

20  
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ACATLAN"



"PROPIEDADES MECANICAS Y APLICACIONES DE  
CONCRETOS CON AZUFRE".



T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A :  
HECTOR ENRIQUE NEVARES ZAPIEN



Acatlán, Edo. de México

1990

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## CONTENIDO

	PAG
INTRODUCCION.....	1
OBJETIVOS.....	3
CAPITULO I.- CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES PARA UN CONCRETO NORMAL.....	7
1.1 Agregados.....	7
1.1.1 Arena Andesítica Azul.....	8
1.1.2 Arena Andesítica Rosa.....	9
1.1.3 Grava Andesítica 25 mm.....	10
1.1.4 Grava Andesítica 13 mm.....	11
CAPITULO II.- EL AZUFRE COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION.....	15
II.1 Aditivos.....	18
II.2 Plastificantes.....	20
II.3 Colorantes.....	22
CAPITULO III.- PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DEL CONCRETO CON AZUFRE.....	32
III.1 Resistencia a la compresión y a la tensión.....	33
III.2 Resistencia a la abrasión y al ataque químico.....	35
III.3 Resistencia al impacto.....	38
III.4 Permeabilidad.....	39
III.5 Refuerzo de concreto de azufre.....	40

CAPITULO IV.- DOSIFICACION DE CONCRETOS DE AZUFRE.....	61
IV.1 Relación Grava/Arena.....	62
IV.2 Consumo de azufre.....	63
IV.3 Consumo de Aditivo Plastificante.....	65
CAPITULO V.- APLICACIONES.....	74
V.1 Materiales Impregnados con azufre.....	74
V.2 Recubrimiento con azufre.....	76
V.3 Pavimentación a base de azufre-asfalto.	77
V.4 Espumas de azufre.....	79
CAPITULO VI.- RECOMENDACIONES DE DISEÑO Y CONSTRUCCION.	94
CAPITULO VII.- ASPECTOS ECONOMICOS Y REFERENCIAS.....	100
CONCLUSIONES.....	109

## INTRODUCCION

El elevado índice de crecimiento demográfico en México ha incrementado de manera notable el déficit de vivienda. Las instituciones gubernamentales, utilizando sistemas de edificación tradicionales y materiales industrializados, no pueden satisfacer la demanda de viviendas requeridas. Por otra parte - el pueblo utilizando métodos tradicionales materiales locales y sus propios recursos ha producido viviendas de calidad - aceptable y de bajo costo, que responden directamente a sus necesidades y condiciones regionales. Sin embargo estos procedimientos no han dado la solución al problema habitacional, ya - que en muchas ocasiones no satisfacen los niveles mínimos de - higiene, durabilidad y seguridad, por lo que surge la necesidad de crear viviendas de bajo costo con materiales de construcción económicos y de buena calidad. En la búsqueda afanosa de nuevos procedimientos constructivos, nuevos materiales o mejoras a los existentes, ha jugado un papel decisivo la inves

tigación en laboratorios de Instituciones de Educación Superior y de Empresas Privadas, para proporcionar técnicas que se apliquen en muchos países, basados en métodos de construcción y auto-construcción. Una tecnología que ha sido desarrollada en algunos países como Estados Unidos, Canadá, Inglaterra, Guatemala y Filipinas, es el utilizar como materia prima el azufre, material que representa una solución atractiva al problema de la vivienda.

En lo que concierne a nuestro país, poco esfuerzo se ha destinado al aprovechamiento de este material y mucho menos para su uso en la construcción de vivienda. Al observar una gráfica de producción vs. exportación (Pág. 6--fig. 1) nos damos cuenta que el 70% se da a la exportación y que solo un 30% se destina al consumo interno. Esto nos demuestra, que no estamos utilizando de una manera adecuada una de nuestras riquezas naturales, que tenemos y que a su vez nos obliga a que juegue un papel importante en la solución del problema de la vivienda.

**OBJETIVOS:**

El objetivo de este trabajo es contribuir de alguna manera a la solución del problema habitacional, utilizando concretos de azufre, donde se determinarán sus propiedades físicas, mecánicas, procedimientos constructivos, mezclas y proporcionamientos, aspectos económicos de su empleo en la construcción, estableciendo comparaciones con los concretos de cemento Portland.

Cabe mencionar que entre las principales ventajas del empleo del azufre como material de construcción tenemos las siguientes:

- a) El azufre es un material abundante y relativamente barato en México, como en otros países en vías de desarrollo (Pág. 6-fig. 1).
- b) El azufre y sus compuestos tienen características físicas que se presentan para su uso en la construcción como:
  - 1.- No tiene olor ni sabor y no causa daños cuando está en contacto con la piel.
  - 2.- Tiene adherencia con una gran variedad de materiales.

- 3.- Es impermeable y no poroso.
  - 4.- Tiene buenas características de aislamiento térmico y eléctrico.
  - 5.- Los concretos de azufre tienen resistencia a la compresión comparable a la del concreto de cemento Portland y admiten refuerzo con fibras que aumentan su resistencia a la tensión, a la flexión y al impacto.
- c) Las técnicas para fundir, mezclar, vaciar y colar el azufre son sencillas.
  - d) Los materiales de construcción a base de azufre se pueden producir con poca inversión en equipo.
  - e) El período de solidificación es muy corto y el producto puede ser utilizado casi inmediatamente.
  - f) Concretos de azufre pueden ser moldeados en una gran variedad de formas; con acabados tersos de alta precisión y utilizando moldes hechos de diversos materiales.
  - g) Los productos de azufre requieren de poco mantenimiento.
  - h) El consumo de energía para fundir el azufre es relativamente bajo.
  - i) Es factible obtener materiales de construcción a partir de desechos industriales y de azufre natural con varios niveles de impureza. Lo anterior está demostrado por la experiencia obtenida en el desarrollo de los proyectos AID en Guatemala, SWRI (Pág.105-Ref.1), y el proyecto del Gobierno de Filipinas (Pág.105-Ref.2) en las que se empleó azufre con varios niveles de impureza para la fabricación de materia-

les de recubrimiento, así como para concretos.

- j) Los productos de azufre son reutilizables con poco consumo de energía, con la ventaja de no aumentar los depósitos de desechos sólidos.
- k) No hay consumo de agua en el procedimiento de fabricación.
- l) Debido a que los concretos de azufre adquieren resistencias altas, en un tiempo relativamente corto, se reduce por lo tanto el tiempo de utilización de cimbras.

Dentro de los obstáculos que presenta el azufre para su aceptación como material de construcción se tiene, la poca resistencia de éste material a la acción del fuego y la generación de gases tóxicos cuando se quema. Sin embargo esto ha sido resuelto con la incorporación de aditivos que retardan el inicio de la combustión y hacen autoextinguible el producto.

Otro inconveniente resulta de la necesidad de trabajar con mezclas a temperaturas relativamente altas, lo cual hace necesario el uso de equipo de protección adecuado. Además al emplear aditivos que producen gases o vapores tóxicos aumenta el riesgo en la fabricación de este material, por lo que deberán tomarse las precauciones necesarias para evitar intoxicación.

La rapidez con que el azufre pasa del estado líquido al sólido puede llegar a ser una limitante de su empleo, ya que no es posible lograr acabados aceptables en superficies expuestas grandes.

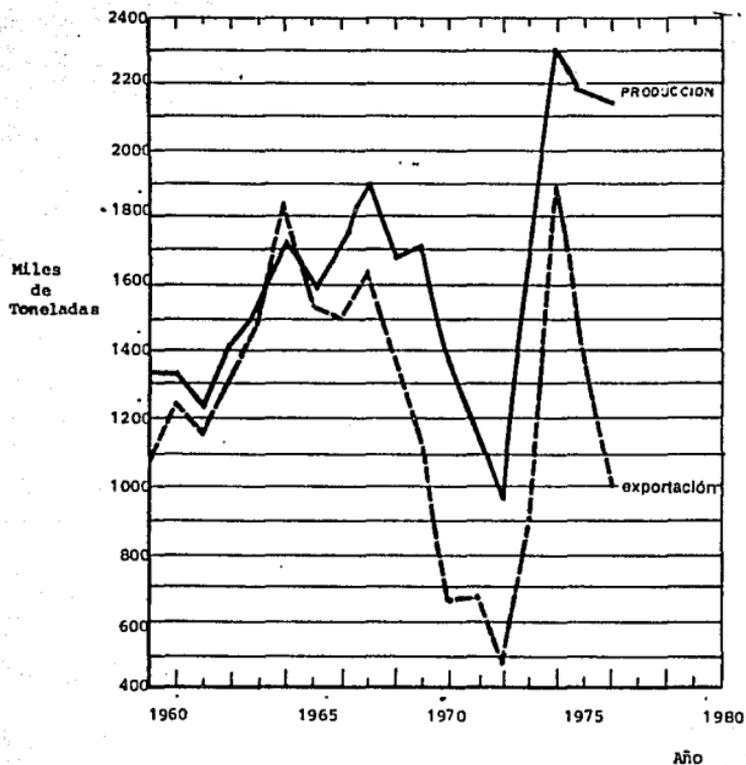


Fig. 1 PRODUCCION Y EXPORTACION DE AZUFRE  
EN MEXICO

\* FUENTE: Dirección General de Estadística.  
SPP Dirección General de Minas, SE.PA.FIN

## CAPITULO I. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES PARA UN CONCRETO NORMAL.

### I.1 AGREGADOS

En la fabricación de los morteros y concretos de azufre se requieren emplear agregados pétreos de calidad semejante a los usados para la fabricación de concretos de cemento Portland. El comportamiento satisfactorio de los productos elaborados dependerá en gran parte de las características de los agregados utilizados, ya que éstos constituyen aproximadamente el 75 por ciento de la mezcla. De los agregados que se han estudiado, los de origen basáltico han conducido a las mayores resistencias mecánicas, pero también se han empleado gravas y arenas pumíticas obteniendo resistencias mecánicas relativamente bajas.

Para este estudio se emplearon dos tipos de arenas comunes en el Valle de México, ambas andesíticas pero con propie

dades físicas diferentes, principalmente en cuanto a peso específico y contenido de material más fino que la malla 200.

En cuanto a la grava se empleo un solo tipo, grava andesítica, pero con dos tamaños máximos de agregado grueso 25mm (1") y 13 mm (½").

El empleo de los materiales andesíticos antes mencionados conduce a concretos que no son los óptimos que se pueden elaborar, pero servirán para tener idea del comportamiento de estas mezclas y para adoptar la tecnología desarrollada a otros materiales.

Las propiedades físicas de los agregados mencionados son las que se indican a continuación y los comentarios que se hacen se basan en los requisitos que establece la norma, ASTM C 33.

"Especificaciones Estándar de agregados para Concreto". De las que se toman los aspectos aplicables a los concretos de azufre.

#### I.1.1 ARENA ANDESITICA AZUL

GRANULOMETRIA.- Arena gruesa, con un porcentaje de material más fino que la malla N°. 100 superior al límite establecido como aceptable.

Esto requiere mayores consumos de azufre pero puede ser favorable para la trabajabilidad de la mezcla. Módulo de finura 3.10 corresponde al límite superior aceptable (Pág.13-Fig.2).

IMPUREZAS ORGANICAS: NO HAY

PARTICULAS DESMENU-

ZABLES: 3% corresponde al límite superior.

MATERIAL MAS FINO -

MALLA 200: Cantidades elevadas de material fino (11%) pueden afectar la resistencia a la abrasión de los concretos. El valor máximo para concretos que no van a estar expuestos a la abrasión es del 5%.

PESO VOLUMETRICO

SUELTO: 1420 Kg/m<sup>3</sup>

PESO VOLUMETRICO

COMPACTO: 1625 Kg/m<sup>3</sup>

PESO ESPECIFICO SE

CO: 2.36 Kg/m<sup>3</sup>

ABSORCION: 3.40%

El peso específico se da en estado seco, debido a que en estas condiciones se manejan los agregados en los concretos de azufre.

Estas propiedades indican que la arena posee buenas características.

#### I.1.2 ARENA ANDASITICA ROSA

GRANULOMETRIA: Aceptable, módulo de finura de 2.90 valor comprendido entre los límites aceptables, 2.3 y 3.1 (Pág.13-Fig.2).

IMPUREZAS ORGANICAS: NO HAY

PARTICULAS DESMENU-

ZABLES: 5% Superior al máximo aceptable.

MATERIAL MAS FINO

MALLA 200: 16% arriba del máximo aceptable que es de 3% para concretos resistentes a la abrasión.

PESO VOLUMETRICO

SUELTO: 1266 Kg/m<sup>3</sup>

PESO VOLUMETRICO

COMPACTO: 1376 Kg/m<sup>3</sup>

PESO ESPECIFICO SE

CO: 2.07 Kg/m<sup>3</sup>

ABSORCION: 8.60%

Las propiedades anteriores indican que es una arena ligera y poco resistente a las acciones mecánicas como es el desgaste por abrasión.

### I.1.3 GRAVA ANDESITICA 25 MM.

GRANULOMETRIA: Aceptable, módulo de finura de 6.90 (Pág. 13-Fig.2).

IMPUREZAS ORGANICAS: NO HAY

PARTICULAS DESMENU-

ZABLES: 0.70% inferior al 5%, valor máximo aceptable.

## MATERIAL MAS FINO

MALLA 200: 5.90% superior al 1% como valor máximo aceptable. Este aspecto no es totalmente - desfavorable, aunque propicia menor resistencia a la abrasión de los concretos ayuda a la manejabilidad de la mezcla.

## PESO VOLUMETRICO

SUELTO: 1250Kg/m<sup>3</sup>

## PESO VOLUMETRICO

COMPACTO: 1450 Kg/m<sup>3</sup>. El valor aceptado dentro de la clasificación de agregados de peso normal es de 1120 Kg/cm<sup>3</sup>.

PESO ESPECIFICO SE

CO: 2.25 Kg/m<sup>3</sup>

ABSORCION: 3.20%

SANIDAD: 14% superior al máximo permitido de 12%.

ABRASION: 33% nebis dek 50%, valor máximo aceptado - para utilizar la grava en la fabricación - de concreto.

## I.1.4 GRAVA ANDESITICA 13 MM.

Los comentarios hechos para la grava de 25 mm son válidos para la de 13 mm.

GRANULOMETRIA: Aceptable, módulo de finura de 6.20

IMPUREZAS ORGANICAS:NO HAY

PARTICICULAS DESMENU-

ZADAS.

## MATERIAL MAS FINO

MALLA 200: 6.0%

## PESO VOLUMETRICO

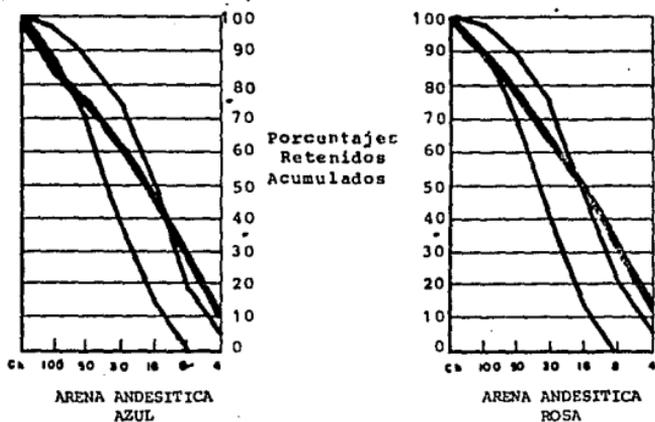
SUELTO: 1240 Kg/m<sup>3</sup>

## PESO VOLUMETRICO

COMPACTO: 1360 Kg/m<sup>3</sup>PESO ESPECIFICO SECO: 2.27 Kg/m<sup>3</sup>

ABSORCION: 3.4%

En la (Pág.14-Tabla 1), se presenta un resumen de las propiedades de los agregados.



\* FUENTE: "STANDARD SPECIFICATION FOR CONCRETE AGREGATES", ASTM C 33, Annual Book of ASTM Standards, parte 14 (1977).

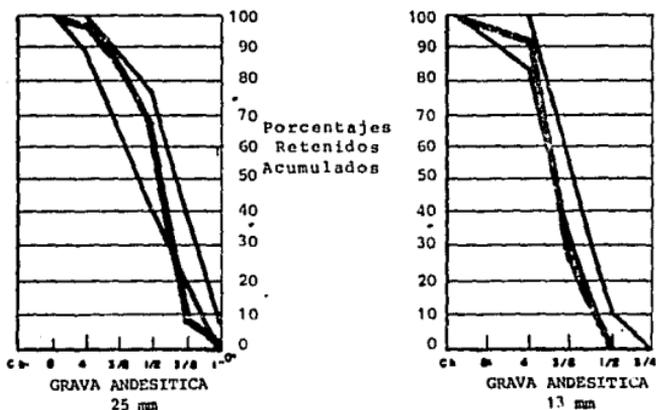


Fig. 2 ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS MATERIALES

PETREOS.

TABLA 1. PROPIEDADES FISICAS DE LOS AGREGADOS

MATERIALES	GRANULO METRIA	MODULO Dº FINURA	PESO VOLUMETRICO. kg/m³		SUSTANCIAS DELETFREAS			OTRAS PROPIEDADES			
			SUELTO	COMPACTO	IMPUREZAS ORGANICAS	PARTICULAS DE MENUS BLAS	MATERIAL MAS FINO QUE PASA POR LA 200	PESO ESPECIFICO (SECO)	ABSORCION %	SANIDAD %	ABRACION %
ARENA ANDESITICA AZUL EDO. DE MEX.	GRUESA	3.10	1 420	1 625	NO HAY	3.0	11.0	2.36	3.4	--	--
ARENA ANDESITICA ROSA, SIN LAVAR	ACEPTABLE	2.90	1 266	1 376	NO HAY	5.0	16.2	2.07	8.6	--	--
GRAVA ANDESITICA 25 mm (1")	ACEPTABLE	6.91	1 250	1 450	--	0.7	5.9	2.25	5.2	14	33
GRAVA ANDESITICA 13 mm (1/2")	ACEPTABLE	6.20	1 240	1 360	--	1.0	6.0	2.27	5.4	--	--

\* FUENTE: "STANDARD SPECIFICATION FOR CONCRETE AGREGATES", ASTM C 33, Annual Book of ASTM Standards, parte 14 (1977).

## CAPITULO II. EL AZUFRE COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION

A pesar de que el empleo del azufre como material de construcción fué conocido desde la edad media, las primeras investigaciones de carácter científico fueron a principios de este siglo. En la patente registrada en 1900 en los Estados Unidos por Mackay, se describe un compuesto de azufre adecuado para techumbres, tuberías, pavimentos y recubrimientos.

En 1939, Dwecker inició estudios sobre compuestos de azufre-asfalto para carreteras (Pág.105-Ref.4). Dwecker, fue el primero en utilizar aditivos para plastificar el azufre y de esta forma mejorar sus propiedades físicas (Pág.105-Ref.5).

Dale y Ludwig del Southwest Reserarch Institute, en la década de los sesenta, realizaron las mayores contribuciones a la investigación en este campo; desarrollaron aditivos químicos inhibidores de la combustión (Pág.105-Ref.6), así como establecieron las características físico-mecánicas de variados com

puestos de azufre y agregados y la utilización de fibras sintéticas como refuerzo en recubrimiento (Pág.105-Ref.7).

En Inglaterra se realizaron estudios sobre; plastificantes del azufre, aditivos con características óptimas y los efectos de estos en las propiedades físico-mecánicas de los compuestos (Pág.105-Ref.8). Investigadores de la Universidad de Calgary en Alberta Canadá, han realizado estudios comparativos entre concretos de azufre y de cemento Portland utilizados en vigas estructurales reforzadas (Pág.105-Ref.9).

Estos estudios impulsaron investigaciones sobre aplicaciones prácticas y desarrollo de la tecnología de construcción con materiales a base de azufre.

El azufre es uno de los elementos más abundantes del que se dispone, representa el 0.1% de la corteza terrestre (Pág.105-Ref.10), se encuentra frecuentemente como:

Azufre natural sobre domos de sal.

Depósitos volcánicos.

Mezclado con calcita, yeso y anhídridos.

Sulfitos en minerales metálicos.

Sulfatos en minerales.

Sulfito hidrogenado y polisulfito hidrogenado en gas natural.

Compuestos de azufre orgánico en petróleo.

Arenas de alquitrán y hulla.

Comercialmente se puede obtener de las siguientes fuentes:

Depósito de azufre, obtenido por proceso -  
Frasch o de Flotación.

Azufre recuperado de gas natural.

Azufre obtenido de piritas y minerales na-  
turales.

Azufre recuperado con los procesos para el  
abatimiento de la contaminación ambiental,  
como son en la actualidad los gases de fun-  
dición y los que provienen de la refina-  
ción de los crudos de petróleo.

En la (Pág.24-Fig.3), se señalan los principales cen-  
tros productores de azufre en la República Mexicana, mientras  
que en la (Tabla 2-Pág.29), se presenta por estados, munici-  
pio y razones sociales sus producciones respectivas para los a  
ños de 1978 y 1979. En la (Pág.30-Tabla 3), se muestra la pro  
ducción nacional de azufre con datos de exportación para los -  
mismos años.

Dentro de la República Mexicana en los volcanes como -  
el Jorullo, Ceboruco y Colina en Michoacán, Nayarit y Colima -  
respectivamente, se ha encontrado azufre y explotado algunas -  
veces en depósitos formados por sublimación; en el Chillador -  
Michoacán, el azufre se ha explotado de las fuentes hidroterma-  
les ahí formadas y de las que emana hidrógeno sulfurado.

En los estados de Colima, Coahuila, Durango, San Luis  
Potosí y Zacatecas; se han encontrado yacimientos de azufre -  
asociados con rocas de origen sedimentario como calizas, anhi-

drita y lutitas, donde hay abundancia de yeso. Cuando se trata de rocas sedimentarias el azufre se obtiene por obras subterráneas de explotación, como en las minas de azufre de los municipios de Mexicali; Baja California Norte; Villa Juárez, Cerritos y Peotillos en San Luis Potosí y en las Virgenes en Baja California Sur.

## II.1 ADITIVOS

### II.1.1 RETARDANTE DEL FUEGO

El azufre elemental ha mostrado que posee propiedades mecánicas adecuadas para considerarlo como un material estructural. Modificado con plastificantes y otros aditivos puede convertirse en material adecuado para recubrimiento, espumas, pegamentos adhesivos y otros usos en la industria de la Construcción. Debido a que el calor de combustión del azufre es bajo, aproximadamente 2 200 cal/g (4800 But/lb), comparado con 4 400 y 10 000 cal/g (8000 y 18 000 But/lb) para maderas y plásticos de hidrocarburos, respectivamente, su uso en la construcción ha sido limitado.

Para encontrar la formulación que mejor resultado pueda proporcionar, el Southwest Research Institute ensayo un gran número de productos cuyas combinaciones se presentan en la (Pág.31-Tabla 4). No todos dieron resultados satisfactorios y una calificación cualitativa de la efectividad de los productos empleados se presenta en la misma tabla. Como resultado de estas pruebas se encontró que cantidades tan pequeñas

como 3% de ácido maléico y 3% de monómero estireno, por peso, cuando se mezclan con azufre producen un material incombustible al ensayarse en recipientes cerrados.

Para encontrar un sustituto del monómero de estireno, que sea efectivo inclusive cuando se prende el material en recipientes abiertos, el mismo Instituto ensayó otra serie de productos químicos, habiendo encontrado que únicamente el dimercaptandipenteno resultaba comparable con el estireno.

Después de la descripción de como fué realizado dicho ensaye, se puede concluir que los resultados fueron los siguientes:

- 1.- En el azufre se puede retardar la acción del fuego con la adición de pequeñas concentraciones (menores de 10%) de gran variedad de materiales poco costosos.
- 2.- El mecanismo por el cual la acción del fuego se retarda en el azufre está relacionado con el uso del estireno o un material de comportamiento similar tal como el dimercaptán dipenteno en combinación con otros aditivos.
- 3.- Una mezcla formada por 100 partes de azufre 3 partes de di mercaptán dipenteno y 3 partes de chlorowax 70s, cuando se ensayan de acuerdo con el método ASTM D 635, da como resultado que no se quema y ensayada con el método ASTM E 84, da una velocidad de propagación de flama de 12.8, un factor de comprensión a la combustión de 14.6 y un factor de densidad de humo de 109. Estas cifras representan relaciones con valores patrones en los cuales los paneles de as-

besto-cemento toman el valor cero y los pisos de roble rojo el valor de 100. En la (Pág.25-Fig.4) se presenta con gráficas los resultados de estos ensayos.

- 4.- El empleo de los aditivos retardantes de la acción del fuego evita la posibilidad de generación de gases tóxicos, dado que el incremento en la temperatura fundirá el material e iniciará la combustión del mismo, pero la flama se extinguirá rápidamente por la acción del aditivo. El comportamiento antes señalado permite el empleo del azufre para la construcción de espacios interiores siempre que se usen aditivos retardantes de la acción del fuego y limitar su aplicación a espacios abiertos o a exteriores cuando no se empleen dichos aditivos.

## II.2 PLASTIFICANTES

Básicamente un plastificante es un sólido de bajo punto de fusión o un líquido con un alto punto de ebullición, el cual, cuando se le agrega a un material rígido en cantidades relativamente pequeñas, le imparte flexibilidad. El plastificante puede combinarse químicamente con el azufre, puede tener un efecto puramente mecánico o puede tener ambos efectos (Pág. 106-Ref.11).

Los azufres plastificados se preparan adicionando un plastificante al azufre fundido y permitiéndole que lleguen a su equilibrio. Cuando se enfría y solidifica, el material deja de ser frágil y no tiene una estructura cristalina visible.

Bajo esfuerzos, los azufres plastificados se deforman plásticamente y en la mayor parte de los casos la dureza del material decrece.

El contenido del aditivo plastificante también modificará el punto de fusión del azufre.

Uno de los aditivos plastificantes que mejores características han presentado es el dicitopentadieno (DCPD), cuyo efecto sobre el azufre se presenta en los termogramas de la (Pág.26-Fig.5).

Para determinar el efecto de la cantidad de aditivo plastificante en las temperaturas de transición y de fusión, se elaboraron las gráficas mostradas en la (Pág.28-Fig.6).

En la (Pág.28-Fig.7), se puede observar que con un consumo de 3 a 4% de aditivo plastificante, el comportamiento del azufre se modifica notoriamente, requiriendo a partir de ese porcentaje prácticamente el mismo incremento de temperaturas para pasar de la temperatura de transición a la de fusión.

Entre las propiedades físicas más importantes del dicitopentadieno se pueden mencionar las siguientes: (Pág.106-Ref. 12).

Estado Físico	Cristales incoloros
Olor	Alcanforado
Peso específico	0.9770, 35/4°C
Punto ebullición	170°C
760 mm Hg	
Punto de fusión	33.6°C

Calor de combustión	1378.4 kilo cal/mol.
Calor de vaporización	9.2 Kilo cal/mol.
Calor de fusión	0.5 Kilo cal/mol.
Punto de combustión espontánea en oxígeno	510°C
Punto de combustión espontánea en el aire	680°C

### II.3 COLORANTES

El color natural del azufre es amarillo, pudiendo variar sus tonalidades desde un amarillo claro a un amarillo naranja. Al mezclarlo con los agregados el color resultante cambiará tomando las tonalidades de los agregados empleados.

Los principales materiales empleados para cambiar de color a los concretos de azufre son los aditivos pigmentantes y los colorantes químicos. Según un estudio realizado por el Sulphur Institute (Pág.106-Ref.13), los pigmentos solubles en aceite dieron mejores resultados desde el punto de vista de solubilidad y uniformidad de color.

Concentraciones de pigmentos de 0.5-2 ml por litro de azufre produjeron tonos desde claros hasta de mediana intensidad.

La cantidad de pigmentos que se requiere dependerá de la tonalidad deseada y del colorante mismo.

El pigmento deberá mezclarse uniformemente y su proporcionamiento se deberá hacer por peso, en forma precisa para

mantener constante el color deseado. Todas las operaciones de mezclado deberán ejecutarse en forma idéntica para lograr un color uniforme.

Algunos pigmentos recomendados son los siguientes: - -

(Pág.106-Ref.14).

Rojos y Rosas	Oxido de hierro rojo
Amarillos	Oxido de hierro amarillo
Café	Oxido de hierro café
Negros y grises	Oxido de hierro negro
Verdes	Oxido de cromo, 95% puro
Azules	Azul cobalto, 98% puro

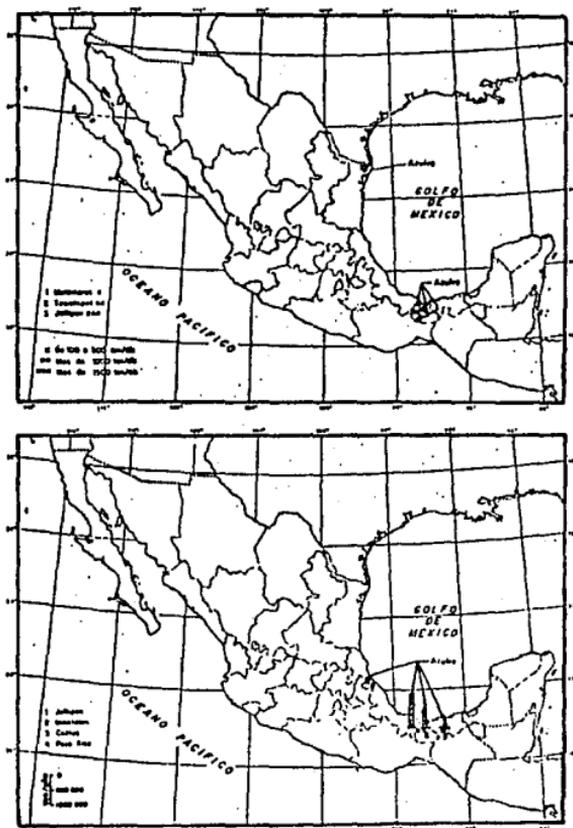


Fig. 3 PRINCIPALES CENTROS PRODUCTORES DE AZUFRE  
EN LA REPUBLICA MEXICANA.

\* FUENTE: Dirección General de Estadística  
SPP Dirección General de Minas, SE.PA.FIN

\* FUENTE: Dale, JM y Ludwig, AC. "FIRE RETARDING ELEMENTAL SULPHUR". Southwest Research Institute, San Antonio, Texas (1967)

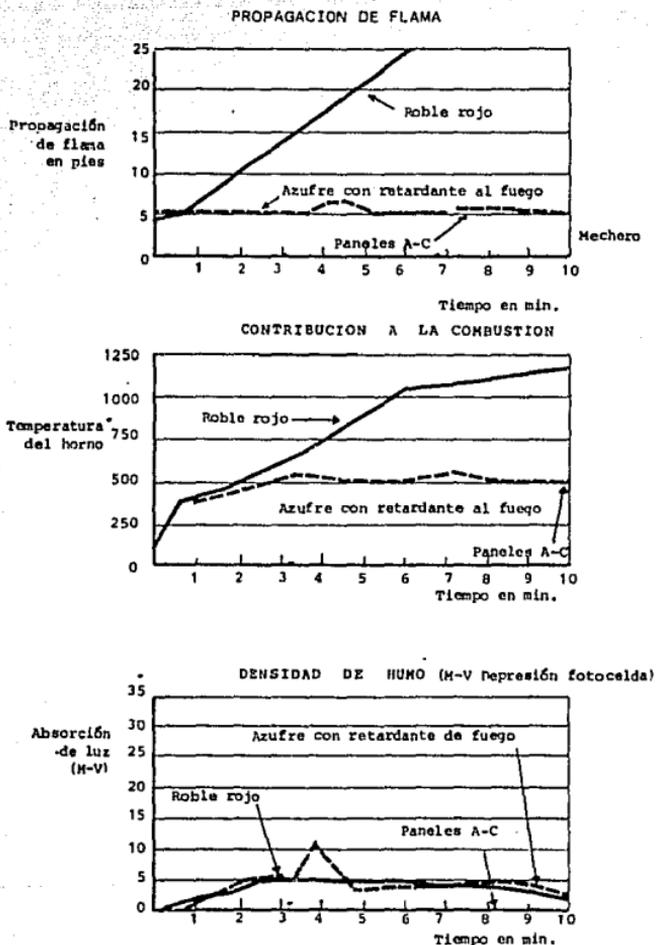
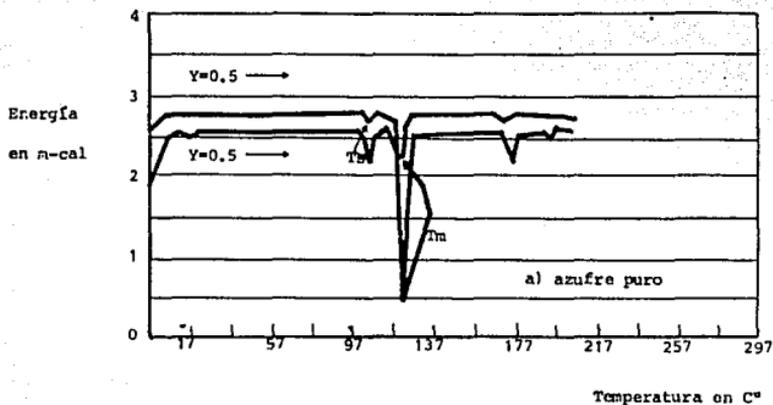


Fig. 4 PRESENTACION GRAFICA DE LOS RESULTADOS DE ENSAYE DE PANELES CON ASBETSYO-CEMENTO CON RECUBRIMIENTO DE AZUFRE CON RETARDANTE AL FUEGO.



\* FUENTE: Dale, JM y Ludwing, AC, "FIRE RETARDING ELEMENTAL SULPHUR", Southwest Research Institute, San Antonio, Texas (1967).

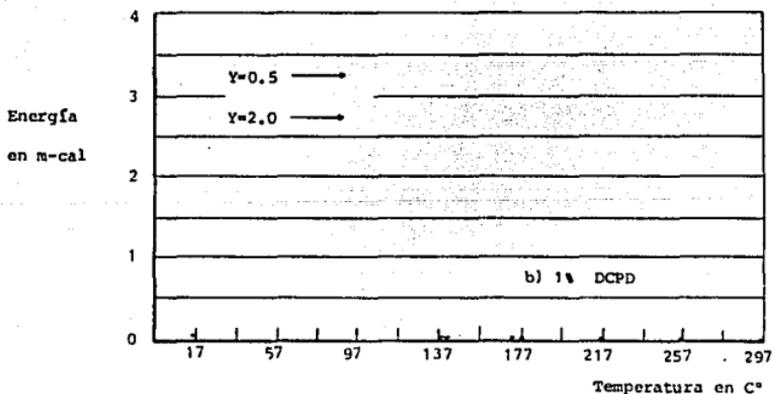


fig 5 TERMOGRAMAS DE LAS MEZCLAS AZUFRE-DCPD VARIANDO LA COMPOSICION.

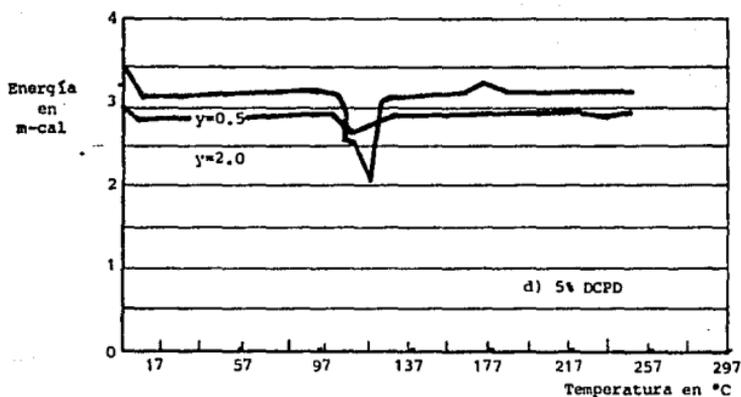
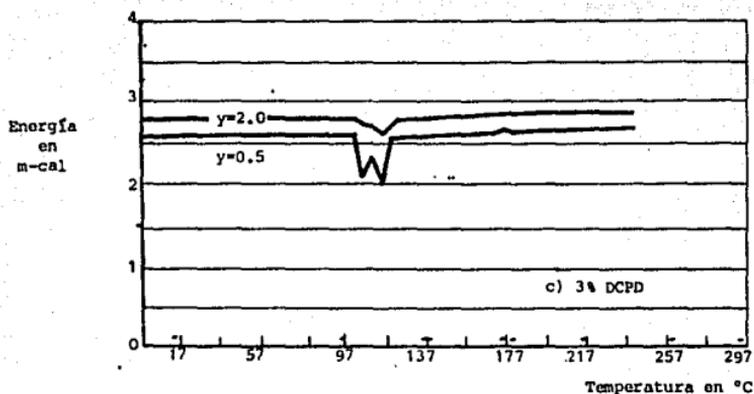


Fig.5. Termogramas de las mezclas azufre-DCPD variando la composición (continuación)

\* FUENTE: Dale, JM y Ludwig, AC, "FIRE RETARDING ELEMENTAL SULPHUR", Southwest Research Institute, San Antonio, Texas (1967).

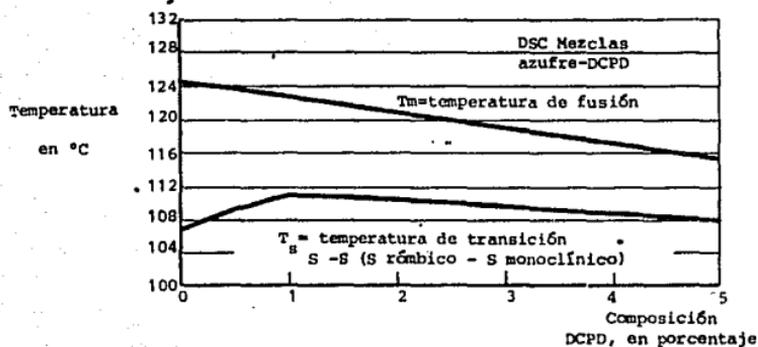


Fig. 6. Influencia del DCPD en las temperaturas de transición y de fusión del azufre.

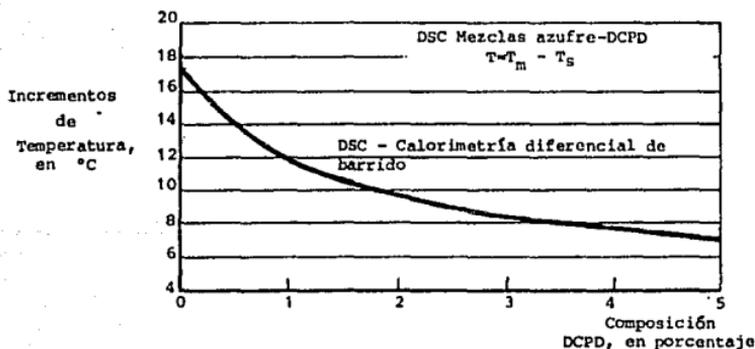


fig. 7. Diferencia de temperatura ( $T_m - T_s$ ) como función de la composición de la mezcla.

\* FUENTE: Dale, JM y Ludwing, AC, "FIRE RETARDING ELEMENTAL SULPHUR", Southwest Research Institute, San Antonio, Texas (1967).

TABLA 2 PRODUCCION, POR MUNICIPIOS  
DURANTE 1978 - 1979

MUNICIPIOS Y ESTADOS	AZUFRE (toneladas)		
	1979	1978	
Salamanca, Guanajuato	4 961	3 130	0
Atzacapotzalco D. F.	7 683	7 236	0.4
Cd. Madero, Tamaulipas	11 105	7 453	0.4
Cactus, Chiapas	47 372	39 935	4.2
Jáltipan, Veracruz	1 325 526	1 106 112	59.6
Minatitlán, Veracruz	723 396	621 036	33.2
Poza Rica, Veracruz	36 119	32 783	2.2
GRAN TOTAL	2 156 167	1 817 685	100.0

CENTROS PRODUCTORES DE AZUFRE

RAZON SOCIAL	UBICACION	CAPACIDAD (ton/día)
Química de la frontera	Matamoros Tamaulipas	180
Azufretera Panamericana, S. A.	Jáltipan Veracruz	3000
Cia. Explotadora del Itamo, S. A.	Texistepec, Veracruz	2 000

Fuente de información: Manifestaciones mensuales de las Empresas  
SPYFI Dirección General de Minas

TABLA 3. PRODUCCION NACIONAL DE AZUFRE  
PARA LOS AÑOS DE 1978 y 1979

	PRODUCCION DE AZUFRE	
	1978 (toneladas)	1979 (toneladas)
DOMOS	1 649 661	1 956 854
PEMEX	168 024	199 313
<b>TOTAL</b>	<b>1 817 685</b>	<b>2 156 167</b>

	EXPORTACION DE AZUFRE	
	1978 (toneladas)*	1979 (toneladas)*
Azufre sin refinar	1 012 583.696	1 232 396.521
Azufre sublimado		0.306
Azufre coloidal	60.200	2 561.845
Azufres diversas formas	424.130	106.700
<b>TOTAL</b>	<b>1 013 068.026</b>	<b>1 235 065.372</b>

	IMPORTACIONES DE AZUFRE	
	1978 (toneladas) <sup>1</sup>	1979 (toneladas)*
Azufre de cualquier clase, excepto el sublimado, -- precipitado y coloidal.	507.503	865.501
Azufre sublimado o precipi- tado; azufre coloidal.	190.834	245.733
<b>TOTAL</b>	<b>694.337</b>	<b>1 111.234</b>

Fuente: Dirección General de Estadística  
S P P Dirección General de Minas, SE, PA. FIN.

\* Volumen de peso bruto.

TAJLA 4 MATERIALES ENSAYADOS DE ACUERDO CON EL METODO ASTM D675

(Composición por peso: tres partes de los materiales listados abajo, tres partes de monómero de estireno más 100 partes de azufre, todas las composiciones preparadas en recipientes cerrados).

\* FUENTE: Dale, JM y Ludwig, AC, "FIRE RETARDING ELEMENTAL SULPHUR, SOUTHWEST Research Institute, San Antonio, Texas (1967).

CLASE I	CLASE II	CLASE III	CLASE IV
Componentos de ácido maleico	Retardadores de flama organo fosforados	Hidrocarburos a Hidrocarburos halogenados	Retardadores de la flama inorgánicos
No inflamable	No inflamable	No inflamable	Parcialmente efectivos
Acido maleico	Fosfato de tricrecilo	Clorowax 70s	Cloruro de amonio
Maleato de dicotilo	Fosfato de trifenilo	bromo estireno	Fosfato de amonio
Maleato de monobutilo	Parcialmente efectivos	Parcialmente efectivos	Sulfato de amonio
Fumarato de dilutilo			Oxido de antimonio
Ftalato de di-iso-decilo	Fyrol 6	Clorowax 50.	Acido bórico
Ftalato de n-dilutilo	Vircol R <sup>2</sup>	Arochlor 1221	Cloruro de magnesio
Parcialmente efectivo	Phosgard C-22-R	Arochlor 1254	Cloruro de Zinc
Anhidrido maleico	Fosfato de trilutilo	Arochlor 5460	Inflamables
Maleato de di-iso octilo		triclorotolueno	Acido bórico y bicarbonato de sodio
Maleato de di-butilo		Halowax 1000	Sulfato de magnesio
Acido fumarico		Hexaclorobutadieno	Bicarbonato de sodio
Acido ftálico		Policlorometil naftaleno	Fosfato de sodio
Anhidrido ftálico		Acetato divinilo (monómero)	
Acido tereftálico		Xileno	
Ftalato de dimetilo		Di-yodometano	
Acido maleico		1,5,9 - ciclodecatrieno	
Acido oxálico		Divinil benceno	
Acido benzoico			
Benzaldehido			
Anhidrido bórico			
Cloruro de dimetilo			
Anhidrido clorúrico			
Tetrabromobisfenol A			
Inflamables			
Anhidrido tetrabromoftálico.			

### CAPITULO III PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DEL CONCRETO CON AZUFRE

Las propiedades requeridas de los concretos de azufre pueden ser diferentes de acuerdo con la finalidad a la que se destine: en la (Pág. 43-Tabla 5), se presentan algunas propiedades físicas del azufre que se consideraron de interés en el estudio (Pág.106-Ref.15).

En algunos casos la capacidad para resistir los esfuerzos mecánicos será la más importante, en tanto que la resistencia al ataque químico será el factor determinante en otros.

Tomando en cuenta la finalidad de este trabajo que es mostrar la similitud entre los concretos de azufre y los concretos de cemento Portland, las relaciones que se presentan tienen un enfoque parecido al establecido usualmente para los concretos a base de cemento Portland y tomando como parámetro de correlación con otras propiedades la resistencia a compresión, debido a la facilidad de su determinación.

### III.1 RESISTENCIA A LA COMPRESION Y A LA TENSION

#### RESISTENCIA A LA COMPRESION

Una de las propiedades más importantes de los concretos de azufre es la rapidez con que adquiere resistencia mecánica. En cuanto al azufre fundido comienza a tomar la forma cristalina a temperaturas por debajo de  $119^{\circ}\text{C}$ , se inicia la adquisición de resistencia y en un tiempo relativamente corto a temperatura por debajo de  $95.4^{\circ}\text{C}$ , el azufre, empieza a adoptar una forma mucho más estable y resistente (Pág.106-Ref.16).

Dale y Ludwig (Pág.106-Ref.17), reportan resistencia a compresión obtenidos a edades tempranas en especímenes cilíndricos de  $11.5 \times 23$  cm. con los siguientes resultados (Pág.48-Fig.8).

EDAD	RESISTENCIA A COMPRESION Kg/cm <sup>2</sup>
45 minutos	238
1½ horas	248
3 horas	330
6 horas	350
28 días	406

Para la determinación de la resistencia a compresión (Pág.49-Fig.9), se emplearon cilindros de 7.5 cm. de diámetro y 15 cm. de altura (Pág.106-Ref.18). En la (Pág.50-Fig.10) y la (Pág.51-Tabla 6) se presentan los resultados de estos ensayos de concreto con diferentes porcentajes de consumo de azu-

fre y en la que se puede observar que a medida que se incrementa el consumo de azufre la resistencia decrece, cuando menos - por las mezclas con buenas características de manejabilidad y aspecto. La tendencia anterior se puede explicar si se considera que el material cementante, azufre, resulta ser el más débil de los que intervienen en la mezcla; en los concretos de cemento Portland la tendencia es contraria, ya que en estos - concretos los agregados resultan ser por lo general el elemento más débil. De acuerdo con lo antes expuesto, desde el punto de vista de resistencia, resulta conveniente emplear los menores consumos de azufre que sean compatibles con las características de apariencia en los acabados y manejabilidad de la mezcla empleada.

#### RESISTENCIA A LA TENSION

Se determinó la resistencia a la tensión tanto por el método indirecto (prueba brasileña) ASTM C 496 (Pág.52-Fig.11), como por flexión en vigas con cargas a los tercios del claro - ASTM C 78 (Pág.52-Fig.11). Los resultados de los ensayos se presentan en la (Pág.51-Tabla 6) y en la (Pág.53-Fig.12), como se puede observar la tendencia general fué que la resistencia a tensión por flexión resulta mayor que la resistencia a tensión obtenida por el método indirecto, a excepción de los concretos fabricados con arena andesítica rosa en los que ambos - resultados prácticamente son coincidentes. En la misma figura se puede observar que la resistencia a la tensión no aumenta -

sensiblemente con la resistencia a la compresión y que de una manera aproximada se pueden establecer los siguientes valores promedio para los materiales estudiados.

$$\text{Tensión indirecta } f_t = 54 \text{ Kg/cm}^2 \text{ (1)}$$

$$\text{Tensión por flexión } f_f = 89 \text{ Kg/cm}^2 \text{ (2)}$$

### III.2 RESISTENCIA A LA ABRASION Y AL ATAQUE QUIMICO

#### RESISTENCIA A LA ABRASION

Para conocer el comportamiento de los concretos de azufre bajo la acción de la abrasión y comparar los resultados con los alcanzados en los ensayos de los concretos de cemento Portland, se hicieron pruebas en las que el desgaste de las superficies se obtuvo por medio de la fricción con arena sílica (Pág.54-Fig. 13).

La prueba en sí no se encuentra estandarizada, pero como los resultados se manejaban desde un punto de vista comparativo, lo único que se requirió fué mantener constantes los parámetros que podrían afectar los resultados. Para este caso se empleó arena sílica con graduación 30-40 (pasa malla 30 se retiene en malla 40) con un tiempo de desgaste de 15 minutos y una sobrecarga en el espécimen de 7.5 Kg. El área de desgaste fue de 5 X 6 cm.

Los resultados de las pruebas efectuadas se presentan en la (Pág.55-Fig.14) y en la (Pág.57-Tabla 6). Se puede observar que el desgaste resulta independiente del porcentaje de azufre empleado, cuando menos dentro de los consumos usuales -

(20-30%). Por otro lado se puede ver que la calidad de los agregados tiene una influencia significativa, así en la misma figura se observa que los concretos fabricados con arena andesítica azul tuvieron un desgaste aproximado de 1 cm, en tanto que, en los concretos fabricados con el mismo tipo de grava, pero con arena andesítica rosa, con peso específico mucho menor que el de la azul, se alcanzó un desgaste aproximado de 1.8 cm.

Para poder comparar los desgastes alcanzados en los concretos de azufre con los correspondientes a los de cemento Portland, en la gráfica que relaciona el desgaste con la resistencia a compresión de los concretos de azufre (Pág.55-Fig.14), se observa que tanto los concretos de cemento Portland como los de azufre siguen una misma tendencia; al aumentar la resistencia disminuye el desgaste. Sin embargo, si se toma en cuenta que para los concretos de cemento Portland las resistencias a compresión varían entre 200 y 400 Kg/cm<sup>2</sup>, valores usuales para su empleo en las construcciones de pisos y pavimentos, y que los concretos de azufre alcanzan resistencias a la compresión por lo general mayor a los 400 Kg/cm<sup>2</sup>, se puede concluir en forma general que para concretos con arenas y gravas similares a los de azufre presentarán una mayor resistencia a la abrasión que los de cemento Portland.

#### RESISTENCIA AL ATAQUE QUIMICO

Hay una cantidad considerable de material publicado so

bre la resistencia de morteros de azufre al ataque de varias - sustancias tales como ácidos, sales, etc., en general se ha en-  
contrado que los morteros a base de azufre son muy resistentes al ataque químico. Puede esperarse que los concretos de azu-  
fre tengan propiedades similares, a menos que el agregado grue-  
so se vea afectado. Se ha encontrado que los cementos sulfuro-  
sos empleados en la unión de tubería, ladrillos y mosaicos son resistentes al ataque de las siguientes sustancias (Pág.106-Ref. 19).

Acido clorhídrico	Aceite de soya
Acido nítrico	Sulfato de calcio
Acido sulfúrico	Sulfato de cobre
Acido fosfórico	Cloruro de cobre
Vinagre	Sulfato ferroso
Acido butírico	Sulfato de níquel
Acido láctico	Sulfato de magnesio
Cal saturado (20°C)	Sulfato de zinc
Azúcar	Sulfato de amonio
Crema	Cloruro férrico
Desperdicios en rastros	Cloruro de sodio
Aceite de ajonjolí	Cloruro de zinc
Aceite de maíz	

Los cementos sulfurosos se deterioran bajo el ataque de

Acido oleico	Dicromato de potasio
Acido crómico	Aceite de higuera
Cal saturada (a 80°C)	Bisulfito de calcio

Kerosena

Petróleo crudo sulfurado

Aceite de algodón.

### III.3 RESISTENCIA AL IMPACTO

Los concretos de azufre, al igual que los de cemento - Portland, son materiales frágiles poco resistentes al impacto, sobre todo cuando se tiene espesores relativamente delgados. Para mejorar el comportamiento del material bajo éste tipo de acciones, es común emplear diferentes tipos de refuerzo, ya sea en forma de barras, mallas o fibras distribuidas aleatoriamente en el material.

No obstante, la poca resistencia que se puede alcanzar en el ensaye de placas de concreto simple, en este estudio se trató de conocer el comportamiento del material bajo las cargas de impacto al variar el consumo de azufre.

La prueba empleada para efectuar estas determinaciones no es un método de ensaye estándar, por lo que los resultados obtenidos pueden tomarse como valores relativos. Los especímenes empleados fueron placas de 50 x 50 x 5 cms. y la masa que produjo el impacto fue de cilindro de acero con un extremo redondeado que tiene un peso de 10.785 Kg, (Pág.56-Fig.15) este cilindro se dejó caer desde una altura de 55.6 cm. y la energía que produjo la rotura del espécimen se consideró como la suma de la energía acumulada con cada impacto; los resultados alcanzados se presentaron en la (Pág.51-Tabla 6).

En la (Pág.57-Fig.16) se relaciona la resistencia al -

impacto con la resistencia a compresión con los consumos de azufre empleados. Como se observa, la resistencia a compresión no parece tener correlación con la resistencia al impacto, en tanto que los consumos de azufre afectan sensiblemente la capacidad del material para absorber energía, siendo esta inversamente proporcional a los consumos de azufre.

#### III.4 PERMEABILIDAD

El azufre es un material impermeable pero, al combinarlo con otros productos para formar concretos puede, volverse permeable, por la formación de conductos capilares y quedades originados por el aire atrapado durante el colado de las piezas y la compactación deficiente de las mismas.

Con objeto de comparar el comportamiento de las diferentes mezclas elaboradas en este estudio, se colocaron placas de concreto de 40 x 40 x 5 cm. las cuales se sometieron a pruebas de permeabilidad al agua dándoles un tirante de 10 cm. a presión atmosférica, (Pág.58-Fig.17). Las placas fueron coladas en igual forma, recibiendo la misma energía de compactación. Sin embargo, como era de esperarse, la menor cantidad de aire atrapado se obtuvo en aquellas mezclas con menores tamaños de agregados y con mayores consumos de azufre.

En términos generales se puede decir que los concretos siguieron siendo impermeables, no apreciándose humedades por la parte inferior de las placas después de una semana de observación en condiciones de ensaye. En algunos casos el agua pe-

netró al interior de la placa a través de los conductos capilares, pero el flujo se interrumpió al terminar el conducto, aun que éste siguiese hasta pocos milímetros de la superficie inferior.

Las ocasiones en que se presentó el flujo del agua se debió invariablemente a la presencia de conductos claramente visibles que unían las superficies húmeda y seca (Pág.60-Fig. 18).

### III.5 REFUERZO DE CONCRETOS DE AZUFRE

Se han utilizado con éxito fibras de vidrio como refuerzo de concreto de azufre, pero su aplicación no es prometedora en el caso de grandes elementos estructurales. Si se evita la humedad, previniendo la formación de ácido sulfúrico, es posible reforzar el concreto con barras de acero produciendo un material durable. Esto impone una restricción severa al uso de las barras de refuerzo del tipo convencional, al menos que estas sean galvanizadas para evitar la corrosión.

Se ha reportado que el aluminio, magnesio, cadmio y cromo, son relativamente inertes al usarse con azufre (Pág.60-Fig.18).

En la Universidad de Calgary (Pág.107-Ref.23) se han llevado a cabo ensayos preliminares de vigas de concreto de azufre con acero de refuerzo del tipo convencional, así como con torones de los normalmente utilizados en concreto preesforzado.

Se observó que no ocurre corrosión si las vigas se mantienen en el laboratorio bajo techo; sin embargo la corrosión se presenta, en cierto grado, si las vigas se almacenan a la intemperie.

Otro tipo de refuerzo que se ha usado con éxito es la fibra de vidrio entretejida en forma de malla cerrada, del tipo usado para su impregnación con resinas poliéster. En los casos en que se ha empleado azufre, este se coloca en estado líquido por medio de aspersion sobre la malla de refuerzo (Pág. 107-Ref.24).

Para este trabajo se realizó la inclusión de fibra de vidrio e ixtle de lechuguilla como refuerzo de morteros de azufre.

Primeramente es necesario destacar la dificultad que representa tratar de incorporar cualquier tipo de fibra en los morteros de azufre o en el azufre simple observándose que tenderan a flotar en el azufre simple, se formaban además, espumas abundantes que muy probablemente reflejaban la presencia de agua en las fibras. Por ello, se sometió a estas últimas a un ligero proceso de secado en un horno eléctrico con temperaturas hasta de 90°C. Sin embargo, siempre se tuvieron problemas de adherencia entre fibras y el azufre, independientemente del método constructivo empleado para obtener mezclas más o menos homogéneas.

La cantidad de fibras de refuerzo se proporcionó siempre de manera que se obtuviesen mezclas más o menos homogéneas.

Se observó que cantidades del orden del 1% en peso, se podían colocar sin que se formaran grumos.

Los resultados de estas pruebas se muestran en la (Pág. 59-Tabla 7).

TABLA 5. PROPIEDADES DEL AZUFRE

Número atómico	16
Peso atómico	32.066
Volumen atómico (calculado)	Rómbico 15.5 cm Monoclínico 16.4 cm
Angulo de reposo	35°
Punto de ebullición	444.6°C a una atmósfera
Cristalización	Rómbico. Forma común del azufre, estable abajo de 95.5°C
Densidad	Rómbico 2.07 g/cm a 20°C Monoclínico 1.96 g/cm a 20°C Amorfo 1.92 g/cm a 20°C Sin compactar 1.35 a 1.44 g/cm En polvo (malla 250) 0.56 g/cm
Densidad en estado líquido en la siguiente figura (Anexo1)	

\* FUENTE: Loov, R, "CONCRETO CON AZUFRE", II Simposio Internacional Sobre Tecnología del Concreto, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (mar 1975).

TABLA 5. PROPIEDADES FISICAS DEL AZUFRE  
(Continuación)

44

ENTROPIA

TEMPERATURA			cal/ g atom/	cal/g/grado	Btu/lb atom/	Btu/lb/grado	
*K	*F		grado		grado		
350	200	r6mbico	0.90	0.028	1.17	0.036	
168.6	204		1.20	0.037	1.20	0.037	
388.6	204	monoclinico	1.43	0.044	1.43	0.044	
382	246		1.81	0.056	1.81	0.056	
392	246		2.56	0.080	2.56	0.080	
400	-		2.71	0.084	-	-	
450	300		3.60	0.112	3.10	0.097	
500	400	lambda	4.42	0.138	4.00	0.125	
550	500		5.18	0.162	4.90	0.153	
600	600		5.90	0.184	5.70	0.178	
650	700		6.58	0.205	6.50	0.203	
700	800		7.21	0.225	7.20	0.224	
718	833		7.46	0.233	7.46	0.233	
392	246		monoclinico	1.81	0.056	1.81	0.056
392	246			2.60	0.081	2.60	0.081
400	-		2.76	0.086	-	-	
450	300		lambda, mu	3.81	0.119	3.20	0.100
500	400	4.71		0.147	4.30	0.134	
550	500	5.49		0.171	5.20	0.162	
600	600	6.22		0.194	6.10	0.190	
650	700	6.90		0.215	6.80	0.212	
718	833	7.78		0.242	7.78	0.242	

\* FUENTE: Loov, R, "CONCRETO CON AZUFRE", II Simposio Internacional Sobre Tecnología del Concreto, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (mar 1975).

TABLA 5. PROPIEDADES FISICAS SOBRE EL AZUFRE  
(Continuación)

## CONTENIDO DE CALOR

TEMPERATURA			cal/g atom/	cal/g/grado	Btu/lb atom/	Btu/lb/grado
*K	*F		grado		grado	
350			290	9.04		
	200	r6mbico			.695	21.7
368.6	204		399	12.40	720	22.4
368.6	204	monoclinico	485	15.10	876	22.3
392	246		630	19.60	1 135	35.4
392	246		925	28.80	1 665	51.5
400			985	30.70		
	300				2 070	64.5
450			1 360	42.40		
	400				2 830	88.2
500			1 750	54.60		
	500				3 360	113.2
550		lambda	2 150	67.00		
	600				4 450	138.8
650			2 990	93.20		
	800				6 170	192.4
700			3 430	106.90		
718	833		3 590	111.90	6 460	204.4
392	246	monoclinico	630	19.60	1 135	35.4
392	246		940	29.30		
400			1 005	31.30		
	300				2 160	67.4
450			1 450	45.20		
	400		1 875	58.50	3 030	94.5
500						
	500				3 860	120.4
550		lambda, mu	2 285	71.20		
	600				4 700	146.0
600			2 705	84.30		
	700				5 540	172.7
650			3 130	97.60		
	800				6 430	200.5
700			3 570	111.30		
718	833		3 730	116.30	6 715	209.4

\* FUENTE: Loov, R. "CONCRETO CON AZUFRE", II Simposio Internacional Sobre Tecnología del Concreto, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (mar 1975).

TABLA 5. PROPIEDADES FISICAS DEL AZUFRE  
(Continuación)

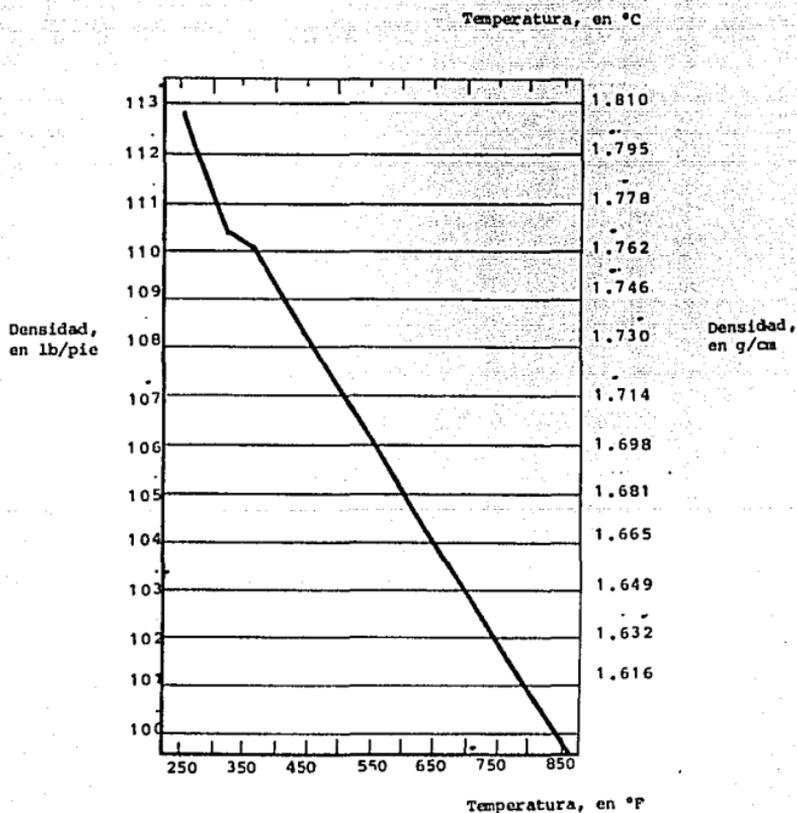
Calor específico

La capacidad de calor específico está dada como cal/g/mole/grado o Btu/lb mole/grado. Para convertir estas a cal/g/grado o Btu/lb/grado divide entre el peso molecular respectivo. Temperaturas en grados Kelvin.

S(ro):	$C_p = 3.58 + 6.24 \times 10^{-5} T$ (24.9 - 95.5°C ó 77 - 203.9°F)
S(mono):	$C_p = 3.56 + 6.96 \times 10^{-5} T$ (-4.5 - 118.9°C ó 23.9 - 246°F)
S(líquido):	$C_p = 5.4 + 5 \times 10^{-5} T$ (118.9 - 444.9°C ó 246 - 832.8°F)
S(gas)	$C_p = 5.43 + 0.26 \times 10^{-5} T + 0.27 \times 10^{-8} T^2$ (25 - 1727°C ó 77 - 3140.6°F)
S(gas):	$C_p = 8.54 + 0.28 \times 10^{-5} T + 0.79 \times 10^{-8} T^2$ (25 - 1727°C ó 77 - 3140.6°F)
SO(gas):	$C_p = 7.70 + 0.84 \times 10^{-5} T + 0.65 \times 10^{-8} T^2$ (25 - 1727°C ó 77 - 3140.6°F)
SO(gas):	$C_p = 10.38 + 2.54 \times 10^{-5} T - 1.42 \times 10^{-8} T^2$ (25 - 1727°C ó 77 - 2780.6°F)
SO(gas):	$C_p = 13.70 + 6.42 \times 10^{-5} T - 3.12 \times 10^{-8} T^2$ (25 - 1727°C ó 77 - 1700.6°F)
H S(gas):	$C_p = 7.15 + 3.32 \times 10^{-5} T$

\* FUENTE: Loov, R, "CONCRETO CON AZUFRE", II Simposio Internacional Sobre Tecnología del Concreto, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (mar 1975).

TABLA 1. Anexo 1



## DENSIDAD DEL AZUFRE LIQUIDO

\* FUENTE: "STANDARD SPECIFICATION FOR CONCRETE AGREGATES", ASTM C 33, Annual Book of ASTM Standards, parte 14 (1977).

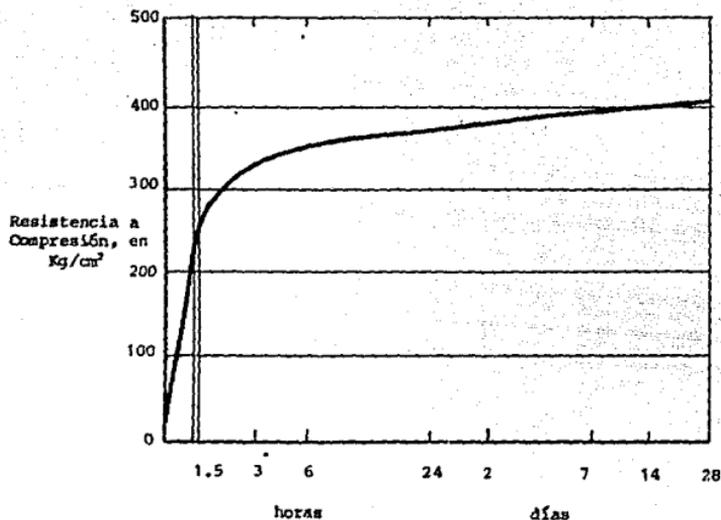


fig. 8. INCREMENTO DE LA RESISTENCIA A COMPRESION  
CON LA EDAD.

\* FUENTE: Malhotra, VM. "EFFECT OF SPECIMEN SIZE ON COMPRESSIVE STRENGTH OF SULPHUR CONCRETE", Mines Branch Investigation, Informe IR-74-25 Department of Energy Mines and Resources, Ottawa, Canadá (Jun. 1974).

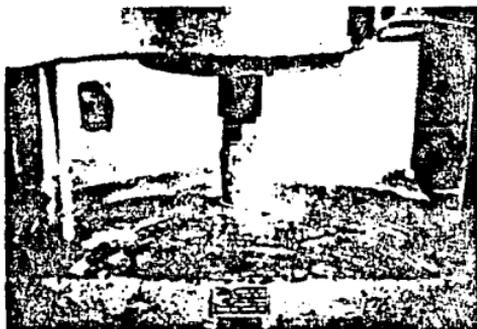


Fig. 9 ENSAYES SOMETIDOS A COMPRESION.

\* FUENTE: Malhotra, VM, "EFFECT OF SPECIMEN SIZE ON COMPRESSIVE STRENGTH OF SULPHUR CONCRETE" Mines Branch Investigation, Informe IR 74-25 Department of Energy Mines and Resources, Ottawa, Canadá (Jun. 1974).

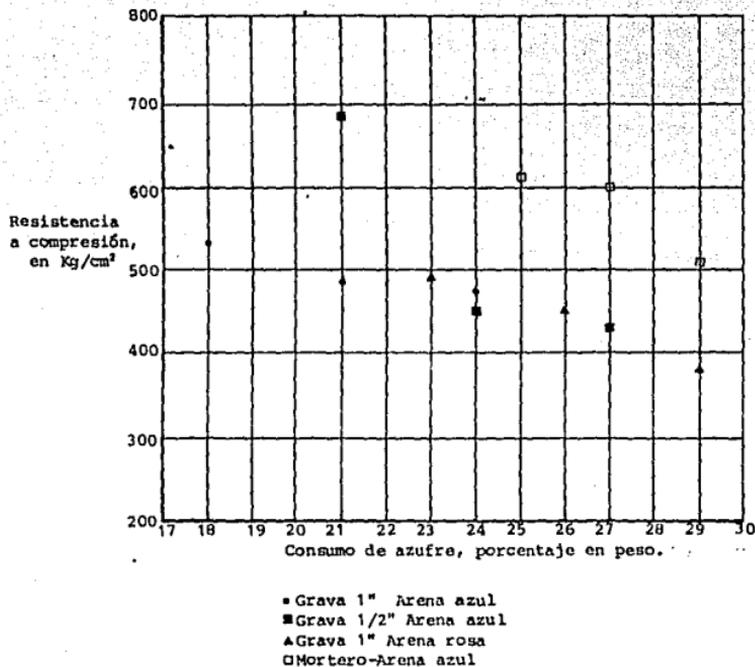


fig. 10 RESISTENCIA A COMPRESION EN FUNCION DE LOS CONSUMOS DE AZUFRE.

\* FUENTE: Malhotra, VM, "EFFECT OF SPECIMEN SIZE ON COMPRESSIVE STRANGTH OF SULPHUR CONCRETE", Mines Branch Investiga tion, Informe IR 74-25 Department of Energy Mines and Resources, Ottawa, Canadá (Jun. 1974).

TABLA 6 PROPIEDADES FISICAS DE LOS CONCRETOS Y MORTEROS DE AZUFRE

MATERIALES ENSAYES *	CONCRETO GRAVA, 25 mm						CONCRETO GRAVA, 13 mm			MORTERO		
	ARENA AZUL			ARENA ROSA			ARENA AZUL			ARENA ROSA		
	18%	21%	24%	23%	26%	29%	21%	24%	27%	25%	27%	29%
Compresión, Kq/cm	- 537	484	466	488	455	374	684	441	436	615	599	508
Tensión, Kq/cm (Compresión dia metral)	57	64	57	53	46	46	61	57	54	58	53	49
Tensión, kq/cm (módulo de ro- tura)	41	88	92	60	53	48	83	87	80	94	100	89
Módulo de elas- ticidad x 10 <sup>-4</sup> , kq/cm	242	177	167	203	172	162	215	181	160	204	181	141
Deformación uni- taria última, x 10 <sup>-3</sup> u	285	341	366	290	266	252	357	300	389	350	380	475
Impacto, kg-m	11	6	4	10	8	8	27	15	6	27	15	6
Abrasión, mm	14	10	12	18	17	18	8	9	8	13	9	10

\* Conozcos de azufre, peso en porcentaje

\* FUENTE: Lee, Dy y Klaiber, Fw, "FATIGUE BEHAVIOR OF SULPHUR CONCRETE"  
New Horizons in Construction Materials, I, ENVO Publishing  
Company, Inc (1976).

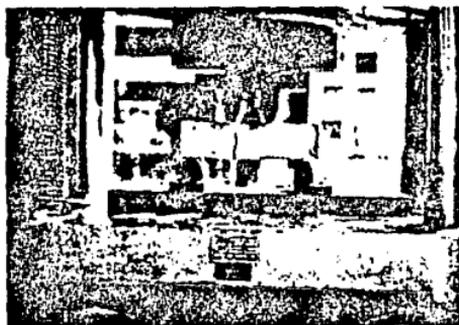


Fig. 11 ENSAYES SOMETIDOS A TENSION POR FLEXION

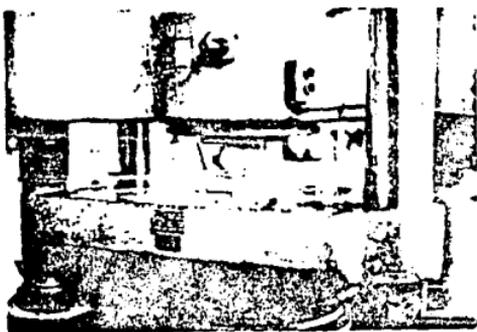
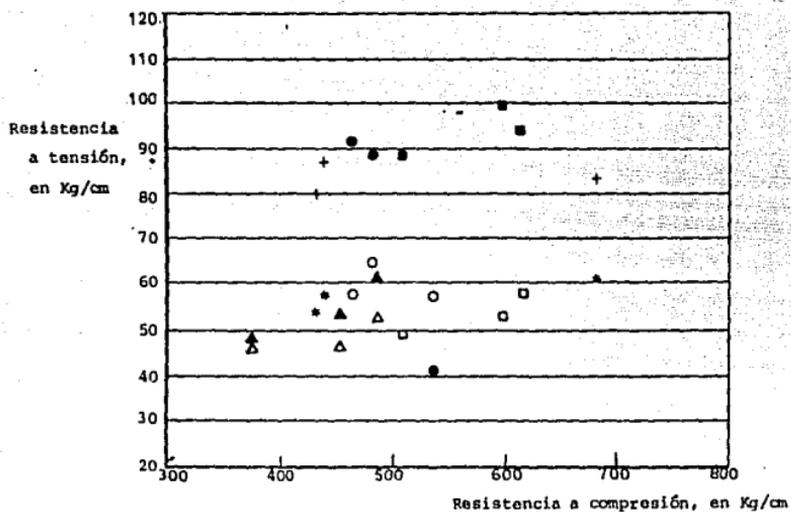


Fig. 11 ENSAYES SOMETIDOS A TENSION (PRUEBA BRASILEÑA)

\* FUENTE: Lee, Dy y Klaiber, FW, "FATIGUE BEHAVIOR OF SULPHUR CONCRETE" New Horizons in Construction Materials, I, ENVO Publishing Company, Inc (1976).



Concretos	Brasileña	M.R.
Grava 1 pulg-arena azul	○	●
Grava 1/2 pulg-arena azul	*	+
Grava 1 pulg-arena rosa	△	▲
Morteros		
A rena azul	□	■

Fig. 12. Relación entre las resistencias a tensión y compresión.

\* FUENTE: Lee, Dy y Klaiber, FW, "FATIGUE BEHAVIOR OF SULPHUR CONCRETE" New Horizons in Construction Materials, I, ENVO Publishing Company, Inc. (1976)

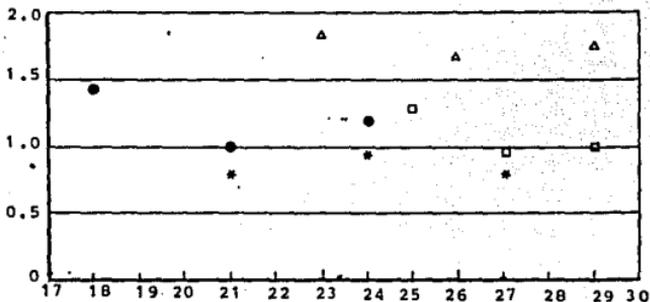


Fig. 13 EQUIPO PARA PRUEBAS DE DESGASTE

\* FUENTE: Lee, Dy y Kleiber, FW, "FATIGUE BEHAVIOR OF SULPHUR CONCRETE" New Horizons in Construction Materials, I, ENVO Publishing Company, Inc (1976).

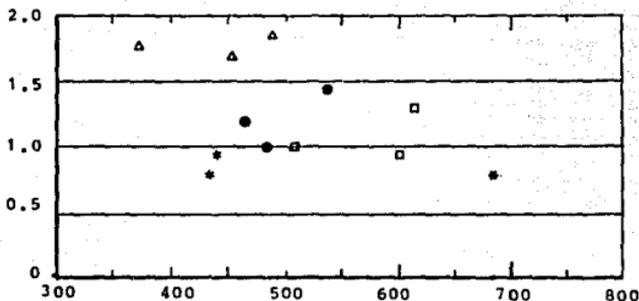
\* FUENTE: Lee, Dy y Klaiber, FW, "FATIGUE BEHAVIOR OF SULPHUR CONCRETE" New Horizons in Construction Materials, I, ENVO, Publishing Company, Inc (1976).

Desgaste,  
en cm.



Consumo de azufre,  
porcentaje en peso.

Desgaste,  
en cm.



Resistencia a  
compresión, -  
en kg/cm

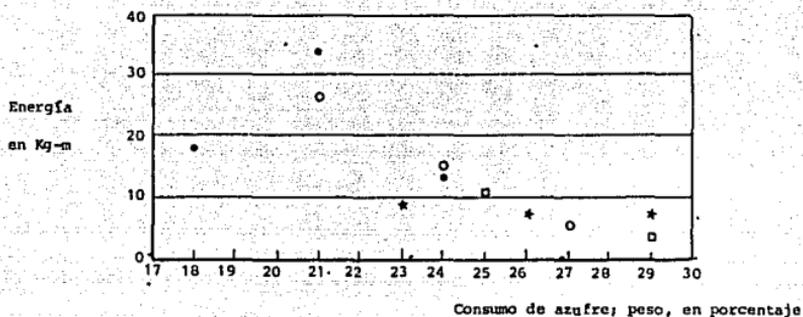
● Grava 1" Arena azul    ▲ Grava 1" Arena Rosa  
\* Grava 1/2" Arena azul    □ Mortero, Arena azul

fig. 14 EFECTO DEL CONSUMO DE AZUFRE Y LA RESISTENCIA A COMPRESION EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE

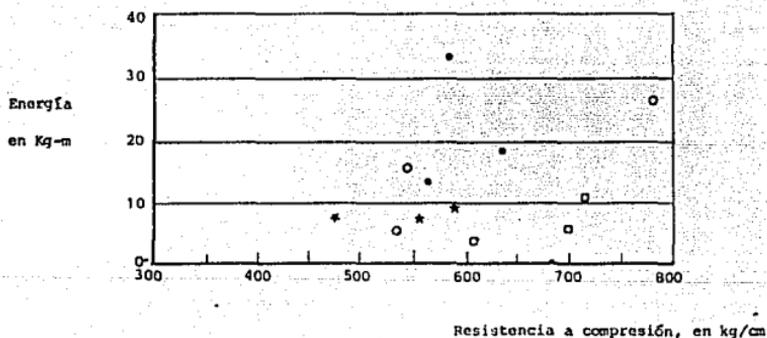


Fig. 15 EQUIPO PARA PRUEBA  
DE IMPACTO

\* FUENTE: Lee, Dy y Klaiber, FW, "FATIGUE BEHAVIOR OF SULPHUR  
CONCRETE" New Horizons in Construction Materials, I,  
ENVO Publishing Company, Inc (1976)

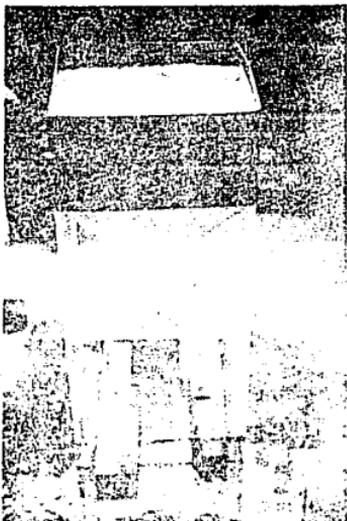


\* FUENTE: Lee, Dy y Klaiber, FW, "FATIGUE BEHAVIOR OF SULPHUR CONCRETE" New Horizons in Construction Materials, I, ENVO Publishing Company, Inc (1976).



- Grava 1 pulg-arena azul
- Grava 1/2 pulg-arena azul
- \* Grava 1 pulg-arena rosa
- Mortero, arena azul

Fig. 16 RELACION ENTRE LA RESISTENCIA AL IMPACTO, CONSUMO DE AZUFRE Y RESISTENCIA A COMPRESION.



**Fig. 17 EQUIPO PARA PRUEBA  
DE PERMEABILIDAD.**

\* FUENTE: Lee, Dy y Keiber, FW, "FATIGUE BEHAVIOR OF SULPHUR CONCRETE" New Horizons in Construction Materials, I, ENVO Publishing Company Inc (1976).

TABLA 7 PROPIEDADES MECANICAS DE MORTEROS  
CON REFUERZO

ENSAYE MORTERO *	TENSION, Kg/cm <sup>2</sup> (COMPRESION DIA- METRAL)	TENSION, Kg/cm <sup>2</sup> (MODULO DE RO- TURA)	IMPACTO Kg-m	ABRASION mm
70% Azufre 30% Arena Fibra de vidrio	41	44	--	--
50% Azufre 50% Arena y Fibra de lechugui- lla.	40	--	--	--
50% Azufre 50% Arena y Fibra de vidrio	36	--	6	7
40% Azufre 60% Arena y Fibra de lechugui- lla.	--	-6	12	9

\* La adición de fibras se realizó por tanteos de manera que la mezcla fuera trabajable.

\* FUENTE: Lee, Dy y Klaiber, FW, "FATIGUE BEHAVIOR OF SULPHUR CONCRETE" New Horizons in Construction Materials, I, ENVO Publishing Company, Inc (1976)

\* FUENTE: Lee, Dy y Klaiber, FW, "FATIGUE BEHAVIOR OF SULPHUR CONCRETE" New Horizons in Construction Materials, I, ENVO Publishing Company, Inc (1976).



Fig. 1 DEFICIENTE COMPACTACION



Fig. 2 ADECUADA COMPACTACION

FIG. 18 INFLUENCIA DE LA COMPACTACION EN LA PERMEABILIDAD.

#### CAPITULO IV DOSIFICACION DE CONCRETOS DE AZUFRE

La dosificación de las mezclas de concreto de azufre, al igual que las mezclas de concreto de cemento Portland, dependerá básicamente de las características físicas de los materiales componentes.

Aunque la resistencia a la compresión varía proporcionalmente a los consumos de azufre, cuando menos dentro de cierto intervalo, factores más determinantes de la cantidad de azufre requerida están dados por la trabajabilidad de la mezcla y el grado de calidad que se requiere lograr en los acabados superficiales.

El criterio que se siguió en este trabajo para determinar la cantidad de cada uno de los materiales que debe intervenir en la mezcla, fue el de calcular los volúmenes absolutos de los materiales componentes, la suma de los cuales debe ser igual al volumen requerido.

#### IV.1 RELACION GRAVA/ARENA

Para determinar las cantidades de grava y de arena que se deben mezclar para obtener el mínimo volumen de vacío, se hicieron diferentes combinaciones de estos materiales a las cuales se les determinó el paso volumétrico compacto.

Las combinaciones que se estudiaron fueron:

GRAVA (Tamaño máximo).	ARENA (contenido de polvo)
Andesítica 25 mm (1")	Andesítica azul (11%)
Andesítica 25 mm (1")	Andesítica rosa (16%)
Andesítica 13 mm (½")	Andesítica azul (11%)

Para cada combinación de materiales existe una relación grava/arena que resulta óptima; la menor cantidad de vacíos conducirá a los mayores pesos volumétricos, (Pág.66-Fig. 19). Si se calculan los volúmenes absolutos que ocupan estos materiales, en función de su peso específico, la diferencia entre los volúmenes aparentes y los volúmenes absolutos deberá ser ocupado por el azufre; en la (Pág.68.Fig.20), se presentan estas relaciones de volúmenes para las combinaciones de los materiales incluidos en éste trabajo.

Los menores consumos de azufre no necesariamente conducen a las mezclas óptimas, ya que aparte del aspecto económico, hay que considerar las características de resistencia, trabajabilidad, acabados, etc., a que dan lugar.

Para seleccionar la relación grava/arena que condujera a la mezcla óptima, cuanto a resistencia a compresión, se hicieron pruebas preliminares con diferentes relaciones grava/a-

rena (Pág. 69-Fig. 21), de las que se determinaron las siguientes relaciones que se consideraron las más efectivas:

GRAVA ANDESITICA TAMAÑO MAXIMO	ARENA ANDESITICA	% GRAVA EN PESO	% ARENA EN PESO
25 mm (1")	Azul "	45	55
13 mm (½")	Azul	45	55
25 mm (1")	Rosa	55	45

Como se puede observar al comparar las (Págs. 68, 69 - Figs. 20, 21) salvo los concretos con agregados de 13 mm (½") - en el que la relación óptima coincidió con el comportamiento - observado en los ensayos preliminares, para los otros dos casos las relaciones que se recomiendan resultan diferentes a - las teóricas. Los consumos de azufre empleados en esta comparación fueron los requeridos para alcanzar mezclas trabajables y apariencia aceptable.

#### IV.2 CONSUMO DE AZUFRE

Determinadas las proporciones en que se deberían mezclar la grava y la arena para alcanzar las mejores características, en cuanto a la resistencia, queda por resolver la influencia de los consumos de azufre en cuanto a trabajabilidad y apariencia.

La trabajabilidad fué estimada en función de la relación diámetro/altura que adoptaba una mezcla al dejarla caer - desde altura de 45 cm sobre una superficie horizontal lisa, es

ta prueba, aunque bastante imprecisa, da idea de la facilidad con que se puede acomodar una mezcla en las cimbras. En la (Pág.70-Fig.22) se presentan los resultados alcanzados y se puede observar, como tendencia general, que al aumentar los consumos de azufre aumenta el índice de trabajabilidad; así mismo a medida que aumenta la finura de los materiales componentes, concretos de 13 mm de agregado grueso, concretos con arena rosa, se requieren mayores consumos de azufre.

Se consideró como intervalo aceptable la trabajabilidad de los valores comprendidos entre 5 y 8.

Los concretos con valores mayores que 8 presentaron por lo general, exceso de azufre en su aspecto (Pág.70-Fig.22)

La apariencia del acabado se estimó con el criterio mostrado en la (Pág.71-Fig.23), basado en la tersura de la superficie de contacto con los moldes metálicos en que se colaron. La (Pág.72-Fig.24) presenta los consumos de azufre que fueron necesarios en concretos para alcanzar una superficie tersa. También en la misma figura se relacionan los consumos de azufre con la resistencia a compresión de los concretos.

Como se puede observar, para los concretos de arena andesítica azul y grava andesítica, tanto de 13 mm como de 25 mm de tamaño máximo, el consumo mínimo de azufre que produce un acabado superficial calificado como bueno resulta ser 24%. Para los concretos con grava andesítica de 25 mm y arena andesítica azul, el consumo mínimo por aspecto fue el 29%. También se observa que los consumos mínimos por apariencia no coinci-

den con las resistencias máximas que se pueden alcanzar, a excepción de la grava de 13 mm. y que por lo general las resistencias máximas se obtienen con consumos menores de los que se requieren por aspecto.

#### IV.3 CONSUMO DE ADITIVO PLASTIFICANTE

Con objeto de prolongar el tiempo en que una mezcla de concreto de azufre permanece fluida, se empleó un aditivo plastificante, dicitopentadieno, además de observar la influencia del consumo de éste aditivo en la resistencia y en la trabajabilidad de la mezcla. Se tomó como proporcionamiento de partida el de un concreto con un buen acabado superficial, así los consumos se variaron del 1 al 7% y como se observa en la (Pág. 73-Fig.25), en cuanto a trabajabilidad, medida esta como se estableció anteriormente, no existe un aumento sensible con el incremento del dicitopentadieno, su influencia es más significativa cuando se tienen consumos superiores a 3% del peso del azufre.

De acuerdo con los termogramas de las diferentes mezclas, de azufre y dicitopentadieno, (Págs. 27,28-Figs.5,6,7), se consideró que un consumo de aditivo del 2 al 3% del peso del azufre, resulta apropiado para la mayor parte de las mezclas.

\* FUENTE: "CONCRETE MANUAL", US, Bureau of Reclamation, Department of the Interior 7<sup>a</sup> Ed, Denver, Col. (1963)

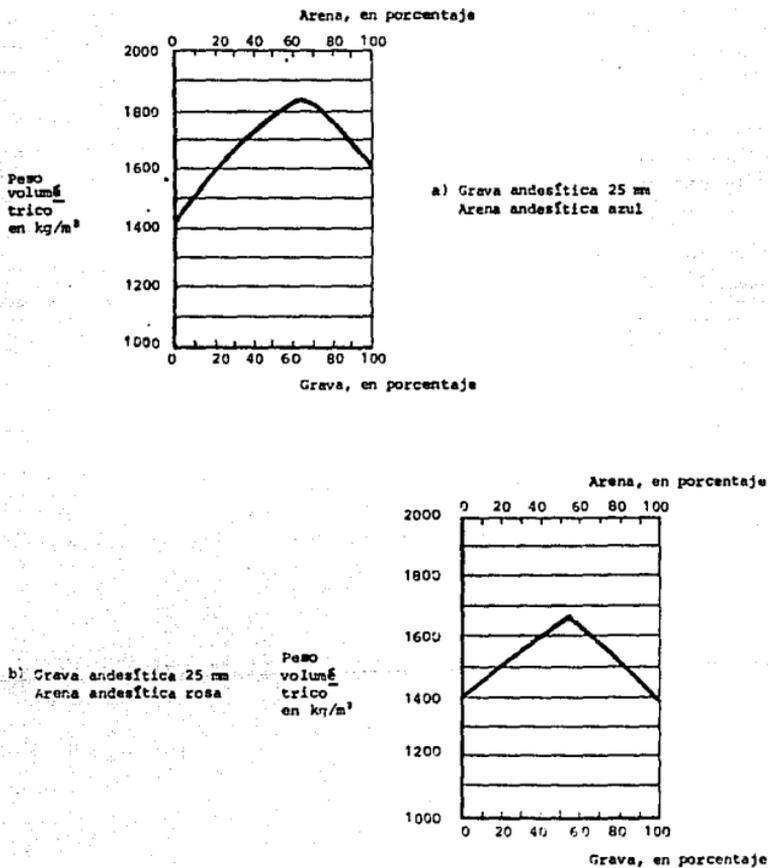
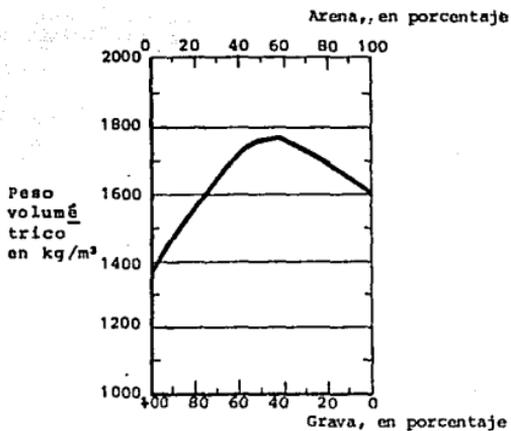


Fig. 19. PESO VOLUMETRICO PARA DIFERENTES COMBINACIONES

GRAVA - ARENA

Fig. 19 PESO VOLUMETRICO PARA DIFERENTES COM\_  
BINACIONES GRAVA - ARENA  
(continuación)



c) Grava andesítica 13 mm  
Arena andesítica azul

\* FUENTE: "CONCRETE MANUAL", US, Bureau of Reclamation, Department of the Interior 7ª Ed, Denver, Col (1963).

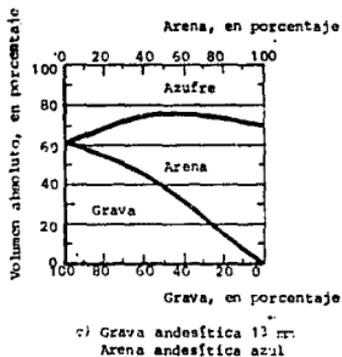
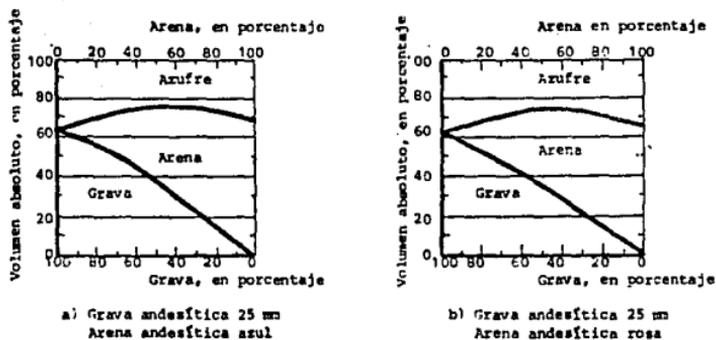
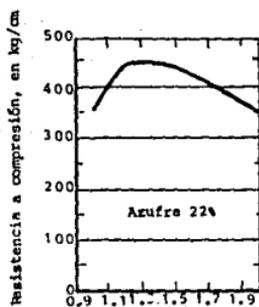


fig. 20 VOLUMENES ABSOLUTOS DE LOS MATERIALES COMPONENTES

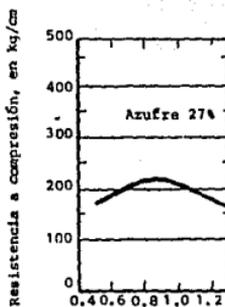
\* FUENTE: "CONCRETE MANUAL", US, Bureau of Reclamation, Department of the Interior 7<sup>a</sup> Ed, Denver, Co. (1963).

\* FUENTE: "CONCRETE MANUAL" US, Bureau of Reclamation Department of the Interior 7ª Ed, Denver, Col. (1963).



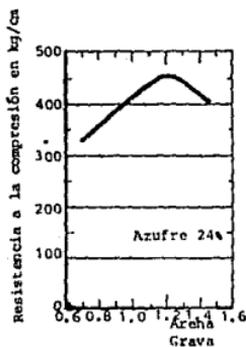
Arena  
Grava

a) Grava andesítica 25 cm  
Arena andesítica azul



Arena  
Grava

b) Grava andesítica 25 cm  
Arena andesítica rosa



c) Grava andesítica 13mm  
Arena andesítica azul

fig. 21 INFLUENCIA DE LA RELACION GRAVA - ARENA EN LA RESISTENCIA A COMPRESION

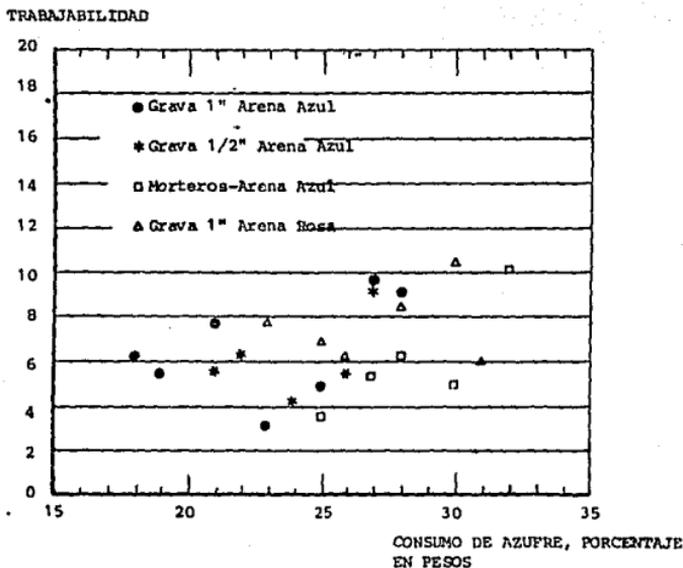
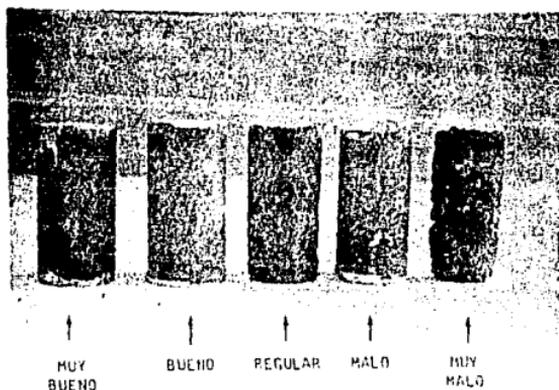


Fig. 22 CLASIFICACION DE LAS MEZCLAS DE ACUERDO CON SU TRABAJABILIDAD.

\* FUENTE: "CONCRETE MANUAL" US, Bureau of Reclamation, Department of the Interior 7<sup>a</sup> Ed, Denver, Col. (1963).



**Fig. 23 CALIFICACION DE LOS ACABADO DE ACUERDO  
A SU ASPECTO.**

\* FUENTE: L'bov, R, "CONCRETO CON AZUFRE", II Simposio Internacional sobre Tecnología del Concreto Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (mar 1975).

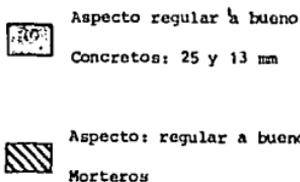
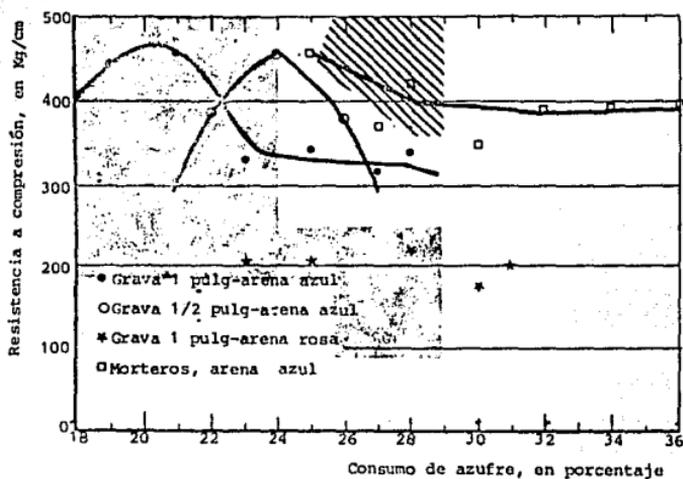
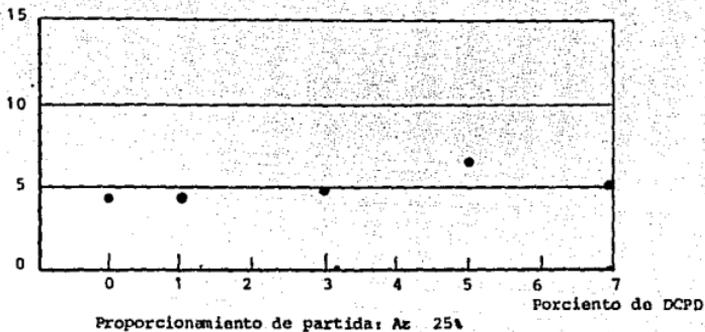


Fig. 24 Clasificación de las mezclas de acuerdo a su apariencia.

\* FUENTE: Loov, R, "CONCRETO CON AZUFRE" II Simposio Internacional sobre Tecnología del Concreto, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (mar 1975).

## Trabajabilidad



Proporcionamiento de partida: Az 25%  
 Ar 42%  
 Gr 33% Az + DCPD = Constante

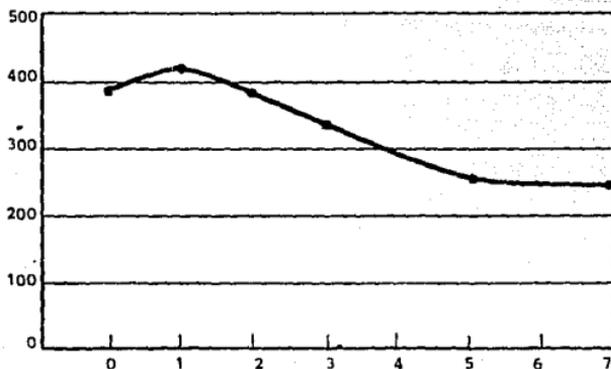
Resistencia a  
compresión,  
kg/cm<sup>2</sup>

Fig. 25 INFLUENCIA DEL DICICLOPENTADIENO EN LA TRABAJABILIDAD Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESION DE LAS MEZCLAS DE AZUFRE

\* FUENTE: Loov, R, "CONCRETO CON AZUFRE", II Simposio Internacional sobre Tecnología del Concreto. Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (mar 1975).

## CAPITULO V APLICACIONES

Aparte del empleo de concretos de azufre en elementos prefabricados (Pág.105-Ref.10) cuya elaboración requiere técnicas de moldeo y cuyo comportamiento se expuso en los capítulos previos, existen otras aplicaciones del azufre que por su relación con la industria de la construcción resultan atractivas. Al respecto, se hará referencia a las aplicaciones que ya han sido desarrolladas a nivel de aplicaciones de campo.

### V.1 MATERIALES IMPREGNADOS CON AZUFRE

Varios materiales porosos pueden ser impregnados con azufre mediante técnicas sencillas, dando como resultado el mejoramiento de sus propiedades físico mecánicas. Entre estos materiales se puede mencionar el concreto de cemento Portland, cerámica, madera, productos de papel y aglomerados de fibras vegetales (Pág.107-Ref.27).

El sistema que se recomienda consiste en secar el material por impregnar a temperaturas del orden de 121°C y después

sumergir los especímenes en azufre fundido. Para mayor efectividad en la penetración del azufre se recomienda hacer vacío - en la cámara de impregnación, con lo que se logra reducir notablemente el tiempo de inmersión.

Las telas y mallas de fibras impregnadas con azufre - pueden emplearse en revestimiento de muros y en la fabricación de elementos impermeables para techumbres.

Investigadores del institute of Paper Chemistry han desarrollado sistemas de paneles estructurales para la prefabricación de vivienda a base de papel impregnado con azufre, dando como resultado estructuras resistentes a la intemperie y - con buen aislamiento térmico. También existen patentes sobre el proceso de fabricación de cartón corrugado impregnado con - azufre, que tiene un uso potencial en techados.

Entre los materiales impregnados con azufre, probablemente el concreto de cemento Portland es el que mayores posibilidades presente en la industria de la construcción (Pág.107- Ref.28). Estos concretos, que por lo general se fabrican con mezclas de bajos consumos de cemento Portland, al impregnarse mejoran notablemente sus características mecánicas y físicas. La resistencia a compresión se puede incrementar en aproximadamente 10 veces, así como su resistencia a tensión y muy especialmente al ataque de las sales y a la mayoría de los agentes químicos. Lo anterior sugiere que este material puede encontrar un uso adecuado en la construcción de tubos para drenaje, banquetas, guarniciones, losas para puentes, pavimentos, bases

para postes, parapetos, etc. El incremento en costo por la impregnación con azufre puede compensarse con los ahorros en los consumos de cemento y con el mejor comportamiento de estos concretos.

## V.2 RECUBRIMIENTOS CON AZUFRE

El azufre plastificado se ha empleado como recubrimiento de petates, telas y mallas de fibras vegetales para producirir paneles y elementos de distintas formas. El Azufre se coloca en forma de pintura sobre el alma formada por los materiales mencionados, produciendo elementos rígidos e impermeables, que se agrieten cuando están sometidos a esfuerzos a flexión - (Pág.107-Ref.29).

El Southwest Research Institute realizó una serie de pruebas en Africa para recubrimiento de muros de adobe; los resultados fueron positivos cuando previamente a la colocación del azufre se fijó a los adobes una malla de fibras vegetales, la cual servía como refuerzo a la capa de azufre.

Otra aplicación del azufre plastificado como material de recubrimiento es como elemento de lija en el junteo de bloques de concreto de cemento Portland (Pág.107-Refs.30,31); con-siste en emplear una mezcla formada con azufre plastificado, fibras minerales y una carga de material fino, para unir bloques, los cuales se apilan en seco. La colocación del mortero de azufre sobre las piezas puede efectuarse manualmente o con equipos de aspersión, dando como resultado muros con caracte-

rísticas mecánicas comparables a las de los muros tradicionales. Entre las ventajas del sistema está la rápida construcción de los muros, empleo de mano de obra no especializada y acabado resistente, aislante e impermeable. Como posibles desventajas son el uso de fibras y aditivos retardantes del fuego y, en su caso, el empleo del equipo especializado de aspersión. El Southwest Research Institute construyó como unidades muestras varios prototipos en Colombia, Guatemala, Tanzania y Botswana (Pág.107-Ref.32).

### V. 3 PAVIMENTACION A BASE DE AZUFRE - ASFALTO

Uno de los campos de aplicación de azufre donde más es fuerzos y recursos se ha invertido, es el relativo a la pavimentación de carreteras. De 1975 a la fecha se han realizado cinco pruebas a escala real en carreteras de Canadá, Europa y Medio Oriente (Pág.107-Ref.33). El éxito potencial de estas investigaciones depende de los siguientes factores:

- a) Disponibilidad de grandes reservas de azufre.
- b) Crecimiento del costo de los derivados del petróleo.
- c) Mejores propiedades físico-mecánicas que las de los asfaltos.
- d) Posibilidad de empleo de materiales de baja calidad y costo como algunos desechos industriales no apropiados para el asfalto tradicional.

En las mezclas empleadas para la pavimentación, el azufre puede sustituir entre 30 y 50 por ciento el peso del asfal

to, además de que los compuestos azufre-asfalto tienen mayores densidades que los materiales empleados en la pavimentación - tradicional y de otras propiedades mejoradas, entre las que se pueden mencionar:

- a) Mayor resistencia, según método Marshall.
- b) Posibilidad de empleo de materiales de menor calidad o de espesores reducidos.
- c) Aumento de la rigidez a altas temperaturas sin la pérdida - correspondiente a bajas temperaturas. Esto permite el uso de asfaltos más dúctiles para minimizar grietas a bajas tem peraturas sin los peligros de las deformaciones a altas tem peraturas.
- d) La viscosidad de las mezclas azufre-asfalto es más baja que la del asfalto solo, por lo que se puede mezclar a temperaturas más bajas con el consiguiente ahorro de energía.
- e) Mayor resistencia al ataque de la gasolina, diesel y otros solventes.
- f) Mejor comportamiento bajo esfuerzos de fatiga.

En cuanto equipo y tecnología, básicamente son los mis mos que se utilizan en la pavimentación tradicional con asfalto.

Existe un proceso patentado Thermopave que utiliza una mezcla con una proporción, en peso, de 81 por ciento de arena, 13 por ciento de azufre y 6 por ciento de asfalto (Pág.108-Ref. 34). Al agregado calentado entre 135-150°C en la mezcladora, se adiciona el asfalto; después de mezclar durante 30 seg. se

agrega el azufre fundido y continúa mezclando por otros 30 segundos como resultado un material de pavimentación de alta resistencia.

Esta tecnología sí requiere de equipo especial, como son camiones con sistema de calentamiento para el transporte del material, equipo de pavimentación modificado para manejar mezclas más fluidas, etc. Sin embargo, con las mezclas antes descritas se elimina la necesidad de la compactación.

#### V.4 ESPUMAS DE AZUFRE

La tecnología para espumas rígidas de azufre se encuentra desarrollada y su aplicación se ha intentado en soluciones estructurales gracias a sus características físico-mecánicas. Las espumas con densidades entre 100 y 600 Kg/m<sup>3</sup> pueden alcanzar resistencias a compresión entre 3 y 35 Kg/cm<sup>2</sup> y se mantienen constantes hasta deformaciones unitarias de 50 por ciento (Pág.108-Ref.34).

Las espumas tienen excelentes características de aislamiento térmico, baja absorción de agua, buena adherencia a otros materiales y buena estabilidad dimensional. Su resistencia al ataque químico y biológico también es adecuada. Están formadas básicamente por azufre (90 por ciento) y la tecnología para su fabricación es relativamente sencilla pues el azufre se puede espumar en el sitio de su aplicación.

La potencialidad de su empleo en la construcción es grande. Entre sus aplicaciones está la de servir como base

ESTA DEBE NO DEBE  
SMUR

aislante en la construcción de carreteras, manufactura de elementos estructurales por moldeo, por ejemplo, paneles tipo - - sandwich, etc.

#### ALGUNOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS APLICABLES A LA CONSTRUCCION DE VIVIENDAS, ADECUADOS A LA PREFABRICACION

##### a) ADOQUIN TRABABLE

Uno de los problemas más graves en los asentamientos humanos de áreas rurales y zonas marginadas de las ciudades es la falta de calles y andadores adecuados que eviten las condiciones de insalubridad que se generan, sobre todo en zonas extremadamente áridas o durante la época de lluvias en otras partes del país.

En 1970, en el Proyecto Experimental de Vivienda (PRE-VI), realizado en Perú y auspiciado por la ONU, se trató de aliviar estos problemas con el desarrollo de un sistema de pavimentación económico a base de adoquines trabables de concreto de cemento Portland que permitiera la construcción de caminos con técnicas apropiadas para el auto-constructor. Dentro del proyecto no se incluyó la elaboración de prototipos, y no fue sino hasta 1973 cuando se fabricó en Montreal, Canadá, la primera muestra en que se utilizó concreto de azufre como materia prima, dado que sus características de rápido fraguado y facilidad de moldeo se prestaban para el diseño peruano. En el presente estudio se trató de adecuar las técnicas de fabri-

cación y colocación del sistema y evaluar la factibilidad de su uso en el contexto mexicano.

El sistema de pavimentación consiste de elementos modulares de 20 x 20 x 10 cms. con dos de sus costados rebajados y los otros dos volados para formar un traslape horizontal. De esta forma, cada pieza está apoyada en las dos contiguas y las cargas se distribuyen a través de la junta. La capacidad estructural del sistema es grande y se ha empleado con éxito en varios países de Europa y América Latina.

La versatilidad del sistema permite su empleo en la pavimentación de calles con tráfico de vehículos, andadores, plazas, patios y también en pisos domésticos.

Para su fabricación el primer molde prototipo fue de madera barnizada y base de formaica. A fin de obtener un molde económico y de rápida fabricación se experimentó con varios hechos con mortero de cemento Portland. Con el de madera como contramolde se colaron cinco juegos de moldes.

#### COLADO

Según el tipo de elemento que se va a colar se ensamblan las piezas del molde, cubriéndolas posteriormente con una capa ligera de aceite. El procedimiento de colado es el mismo, ya sea para molde de madera o de concreto. Se comienza por vaciar una primera capa de mezcla de 2 a 3 cm. de espesor, acomodando el material mediante vibración producida al golpear la mesa de trabajo con un mazo de hule. Enseguida se esparce en-

cima de la mezcla una capa de 20 a 25 mm. de espesor de grava seca y fría, y se revuelve por medio de un varillado, se cue-  
lan en forma alternada capas de mezcla y grava, acomodando el  
material por varillado o vibrado, y una vez lleno el molde, se  
termina el acomodo del material y se envasa. La parte supe-  
rior de la pieza queda rugosa, pero como va en contacto con la  
base del pavimento no tiene importancia.

La solidificación de la pieza en moldes de madera es -  
muy lenta (25 min. aproximadamente) debido al aislamiento tér-  
mico que le proporciona este material, en tanto que en moldes  
de concreto es más rápido (15 min.). La grava fría tiene como  
función acelerar el fraguado y reducir el consumo de mezcla.

#### PROCESO CONSTRUCTIVO

Con los seis moldes se fabricaron 130 adoquines, de -  
los cuales se utilizaron 108 para pavimentar un área de 1.80 X  
2.40 m. con una superficie total de 4.3 m<sup>2</sup>. Varias piezas se  
hicieron en tonos rojos, ocre, negro y turquesa y se colocaron  
con un arreglo asimétrico produciendo una apariencia agradable.

La colocación de los adoquines es sencilla y rápida. Pri-  
mero se puso una capa de grava sobre la que se extendió otra -  
de arena de unos 3 cm. de espesor. Se niveló la arena con una  
regla y se comenzaron a colocar los adoquines por dos orillas  
contiguas del área, permitiendo separaciones entre adoquines -  
hasta de 3 mm. Se nivelaron los adoquines con una regla de ma-  
dera y después de colocar todas las piezas se llenaron las - -

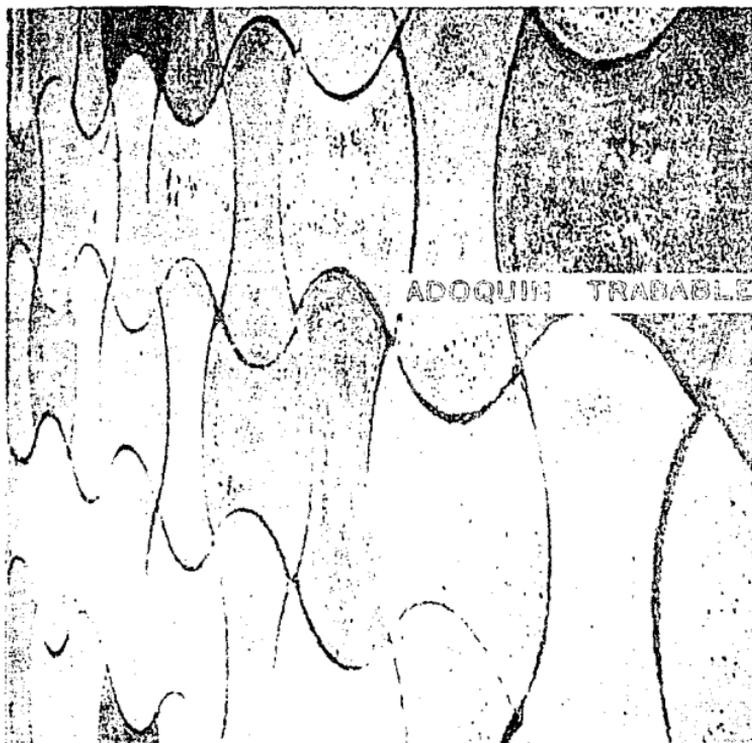
grietas con arena fina. Después de la primera lluvia se volvieron a llenar las grietas.

Un albañil con su ayudante pavimentó el área en dos horas.

#### ESPECIFICACIONES DEL ADOQUIN POR PIEZA

Peso		8 Kg.
Dimensiones	módulo	20 x 20 cm.
	extremos	28 x 12 cm.
	espesor	10 cm.
Área de piso por pieza		0.04 m <sup>2</sup>
Número de piezas por metro cuadrado de pavimento		25
Peso por metro cuadrado		200 Kg.
Tiempo de colocación*		<u>2 m<sup>2</sup></u> hora-hombre

\* Basado en la muestra construida.



ELEMENTOS MODULARES

(ADOQUIN TRABABLE)

\* FUENTE: "APLICACIONES DEL AZUFRE A LA VIVIENDA ECONOMICA Y A OTRAS CONSTRUCCIONES", Carlos Javier Mendoza. Noviembre 1930, Instituto de Ingenieria, UNAM. Ilustración tomada de la misma fuente.



EN EL PRESENTE ESTUDIO SE TRATO DE ADECUAR LAS TECNICAS DE FABRICACION Y COLOCACION DEL SISTEMA Y EVALUAR LA FACTIBILIDAD - DE SU USO EN EL CONTEXTO MEXICANO.



LA COLOCACION DE  
LOS ADOQUINES ES  
SENCILLA Y RAPIDA

\* FUENTE: "APLICACIONES DEL AZUFRE A LA VIVIENDA ECONOMICA Y A OTRAS CONSTRUCCIONES", Carlos Javier Mendoza. Noviembre 1980, Instituto de Ingenieria, UNAM. Ilustración tomada de la misma fuente.

**b) MURO DIVISORIO**

En el mercado de materiales industrializados para la construcción existen muchos tipos de muros divisorios, como los de mampostería de piezas muy diversas, paneles de madera, yeso, metal, etc. Además, en la construcción tradicional de vivienda se han desarrollado varios sistemas ingeniosos aprovechando materiales regionales como carrizo, bambú, palma, otate, zacate, etc. La mayoría de los sistemas de paneles requiere una estructura adicional, resultando costosa su utilización; por su parte en los muros de bloques y tabiques es indispensable un gran número de piezas y frecuentemente un aplanado adicional; además, los sistemas tradicionales muchas veces no cumplen con los requisitos mínimos de durabilidad y seguridad estructural.

En este estudio se trató de superar varios de dichos problemas con el desarrollo de un sistema apropiado para la auto-construcción. Los criterios considerados en el diseño fueron: reducción del número de piezas, obtención de acabados que no requieren aplanados térmico y acústico, facilidad de construcción y versatilidad en la utilización del sistema. El empleo de precolados a base de morteros de azufre resulta apropiado para alcanzar estos objetivos dada la precisión que se puede lograr en el moldeo y los acabados tersos.

El sistema desarrollado está basado en piezas machihembradas con módulos de 50 X 50 X 10 cm. Junta horizontal seca, junta vertical colada en el lugar y una barra de refuerzo an-

ciada a la cimentación. Se considera que es un elemento intermedio entre los bloques y los paneles, que no tiene ni el gran número de juntas de un sistema a base de mampostería ni la necesidad de una estructura interna de apoyo. El sistema de construcción es mixto, pues combina la utilización de elementos prefabricados con el procedimiento de juntarlos con colados en el lugar. Resulta un sistema relativamente rápido y fácil de aplicar sin necesidad de mano de obra especializada.

El diseño del sistema facilita la acción con otros muros perpendiculares cada 50 cm. lo que hace posible su uso en muros divisorios internos, fachadas, elementos decorativos, bardas, etc. Su impermeabilidad permite su empleo en muros para instalaciones hidro-sanitarias.

El molde consta básicamente de una caja de madera formada por cinco componentes y una tapa. Las superficies de los dos frentes están recubiertas con una lámina de plástico a fin de mejorar la calidad del acabado del elemento; las otras partes del molde están barnizadas con un producto acrílico resistente al calor. El ensamblado de las piezas fue diseñado a base de un sistema de bisagras, topes de madera y prensas de carpintero lo que permite un rápido armado y desmolde.

La característica líquida de la mezcla de azufre permitió diseñar el molde para efectuar el colado en sentido vertical, logrando una pieza con acabado tersos en todas sus superficies aparentes.

### COLADO

Se realiza en dos etapas: primera, sin tener la tapa puesta, se trata de vaciar la mezcla por los dos extremos donde la caída del material tiene menos impedimentos y asegurar de esta forma un llenado continuo y uniforme.

Para acomodar el material se vibró el molde, haciéndolo oscilar sobre su base. El llenado se efectuó hasta aproximadamente 3 cm. abajo del borde superior.

En la segunda etapa de colado se utilizaron dos procedimientos distintos, tratando de resolver el problema de la contracción por fraguado. Cuando se empleó solamente la tapa de madera, surgió la necesidad de rellenar a tope varias veces el molde, rompiendo primero la capa superior del material ya fraguado para evitar la formación de burbujas de aire en el cuerpo de la pieza. Para resolver este problema, se adicionó una tolva metálica por encima de la tapa. En este caso, la tolva se llena con mezcla para que el material almacenado vaya reemplazando el volumen reducido por la contracción por fraguado. En realidad esta técnica no funcionó adecuadamente debido a que el material en la tolva se solidificó antes de que las contracciones máximas del material en el molde tuvieran lugar.

Lo anterior se explica por el alto nivel de aislamiento térmico que proporciona el molde de madera comparado con el que se puede lograr en la tolva metálica. Para hacer funcional este sistema se tuvo que mantener líquida la mezcla de la tolva rompiendo y quitando la capa fraguada del material.

Finalmente resultó más conveniente colar la pieza solo con la tapa de madera, rellenando el molde las veces que fueron necesarias. Este problema se evitaría si se fabricara el molde totalmente de metal.

#### PROCESO CONSTRUCTIVO

Se evaluó mediante la construcción de un tramo de muro de muestra: se construyó independientemente de muros existentes a fin de evaluar su estabilidad en forma cualitativa. El muro consiste en cinco módulos horizontales y cuatro verticales, de 2.50 m. de largo por 2 m. de altura, para mostrar la facilidad del sistema para unirse con otros muros perpendiculares se adicionó un módulo en sentido transversal al tramo principal.

La cimentación de muro se hizo de concreto de cemento Portland, de 12 cm. de ancho y con una ranura de 5 X 3 cm. en la parte superior para recibir las juntas macho de las piezas. En el lugar correspondiente a las juntas verticales, se hicieron perforaciones con un taladro portátil donde se alojaron barras de refuerzo de 4.7 mm. (3/16 pulg.) de diámetro y 2.50 m. de altura. El anclaje de las barras se efectuó con azufre fundido.

El muro se subió hilada por hilada, colando las juntas al terminar de colocar cada una. Después de dos hilados se puso un andamio para subir las dos hiladas restantes. La colocación fue relativamente fácil: mientras una persona acomodaba -

las piezas otra las transportaba y preparaba la mezcla para los colados. Puesta la primera hilada, la colocación de las otras fue rápida. Se estima que dos personas pueden colocar ocho piezas en una hora, incluyendo el colado de las juntas.

### ESPECIFICACIONES

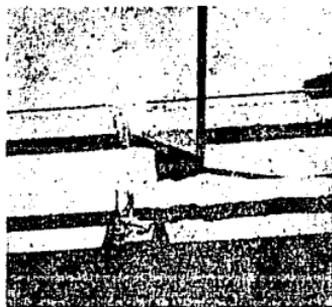
Peso	32 Kg.
Dimensiones	50 X 50 X10 cm.
Area de fachada por pieza	0.25 m <sup>2</sup>
Número de piezas por metro cuadrado de muro	4
Peso por metro cuadrado de muro	128 Kg.
Tiempo de colocación*	<u>1.5 m<sup>2</sup> de muro</u> hora-hombre

\* Estimación basada en la muestra construida.

ESTE SISTEMA ESTA BASADO EN PIEZAS MACHICHEMRADAS.



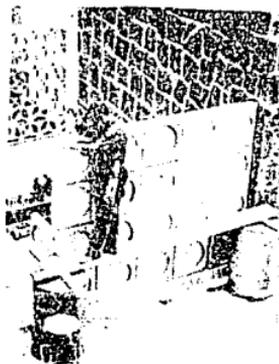
\* FUENTE: "APLICACIONES DEL AZUFRE A LA VIVIENDA ECONOMICA Y A OTRAS CONSTRUCCIONES", Carlos Javier Mendoza. Noviembre 1980. Instituto de Ingeniería, UNAM. Ilustración tomada de la misma fuente.



PARA HACER FUNCIONAL ESTE SISTEMA SE TUVO QUE MANTENER LIQUIDA LA MEZCLA



BARRAS DE REFUERZO DE 4.7 mm.  
(3/16")



EL ASPECTO VISUAL ES EXCELENTE: LA MODULACION Y EL RELIEVE DEL MURO PRODUCEN UN EFECTO GEOMETRICO INteresante.

\* FUENTE: "APLICACIONES DEL AZUFRE A LA VIVIENDA ECONOMICA Y A OTRAS CONSTRUCCIONES, Carlos Jvaier Mendoza. Noviembre 1980. Instituto de Ingenieria, UNAM. Ilustración tomada de la misma fuente.

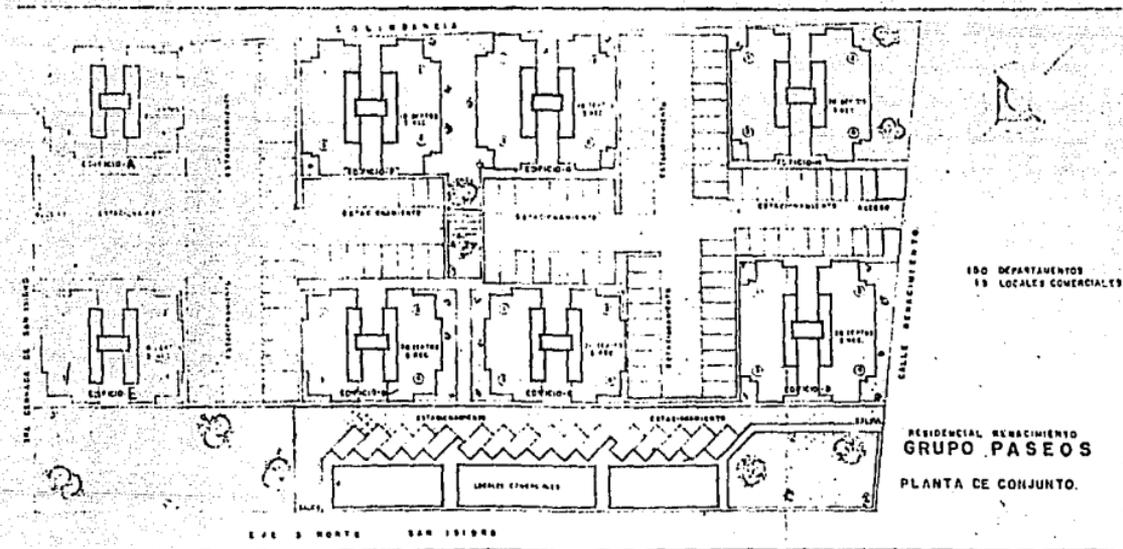
UTILIZACION RECOMENDABLE PARA EL MANEJO  
DEL AZUFRE EN LA MEZCLA

PROCEDIMIENTO

- 1.- Precalear la olla de la revolvedora.
- 2.- Calentar los agregados a temperatura del orden de 150°C.
- 3.- Fundir el azufre y agregar el aditivo plastificante (140°C)
- 4.- Colocar parte de la grava y la arena ya caliente en la revolvedora.
- 5.- Vaciar parte del azufre plastificado.
- 6.- Repetir 4 y 5 hasta que todo el material esté dentro de la revolvedora.
- 7.- Revolver de 3 a 4 minutos todos los materiales.
- 8.- Colar.

# APLICACIONES DEL AZUFRE A ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS EN UN

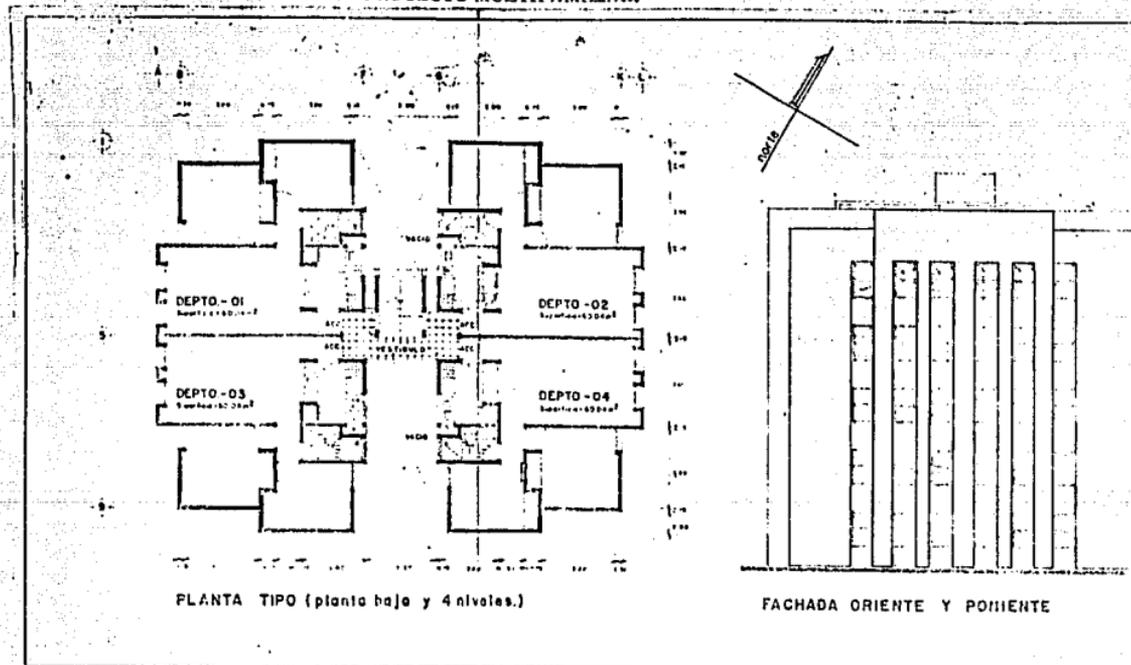
## PROYECTO MULTIFAMILIAR.



En este conjunto habitacional se va a definir los elementos constructivos que pueden desarrollarse con azufre.

1. Estacionamiento: La pavimentación a base de azufre-asfalto;
2. Andadores: Adoquín trabable;
3. Drenaje: Tubos de azufre

APLICACIONES DEL AZUFRE A ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS EN UN  
PROYECTO MULTIFAMILIAR.



4. Muros Divisorios: Sistema basado en piezas machihembradas.
5. Bardeado del Conjunto: Celosía trabable.

## CAPITULO VI RECOMENDACIONES DE DISEÑO Y CONSTRUCCION

El empleo de los concretos de azufre, en el medio de la construcción y especialmente en la prefabricación de elementos moldeados, tiene un enorme campo de aplicación, y las posibilidades de alcanzar productos de calidad adecuada a sus funciones depende en gran parte de las precauciones que se tomen en su elaboración.

Para tal objeto se propone seguir las recomendaciones indicadas a continuación:

- a) En cuanto a la selección de la materia prima, azufre y agregados, conviene tener presente que puede emplearse azufre puro o con ciertas impurezas compatibles con la aplicación que se le de al producto elaborado. Los agregados deben ser sanos, de calidad comparable a los empleados en la fabricación de los concretos de cemento Portland, para obtener productos mejores y más económicos pero también es factible empelar agregados de calidad inferior. Es importante que las arenas tengan partículas más finas que la malla 200

200 (0.074 mm) en cantidades aproximadas al 10%. El tamaño máximo de agregado grueso está limitado por la dimensión mínima del molde, siendo recomendable que la relación entre el tamaño máximo de la grava y la dimensión mínima del molde sea cuando mucho de 1:4.

Por otra parte, los tamaños pequeños de agregado grueso, grava de 13 mm. facilitan la colocación y compactación del concreto de azufre.

El empleo de aditivos retardantes de la acción del fuego se recomienda siempre que el concreto de azufre se emplee en la construcción de elementos estructurales o en zonas habitadas cerradas donde los gases tóxicos ( $SO_2$ ) generados por la combustión ponga en peligro la vida humana.

Los aditivos plastificantes son recomendables cuando se requiera de un tiempo apreciable para la colocación y compactación del concreto, como es el caso de piezas de formas complejas ó de elementos de tamaño tal que requieren del empleo de más de una revoltura en los que sería perjudicial la formación de juntas frías, se recomienda un consumo de aditivo plastificante del 2 al 3% del peso del azufre. El uso de colorantes dependerá de la tonalidad deseada y su proporcionamiento deberá hacerse por peso de la mezcla.

b) Se recomienda hacer la dosificación de la mezcla en función de los volúmenes absolutos que ocupan los materiales, aunque la proporción en que interviene cada uno de ellos dependerá de sus características físicas. Una mezcla de partida

puede ser la formada por una combinación de grava y arena - al 50% en peso y un consumo de azufre del 25% del peso total de la mezcla. Es muy probable que esta mezcla no resulte ser la óptima, pero a partir de ella se pueden hacer modificaciones que conduzcan a mejores resultados en cuanto a trabajabilidad, resistencia y economía de las mismas. Conviene realizar la dosificación por peso para lograr mayor uniformidad en los concretos elaborados.

- c) A menos que un estudio económico indique lo contrario, la técnica recomendable a seguir para el mezclado de los concretos será la de calentar los agregados y fundir el azufre por separado y posteriormente efectuar el mezclado en un recipiente (revolvedora) calentado previamente. La temperatura entre la que debe de oscilar la mezcla será 119°C-150°C. El tiempo de mezclado dependerá de la eficiencia del sistema empleado y del volumen de ésta.

El combustible a emplear para el calentamiento de los agregados y para fundir el azufre estará regida por el aspecto económico.

- d) El colado deberá efectuarse en el lapso más breve que sea posible, por lo que la consistencia de la mezcla deberá estar de acuerdo con la complejidad del molde, con el fin de lograr mejores acabados y una compactación adecuada. La forma más eficiente de compactar las mezclas es por medio de vibrado externo, pero a falta de este, también podrá efectuarse la compactación por varillado. Para evitar la

presencia de juntas frías y agrietamiento verticales por limitación a la libre contracción de las mezclas, se recomienda emplear una sola revoltura para el colado de las piezas. Es conveniente tener presente que los acabados tradicionales con liana no pueden efectuarse, por lo que los moldes deben tener el mínimo de área expuesta para lograr mejor apariencia del elemento colado.

- e) Para lograr los mejores resultados en cuanto a los acabados, rapidez de ejecución y uniformidad de los elementos construídos, se recomienda emplear moldes metálicos; aunque la inversión inicial pudiera resultar mayor en comparación con el empleo de otros materiales, si el número de piezas por construir es suficientemente grande, el costo final y los resultados alcanzados con los mismos los hacen deseables.
- f) Para efectos del dimensionamiento de elementos estructurales construídos con concretos de azufre, se pueden suponer las siguientes propiedades mecánicas, que se basan en los resultados obtenidos con los agregados andesíticos característicos de la Ciudad de México.

Resistencia a compresión	500 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a tensión (indirecta)	50 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a tensión (flexión)	90 kg/cm <sup>2</sup>
Deformación unitaria última	=0.004
Módulo de elasticidad	180 000 kg/cm <sup>2</sup>

Además, para este material puede suponerse una relación lineal en la gráfica esfuerzo-deformación unitaria. El -

efecto de la deformación diferida debe tomarse en cuenta; aunque no existe información suficiente para cuantificarla, se ha encontrado que es mayor que la correspondiente a los concretos de cemento Portland.

La mayor resistencia de los concretos de azufre a la fatiga así como las altas resistencias del mismo a la tensión por flexión y a la abrasión hacen recomendable este material para emplearlo en pavimentos.

- g) Los concretos de azufre tienen una alta resistencia a la acción de los ácidos y sales, así como un bajo coeficiente de permeabilidad, por lo que se recomienda emplearlos para la construcción de drenajes de residuos industriales y otros usos semejantes.
- h) El empleo de las barras de refuerzo convencional en los concretos de azufre no es recomendable, a menos que se pueda evitar la humedad en las piezas que se refuerzan; sin embargo, si el acero se encuentra galvanizado no existe peligro de corrosión del mismo.
- i) El empleo de los concretos de azufre en; construcciones de muros reforzados, como recubrimiento protector en muros y techos en la fabricación de muros divisorios o celosías, - el uso como elemento de liga entre unidades prefabricadas - como bloques de concreto, tabique rojo recocido o tabicón, la técnica más recomendable es el empleo de la cuchara con mezclas fluidas que contengan al menos el 40% de azufre, arena y 3% de plastificante y a temperaturas que oscilen en.

tre 120 y 130°C. Los sistemas de aspersión son igualmente recomendables especialmente el uso de pistola, pero los que habrá de diseñarse tomando en cuenta las altas temperaturas con la que se opera, para evitar la rápida disipación del calor o algún sistema que permita subir la temperatura interna del recipiente que se utiliza, también dentro del campo de la construcción se encuentra el empleo de espuma de azufre cuya aplicación como material de relleno en la construcción de paneles tipo sandwich presenta ventajas debido al aislamiento térmico y acústico que se logra. Otra aplicación del azufre como material de construcción.

Es el uso de la impregnación de materiales porosos, como la cerámica, la madera, los productos de papel, los aglomerados de fibras vegetales, etc., materiales que una vez tratados mejoran su comportamiento ante diferente tipo de agentes externos.

## VII. ASPECTOS ECONOMICOS

Para estudiar la conveniencia de emplear los concretos de azufre en la fabricación de materiales para la vivienda, - desde el punto de vista económico, se estableció como patrón - de comparación los costos de estos productos y el de los concretos de cemento Portland.

Se hacen los siguientes comentarios, donde se resaltan los aspectos en los que hay diferencias notables:

- 1.- En cuanto al material cementante, "el azufre tiene un precio en el mercado internacional relativamente alto", no compatible para su uso en la construcción, pero gracias a las reservas probadas de petróleo y gas natural en la República Mexicana, es inevitable que en el futuro la producción sobrepase la demanda y se requieran nuevos campos de aplicación. No obstante lo anterior, para la fabricación de los concretos de azufre no se requiere el empleo de éste con un 99% de grado de pureza como

es el que se comercializa en el mercado internacional; los azufres, que por lo general son subproductos de otras industrias, son poco comercializables y por lo tanto su costo es prácticamente inferior. En el caso del cemento Portland existen plantas - productoras de cemento prácticamente en toda la República, pero el costo de éste material va en aumento y depende de la demanda que el producto tenga en el momento dado.

Si se compara el costo comercial del cemento Portland es como mínimo 35% más caro, sin embargo, en las mezclas de concreto de azufre se emplea de 25% a 30% de azufre, del peso de la mezcla, en tanto - que en las de cemento Portland, empleadas para finalidades similares, se requiere de 10 a 15% de éste, en peso, aproximadamente la mitad de la cantidad que se requiere de azufre.

Debe destacarse que los concretos de azufre pueden ser reutilizables con consumos de energía bajos, - además de que estos requieren poco mantenimiento.

- 2.- En cuanto a los agregados pétreos empleados, en los concretos de azufre como en los de cemento Portland, se requiere que sean de buena calidad para obtener productos elaborados con un comportamiento físico-mecánico aceptable.
- 3.- En relación con los equipos de mezclado y la ener-

gía requerida para el mismo, se puede decir que a nivel de autoconstrucción se puede emplear equipos similares para ambos concretos, revoladora de capacidad ( $\frac{1}{2}$  saco), y el tiempo de homogeneización - puede llegar a ser el mismo si para el caso de los concretos de azufre se sigue el sistema de calentamiento previo de los agregados y fundición de azufre por separado. Siendo los costos de mezclado - prácticamente iguales, la diferencia básica en los costos de producción estriba en los costos de los energéticos requeridos para calentar los agregados pétreos y fundir el azufre, sean estos carbón mineral o vegetal, petróleo, gas propano, natural o cualquier otra fuente de energía calorífica.

- 4.- El costo del agua de mezclado requerido para los concretos de cemento Portland puede considerarse - despreciable, sin embargo la disponibilidad de ella en forma abundante puede llegar a ser un factor, determinante en la conveniencia de emplear el cemento Portland o el azufre como cementante, ya - que este último no requiere de agua.
- 5.- Otro aspecto que puede ser determinante en la economía de los concretos de azufre, es el costo de - los aditivos retardantes del fuego y plastificantes; aunque los porcentajes en que se emplean son relativamente pequeños, algunos de estos aditivos

son productos de importación, por lo que su costo puede llegar a ser significativo. Los concretos - de cemento Portland también emplean aditivos, pero su uso está restringido a aquellos casos en que se necesita combinar las propiedades normales de esta mezcla, por ejemplo, incluir más aire atrapado usualmente, modificar el tiempo de fraguado, reducir los consumos de agua, etc., por lo que su empleo se requiere en algunos casos, más no es un material indispensable.

- 6.- En cuanto a la resistencia mecánica que adquieren los concretos de azufre en unas cuantas horas, permite el empleo eficiente de cimbras y moldes, factor muy importante tomando en cuenta para los concretos de cemento Portland.
- 7.- En cuanto a costos de manejo y transporte, hay que tomar en cuenta el costo del equipo que se requiere para transportar el concreto de azufre a temperaturas superiores a las de fusión (119°C) y el costo del equipo de protección requerido para el manejo de las mezclas a altas temperaturas, además de la protección contra los gases tóxicos que pueden generar la producción de estos concretos.
- 8.- Actualmente los costos relativos del cemento Portland y de azufre "puro" no justifican la sustitución del primero por el segundo, si se consideran

las condiciones especiales que requiere el azufre para su empleo en el campo de la construcción. La tendencia de los incrementos en costos de los productos hace esperar sin embargo, que el azufre se vuelva cada vez más competitivo para la fabricación de concretos, por lo que para tener incentivos, inclusive económicos deberán enfocarse hacia usos en que se aprovechen algunas ventajas particulares de los concretos de azufre o hacia los subproductos o desechos de azufre que lo convierten en material no comercializable para usos tradicionales. A este respecto, sólo en la región del suroeste del país (Azufrera Panamericana) se generan cantidades que por su magnitud resultan atractivas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- LUDWING, A.C., "Utilization of Sulphur and Sulphur Ores as Construction Materials in Guatemala", United National Report, N. York 1969.
- 2.- ORTEGA, A. Y LEPEVRE, B. "Proyecto Esperimental de Manila, Filipinas", comunicación personal, 1978.
- 3.- MACKAY G, "U.S. Patent N°. 1643 251", 1900.
- 4.- DWECKER, W.W., "Mining and metalurgy", 1938.
- 5.- DWECKER, W.W. AND PAYNE, C.R., "Construction with Sulphur Cement", Metalurgical Enginneering Jorunal, vol. 47 N° - 1, 1940.
- 6.- DALE J.M. Y LYDWING, A.C., "fire Retarding Elemental Sulphur", Southwest Reserach Institute, San Antonio, Texas, 1967.
- 7.- DALE, J.M., Y LUDWING, A.C., "Reinforcement of Elemental Sulphur", Sulphur Institute Jorunal, Vol. 2, 1969.
- 8.- Cuvell B.R. "Plasticization of Sulphur", Interim Report, Department of Chemistry, The Polytechnic of North London Jul, 1971.
- 9.- LOOV, R.E., VROOM, ALAN 4, Y WOARD, M.A., "Sulphur Concrete. A New Construction Maerial", Journal of the presstressed Concrete Institute, Vol. 19, N°. 1, (ene-feb. - 1974).
- 10.- VROOM A.H., "Sulphur utilization, A Challenge and an Opportunity". National Reserach Councerl of Canadá, Oct. - 1971.

- 11.- DALE, J.M. Y LUDWIG, A.C., "Mechanical properties of Sulphur Allotropes", *Materiales Research and Standards*, Ago. 1965.
- 12.- KIRT-OTHMER, "Enciclopedia de Tecnología Química", Vol. 4, Editorial UTEHA, México, 1962.
- 13.- KOBBE, W.H. "Coloured Sulphur", U.S., Patente No. 1655 - 504 ene Id. 1928.
- 14.- U.S. BOREW OF RECLAMATION, "Concrete Manual", Department of the interior, 7ª Edición Denver Colorado, 1963.
- 15.- TEXAS GULF SULPHUR COMPANY, "Factos Abour Sulphur" 1958.
- 16.- LOOV ROBERT., "Concreto con Azufre" II Simposio Internacional sobre Tecnología del Concreto, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, mar - 1975.
- 17.- DALE, J.M. Y LUDWIG, A.C., "Sulphur-aggregate Concrete" *Civil Engineering*, ASCE, dic. 1967.
- 18.- MALHOTRA, V.M. "Effect of Specimen Size on Compressive Strength of Concrete", *Mines Branch Investigation Reporte IR-75-25*, Department of Energy Mines and Resources, - Ottawa, Canadá, Jun. 1974.
- 19.- PAYNE, C.R., DWECKER, W.W., "Chemical Resistence of Sulphur Cements" *Transactions of the American Institute of Chemical Engineers*, Vol. 36 No. 1, 25 Feb. 1940.
- 22.- LUDWIG, A.C., "Sulphur Reinforced Systems for Structural Applications" "Proceeding Inter-American Conference on - Materials Technology, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1968.

- 23.- LOOV ROBERT., "Concreto con azufre", Simposio Internacional sobre Tecnología del Concreto, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Mar, 1975.
- 24.- "SULPHUR CONCRETES GO COMMERCIAL" Sulphur Institute Journal, Verano de 1976.
- 25.- FIKE, "Some potential applications of sulphur", Sulphur Research Trends, American Chemical Society, Washington (1972).
- 26.- MALHOTRA, VM. "Sulphur impregnated concrete", Concrete Construction, 20,3 (1975).
- 27.- "FOOFING IN DEVELOPING COUNTRIES", National Academy of Sciences, National Research Council, Washington (1974).
- 28.- LUDWIG, A.C., "Technique for sulphur surface bonding for low cost housing", Agency for International Development and Southwest Research Institute (1976).
- 29.- ORTEGA, A Y LEFEVRE, B., "Proyecto experimental de las Filipinas y de Dubai", Comunicación personal (1978).
- 30.- LUDWIG, A.C., "Uso de recubrimiento de azufre en la construcción de casas", II Simposio Internacional sobre Tecnología del concreto, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (1975).
- 31.- PLATOU, J.S. "Sulphur research and development creating new markets for Tomorrow Sulphur", Sulphur Research and Development, 1 (1978).
- 32.- "Pavimento de Azufre que reduce el costo de construcción de caminos" Construcción Mexicana (Fe. 1977).

- 33.- RENNIE, WJ. "Espumas de azufre para uso en la construcción", II Simposio Internacional sobre tecnología del - concreto, Universidad Autónoma de Nuevo León (1975).
- 34.- Dirección General de Estadística  
SPP Dirección de Minas, SE.PA.FIN
- 35.- "STANDARD SPECIFICATION FOR CONCRETE AGREGATES, ASTM C33,  
Annual Book of ASTM standards, parte 14 (1977).
- 36.- APLICACIONES DEL AZUFRE A LA VIVIENDA ECONOMICA Y A O-  
TRAS CONSTRUCCIONES", Carlos Javier Mendoza. Noviembre -  
1980, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- 37.- "CONCRETE MANUAL", U.S., Bureau of reclamation, Depart-  
ment of the interior 7ª Ed. Denver, Col. (1963)
- 38.- LEE, DY y KLAIBER, F.W. "Fatigue behavior of sulphur con-  
crete" New Horizons in Construction Materials, I, ENVO -  
Publishing Company, Inc. (1976).

### CONCLUSIONES

En lo que concierne a nuestro país, poco esfuerzo se ha destinado al aprovechamiento del azufre y mucho menos para su uso en la construcción de vivienda. En la producción vs. exportación nos damos cuenta que el 70% se da a la exportación y solo un 30% se destina al consumo interno.

En cuanto al material cementante, "el azufre tiene un precio en el mercado internacional relativamente alto", no compatible para su uso en la construcción, pero gracias a las reservas probadas de petróleo y gas natural en la República Mexicana, es inevitable que en el futuro la producción sobrepase la demanda y se requieran nuevos campos de aplicación.

Si se compara el costo comercial del Cemento Portland con el azufre de exportación se puede decir que el Cemento Portland es como mínimo 35% más caro, sin embargo, en las mezclas de concreto de azufre se emplea de 25 a 30% de azufre del peso de la mezcla, en tanto que en las de cemento Portland

empleadas para finalidades similares, se requiere de 10 a 15% de éste, en peso, aproximadamente la mitad de la cantidad que se requiere de azufre.

Debe destacarse que los concretos de azufre pueden ser reutilizables con consumos de energía bajos, además de que éstos requieren poco mantenimiento.

Los concretos de azufre tienen una alta resistencia a la acción de los ácidos y sales, así como un bajo coeficiente de permeabilidad, por lo que se recomienda emplearlos para la construcción de drenajes de residuos industriales y otros usos semejantes.

Un aspecto que puede ser determinante para su aceptación del azufre como material de construcción se tiene, la poca resistencia de este material a la acción del fuego y la generación de gases tóxicos cuando se quema. Sin embargo, esto ha sido resuelto con la incorporación de aditivos que retardan el inicio de la combustión y hacen auto extingible el producto.

Otro aspecto que resulta de la necesidad de trabajar con mezclas a temperaturas relativamente altas, lo cual hace necesario el uso de equipo de protección adecuado. Además al emplear aditivos que producen gases a vapores tóxicos aumenta el riesgo en la fabricación de este material, por lo que deberán tomarse las precauciones necesarias para evitar intoxicaciones.

En cuanto a la resistencia mecánica que adquieren los

concretos y morteros de azufre en unas cuantas horas, permite el empleo eficiente de cimbras y moldes, factor muy importante tomando en cuenta para los concretos de cemento Portland.

Tomando en cuenta los objetivos de la investigación y conocido el interés por obtener elementos constructivos a costos bajos se puede decir que la mayor eficiencia del concreto con azufre se tiene en elementos prefabricados.

El concreto con azufre tiene grandes ventajas y también tiene algunos inconvenientes. Pero me atrevo a dar una utilización previa en nuestro país para determinados tipos de obra como son: Los pavimentos urbanos (Adoquin trabable), obras de drenaje y alcantarillados, muro divisorio, celosía trabable, bloque trabable, etc.