregado fino y agregado grueso varía considerablemente y depende primordialmente de la textura superficial, tamaño y granulometría de los agregados. En su investigación inicial Dale y Ludwig (3) usaron las relaciones volumétricas azufre-arena-agregado variando desde 1:1.33:1.33 y 1:1:2. Encontraron que este proporcionamiento resulta en mezclas satisfactorias, en cuanto a docilidad, que ellos definen: cuando el material se vierte desde una altura de 45 cm (18 pulg) a una superficie horizontal, y la relación de espesor a diámetro del material vertido debe estar entre 1:6 y 1:8; además, no debe haber residuos de azufre excedentes.

Basándose en esta investigación Crow y Bates (4) variaron el tamaño promedio y la distribución de partículas. La máxima resistencia de 755 kg/cm² (10,700 lb/pulg²) se obtuvo usando agregados basálticos con partículas de 1.7 mm (1/16 pulg) de tamaño promedio y un coeficiente de uniformidad de 22.7 (60% tamaños más finos/10% tamaños más finos).

Esta mezcla se elaboró con un 22.7% de azufre, por peso. Crow y Bates encontraron que el porcentaje de agregados finos menores que 74 micras (malla 200) tuvo un efecto considerable en la docilidad de las mezclas. Las mezclas con un porcentaje excesivo de materiales finos tuvieron muy baja docilidad mientras que, en mezclas con bajo contenido de finos, el azufre tiene una tendencia a segre-

PRODUCCION Y ALMACENAJE DE AZUFRE EN CANADA



garse. Crow y Bates hacen la recomendación de usar material fino menor a 74 micras en una cantidad igual al 10% del peso de la mezcla.

Malhotra (9) usando agregado grueso con un tamaño máximo de 19 mm (3/4 pulg) encontró que el porcentaje óptimo de azufre, por peso, es del 25%. Para mejorar la docilidad de la mezcla se añadió un 6% de polvo de sílica.

Una mezcla típica usada en la Universidad de Calgary contiene 44% agregado grueso (caliza) con un tamaño máximo de 9.5 mm (3/8 pulg), 29% agregado fino, 20% azufre y 7% de ceniza para evitar la segregación del azufre.

Las mezclas que no contienen agregados gruesos probablemente deberán denominarse morteros y no concretos. Para mantener la docilidad en estas mezclas es necesario incrementar el porcentaje de azufre.

Estudios desarrollados por Duecker en 1934 (15) han indicado que la óptima resistencia a la tensión lograda en "cementos" sulfurosos se logró con una mezcla de 40% azufre y 60% arena. Además se encontró que al disminuir el porcentaje de vacíos en la arena la resistencia se vio incrementada.

Los "concretos" sulfurosos ensayados en los laboratorios del National Research Council en Canadá contenían únicamente agregados finos de varios tipos. El contenido de azufre de estas mezclas varía entre 29% y 33.25% por peso.

Al intentar la manufactura de "concreto" sulfuroso a base de piedra pómez, Ludwig (5, 6, 7) probó varias combinaciones de este material con concentrado Ixpaco y mineral Zunil. La piedra pómez se utilizó como agregado fino con un tamaño máximo de 5 mm (0.2 pulg). El concentrado Ixpaco tenía un contenido de azufre del 85% por peso y un gran contenido de ceniza volcánica; el mineral de Zunil tenía un contenido de azufre de aproximadamente 25% y una cantidad considerable de piedra pómez. La resistencia a la compresión de las mezclas ensayadas fue por lo general por debajo de 100 kg/cm² (1,450 lb/pulg²). Debido al porcentaje excesivo de material fino, el contenido de azufre de las mezclas fue incrementado con el fin de obtener una docilidad adecuada.

MEZCLADO.

Para pasar al estado líquido, el azufre debe ser calentado a una temperatura superior a 119°C (246°F). Al aumentar la temperatura a 155°C (311°F) la viscosidad disminuye hasta alcanzar un valor similar a la del agua, pero si la temperatura pasa de los 159°C (318°F) el azufre se polimeriza rápidamente aumentando su viscosidad. Durante el proceso de calentamiento es muy importante tener cuidado de no crear "puntos calientes" donde se concentre el calor y la temperatura pueda exceder los 159°C (318°F).

La energía necesaria para la licuefacción del azufre es de aproximadamente 36 K cal/kg (65 BTU/lb) (16).

Diferentes procedimientos han sido utilizados para derretir el azufre y mezclarlo con los agregados. Un procedimiento muy común consiste en precalentar los agregados y luego añadir el azufre en polvo a la mezcla. Durante la rotación de la revolvedora el calor emitido por los agregados derrite el azufre que ha sido incorporado a la mezcla. Debido a la gran superficie de los agregados el

azufre se derrite rápidamente.

MEZCLADO.

Si la mezcla se mantiene por encima de 119°C (246°F) se puede evitar la solidificación en forma indefinida. Si la mezcla tiene las proporciones adecuadas, el concreto sulfuroso puede colocarse en las cimbras con relativa facilidad. El azufre líquido se solidifica rápidamente al ponerse en contacto con superficies frías como la del acero de refuerzo o la de las cimbras pero el resto de la mezcla permanece en forma trabajable durante un tiempo suficiente que permite la compactación adecuada del material. La densidad del azufre aumenta en un 13% cuando pasa del estado líquido al sólido en forma cristalina (monoclínica) y después a la forma triclínica, más estable. La correspondiente reducción volumétrica puede causar problemas serios, especialmente en el caso de especímenes de gran tamaño. Depresiones superficiales o huecos contenidos en la parte superior del espécimen pueden aparecer cuando el azufre líquido en el interior pasa a ocupar el espacio desalojado por el azufre próximo al exterior cuando éste se enfría y pasa a la forma cristalina. Estos huecos pueden evitarse si se continúa el varillado y mezclado del material en la parte superior del espécimen evitando la cristalización del material, al mismo tiempo que se agrega material adicional mientras solidifica la parte restante (4). Otra forma, a veces es posible utilizar una extensión del molde para permitir que la contracción ocurra en una parte del espécimen que no sea crítica (17). Debido a la reducción considerable de volumen durante el proceso de cristalización, si el colado de concretos sulfurosos se hace por etapas es muy probable que se encuentren serios problemas. Si el concreto se cuela en capas horizontales, el concreto colado inicialmente obstaculiza y restringe a las capas colado posteriormente. Las capas superiores probablemente se agrietarán en forma considerable como resultado de esta restricción (Figura 2). Además, puede presentarse un agrietamiento horizontal entre las diferentes capas (Figura 3).

Si se cuela una viga en porciones sucesivas que abarquen la profundidad total del elemento también se presentarán problemas de agrietamiento pues las porciones coladas posteriormente, al contraerse, se separarán de las porciones coladas inicialmente.

Los cambios volumétricos son reducidos al mínimo reduciendo la cantidad de azufre en la mezcla.

El concreto sulfuroso adoptará fielmente el acabado superficial de las formas permitiendo la obtención de superficies pulidas con detalles minuciosos y esquinas agudas. Sin embargo, es muy difícil obtener superficies regulares en la parte superior debido a la rápida cristalización del azufre en contacto con el aire, haciendo extremadamente difícil el acabado convencional con llana y aplanado. La superficie resultante puede ser muy rugosa, dependiendo de la cantidad de acabado que pueda darse antes del comienzo de la cristalización del azufre (Figura 4).

EFECTO EN LA RESISTENCIA.

El concreto sulfuroso adquiere su resistencia en una forma rápida --



Foto 2 Grieta Vertical por Contracción Térmica

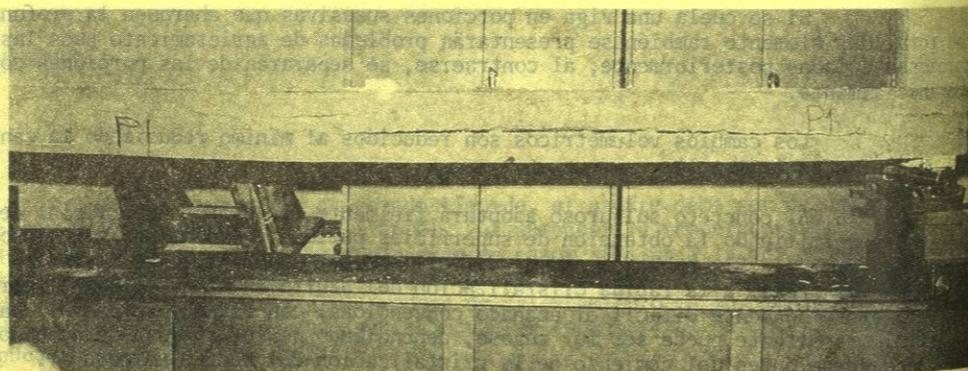


Foto 3 "Junta Fría" Horizontal

Resistencia MPa

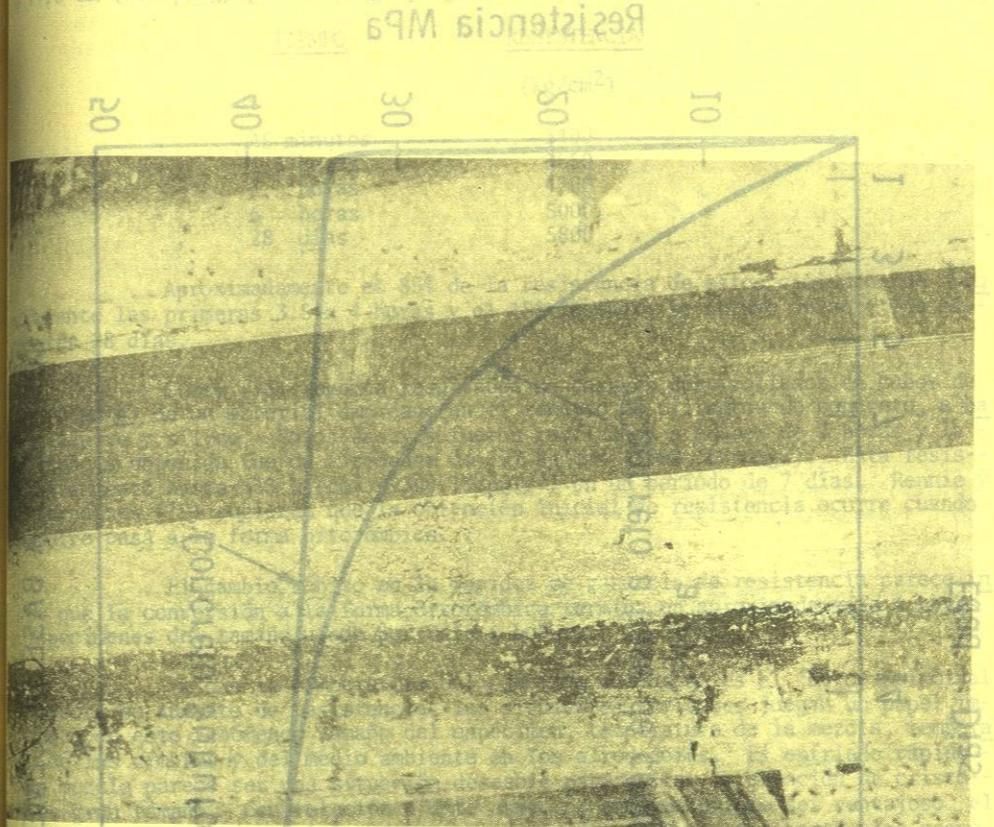


Foto 4 Extradoz de la Viga, Superficie Rugosa

Es posible fabricar concreto sulfuroso con resistencias comparables a las obtenidas en concreto a base de cemento Portland de alta resistencia. Valen los tipos de la resistencia a la compresión que han sido reportados por los varios investigadores durante los últimos 10 años. Estas resistencias pueden compararse con las resistencias normales utilizadas en concreto de cemento fundamentalmente en el tipo y resistencia de los agregados, de la gran cantidad de los mismos así como de la cantidad de azufre utilizado en la mezcla.

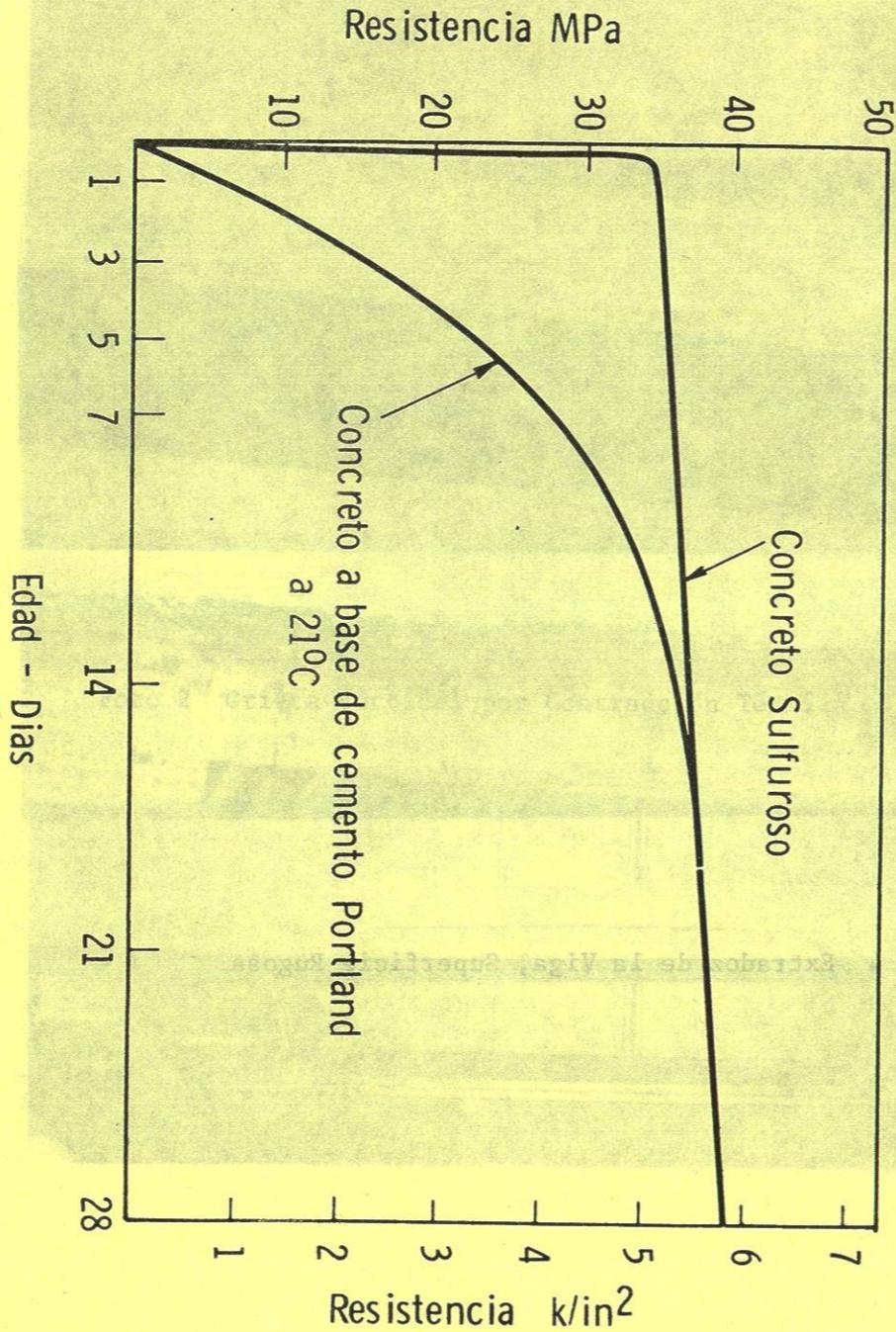


Foto 3 "Junta Fría" Horizontal

(Figura 5) en cuanto el azufre fundido empieza a tomar la forma cristalina monoclí... a temperaturas por debajo de 119°C (246°F). Cuando la temperatura disminuye... por debajo de 95.4°C (204°F) el azufre empieza a adoptar la forma cristalina orto... rónica. Las resistencias tempranas obtenidas por Dale y Ludwig con especímenes... de 11.5 cm (4.5 pulg) por 23 cm (9 pulg) se muestran a continuación:

TIEMPO	RESISTENCIA (kg/cm ²)
45 minutos	3400
1.5 horas	3650
3 horas	4700
6 horas	5000
28 días	5800

Aproximadamente el 85% de la resistencia de estos cilindros se obtu... durante las primeras 3.5 a 4 horas y el 15% restante se obtuvo durante los si... guientes 28 días.

Curry (18) reporta resultados de ensayos desarrollados en cubos de... 5 cm (2 pulg) de un material empleado en el recapeo de cilindros de concreto, a ba... se de azufre y sílice. Estos ensayos fueron realizados a edades de 2 horas y la... resistencia obtenida fue de alrededor de 357 kg/cm² (5800 lb/pulg²). Esta resis... tencia aumentó hasta 653 kg/cm² (9300 lb/pulg²) en un período de 7 días. Rennie y... colaboradores (19) sugieren que la obtención inicial de resistencia ocurre cuando... el azufre pasa a la forma ortorómbica.

El cambio súbito en la rapidez de ganancia de resistencia parece in... dicar que la conversión a la forma ortorómbica termina en aproximadamente 4 horas... en especímenes del tamaño usado por Dale y Ludwig.

Ya que la temperatura del concreto sulfuroso es el factor principal... que afecta su aumento de resistencia, las siguientes variables juegan un papel im... portante en este fenómeno: tamaño del espécimen, temperatura de la mezcla, tempera... tura de las cimbras y del medio ambiente en los alrededores. El enfriado rápido... de la mezcla parece ser una situación deseable para evitar la creación de crista... les de gran tamaño. Con relación a este aspecto, también parece ser ventajoso el... tener una mezcla con materiales finamente divididos ya que estas partículas peque... ñas propician la formación de núcleos que vendrán a inducir la formación de un... gran número de cristales pequeños en lugar de un número limitado de cristales gran... des.

RESISTENCIA DEL CONCRETO SULFUROSO.

Es posible fabricar concreto sulfuroso con resistencias comparables... a las obtenidas en concretos a base de cemento Portland de alta resistencia. Valo... res típicos de la resistencia a la compresión que han sido reportados por los va... rios investigadores varían entre 350 kg/cm² y 500 kg/cm² (5000 lb/pulg² y 7000... lb/pulg²) o más. Estas resistencias pueden compararse con las resistencias normal... mente utilizadas en concreto presforzado. La resistencia depende fundamentalmente... del tipo y resistencia de los agregados, de la granulometría de los mismos así co... mo de la cantidad de azufre utilizada en la mezcla.

CONCRETO A BASE DE CEMENTO PORTLAND vs CONCRETO SULFUROSO