

*2ej 1*

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**CARACTERISTICAS DEL AZUFRE EN EL MEDIO  
DE LA CONSTRUCCION**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**I N G E N I E R O   C I V I L**

P r e s e n t a :

**GUILLERMO AGUILAR DIAZ**

México, D. F.

1981



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.

CARACTERISTICAS DEL AZUFRE EN EL MEDIO DE LA  
CONSTRUCCION

<u>I N D I C E</u>	Pag.
I. INTRODUCCION	1
II. OBJETIVOS	3
III. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES	6
III.1 AGREGADOS	6
III.1.1 ARENA ANDESITICA AZUL	7
III.1.2 ARENA ANDESITICA ROSA	8
III.1.3 GRAVA ANDESITICA 25 MM.	8
III.1.4 GRAVA ANDESITICA 13 MM.	9
IV. AZUFRE	13
IV.1 ADITIVOS	15
IV.2 PLASTIFICANTES	17
IV.3 COLORANTES	18
V. PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS	29
V.1 RESISTENCIA A LA COMPRESION	29
V.2 RESISTENCIA A LA TENSION	30
V.3 RELACION ESFUERZO DEFORMACION	31
V.4 RESISTENCIA A LA ABRASION	32
V.5 RESISTENCIA AL IMPACTO	33
V.6 RESISTENCIA AL ATAQUE QUIMICO	34
V.7 RESISTENCIA A LA CONGELACION Y EL DESHIELO	35
V.8 PERMEABILIDAD	37
V.9 REFUERZOS DE MORTEROS Y CONCRETOS DE AZUFRE.	37

## I N D I C E

	Pag.
VI. DOSIFICACION DE CONCRETOS DE AZUFRE	61
VI.1 RELACION GRAVA/ARENA	61
VI.2 CONSUMOS DE AZUFRE	63
VI.3 CONSUMO DE ADITIVO PLASTIFICANTE	64
VII. TECNICAS DE MEZCLADO, COLADO Y MOLDEO	73
VII.1 MEZCLADO	73
VII.2 COLADO	76
VII.3 MOLDES	78
VIII. RECOMENDACIONES DE DISEÑO Y CONSTRUCCION	81
IX. ASPECTOS ECONOMICOS	86
X. RECONOCIMIENTOS	90
XI. REFERENCIAS	91

## I. 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 respondan 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 investigación en laboratorios de Instituciones de Educación Superior y de Empresas Privadas, esta misma desarrollada en la Facultad de Ingeniería a través de una tesis de licenciatura, para proporcionar técnicas que se apliquen en muchos países, basados en métodos de construcción y autoconstrucción. Una tecnología que ha sido desarrollada en algunos países como Estados Unidos, Canadá, Inglaterra, Guatemala y Filipinas, es el utilizar como materia prima al 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 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.

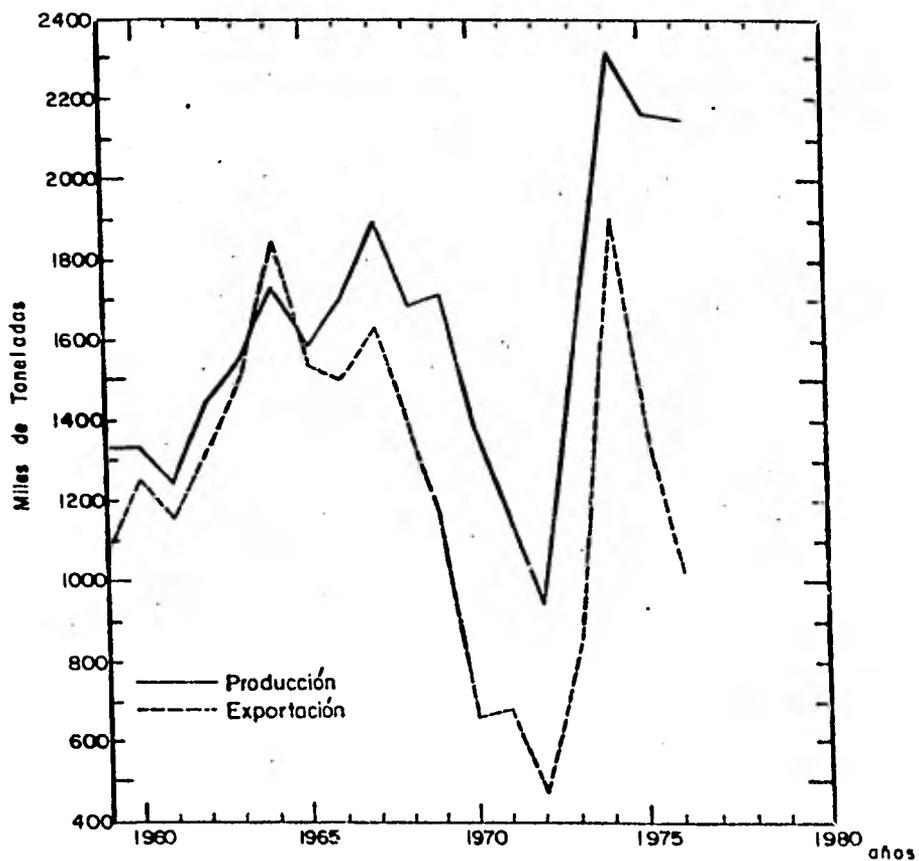


Fig. 1 PRODUCCION Y EXPORTACION DE AZUFRE EN MEXICO.

## II OBJETIVOS.

El objetivo de este trabajo es de alguna manera, contribuir a la solución del problema habitacional. Utilizando concretos y morteros de azufre, donde se determinarán sus propiedades físicas, mecánicas, procedimientos constructivos, mezclas y proporcionamientos, prácticas constructivas y 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 Fig. 1
- b) El azufre y sus compuestos tienen características físicas que se prestan 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 y morteros 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 y morteros 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 ( Ref. 1 ) y el Proyecto del Gobierno de Filipinas ( Ref. 2 ), en las que se empleó azufre con varios niveles de impureza para la fabricación de materiales de recubrimiento, así como para concretos y morteros.
- 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 y morteros de azufre adquieren resisten-

sias 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 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 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.

### III. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES.

#### III.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 propiedades físicas diferentes, principalmente en cuanto a peso específico y contenido de material más fino que la malla 200. En cuanto a la grava se empleó un solo tipo, grava andesítica, pero con dos tamaños máximos de agregado grueso, 25 mm ( 1" ) y 13 mm ( 1/2" ).

El empleo de los materiales andesíticos antes mencionados, conduce a morteros y concretos que no son los óptimos que se pueden elaborar, pero servirán para tener idea del comportamiento de estas mezclas y para adaptar 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 A S T M C 33 " Especificaciones Estándar para Agregados para Concreto ". De las que se toman los aspectos aplicables a los concretos y morteros de azufre.

### III.1.1 ARENA ANDESITICA AZUL.

GRANULOMETRIA.-	Arena gruesa, con un porcentaje de material más fino que la malla No. 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 Fig. 2
IMPUREZAS ORGANICAS.-	No hay.
PARTICULAS DESMENUZABLES.-	3% corresponde al límite superior.
MATERIAL MAS FINO MALLA 200.-	Cantidades elevadas de material fino pueden afectar la resistencia a la abrasión de los concretos. El valor obtenido fue de 11% superior al 5% valor máximo para concretos -- que no van a estar expuestos a la abrasión.
PESO VOLUMETRICO SUELTO.-	1420 Kg/m <sup>3</sup>
PESO VOLUMETRICO COMPACTO.-	1625 Kg/m <sup>3</sup>
PESO ESPECIFICO SECO.-	2.36 Kg/m <sup>3</sup>
ABSORCION.-	3.40%

Estas propiedades indican que la arena posee buenas características.

### III.1.2 ARENA ANDESITICA ROSA.

GRANULOMETRIA.-	Aceptable, módulo de finura de 2.90 valor - comprendido entre los límites aceptables -- Fig. 2.
IMPUREZAS ORGANICAS.-	No hay.
PARTICULAS DESMENUZABLES.-	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 SECO.-	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 la abrasión.

### III.1.3 GRAVA ANDESITICA 25 MM.

GRANULOMETRIA.-	Aceptable, módulo de finura de 6.90 Fig. 2.
IMPUREZAS ORGANICAS.-	No hay.

- PARTICULAS DESMENUZABLES.- 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.-  $1250 \text{ Kg/m}^3$
- PESO VOLUMETRICO COMPACTO.-  $1450 \text{ Kg/m}^3$ . El valor aceptado dentro de la clasificación de agregados de peso normal es de  $1120 \text{ Kg/m}^3$ .
- PESO ESPECIFICO SECO.-  $2.25 \text{ Kg/m}^3$
- ABSORCION.- 3.20%
- SANIDAD.- 14% superior al máximo permitido de 12%.
- ABRASION.- 33% menos del 50%, valor máximo aceptado para utilizar la grava en la fabricación de concretos.

#### III.1.4 GRAVA ANDESITICA 13 MM.

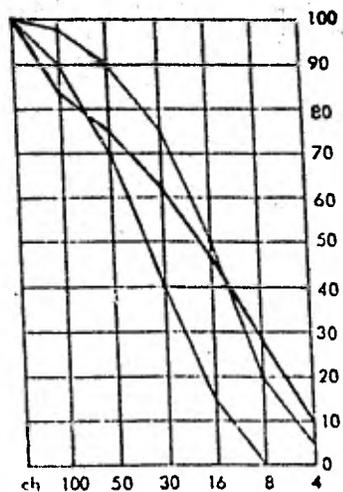
Los comentarios hechos para la grava de 25 mm son válidos para la de 13 mm.

- GRANULOMETRIA.- Aceptable, módulo de finura de 6.20.

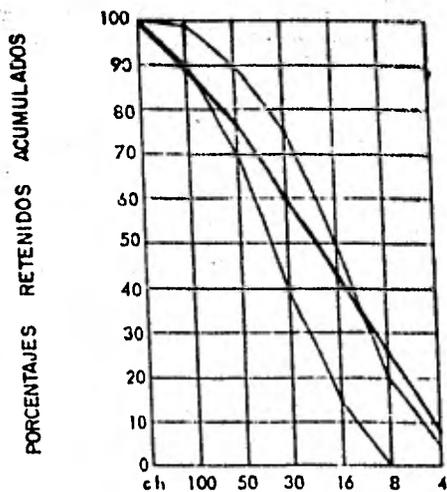
IMPUREZAS ORGANICAS.-	No hay.
PARTICULAS DESMENUZABLES.-	1.0%
MATERIAL MAS FINO MALLA 200.-	6.0%
PESO VOLUMETRICO SUELTO.-	1240 Kg/m <sup>3</sup> .
PESO VOLUMETRICO COMPACTO.-	1360 Kg/m <sup>3</sup> .
PESO ESPECIFICO SECO.-	2.27 Kg/m <sup>3</sup>
ABSORCION.-	3.40%

En la tabla 1 se presenta un resumen de las propiedades de los agregados.

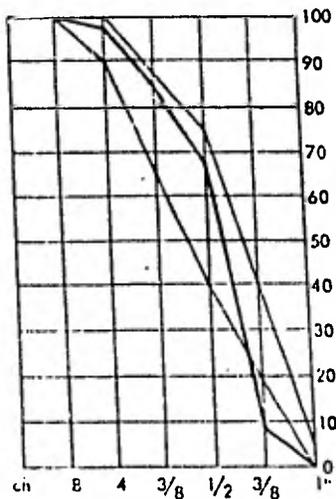
ARENA ANDESITICA AZUL



ARENA ANDESITICA ROSA



GRAVA ANDESITICA 25mm.



GRAVA ANDESITICA 13mm.

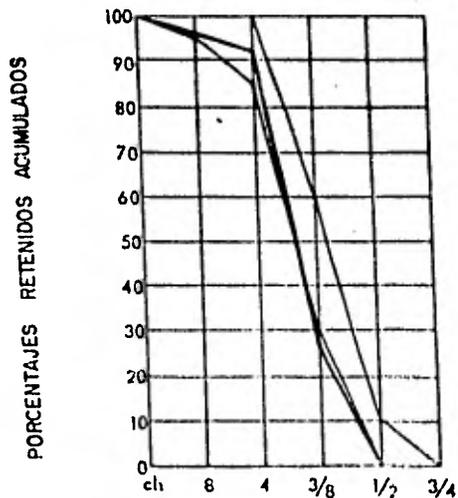


Fig. 2 ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS MATERIALES PETREOS

TABLA I PROPIEDADES FISICAS DE LOS AGREGADOS.

Material	Granulo- metría	Módulo de finura	Peso volumétrico Kg / m <sup>3</sup>		Sustancias deletéreas			Otras propiedades			
			Suelto	Compacto	Impurezas orgánicas %	Partículas deman- sables %	Materia más fina que pasa 200 %	Peso específico (sec)	Absorción %	Sanidad %	Abrasión %
Arena endémica azul, Edo. de Mex.	gruesa	3.10	1420	1425	no hay	3.0	11.0	2.36	3.4	-	1
Arena endémica roja, sin lavar	completa	2.90	1266	1376	no hay	3.0	16.2	2.07	8.0	-	1
Grava endémica 25 mm (1")	completa	6.91	1250	1480	no hay	0.7	9.9	2.28	8.6	4	33
Grava endémica 13 mm (1/2")	completa	6.20	1240	1380	no hay	1.0	6.0	2.27	6.5	-	1



mente 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 naturales.  
 Azufre recuperado con los procesos para el abatimiento de la --  
 contaminación ambiental, como son en la actualidad los gases de  
 fundición y los que provienen de la refinación de los crudos --  
 del petróleo.

En la Fig. 3, se señalan los principales centros productores de azufre en la República Mexicana, mientras que en la tabla 2, se presenta por estados, municipios y razones sociales sus producciones respectivas para los años de 1978 y 1979. En la tabla 3, se muestra la producción nacional de azufre con datos de exportación para los mismos años.

Dentro de la República Mexicana en los volcanes como el Jorullo, Ceboruco y Colima en Michoacan, Nayarit y Colima respectivamente, se ha encontrado azufre y explotado algunas veces en depósitos formados por sublimación; en el Chihllador Michoacán, el azufre se ha explotado de las fuentes hidrotermales 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 asociado con rocas de origen sedimentario como calizas, anhidrita 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.

#### IV.1 ADITIVOS.

##### IV.1.1 Retardante del Fuego.

El azufre elemental ha mostrado que posee propiedades mecánicas adecuadas para considerarlo como un material estructural. El azufre modificado con plastificantes y otros aditivos puede convertirse en material adecuado para recubrimientos, espumas, pegamentos adhesivos y otros usos en la Industria de la Construcción. Debido a que el calor de combustión del azufre es bajo, aproximadamente 2200 cal/g ( 4000 But/lb ), comparado con 4400 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 ensayó un gran número de productos cuyas combinaciones se presentan en la 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 in clusive cuando se prende el material en recipientes abiertos, se encontró en otra publicación una serie de productos químicos, por ejemplo el dimercaptán - dipenteno que 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 al 10% ) de gran variedad de mate riales 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 comporta-- miento similar tal como el dimercaptán dipenteno en combinación con otros aditivos.
3. Una mezcla formada por 100 partes de azufre 3 partes de dimercaptán-- 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 ensaya da con el método ASTM E 84, da una velocidad de propagación de flama de 12.8, un factor de contribución 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 asbesto-cemento -- toman el valor cero y los pisos de roble rojo el valor de 100. En -- la Fig. 4, se presenta con gráficas los resultados de estos ensayes.
4. El empleo de los aditivos retardantes de la acción del fuego evita -- la posibilidad de generación de gases tóxicos, dado que el incremen-- to 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.

#### IV.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 ( Ref. 11 ).

Los azufres plastificados se preparan adicionando un plastificante al azufre fundido y permitiéndole que llegue 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 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 Fig. 6

En la 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 temperatura para pasar de la temperatura de transición a la de fusión.

Entre las propiedades físicas más importantes del dicitlopentadieno se pueden mencionar las siguientes: ( Ref. 12 )

Estado físico.	Cristales incoloros.
Olor	Alcanforado.
Peso específico.	0.9770, 35/4°C.
Punto de ebullición 760 mm Hgo.	170°C.
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.

#### IV.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 ( Ref. 13 ), los pigmentos solubles en -- aceite dieron mejores resultados desde el punto de vista de solubilidad y unifor

midad 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 pigmento 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: ( Ref. 14 ).

Rojos y Rosas.	Oxido de hierro rojo.
Amarillo y color ante	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.

En pruebas realizadas con morteros hechos con arenas andesíticas, características del Valle de México ( gris-verdoso ), se obtuvieron los siguientes resultados:

COLORANTES	RESULTADOS
1. Ninguno	Verde pálido-Verde oscuro.
2. Rojo vivo	a) Color tabique de barro. b) Rojo-morado pálido.

## COLORANTES

## RESULTADOS

- |                      |                                    |
|----------------------|------------------------------------|
| 3. Amarillo naranja  | a) Amarillo-ocre fuerte.           |
|                      | b) Amarillo-ocre con fondo oscuro. |
| 4. Azul concentrado  | Poco cambio.                       |
| 5. Verde concentrado | Poco cambio.                       |
| 6. Negro             | Negro-azul oscuro.                 |

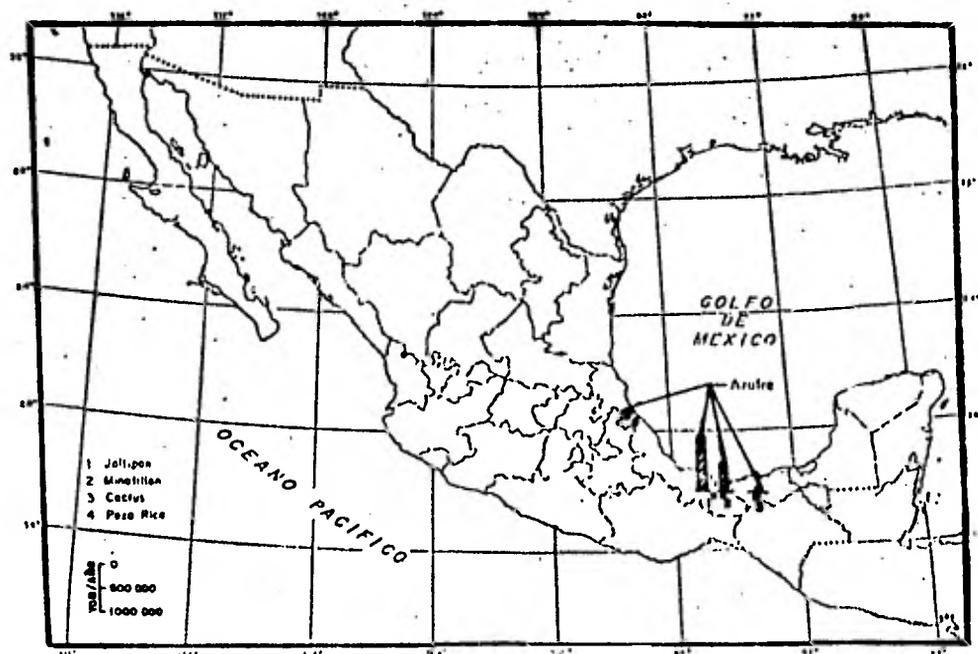


Fig 3 PRINCIPALES CENTROS PRODUCTORES DE AZUFRE EN LA REPUBLICA MEXICANA

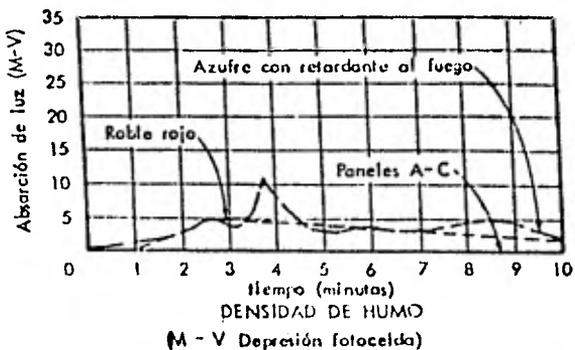
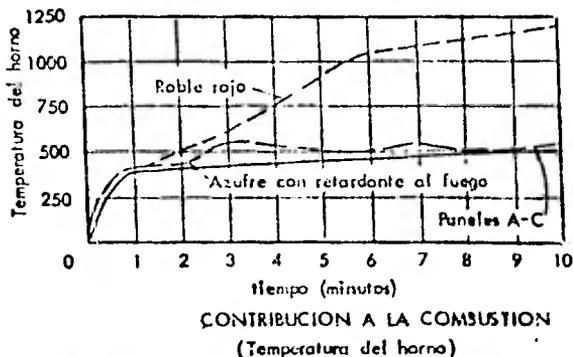
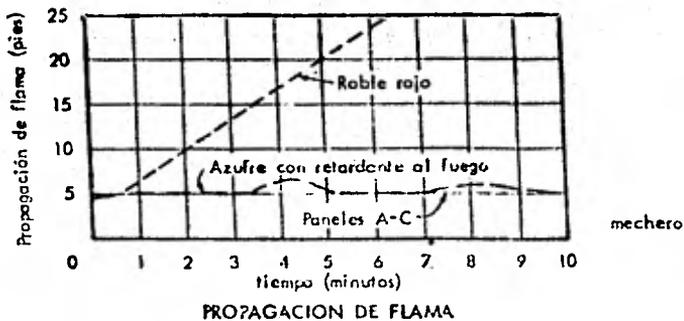


Fig. 4 PRESENTACION GRAFICA DE LOS RESULTADOS DE ENSAYE DE PANELES DE ASBESTO - CEMENTO CON RECUBRIMIENTO DE AZUFRE CON RETARDANTE AL FUEGO. (Tomada de la referencia 2.6)

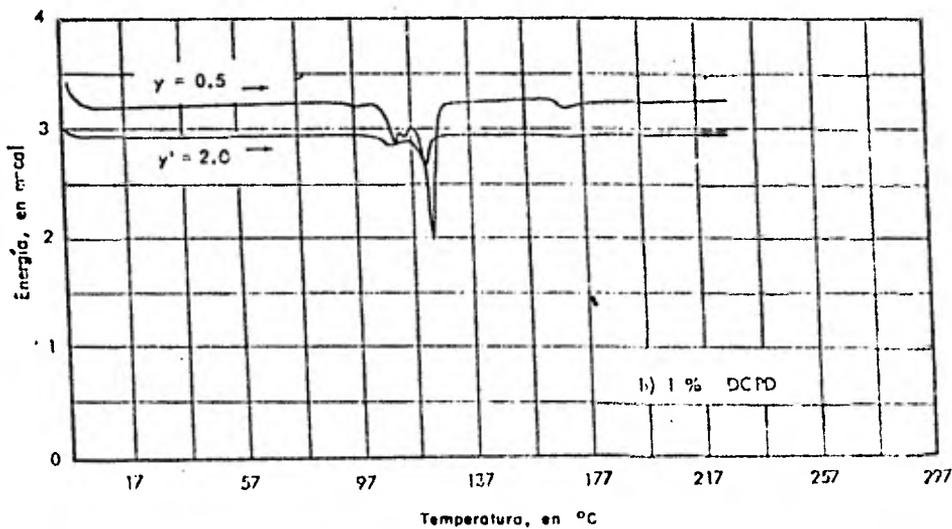
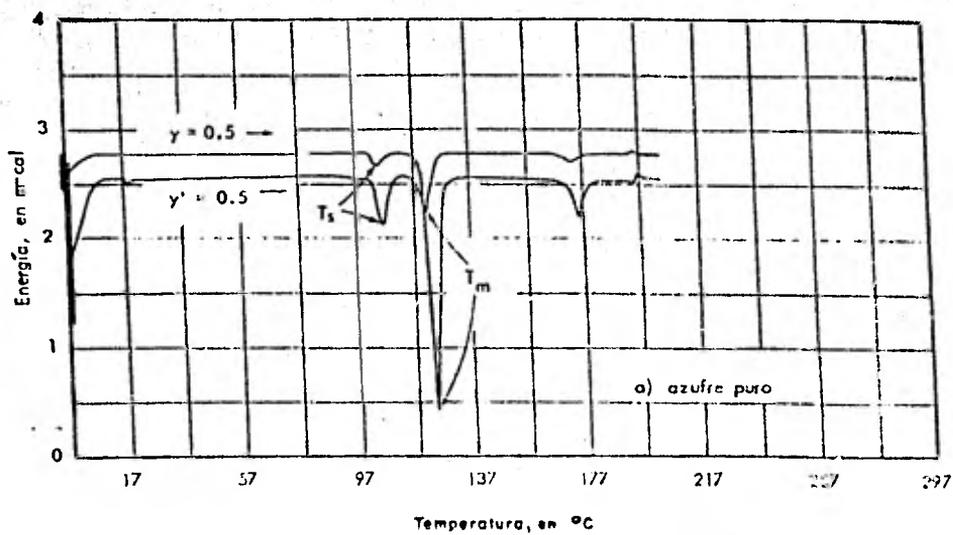


Fig. 5 TERMOGRAMAS DE LAS MEZCLAS AZUFRE - DCPD VARIANDO LA COMPOSICION

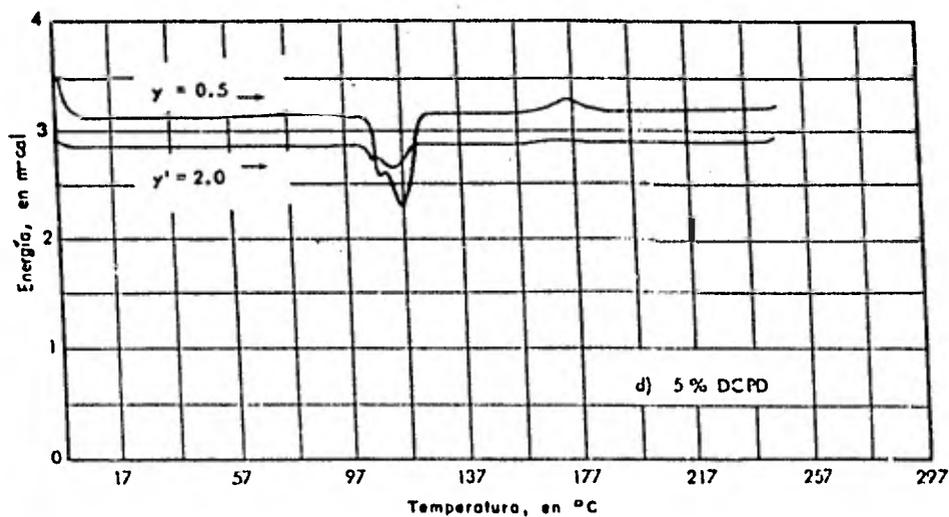
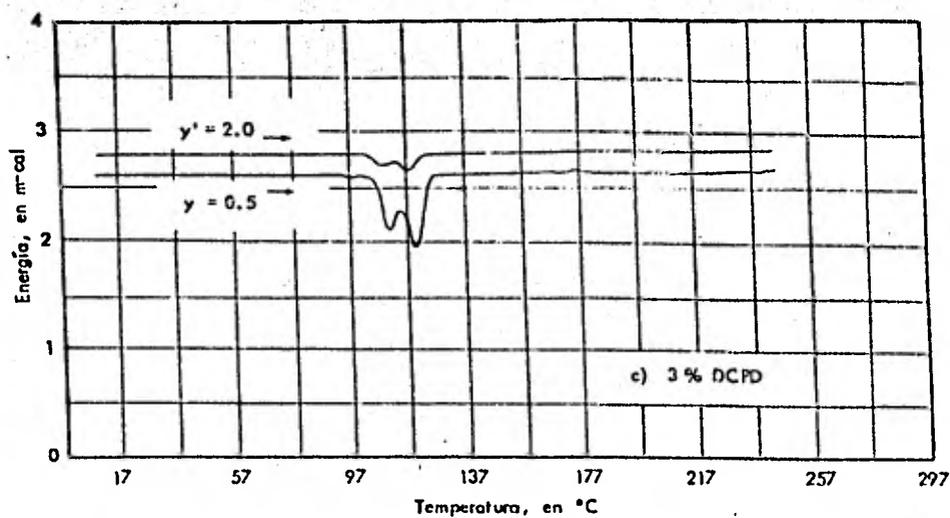


Fig. 5 TERMOGRAMAS DE LAS MEZCLAS AZUFRE-DCPD VARIANDO LA COMPOSICION (Continuacion)

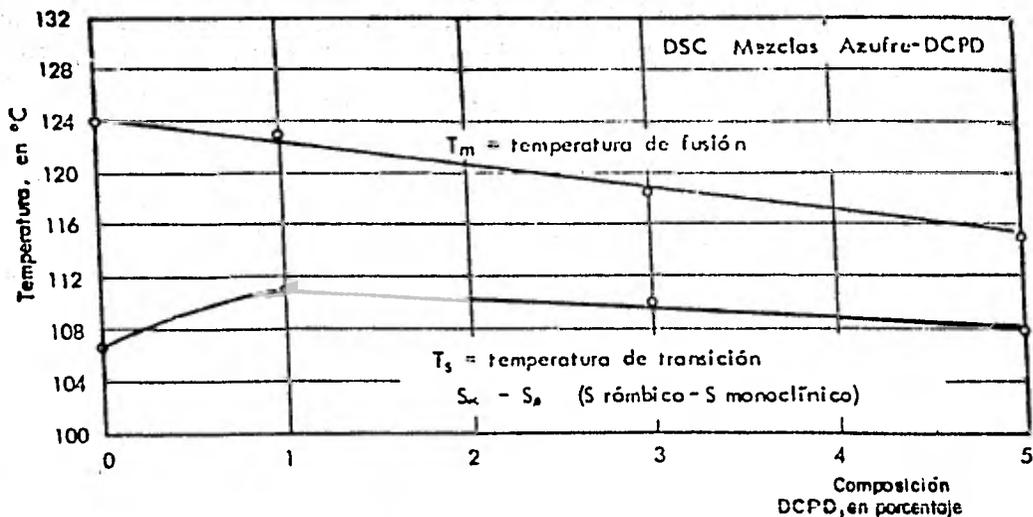


Fig. 6 INFLUENCIA DEL DCPD EN LA TEMPERATURA DE TRANSICION Y DE FUSION DEL AZUFRE.

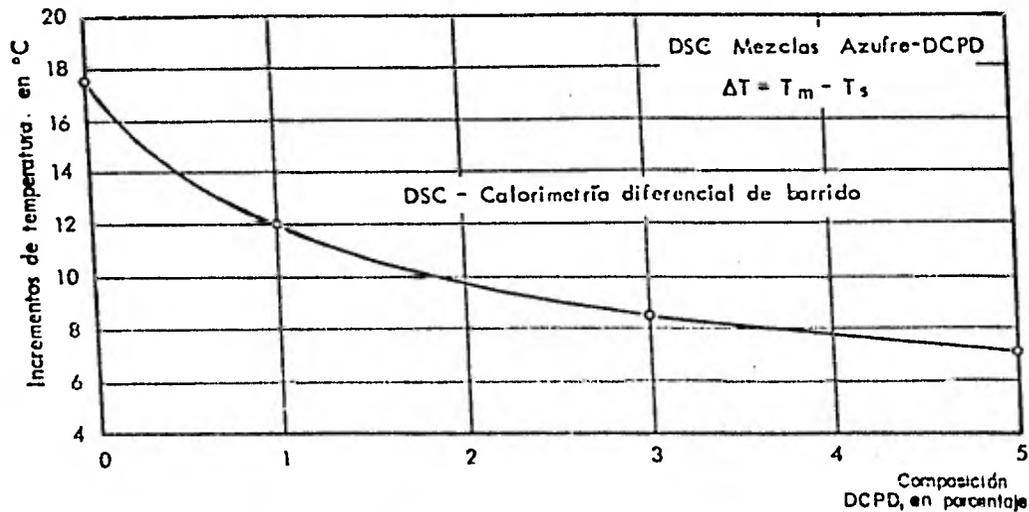


Fig. 7 DIFERENCIA DE TEMPERATURA ( $T_m - T_s$ ) COMO FUNCION DE LA COMPOSICION DE LA MEZCLA.

TABLA 2 PRODUCCION POR MUNICIPIOS DURANTE 1978-1979

ESTADOS Y MUNICIPIOS	AZUFRE ( Toneladas )		%
	1979	1978	
Salamanca Gto.	4963	3130	0
Atzacapotzalco D.F.	7683	7236	0.4
Cd Madero Tamaulipas.	11105	7453	0.4
Cactus Chiapas.	47372	39935	4.2
Jáltipan Ver.	1325526	1106112	59.6
Minatitlán Ver.	723396	621036	33.2
Poza Rica Ver.	36119	32783	2.2
GRAN TOTAL	2156167	1817685	100.0

CENTROS PRODUCTORES DE AZUFRE

RAZON SOCIAL	UBICACION	CAPACIDAD ( TONELADAS/DIA )
Química de la Frontera.	Matanoros Tamaulipas	180
Azufrera Panamericana, S.A.	Jáltipan Veracruz.	3000
Cía. Explotadora del Itsmo, S.A.	Texistepec Veracruz.	2000

Fuente de información: Manifestaciones mensuales de las Empresas  
Secretaría del Patrimonio y Fomento Industrial  
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		1649661	1956854
PEMEX		168024	199313
	TOTAL	1817685	2156167

	EXPORTACION DE AZUFRE	
	1978 ( toneladas ) *	1979 ( toneladas ) *
Azufre sin refinar	1012583.696	1232396.521
Azufre sublimado		0.306
Azufre coloidal	60.200	2561.845
Azufres diversas formas	424.130	106.700

	IMPORTACIONES DE AZUFRE	
	1978 ( toneladas )	1979 * ( toneladas )
Azufre de cualquier clase, excepto el sublimado, precipitado y coloidal **	503.503	865.501
Azufre sublimado o precipitado; azufre coloidal.	190.834	245.733

Fuente: Dirección General de Estadística  
 Secretaría de Programación y Presupuesto.  
 Dirección General de Minas, SE. PA. FIN.

\* Volumen en peso bruto.

TABLA 4 . MATERIALES ENSAYADOS DE ACUERDO CON EL METODO ASTM D 635  
 (Composición por peso: 3 partes de los materiales listados abajo,  
 3 partes de monómero de estireno más 100 partes de azufre todas -  
 las composiciones preparadas en recipientes cerrados).

Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV.
Compuestos del ácido maleico	Retardadores de flama organo fosforados	Hidrocarburos a Hidrocarburos halogenados.	Retardadores de flama - inorgánicos
No inflamable	No inflamable	No inflamable	Parcialmente efectivos
Acido maléico	Fosfato de Tricrecilo	Clorowax 70s.	Cloruro de amonio
Maleato de dioctilo	Fosfato de trifenilo	3-bromo estireno.	Fosfato de amonio
Maleato de monobutilo	Parcialmente efectivos	Parcialmente efectivos	Sulfato de amonio
Fumarato de dibutilo			Oxido de antimonio
Ftalato de n-dibutilo			Acido bórico
Parcialmente efectivo	Fyrol 6.	Chlorowax 50	Cloruro de magnesio
Anhídrido maléico	Vircol 82	Arochlor 1221	Cloruro de zinc.
Maleato de di-butilo	Phosgard C-22-R	Arochlor 1254	Inflamable
Acido fumárico	Fosfato de Tributilo	Arochlor 5460	Acido bórico y bicarbonato de sodio
Acido ftálico		p-diclobenceno	Sulfato de magnesio
Acido tereftálico		Calowax 1000	Bicarbonato de sodio
Ftalato de dimetilo		Hexaclorobutadieno	Fosfato de sodio.
Acido maléico		Policlorometil naftaleno	
Acido oxálico		Acetato divinilo (monómero)	
Acido benzoico		Xileno	
Anhídrido éndico		Di-yodometano	
Clorendato de dimetilo		1,5,9- ciclododecatrieno	
Tetrabromobisfenol A		Divinil benceno	
Inflamable			
Anhídrido tetrabromoftálico.			

## V. PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS.

Las propiedades requeridas de los concretos y morteros de azufre pueden -- ser diferentes de acuerdo con la finalidad a la que se destine; en la tabla 5, -- se presentan algunas propiedades físicas del azufre que se consideraron de interés en el estudio ( 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 relacio-- nes 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.

### V.1 RESISTENCIA A LA COMPRESION.

Una de las propiedades más importantes de los concretos y morteros de azu-- fre 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°C, se-- inicia la adquisición de resistencia y en un tiempo relativamente corto, a tempe-- ratura por debajo de 95.4°C, el azufre empieza a adoptar una forma mucho más esta-- ble y resistente ( Ref. 16 ).

Dale y Ludwig ( Ref.17 ), reportan resistencia a compresión obtenidas a -- edades tempranas en especímenes cilíndricos de 11.5 X 23 cm. con los siguientes-- resultados Fig. 8

E D A D	RESISTENCIA A COMPRESION Kg/cm <sup>2</sup>
45 minutos.	238
1.5 horas.	248
3 horas.	330
6 horas	350
28 días.	406

Para la determinación de la resistencia de morteros a compresión Fig. 9, - se emplearon cilindros de 7.5 cm. de diámetro y 15 cm. de altura ( Ref. 18 ), - En la Fig. 10 y la tabla 6, se presentan los resultados de estos ensayos de con- creto y mortero con diferentes porcentajes de consumos de azufre y en la que se puede observar que ha medida que se incrementa el consumo de azufre la resisten- cia decrece, cuando menos para las mezclas con buenas características de traba- jabilidad y aspecto. La tendencia anterior se puede explicar si se considera -- que el material cementante, azufre, resulta ser el más débil de los que inter- vienen en la mezcla; en los concretos de cemento Portland la tendencia es con- traria, 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 traba- jabilidad de la mezcla empleada.

En la misma Fig. 10, se puede observar también que para iguales consumos- de azufre, los morteros alcanzaron mayores resistencias que los concretos y que la resistencia de estos últimos resulta independiente del tipo de arena empleada.

#### IV.2 RESISTENCIA A LA TENSION.

Se determinó la resistencia a la tensión tanto por el método indirecto -- (prueba brasileña) ASTM C 496 Fig.11, como por flexión en vigas con cargas en -

los tercios del claro ASTM C 78 Fig.11. Los resultados de los ensayos se presentan en la tabla 6 y en la Fig. 12. Como se puede observar la tendencia general fue 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:

$$\text{Tensión indirecta } \bar{F}_t = 54 \text{ Kg/cm}^2 \quad ( 1 )$$

$$\bar{F}_t = 89 \text{ Kg/cm}^2 \quad ( 2 )$$

### V.3 RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACION

Al trazar las gráficas esfuerzo-deformación unitaria de los morteros de azufre se observó que estos presentan relaciones prácticamente lineales hasta un porcentaje elevado de esfuerzo último Fig. 13. Para los concretos y morteros fabricados con arena andesítica azul, las deformaciones unitarias a la falla variaron en forma directamente proporcional a los consumos de azufre y en relación inversa con la resistencia a compresión Fig. 14. Los valores variaron entre 0.0028 y 0.0048. Un valor promedio  $\epsilon_u = 0.0037$  se puede considerar representativo de su comportamiento. Los concretos con arena andesítica rosa presentaron un comportamiento diferente, siendo independiente la deformación última tanto de la resistencia a compresión como del consumo de azufre. Un valor estimado de deformación unitaria última para estos concretos puede ser  $\epsilon_u = 0.0025$ . Los valores obtenidos para cada mezcla se presentan en la Tabla 6.

En cuanto al módulo de elasticidad de los morteros y concretos de azufre se puede decir que estos varían proporcionalmente con  $f'_c$ , siendo una gráfica -

representativa de su comportamiento la presentada en la Fig. 15. e indicada con la siguiente expresión:

$$E_c = 8200 \sqrt{f'_c} , \text{ en Kg/cm}^2$$

Si se compara el valor alcanzado con el correspondiente a los concretos de cemento Portland fabricados con agregados semejantes, que es de  $E_c = 8500 \sqrt{f'_c}$  se puede decir que prácticamente es la misma relación para ambos materiales.

En cuanto a la deformación diferida, investigaciones preliminares realizadas por B. Gamble en la Universidad de Calgary Canadá, indican que estas deformaciones son mayores que las alcanzadas en los concretos de cemento Portland y que se incrementan rápidamente al aumentar la temperatura, Fig. 16. Cuando el concreto de azufre se emplee como material estructural, las deformaciones diferidas ( Creep ) deben de tomarse en cuenta ( Ref. 16 ) .

#### V.4 RESISTENCIA A LA ABRASION.

Para conocer el comportamiento de los morteros y 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, Fig. 17.

La prueba en sí no se encuentra estandarizada, pero como los resultados se manejaron desde un punto de vista comparativo, lo único que se requirió fue 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 Fig. 18 y en la 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 y morteros 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, Fig.18, 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 alcanzaban 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.

#### V.5 RESISTENCIA AL IMPACTO.

Los morteros y 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 este tipo de acciones es común emplear diferentes tipos de refuerzo, ya sea en forma de barras, malla 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 trato 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 un cilindro de acero con un extremo redondeado que tiene un peso de 10.785 kg, Fig. 19, 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 Tabla 6.

En la Fig. 20, se relaciona la resistencia al impacto con la resistencia a compresión con los consumos de azufre empleados. Como puede observar la resistencia a compresión no parece tener ninguna 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.

#### V.6 RESISTENCIA AL ATAQUE QUIMICO.

Hay una cantidad considerable de material publicado sobre la resistencia de morteros de azufre al ataque de varias sustancias tales como ácidos, sales, etc, en general se ha encontrado que los morteros a base de azufre son muy resistentes al ataque químico. Puede esperarse que los concretos de azufre tengan propiedades similares, a menos que el agregado grueso se vea afectado. Se ha encontrado que los cementos sulfurosos empleados en la unión de tubería, ladrillos y mosaicos son resistentes al ataque de las siguientes sustancias(Ref. 19):

ácido clorhídrico	aceite de soya .
ácido nítrico.	sulfato de calcio.
ácido sulfúrico.	sulfato de cobre.
ácido fosfórico.	cloruro de cobre.
vinagre.	sulfato ferroso.
ácido butírico.	sulfato de níquel.
ácido láctico.	sulfato de magnesio
cal saturada ( 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

ácido oleico.	dicromato de potasio.
ácido crómico.	aceite de híguerilla.
cal saturada ( a 80°C ).	bisulfito de calcio.
kerosena.	petróleo crudo sulfuroso.
aceite de algodón.	

#### V.7 RESISTENCIA A LA CONGELACION Y DESHIELO.

El concreto en climas fríos está expuesto a condiciones climatológicas -- muy severas que frecuentemente resultan en ciclos de congelación y deshielo. -- Como el concreto de azufre se produce sin agua y es un material relativamente -- impermeable es de esperarse que sea menos susceptible a desintegrarse que el -- concreto de cemento Portland. Sin embargo, debido a que el coeficiente de expansión térmica del azufre es grande. los cambios bruscos de temperatura pueden -- crear problemas serios.

No obstante que se tienen las soluciones al problema (Ref. 20, 21), en la mayor parte de la República Mexicana éste no existe por lo que en general no será necesario tomar medidas de precaución.

#### V.8 PERMEABILIDAD

El azufre es un material impermeable pero, al combinarlo con otros productos para formar morteros o concretos puede transformarse en permeable, por la formación de conductos capilares y oquedades 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 y mortero de 40X40X5 cm, - las cuales se sometieron a pruebas de permeabilidad al agua dándoles un tirante de 10 cm a presión atmosférica, Fig. 21. Las placas fueron colocadas en la misma 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 tanto los concretos como los morteros 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 penetró al interior de la placa a través de los conductos capilares, pero el flujo se interrumpió al terminar el conducto, aunque 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, Fig. 22.

#### V.9 REFUERZO DE MORTEROS Y 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 ( Ref. 22 ).

En la Universidad de Calgary ( 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 preforzado. 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 aspersión sobre la malla de refuerzo ( 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 tendían a flotar en el azufre simple, en los morteros

el fenómeno disminuía ligeramente. Se formaban además, en ambos casos, 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 mas o menos homogéneas.

En general los morteros de azufre son casi impermeables, como se indicó anteriormente, pero cuando se les adiciona fibras de refuerzo pueden presentar flujos de agua debido a oquedades originadas por mal colado o por falta de adherencia, que finalmente da lugar a formación de algunos conductos capilares.

La cantidad de fibras de refuerzo se proporcionó siempre de manera que se obtuviesen mezclas mas o menos homogéneas. Se observó que cantidades del orden de 1% en peso, se podían colocar sin que se formaran grumos

Todos los morteros de azufre fabricados para las diferentes determinaciones contenían un 3% de plastificante ( D.C.P.D.), con respecto al peso del azufre, azufre puro y arena andesítica.

Se realizó para la mayoría de estos morteros, pruebas de tensión indirecta ( brasileña ), tensión por flexión, abrasión, impacto y permeabilidad, que son las propiedades que más interesa conocer a través de la inclusión de fibras. No se realizaron ensayos a compresión de morteros reforzados con fibras, puesto que esta propiedad es ya muy satisfactoria en los morteros de azufre y no es de esperarse que se vea afectada por el refuerzo de fibras.

Los resultados de estas pruebas se muestran en la tabla 7.

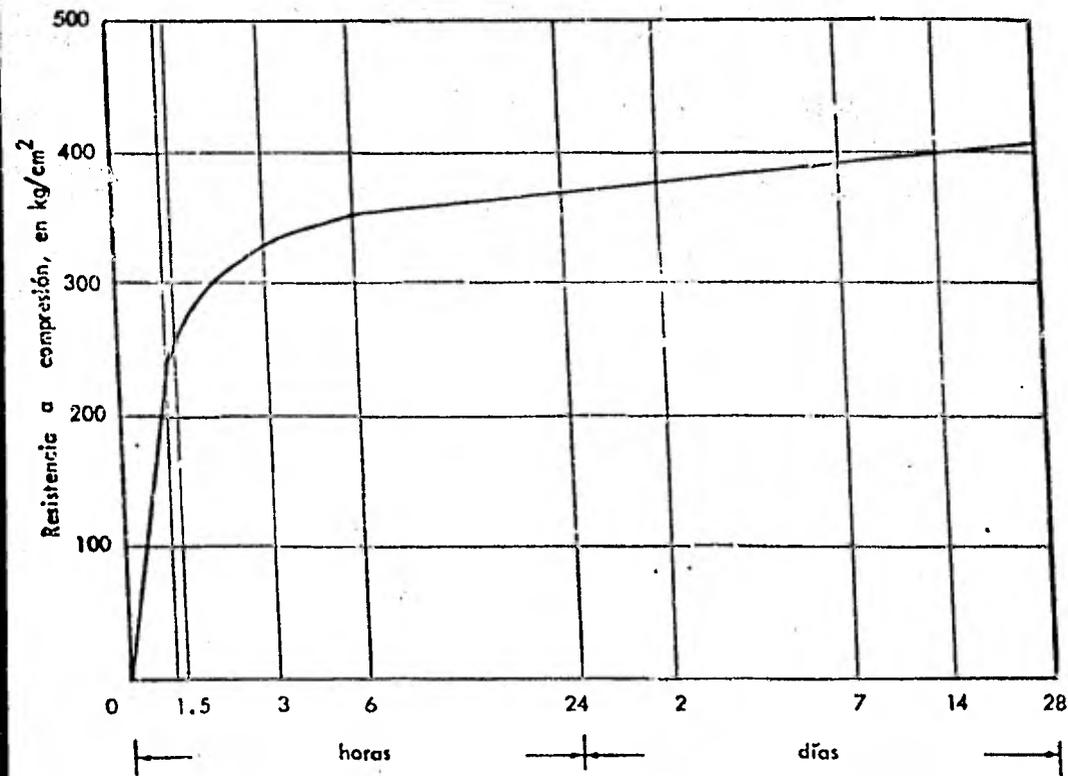


Fig 8 INCREMENTO DE LA RESISTENCIA A COMPRESION CON LA EDAD  
(Tomado de la Ref. 17)

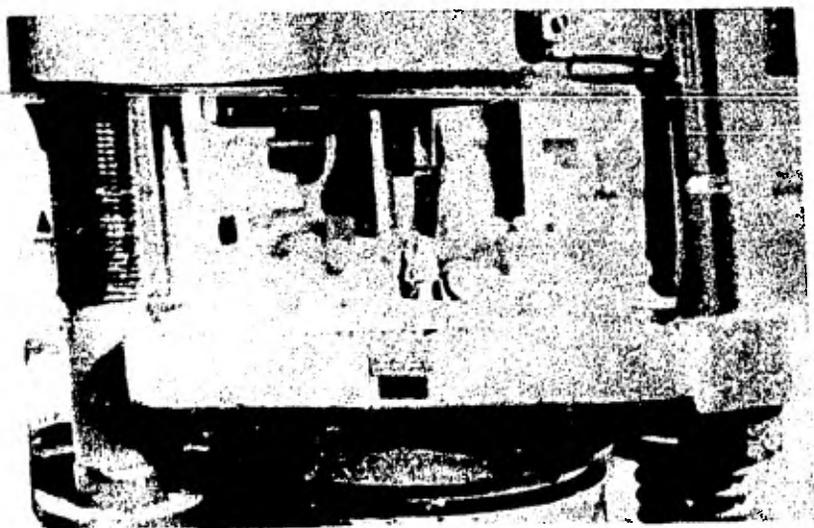
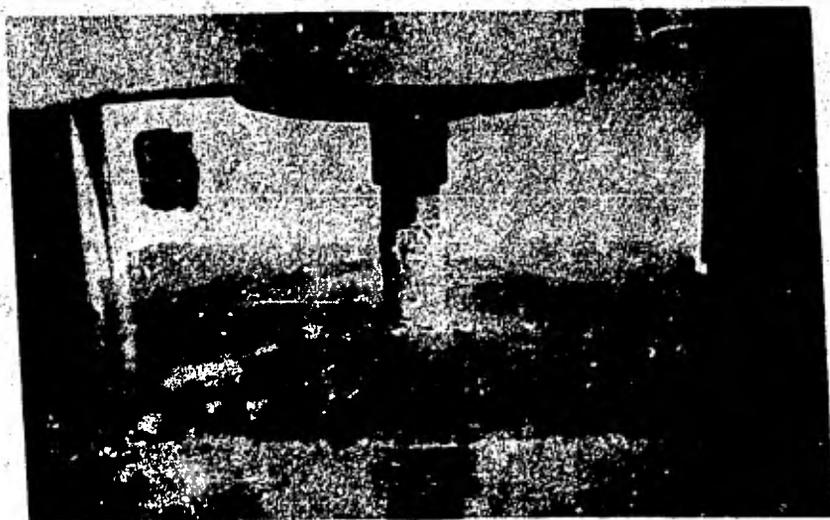


Fig. 9 ENSAYES SOMETIDOS A COMPRESION

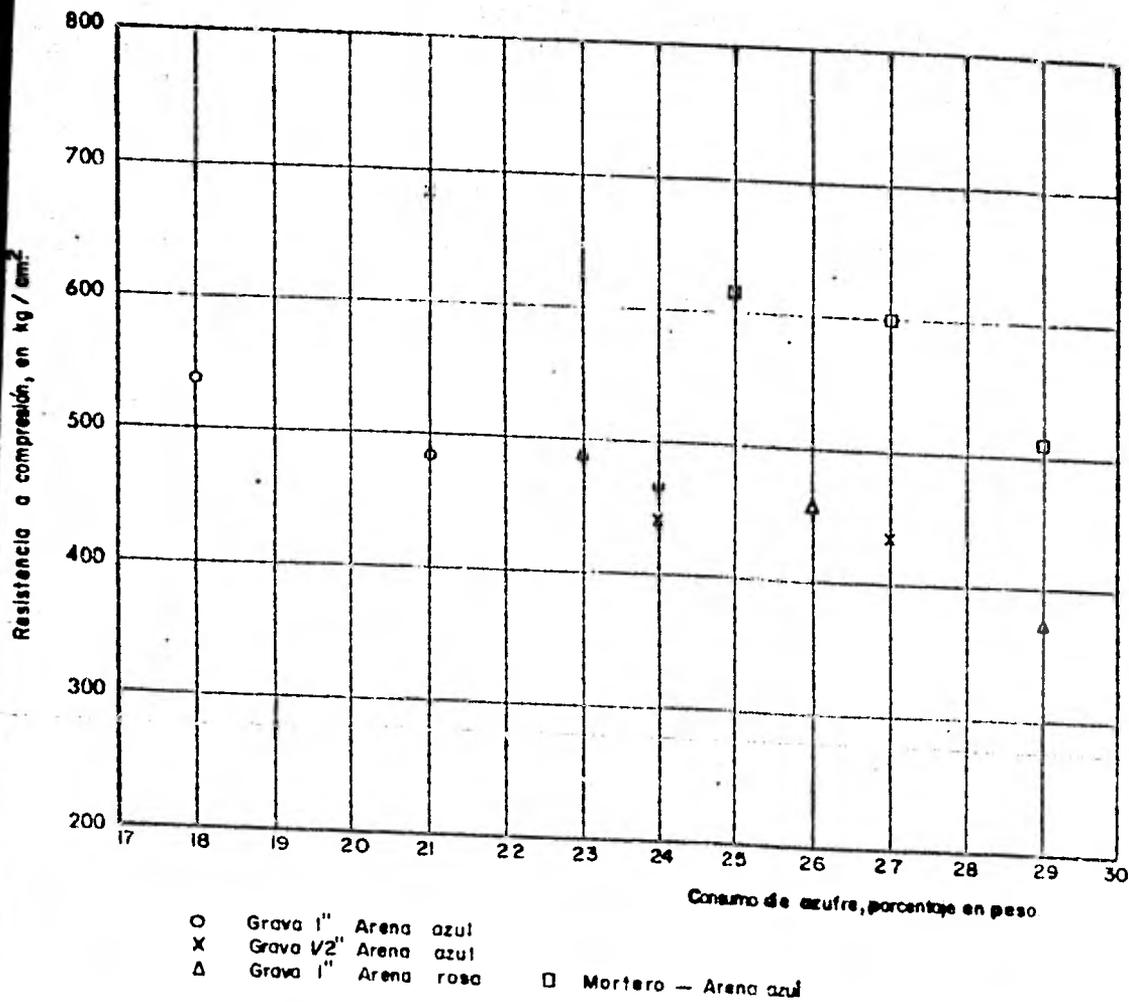


Fig. 10 RESISTENCIA A COMPRESION EN FUNCION DE LOS CONSUMOS DE AZUFRE

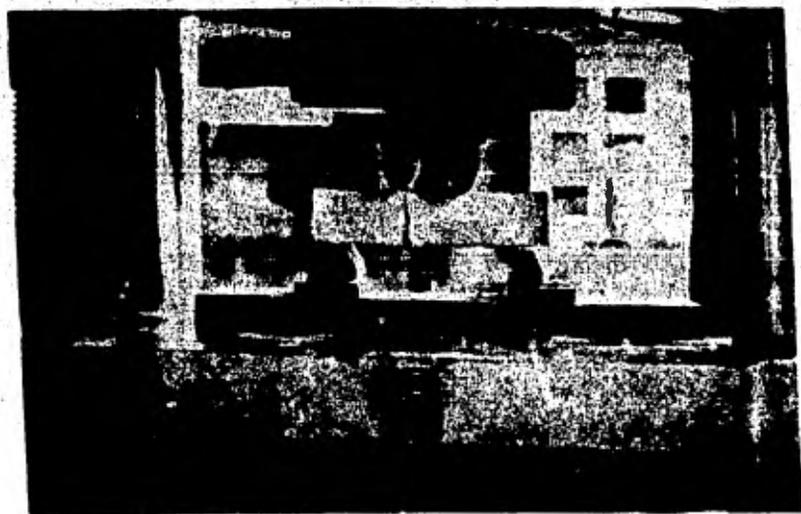
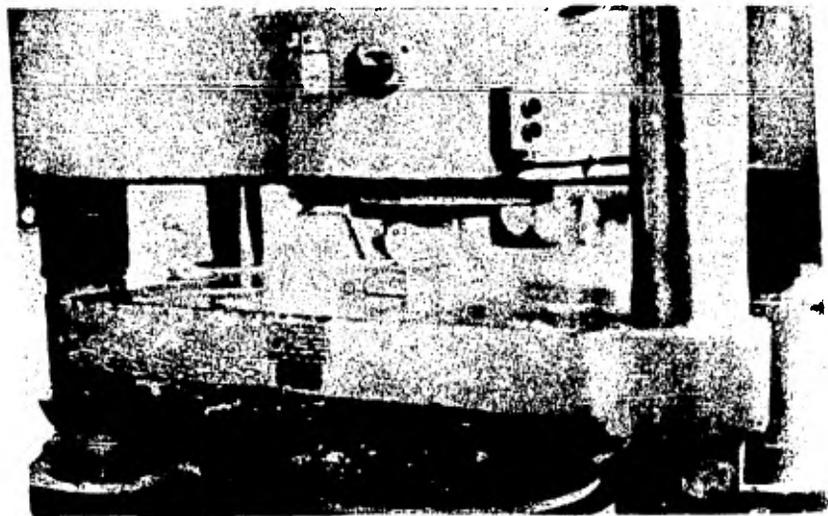
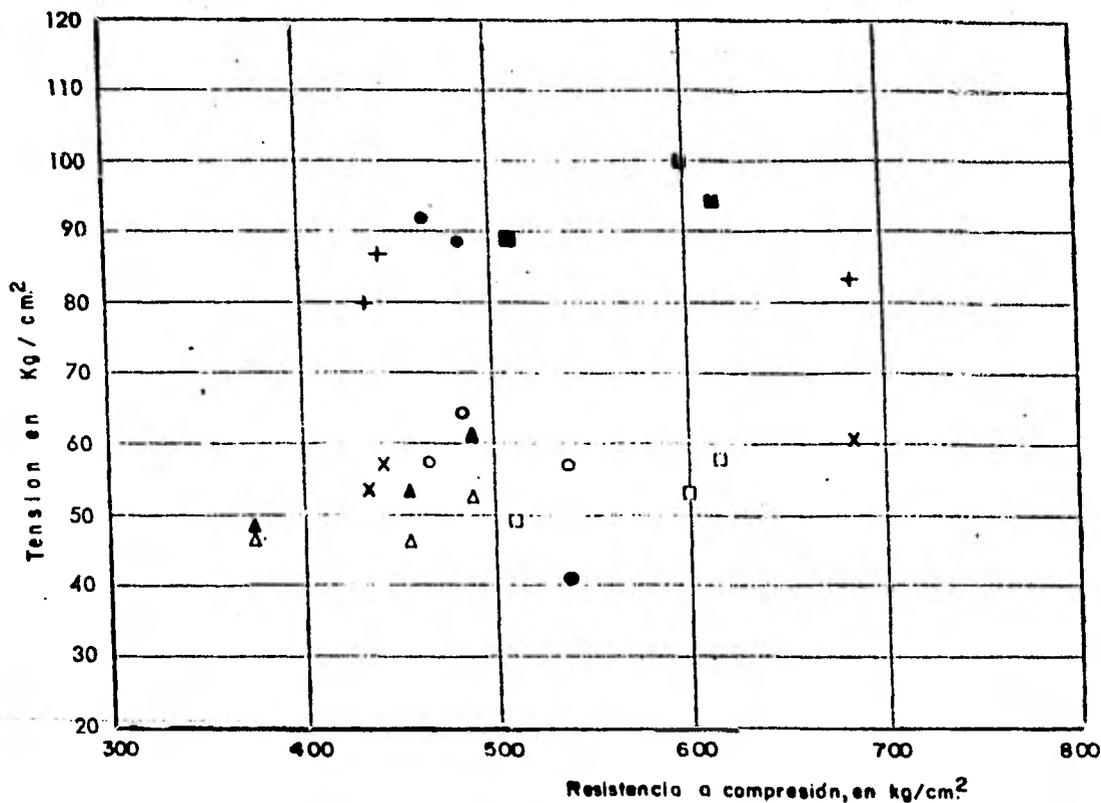


Fig. II ENSAYES SOMETIDOS A TENSION POR FLEXION



II ENSAYES SOMETIDOS A TENSION (PRUEBA BRASILEÑA)



**Concretos**

Grava 1" Arena azul  
 Grava 1/2" Arena azul  
 Grava 1" Arena rosa

**Brasilena (1)**

○  
 ×  
 △

**M.R. (2)**

●  
 +  
 ▲

**Morteros**

Arena azul

□

■

Fig. 12 RELACION ENTRE LAS RESISTENCIAS A TENSION Y COMPRESION.

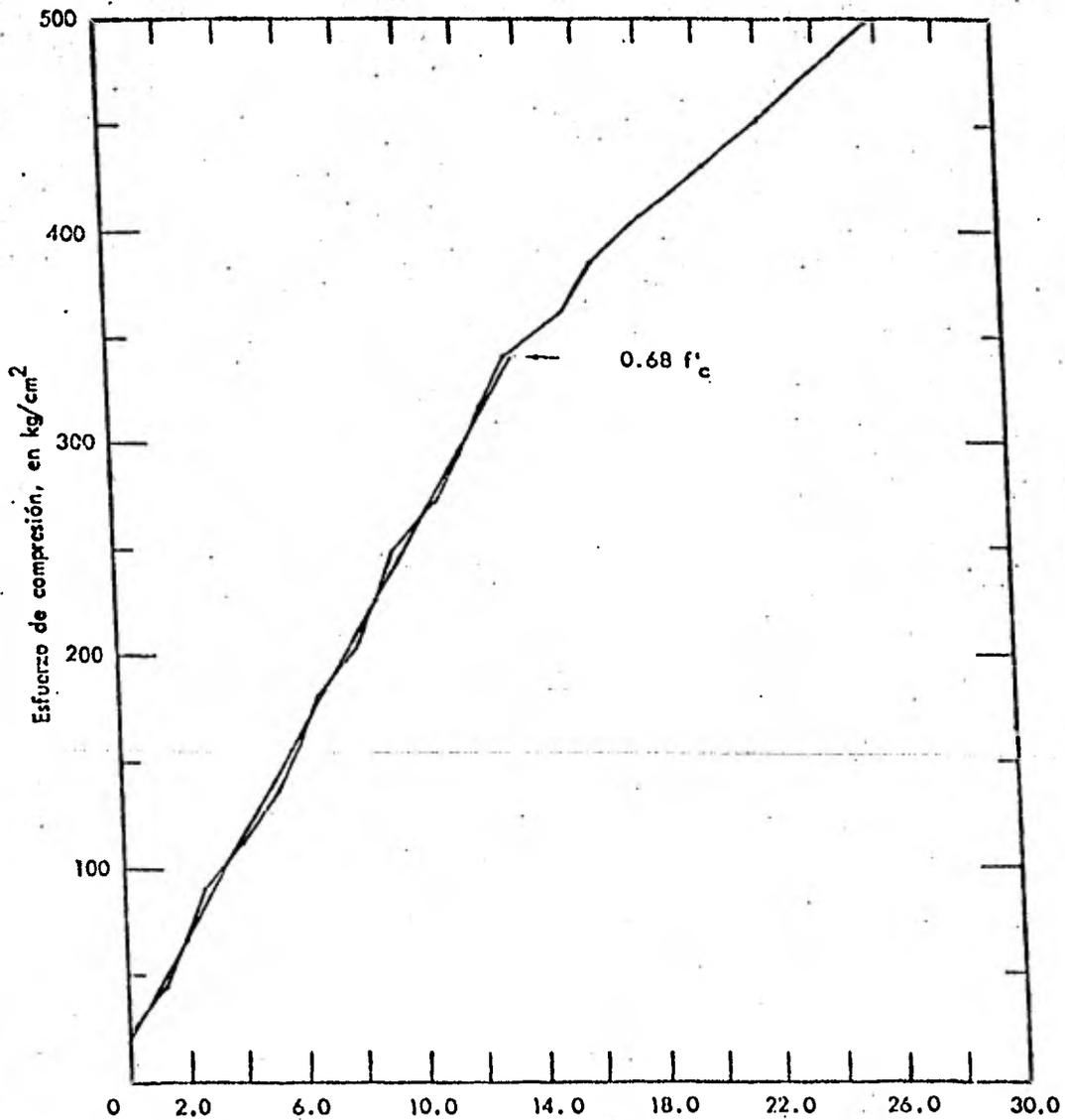
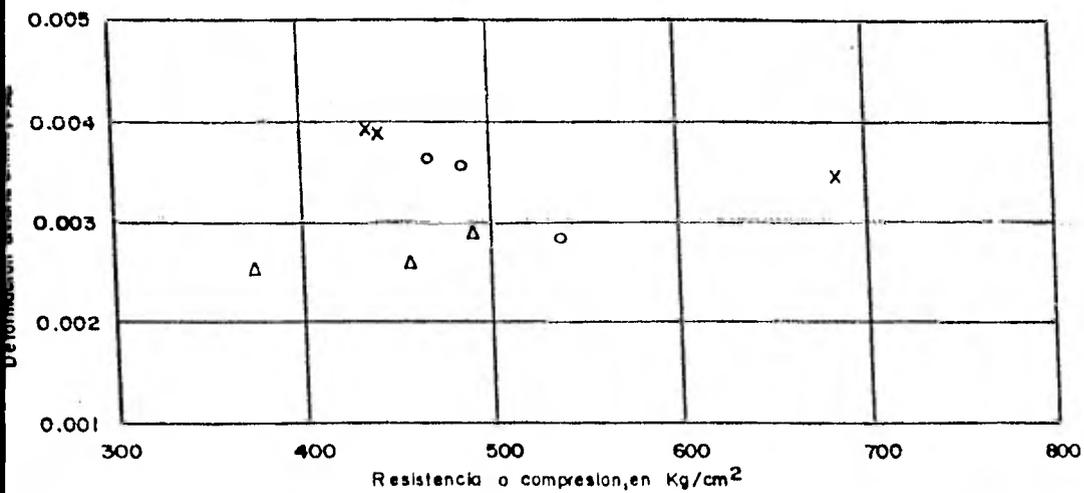
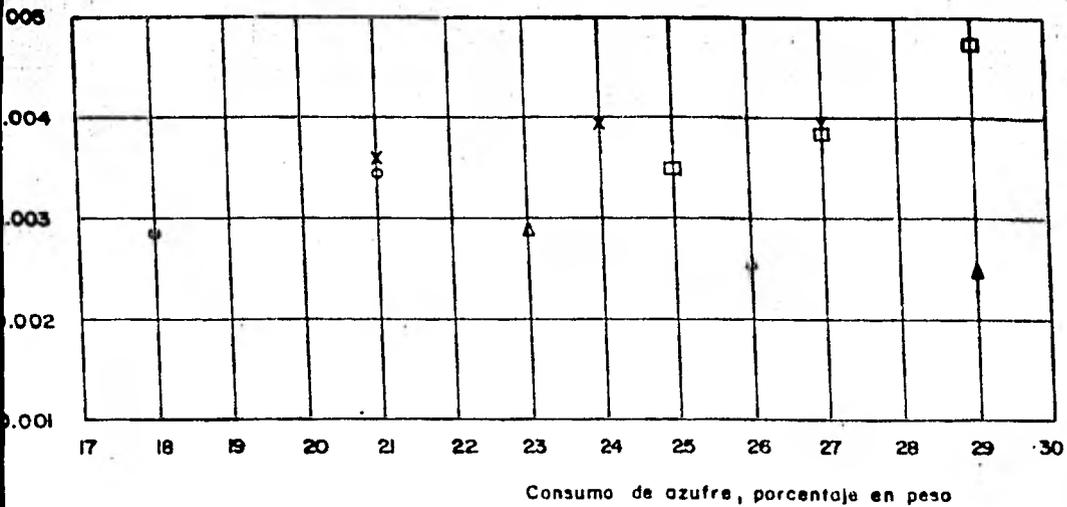


Fig. 13 GRAFICA ESFUERZO-DEFORMACION UNITARIA DE UN MORTERO DE AZUFRE



- Grava 1" - Arena azul
- × Grava 1/2" - Arena azul
- △ Grava 1" - Arena rosa
- Mortero, Arena azul

Fig. 14 VARIACION DE LA DEFORMACION UNITARIA ULTIMA CON LOS CONSUMOS DE AZUFRE Y LA RESISTENCIA A COMPRESION.

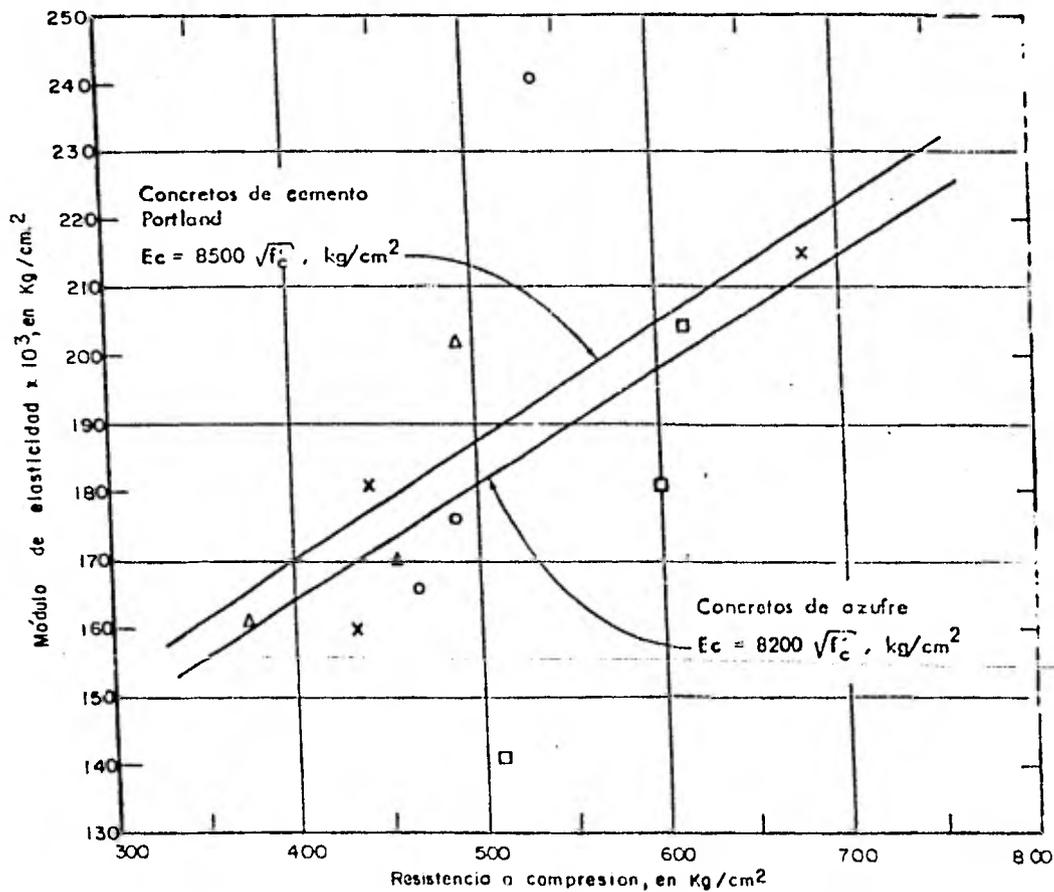


Fig. 15 RELACION ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y LA RESISTENCIA A COMPRESION

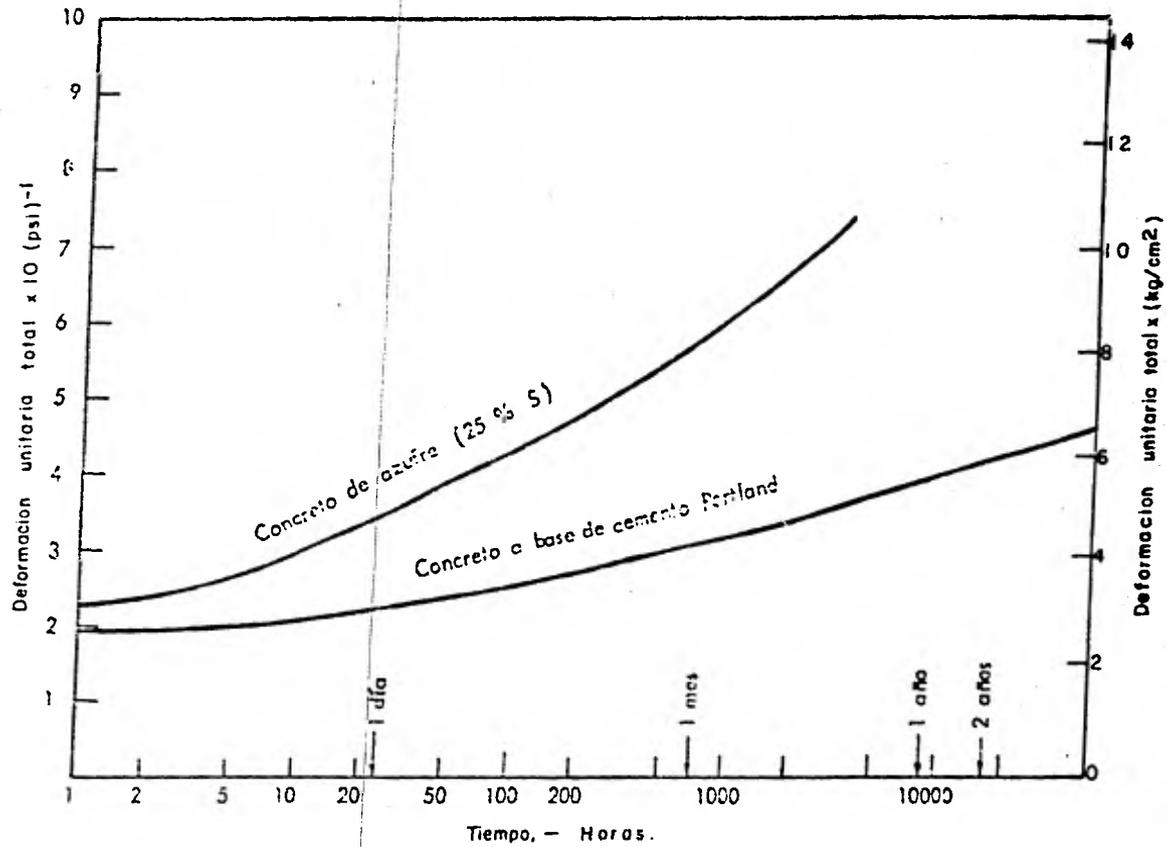
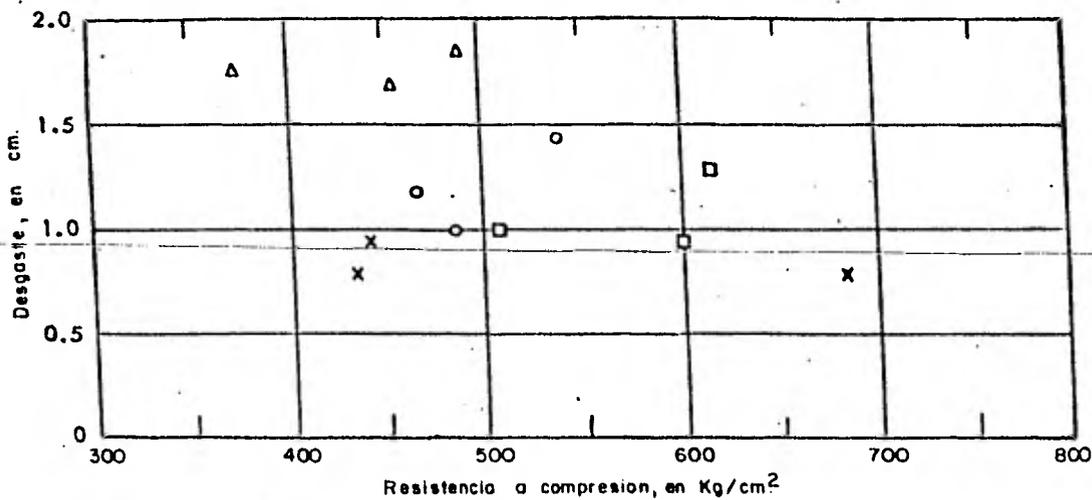
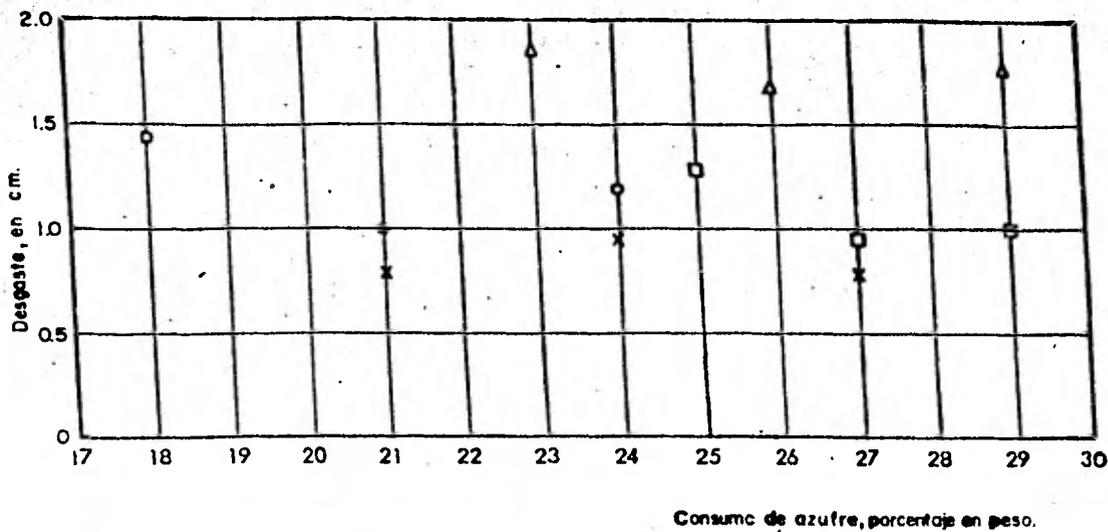


Fig 16 DEFORMACION DIFERIDA EN CONCRETO DE AZUFRE A 21° C  
(Tomado de la Ref. 16)



**Fig.17 EQUIPO PARA PRUEBAS DE  
DESGASTE**



O Grava 1" Arena azul  
X Grava 1/2" Arena azul

Δ Grava 1" Arena rosa  
□ Mortero, Arena azul

Fig. 18 EFECTO DEL CONSUMO DE AZUFRE Y LA RESISTENCIA A COMPRESION EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE

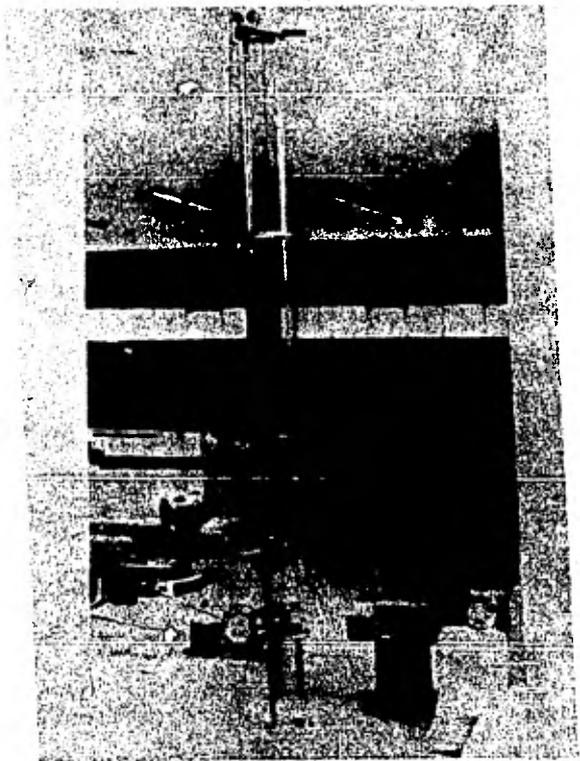
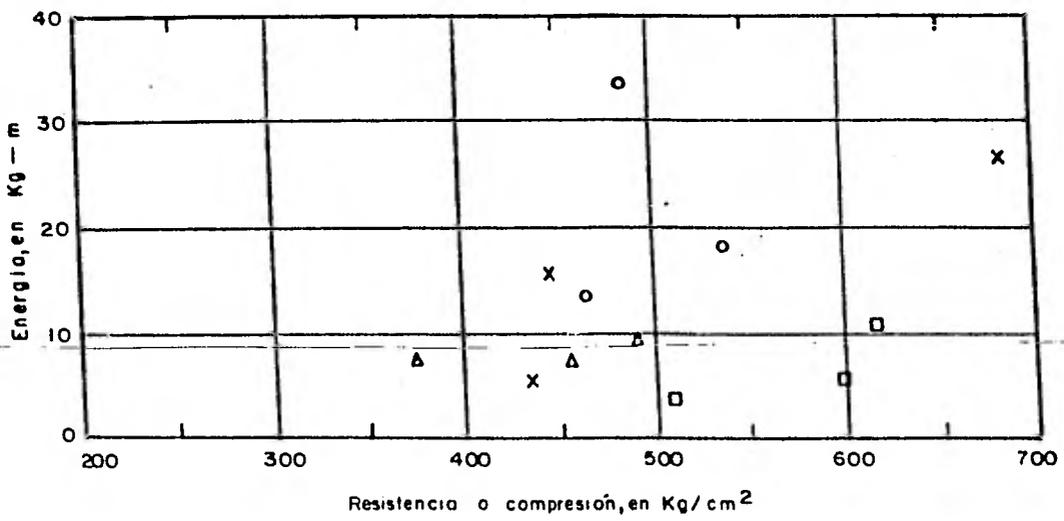
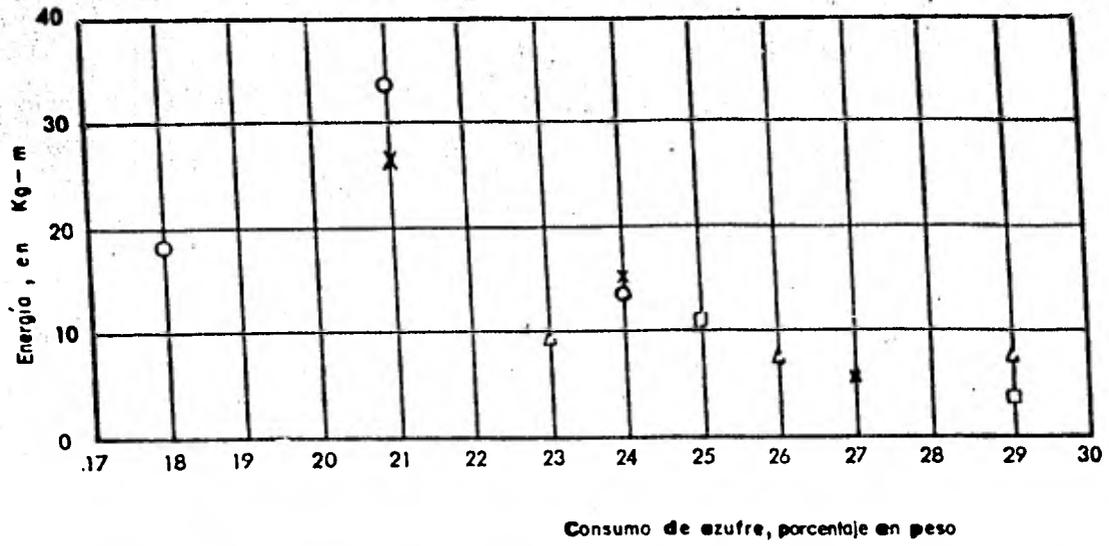
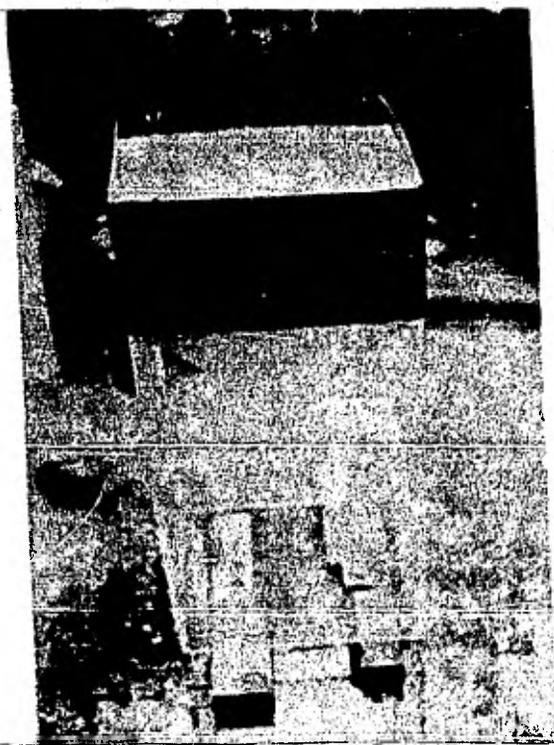


Fig. 19 EQUIPO PARA PRUEBA DE IMPACTO

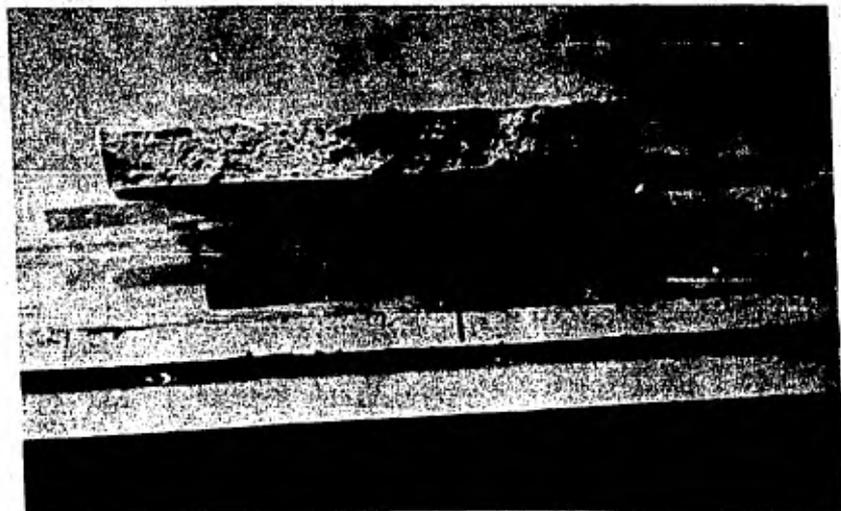


- Grava 1" - Arena azul
- × Grava 1/2" - Arena azul
- △ Grava 1" - Arena azul
- Mortero, Arena azul

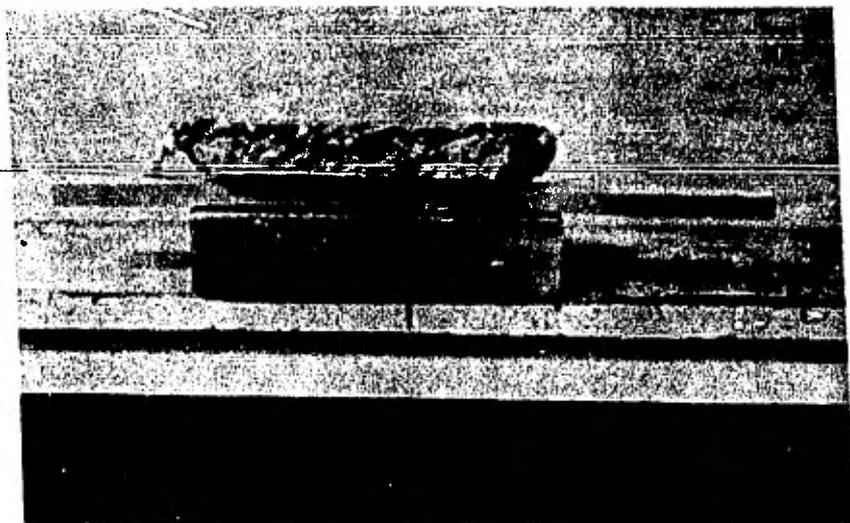
Fig. 20 RELACION ENTRE LA RESISTENCIA AL IMPACTO, EL CONSUMO DE AZUFRE Y LA RESISTENCIA A COMPRESION.



**Fig. 21 EQUIPO PARA PRUEBA DE PERMEABILIDAD**



**Adecuada compactacion**



**Deficiente compactacion**

**Fig.22 INFLUENCIA DE LA COMPACTACION EN LA PERMEABILIDAD**

Número atómico	16	
Peso atómico	32.066	
Volumen atómico (calculado)	Rúbico 15.5 cm <sup>3</sup> Monoclinico 16.4 cm <sup>3</sup>	
Ángulo de reposo	35°	
Punto de ebullición	444.6°C a una atmósfera	
Cristalización	Rúbico. Forma azul del azufre, estable desde 95.5°C Monoclinico. Estable arriba de 95.5°C	
Densidad	Rúbico 2.07 g/cm <sup>3</sup> a 20°C Monoclinico 1.96 g/cm <sup>3</sup> a 20°C Acero 1.92 g/cm <sup>3</sup> a 20°C Sin compactar 1.35 a 1.44 g/cm <sup>3</sup> En polvo (malla 250) 0.56 g/cm <sup>3</sup>	

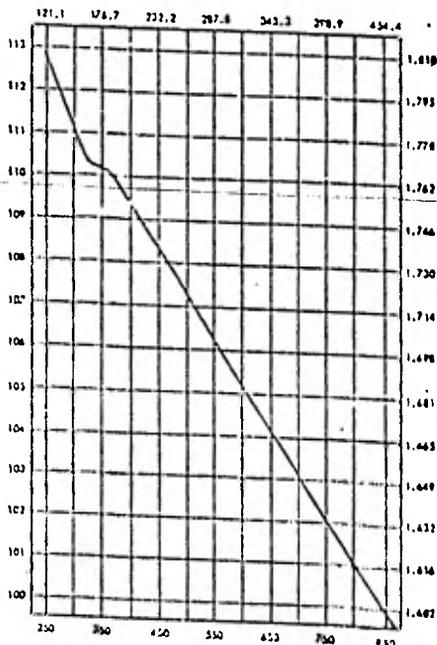
Calor de fusión	°C	Temperatura cal/g
S(rúbico) = S λ (líquido)	112.8	11.9
S(monoclinico) = S λ (líquido)	118.9	9.2
SO <sub>2</sub> (sólido) = SO <sub>2</sub> (líquido)	-75.5	27.64
SO <sub>3</sub> (=) = SO <sub>3</sub> (líquido)	16.8	22.5
SO <sub>3</sub> (β) = SO <sub>3</sub> (líquido)	32.5	36.25
SO <sub>3</sub> (γ) = SO <sub>3</sub> (líquido)	62.3	77.50
Calor de transformación	°C	Temperatura cal/g
S(rúbico) = S(monoclinico)	95.5	2.607
S(líquido) = S(vicinoso)	159.9	2.751
Temperatura de ignición		
	248 - 261°C en aire a presión atmosférica	
Dureza	Número 1.5 a 2.5 en escala Mohs	
Olor	Sin olor	
Dilatación térmica		
Línea (rúbico)	Rango de temperatura °C	Dilatación
	0 - 13	0.567 x 10 <sup>-5</sup>
	13 - 50	7.411 x 10 <sup>-5</sup>

**TABLA 5 PROPIEDADES FÍSICAS  
DEL AZUFRE**

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 (sól)	$C_p = 3.58 + 6.24 \times 10^{-3} T$ (24.9 - 95.5°C ó 77-203.9°F)
S (suro)	$C_p = 3.56 + 6.96 \times 10^{-3} T$ (-4.5-118.9°C ó 23.9 - 246°F)
S <sub>2</sub> (líquido)	$C_p = 5.4 + 5 \times 10^{-3} T$ (118.9-444.9°C ó 246-832.8°F)
S (gas)	$C_p = 5.43 - 0.26 \times 10^{-3} T + 0.27 \times 10^{-5} T^2$ (25 - 1727°C ó 77-3140.6°F)
S <sub>2</sub> (gas)	$C_p = 8.54 + 0.28 \times 10^{-3} T + 0.79 \times 10^{-5} T^2$ (25-1727°C ó 77-3140.6°F)
SO (gas)	$C_p = 7.70 + 0.84 \times 10^{-3} T + 0.65 \times 10^{-5} T^2$ (25-1727°C ó 77-3140.6°F)
SO <sub>2</sub> (gas)	$C_p = 10.30 + 2.54 \times 10^{-3} T - 1.42 \times 10^{-5} T^2$ (25-1527°C ó 77-2780.6°F)
SO <sub>3</sub> (gas)	$C_p = 13.70 + 6.42 \times 10^{-3} T - 3.12 \times 10^{-5} T^2$ (25-927 ° C ó 77-1700.6° F)
H <sub>2</sub> S (gas)	$C_p = 7.15 + 3.32 \times 10^{-3} T$

TABLA 5 PROPIEDADES FÍSICAS DEL AZUFRE (Continuación)



Entropía

Temperatura = s	p		cal/ g atm/ grado	cal/ g/ grado	B t u/ lb r atm/ grado	B t u/ lb/ grado
350			0.90	0.078		
368.6	300	sublimo	1.26	0.037	1.17	0.026
	200				1.20	0.027
368.6	200	sublimo	1.43	0.044	1.43	0.044
392	246			1.81	0.054	1.81
400	246		2.58	0.080	2.50	0.080
	300		2.71	0.084		
450			2.60	0.112	3.10	0.087
500	400		4.42	0.138	4.0	0.125
550	500	líquido	5.10	0.142	4.9	0.132
	600			5.90	0.184	5.7
650	700		1.50	0.205	6.9	0.202
700	800		7.23	0.225	7.2	0.224
718	832	sublimo	7.46	0.232	7.48	0.231
392	246			1.81	0.058	1.81
392	246		2.60	0.081	2.60	0.081
400			2.74	0.086		
450	300		3.01	0.119	3.2	0.100
500	400	líquido, 0.04	1.71	0.147	4.3	0.134
	500			5.49	0.171	5.2
600	600		6.22	0.194	6.1	0.190
650	700		6.96	0.215	6.8	0.212
718	832		7.78	0.242	7.70	0.242

TABLA 5 PROPIEDADES FISICAS DEL AZUFRE (Continuación)

	50 - 78	$5.433 \times 10^{-5}$
	78 - 97	$25.67 \times 10^{-5}$
	97 - 110	$103.7 \times 10^{-5}$
Oferta (g/24h)	Rango de temperatura °C	Ecuación
	0 - 31	$13.70 \times 10^{-5}$
	31 - 50	$22.30 \times 10^{-5}$
	50 - 78	$25.90 \times 10^{-5}$
	78 - 97	$62.01 \times 10^{-5}$
	97 - 110	$302.6 \times 10^{-5}$

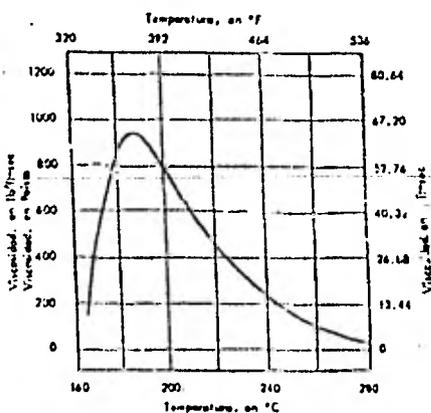
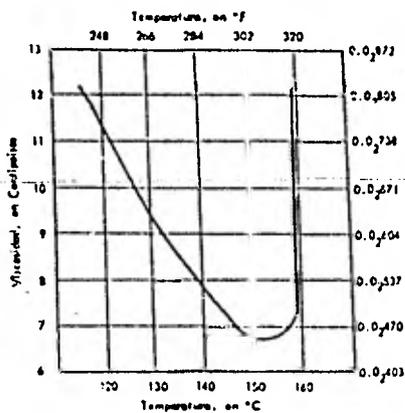


TABLA 5 PROPIEDADES FISICAS DEL AZUFRE (Continuación)

Contenido de calor

Temperatura			cal/ gramo/ grado	cal/ g/ grado	Btu/ libra/ grado	Btu lb/ grado
° K	° F					
350			250	9.04		
	290	rámico				
368.6	304		399	12.4	495	21.7
368.6	304	monoclinico	485	15.1	720	22.4
392	346		630	19.6	875	27.3
392	346		925	28.8	1135	35.4
600			985	30.7	1845	51.5
	300	Líquido				
450			1340	42.4	2070	64.5
	400					
500			1750	54.2	2830	88.2
	500	Líquido				
550			2150	67.0	3690	113.7
	600	Líquido				
650			2990	97.7	4950	139.0
	600					
700			3430	106.9	6170	192.4
710	831	monoclinico	3990	111.8	6440	201.0
392	346		630	19.6	1135	35.4
392	346		940	27.3	1690	52.1
600			1005	31.3		
	300	Líquido				
450			1450	45.2	2140	67.4
	400					
500			1875	58.5	2830	94.5
	500	Líquido				
550			2205	71.2	3040	120.4
	600	Líquido				
600			2705	86.3	4700	146.0
	700					
650			3130	97.4	5540	172.7
	660					
700			3570	111.7	6430	200.5
710	811		3730	116.7	6715	209.4

TABLA 5 PROPIEDADES FÍSICAS DEL AZUFRE (Continuación)

TABLA. 6 PROPIEDADES MECANICAS DE LOS CONCRETOS Y MORTEROS DE  
AZUFRE

MATERIALES	CONCRETO GRAVA 25 mm						CONCRETO GRAVA 13 mm			MORTERO		
	ARENA AZUL			ARENA ROSA			ARENA AZUL			ARENA AZUL		
Ensayos *	18 %	21 %	24 %	23 %	26 %	29 %	21 %	24 %	27 %	25 %	27 %	29 %
Compresión Kg/cm <sup>2</sup>	537	484	466	488	455	374	684	441	436	615	599	509
Tens. az. (Compresión diametral) Kg/cm <sup>2</sup>	57	64	57	53	46	46	61	57	54	58	53	49
Tensión (Módulo de rotura) Kg/cm <sup>2</sup>	41	88	92	60	53	48	83	87	80	94	100	89
Módulo de elasticidad x 10 <sup>-3</sup> Kg/cm <sup>2</sup>	242	177	167	203	172	162	215	181	160	204	181	141
Deformación unitaria última x 10 <sup>-3</sup> Eu	285	341	366	290	266	252	357	380	389	350	380	475
Impacto Kg-m	18	33	13	10	8	8	27	15	6	11	6	4
Abrasión mm	14	10	12	18	17	18	8	9	8	13	9	10

\* Consumos de azufre, porcentaje en peso

**TABLA. 7 PROPIEDADES MECANICAS DE MORTEROS CON REFUERZO**

Ensaye	Tensión, Kg/cm. <sup>2</sup> (compresión diametral)	Tensión, Kg/cm <sup>2</sup> (Módulo de rotura)	Impacto Kg - m	Abrasión m m
Mortera *				
70% azufre 30% arena y fibra de vidrio	4 1	4 4	—	—
50% azufre 50% arena y fibra de lechu- quilla.	4 0	—	—	—
50% azufre 50% arena y fibra de vidrio.	3 6	—	6	7
40% azufre 60% arena y fibra de lechu- quilla.	—	3 6	1 2	9

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

## VI. 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 caracte-- rísticas físicas de los materiales componentes.

Aunque la resistencia a la compresión varía proporcionalmente a los consu-- mos de azufre, cuando menos dentro de cierto intervalo, factores más determi-- nantes de la cantidad de azufre requerida están dados por la trabajabilidad de la mezcla y el grado de calidad que se requiera lograr en los acabados superfi-- ciales.

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 calcu-- lar los volúmenes absolutos de los materiales componentes, la suma de los cua-- les debe ser igual al volumen requerido.

### VI.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 peso 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 roma ( 16% )
Andesítica 13 mm ( 1/2" )	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 volu-  
métricos, Fig. 23. Si se calculan los volúmenes absolutos que ocupan estos ma-  
teriales, en función de su peso específico, la diferencia entre los volúmenes  
aparentes y los volúmenes absolutos deberá ser ocupada por el azufre; en la  
Fig. 24, se presentan estas relaciones de volúmenes para las combinaciones de  
los materiales incluidos en este trabajo.

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

Para seleccionar la relación grava/arena que condujera a la mezcla óptima,  
en cuanto a resistencia a compresión, se hicieron pruebas preliminares con di-  
ferentes relaciones grava/arena Fig. 25, de las que se determinaron las si-  
guientes relaciones que se consideraron las más efectivas:

GRAVA ANDESITICA TAMAÑO MAXIMO	ARENA ANDESITICA	% GRAVA EN PESO	% ARENA EN PESO
25mm ( 1" )	azul	45	55
13mm ( 1/2" )	azul	45	55
25mm ( 1" )	rosa	55	45

Como se puede observar al comparar las Figs 24 y 25, salvo para los con-  
cretos con agregados de 13mm (1/2") 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 pa-  
ra alcanzar mezclas trabajables y apariencia aceptable.

## VI.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 fue estimada en función de la relación diámetro/altura que adoptaba una mezcla al dejarla caer desde la altura de 45 cm sobre una superficie horizontal lisa, esta prueba, aunque bastante imprecisa, da idea de la facilidad con que se puede acomodar una mezcla en las cimbras. En la Fig.26 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 13mm de agregado grueso, concretos con arena rosa y morteros, se requieren mayores consumos de azufre.

Se consideró como intervalo aceptable la trabajabilidad de los valores comprendidos entre 5 y 8. Los morteros y concretos con valores mayores que 8 presentaron por lo general exceso de azufre en su aspecto Fig. 26

La apariencia del acabado se estimó con el criterio mostrado en la Fig.27 basado en la tersura de la superficie de contacto con los moldes metálicos que se colaron. La Fig. 28, presenta los consumos de azufre que fueron necesarios tanto en concretos como en morteros para alcanzar una superficie tersa. También en la misma figura se relacionan los consumos de azufre con la resistencia a compresión de los concretos y morteros.

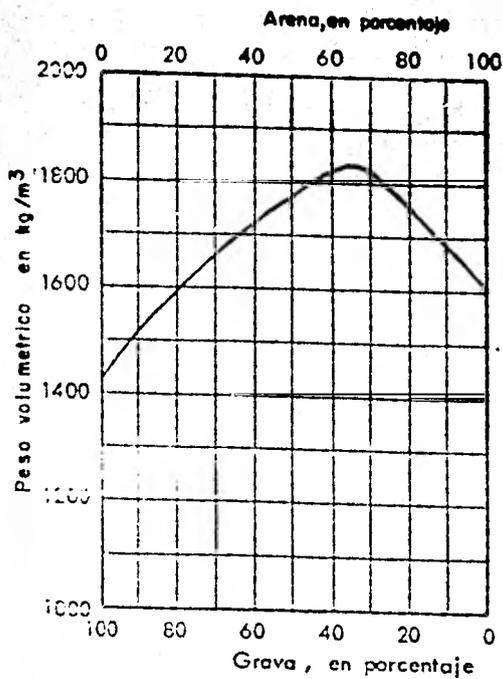
Como se puede observar, para los concretos de arena andesítica azul y grava andesítica, tanto de 13mm como de 25 mm de tamaño máximo, el consumo mínimo de azufre que produce un acabado superficial calificado como bueno resul-

ta 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 coinciden 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.

### VI.3 CONSUMO DE ADITIVO PLASTIFICANTE.

Con objeto de prolongar el tiempo en que una mezcla de concreto o mortero de azufre permanece fluida, se empleó un aditivo plastificante, dicitropentadieno, además de observar la influencia del consumo de este 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 Fig. 29, en cuanto a trabajabilidad, medida esta como se estableció anteriormente, no existe un aumento sensible con el incremento del dicitropentadieno, 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 dicitropentadieno, Figs 5, 6 y 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.



a) Grava andesítica 25 mm.  
Arena andesítica azul.

b) Grava andesítica 25 mm.  
Arena andesítica rosa.

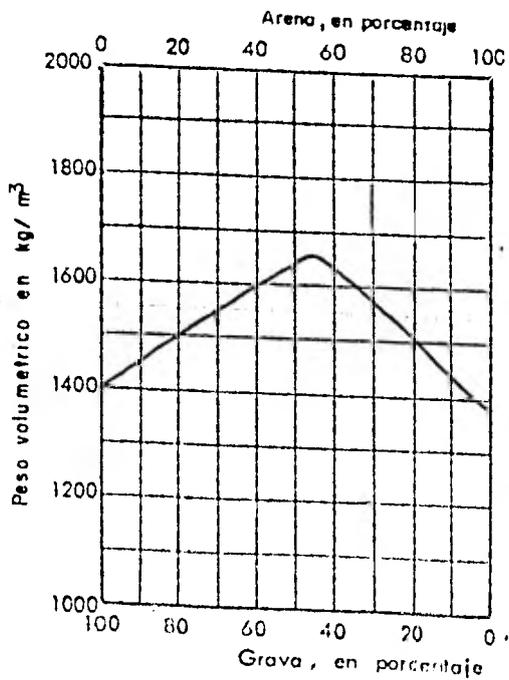
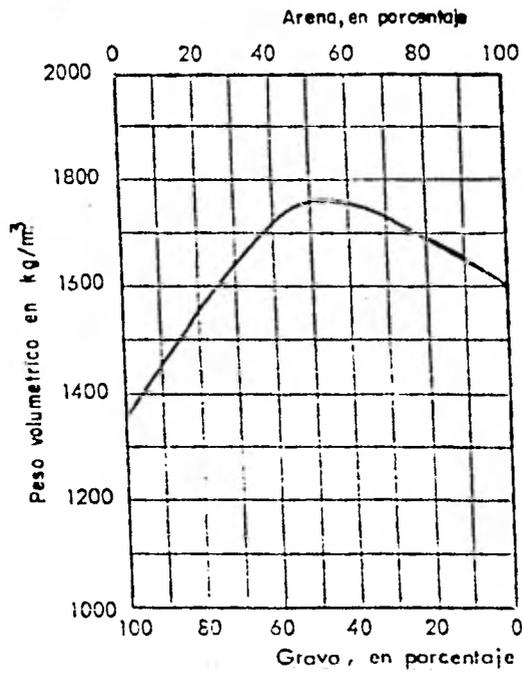
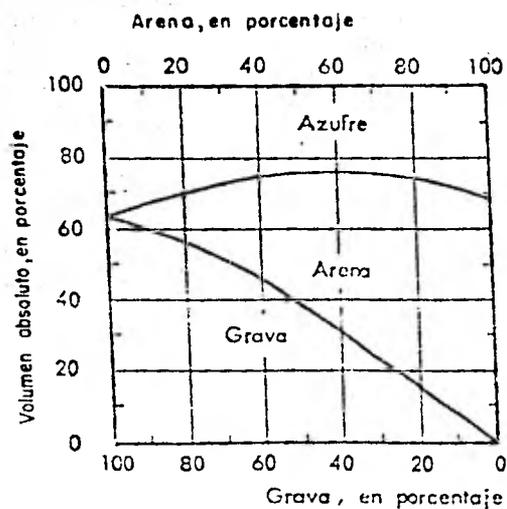


Fig. 23 PESO VOLUMETRICO PARA DIFERENTES COMBINACIONES GRAVA - ARENA.

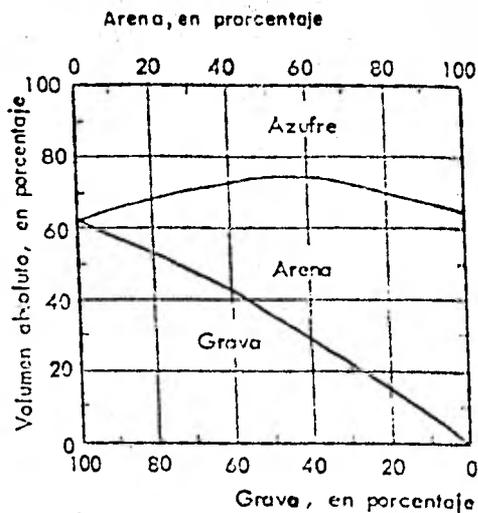


c) Grava andesítica 13 mm  
 Arena andesítica azul.

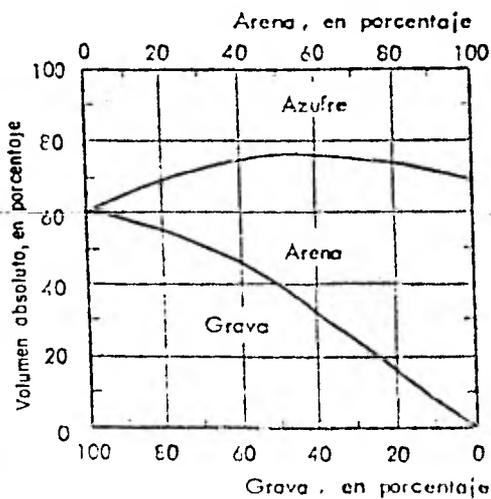
Fig. 23 PESO VOLUMETRICO PARA DIFERENTES COMBINACIONES GRAVA - ARENA  
 (Continuación)



a) Grava andesítica 25 mm.  
Arena andesítica azul

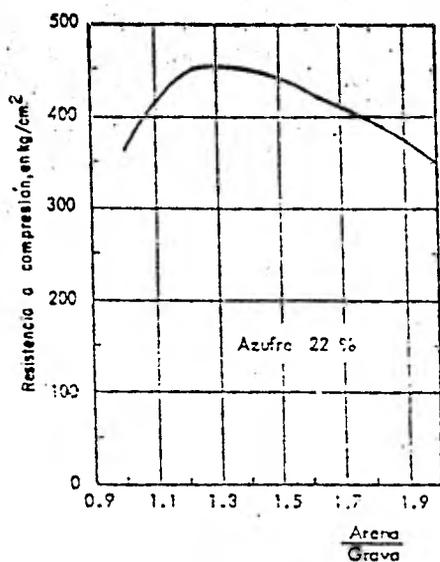


b) Grava andesítica 25 mm.  
Arena andesítica rosa.

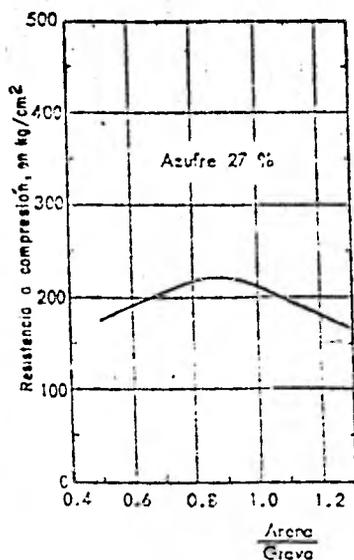


c) Grava andesítica 13 mm.  
Arena andesítica azul.

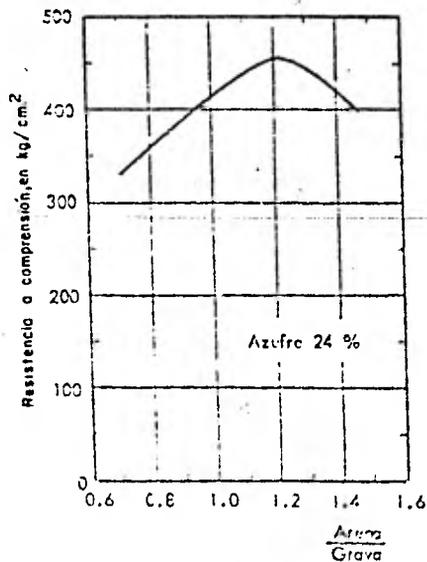
Fig. 24 VOLUMENES ABSOLUTO DE LOS MATERIALES COMPONENTES



a) Grava andesítica 25 mm.  
Arena andesítica azul.



b) Grava andesítica 25 mm.  
Arena andesítica rosa.



c) Grava andesítica 13 mm.  
Arena andesítica azul

Fig. 25 INFLUENCIA DE LA RELACION GRAVA-ARENA EN LA RESISTENCIA A COMPRESION.

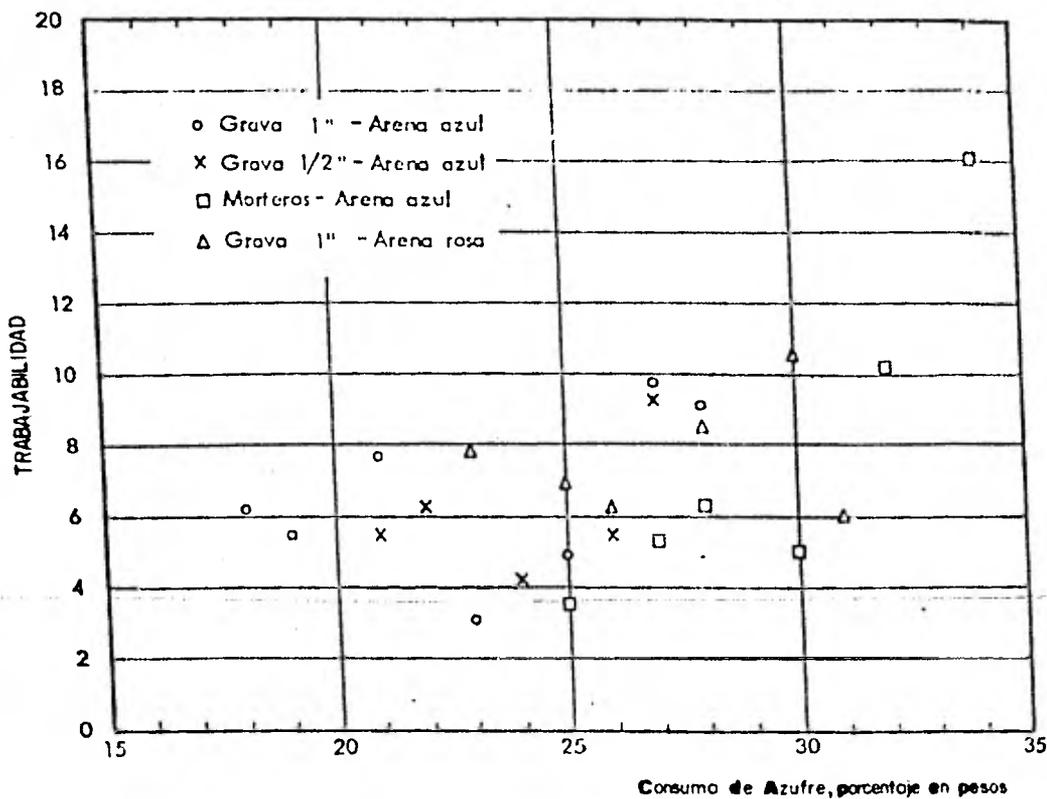


Fig 26 **CLASIFICACION DE LAS MEZCLAS DE ACUERDO CON SU TRABAJABILIDAD.**

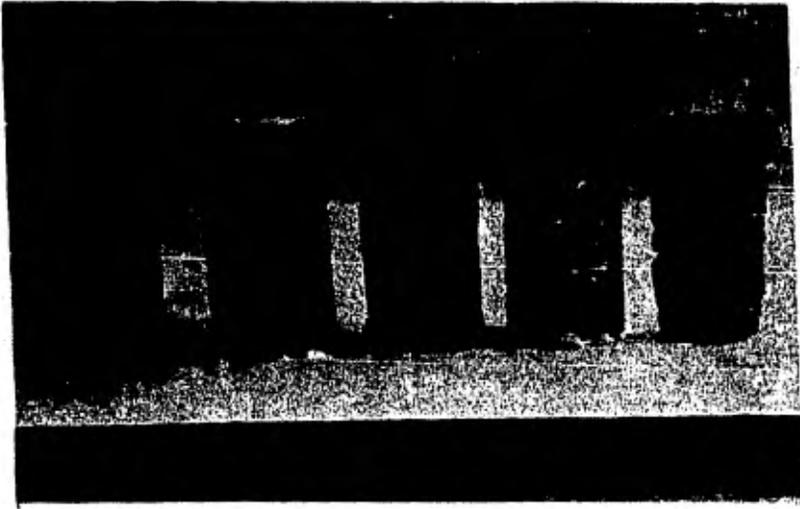
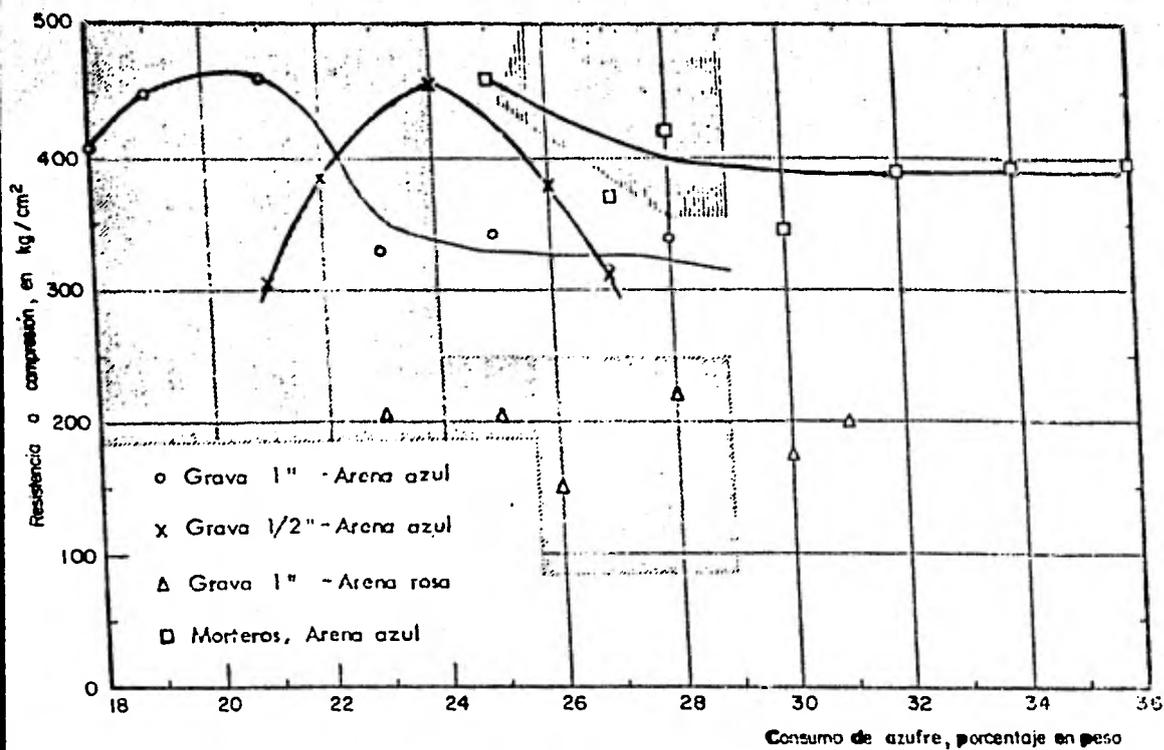


Fig. 27 CALIFICACION DE LOS ACABADOS DE ACUERDO A SU ASPECTO

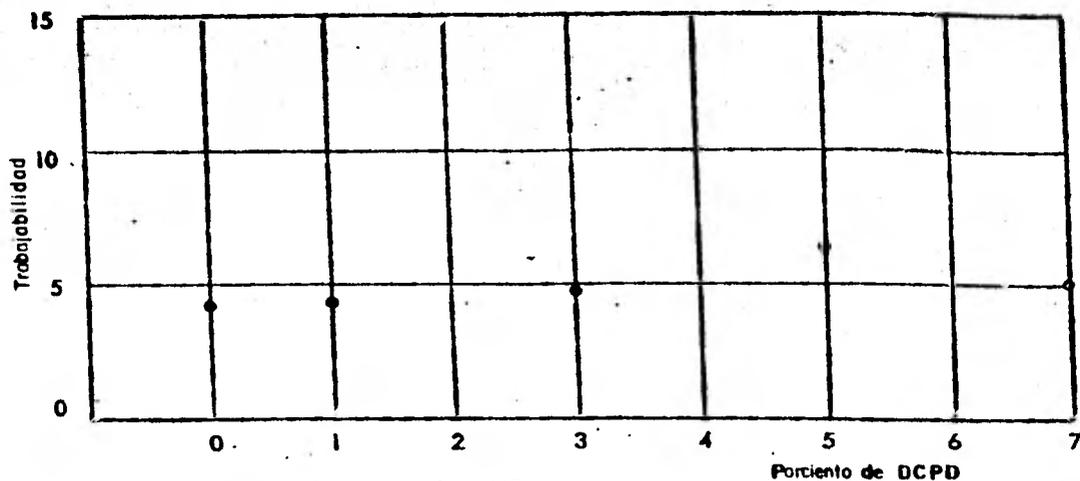


Aspecto: regular a bueno.  
 Concretos: 25 y 13 mm.



Aspecto: regular a bueno.  
 Morteros.

Fig. 2 8 CLASIFICACION DE LAS MEZCLAS DE ACUERDO CON SU APARIENCIA .



Proporcionamiento de partida: Az 25%  
 Ar 42%  
 Gr 33%

Az + DCPD = Constante.

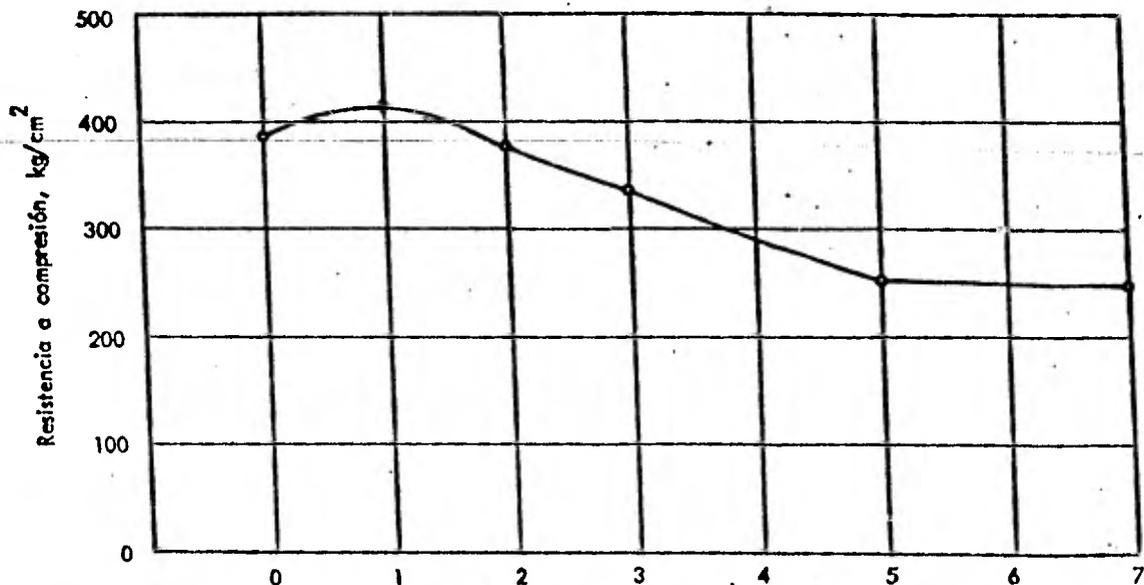


Fig 29 INFLUENCIA DEL DICICLOPENTADIENO EN LA TRABAJABILIDAD Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LAS MEZCLAS DE AZUFRE.

## VII. TECNICAS DE MEZCLADO, COLADO Y MOLDEO.

### VII.1 MEZCLADO.

La función del mezclado es transformar los materiales componentes en una masa lo más homogénea posible en cuanto a sus propiedades. Los morteros y concretos de azufre presentan una característica muy peculiar de estos materiales que resulta de la necesidad de efectuar el mezclado a temperaturas relativamente altas, superiores a la temperatura de fusión del azufre que es de aproximadamente 199°C. Además, es necesario tener un control de la temperatura de mezclado, debido a que la viscosidad del azufre varía con ella, con valores mínimos para temperaturas del orden de 150°C. En este intervalo de temperatura ( 119-150°C ) la mezcla es fácilmente homogeneizable, pero si la temperatura llega a 159°C la viscosidad se incrementa notoriamente dificultando la operación de mezclado ( ver Tabla 5 ). También es importante evitar la concentración de calor, por el riesgo de encendido del azufre, lo que sucede a temperaturas comprendidas entre 248 y 261°C cuando está en contacto con el aire y a presión atmosférica.

Para alcanzar la temperatura de fusión del azufre y lograr la homogeneización de este material con los agregados pétreos dependerá en gran parte de:

Equipo disponible  
Volumen de obra  
Rápidez de colocación.

En cuanto a la forma de fundir el azufre, esto se puede lograr calentando por separado los materiales componentes, calentando los agregados y adicionándoles posteriormente el azufre a la temperatura ambiente o bien mezclando los agregados y el azufre a temperatura ambiente y calentándolos posteriormente en forma conjunta.

Para fundir el azufre es conveniente emplear un recipiente con paredes metálicas gruesas, como los crisoles de hierro fundido o recipientes de doble fondo que permiten una transmisión uniforme de calor. El combustible a emplear puede variar desde carbón o gas propano hasta resistencias o equipos a base de vapor.

El calentamiento de los agregados también se puede hacer partiendo de las mismas fuentes de calor empleadas para la fusión del azufre, siendo conveniente en estos casos aislar el recipiente para evitar al máximo la pérdida de energía calorífica y aplicar directamente la flama a los agregados.

En apariencia, la alternativa que resulta más favorable para hacer el mezclado es la de fundir el azufre y calentar los agregados por separado, esta mezcla se puede hacer en forma manual, para volúmenes muy pequeños, o con revolvedoras semejantes a las empleadas para el mezclado del concreto de cemento Portland, con un mechero de gas acoplado a la base de la misma, cuando se requiere de volúmenes medianos y equipos semejantes a los empleados para el mezclado de los concretos asfálticos, cuando se requiere de volúmenes importantes de concretos de azufre.

- Comercialmente no existen equipos apropiados para el mezclado de estos materiales, pero se han hecho adaptaciones a los equipos antes descritos con resultados satisfactorios. En las pruebas realizadas dentro de este trabajo se empleó una revolvedora como la mostrada en la Fig. 30.

Para calificar el proceso de mezclado se intentaron varios procedimientos y se observaron las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. Estos procedimientos consistieron de los siguientes pasos:

Procedimiento a)

- 1) Precalentar 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 .

Procedimiento b )

- 1) Precalentar la olla.
- 2) Precalentar los agregados a temperaturas del orden de 150°C.
- 3) Colocar la mayor parte de los agregados en la olla.
- 4) Agregar una parte pequeña del azufre a temperatura ambiente y una parte del aditivo plastificante.
- 5) Una vez fundida la porción de azufre adicionada a la mezcla se continúa agregando simultáneamente azufre y aditivo.
- 6) Adicionar más agregado.
- 7) Repetir 5 y 6 hasta que todo el material por mezclar esté en la revolvedora.
- 8) Revolver la mezcla de 3 a 4 minutos.
- 9) Colar .

Procedimiento c )

Igual al procedimiento b) pero invirtiendo los pasos 3 y 4

Procedimiento d )

- 1) Secar los agregados al sol o en un espacio cubierto.

- 2) Precalentar la olla.
- 3) Colocar todo el agregado en la olla y calentarlo hasta alcanzar temperaturas de aproximadamente 150°C.
- 4) Agregar una parte del azufre a temperatura ambiente hasta que se funda.
- 5) Agregar una parte del aditivo.
- 6) Repetir 4 y 5 hasta que todo el material por utilizar esté en la revolvedora.
- 7) Mezclar de 3 a 5 minutos
- 8) Colar

De los procedimientos antes descritos el a) es el que permite mayor velocidad de fabricación y el d) el que requiere de mayor tiempo. Los procedimientos b) y c) requieren de aproximadamente el mismo tiempo, con el inconveniente adicional de tener mayor facilidad de inflamarse el azufre al entrar en contacto - ~~el polvo de azufre, producido por su trituración con los agregados, con la flama del mechero.~~

Los procedimientos b), c) y d) tienen como ventaja sobre el a) que no requieren de un recipiente adicional para fundir el azufre. En las mezclas realizadas en este trabajo se utilizaron los procedimientos a) y c); en la selección de estas alternativas no se tomo en cuenta el factor económico.

## VII.2 COLADO.

El método más conveniente en la colocación y compactación de los morteros y concretos de azufre depende en gran parte de las características geométricas de las piezas por colar, del tipo de material empleado en la fabricación de -- los moldes y del volumen de material que se requiere acomodar en breve lapso - en el que la mezcla está en estado plástico para evitar la presencia de juntas frías que ocasionaría el colado por etapas.

Al igual que en los concretos de cemento Portland, el tamaño máximo del agregado grueso y la fluidez de la mezcla dependerá básicamente de la complejidad del molde y, en caso de emplear algún tipo de refuerzo, de lo cerrado que se encuentre el armado.

Al ponerse en contacto las mezclas de azufre con las superficies frías del molde o del refuerzo interior del mismo, la capa que entra en contacto se solidifica de inmediato, pero el resto de la mezcla permanece en estado plástico permitiendo su compactación adecuada. Esta compactación se puede lograr por varillado, por vibrado interno o bien por vibrado externo; este último aparentemente produce mejores resultados.

La temperatura a la cual debe efectuarse el colado dependerá principalmente de los volúmenes que se requieran colar, Para volúmenes pequeños es conveniente emplear temperaturas ligeramente mayores a las de fusión ( $-119^{\circ}\text{C}$ ) para alcanzar una solidificación más rápida y la posibilidad de tener una mayor eficiencia en el empleo de los moldes. Para volúmenes importantes la temperatura más conveniente resulta ser la correspondiente al límite superior del estado líquido del azufre ( $159^{\circ}\text{C}$ ).

Los cambios volumétricos por fraguado de los concretos y morteros de azufre son proporcionales a la cantidad de azufre, el cual tiene una variación de densidad de 13% al pasar del estado sólido al líquido. Estas contracciones se deben tomar en cuenta sobre todo cuando se cuelean piezas grandes en varias capas.

Las grietas verticales por contracciones restringidas y las grietas horizontales entre capas cuando se permite el fraguado de una capa antes de colocar la que sigue, son comunes cuando no se toman las precauciones necesarias para evitarlas. Una práctica aconsejable sería la de emplear una sola revoltura y evitar de esta forma la presencia de las grietas verticales originadas por la res-

tricción a contraerse que le imparte el concreto ya solidificado así como las juntas frías que se originan entre dos colados subsecuentes.

En cuanto a los acabados superficiales el concreto de azufre adoptará fielmente el acabado de las cimbras, permitiendo la obtención de superficies pulidas con detalles minuciosos y esquinas agudas. Sin embargo, debido a la rápida cristalización del azufre al ponerse en contacto con el aire, es muy difícil -- obtener superficies regulares en la cara superior, ya que el uso de la llana -- para el acabado convencional se hace casi imposible.

Además, pueden aparecer depresiones superficiales o huecos en la parte superior de los especímenes cuando el azufre líquido en el interior pasa a ocupar el espacio desalojado por el azufre próximo al exterior al enfriarse. Estos huecos se pueden evitar si se continúa la compactación y mezclado del material de la parte superior del espécimen, al mismo tiempo que se agrega material mientras solidifica la parte restante.

### VII.3 MOLDES

Debido a las características de los concretos y morteros de azufre se puede realizar el moldeo de elementos de una variedad de formas con diferentes grados de complejidad y como el proceso de moldeo es por vaciado de la mezcla en estado plástico, permite que se puedan colar piezas con precisión milimétrica.

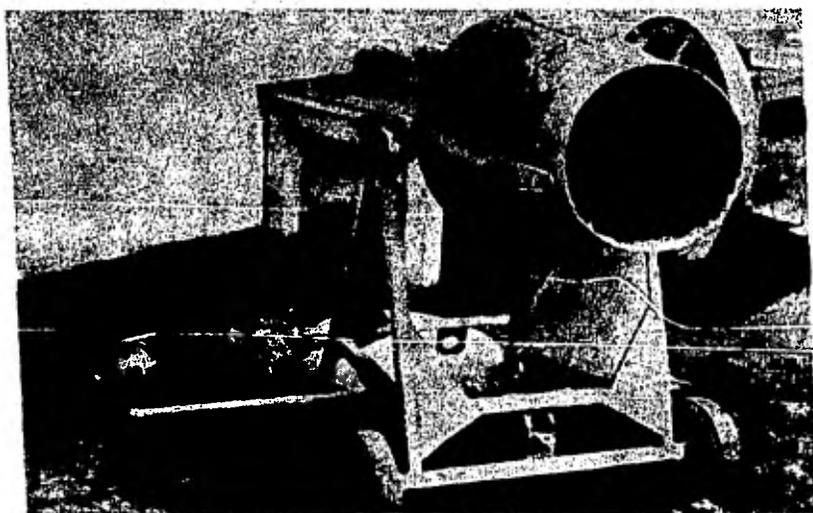
Un buen molde debe reunir las siguientes características: fácil armado y desmolde, permitir un colado rápido, ser durable y dimensionalmente estable, -- con área mínima de vaciado y tener elementos para compensar las contracciones.

Para la fabricación de los moldes pueden emplearse diferentes tipos de materiales; el aluminio, la lámina de acero, el vidrio templado y la lámina de -- plástico dan una superficie lisa y tersa sin problemas de adherencia superfi---

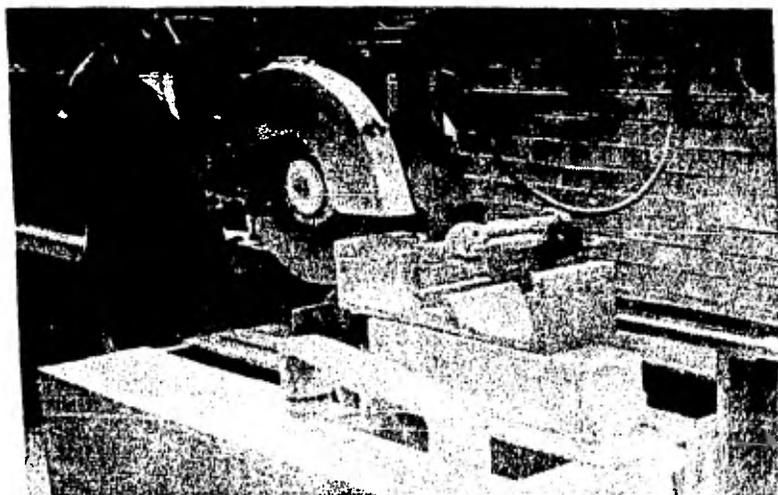
cial. Los moldes de madera barnizada o de concreto con las superficies engrasadas, dan acabados menos tersos y tienen una durabilidad muy inferior a los metálicos. Los plásticos termofijos como algunas resinas fenólicas y algunas aminas pueden utilizarse como moldes, también algunas resinas termoplásticas pueden emplearse como moldes, pero requieren de un medio para disipar el calor generado, como un baño de agua o una cama de arena. Los moldes de fibra de vidrio con resinas tratadas, para hacerlos resistentes al calor, presentan una alternativa ya que pueden resultar tan durables y resistentes como los de metal pero más baratos.

Para desmoldar las piezas con cierta facilidad es necesario romper la adhesión entre el molde y la pieza con un golpe al molde en sentido perpendicular al área de contacto, por lo que los elementos componentes del molde deben ser lo suficientemente resistentes para soportar esta acción. Los huecos o cavidades dentro de la pieza requieren que los moldes sean desarmables por dentro para facilitar su desmolde.

El requisito de área mínima de colado se estipula por la poca facilidad que se tiene para acabar las superficies expuestas, debido a la rápida cristalización del azufre cuando está en contacto con el aire. Una forma de lograr este requisito es tener moldes con extensiones que permitan almacenar material para compensar las contracciones que se presentan. Una forma de como invertido acoplado a la tapa de los moldes permite efectuar el colado con cierta facilidad y posteriormente eliminar estas extensiones cuando el material tiene poco tiempo de haber cristalizado. Estas extensiones se localizarán en las partes del molde que permitan un mejor acomodo del material y donde no sean críticos por aspectos o por funcionamiento del elemento. En otros casos, cuando no se emplea tapa en los moldes, el acabado terso por todas las caras de las piezas puede lograrse colando una extensión a la pieza y recortando posteriormente el excedente con una sierra, del tipo de las empleadas para cortar concreto, Fig. 31.



**Fig. 30 EQUIPO DE MEZCLADO.**



**Fig. 31 ACABADO DE LAS PIEZAS POR CORTE**

### VIII. RECOMENDACIONES DE DISEÑO Y CONSTRUCCION.

El empleo de los morteros y 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 toman 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 dé 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 emplear agregados de calidad inferior. Es importante que las arenas tengan partículas más finas que la malla 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 mortero o 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 mortero o concreto, como es el caso de piezas de formas complejas o 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 proporcio namiento deberá hacerse por peso de la mezcla.

- b) Se recomienda hacer la dosificación de la mezcla en función de los vo lúmenes 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 morteros y concretos -- elaborados.
- c) A menos que un estudio económico indique lo contrario, la técnica recomendable a seguir para el mezclado de los concretos y morteros será la de calentar los agregados y fundir el azufre por separado y posteriormente efectuar el mezclado en un recipiente, revolvedora, calenta do previamente. La temperatura entre la que debe de oscilar la mezcla será 119°- 150°C. El tiempo de mezclado dependerá de la eficiencia del sistema empleado y del volúmen de ésta.

El combustible a emplear para el calentamiento de los agregados y para fundir el azufre estará regido 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 agrietamientos verticales por limitación a la libre contracción de las mezclas se recomienda emplear una sola revolución para el colado de las piezas.

Es conveniente tener presente que los acabados tradicionales con llana 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 construidos 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 construidos con morteros o 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	$\epsilon_u = 0.004$
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 en 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 morteros y 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 morteros y 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 morteros y 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 bloque de concreto, tabique rojo recocido o tabicón, la técnica más recomendable es el empleo de la cuchara con mezclas fluidas que contengan al menos 40% de azufre,-

arena y 3% de plastificante y a temperaturas que oscilen entre 120 y 130°C. Los sistemas de aspersión son igualmente recomendables, especialmente el uso de la 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 utilice. También dentro del campo de la construcción se encuentra el empleo de espumas 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 que conviene estudiar, ya que existe poca información al respecto, es el uso en 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.

## IX. ASPECTOS ECONOMICOS.

Para estudiar la conveniencia de emplear los morteros y 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 morteros y concretos de cemento Portland.

Se hacen los siguientes comentarios, donde se resaltan los aspectos donde 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 morteros y concretos de azufre no se requiere el empleo de azufre 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 este 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 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% en peso, aproximadamente la mitad de la cantidad que se requiere de azufre.

Debe destacarse que los concretos y morteros 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, tanto en los concretos y morteros 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.

Ambos concretos pueden utilizar agregados que no cumplan con los requisitos de las recomendaciones generalmente aceptadas para los concretos de cemento Portland, pero esto va en decremento de la calidad del producto elaborado, aunado a los incrementos en los costos de producción por requerirse de mayores consumos de cementante. La cantidad de agregados pétreos requeridos para uno y otro caso es semejante, -- por lo que ~~no hay~~ U diferencia en costo en cuanto a este concepto.

3. En relación con los equipos de mezclado y la energía requerida para el mismo se puede decir que a nivel de autoconstrucción se puede emplear equipos similares para ambos concretos, revolvedoras de 90 l. de capacidad ( 1/2 saco ), y el tiempo de homogeneización puede llegar a ser el mismo, si para eso de los morteros y 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 requerida para los morteros y 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 morteros y 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 y morteros 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, mas no es un material indispensable.
6. 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.
7. En cuanto a costo de manejo y transporte, hay que tomar en cuenta el costo del equipo que se requiera para transportar el concreto y mortero 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 puedan 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 costo de los productos hace esperar sin embargo que el azufre se vuelva cada vez mas competitivo para la fabricación de concretos y morteros, por lo que para tener incentivos, inclusive económicos deberán enfocarse hacia usos en que se aprovechen algunas ventajas particulares de los morteros 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 sureste del país ( Azufrera Panamericana) se generan cantidades que por su magnitud resultan atractivas.

Por lo expuesto anteriormente se puede concluir que el empleo de azufre como material de construcción tiene un campo de aplicación bastante amplio y que hace falta conocer mejor algunas de sus propiedades ~~mecánicas cuando se encuentra combinado~~ con materiales pétreos y que, dentro del campo de sus aplicaciones en la Industria de la Construcción hace falta mucha más investigación para poder dividir más su empleo y dar recomendaciones específicas sobre su uso.

#### X. RECONOCIMIENTO.

El estudio fue realizado dentro del programa de investigación y aplicación de nuevos materiales en la construcción de vivienda que se viene desarrollando dentro del Instituto de Ingeniería, se agradecen las facilidades prestadas, así como a la Facultad de Ingeniería, por haber dado oportunidad de desarrollar la parte experimental del mismo.

Se reconoce y agradece la participación del Ing. Marco A. Alvarez Solís, así como la del Ing. Carlos Javier Méndez E. cuyas observaciones y valiosos comentarios fueron de gran ayuda para llevar a buen término el estudio.

También se reconoce la participación del Ing. Alberto Fuentes González y del Ing. Enrique Erazo R. A todas estas personas y a las que de alguna forma intervinieron en la realización del estudio, mis más sinceros agradecimientos.

XI. REFERENCIAS.

1. Ludwig, A. C., " Utilization of Sulphur and Sulphur Ores as Construction Materials in Guatemala ", United Nations Report, N. York - 1969.
2. Ortega, A. y Lefebvre, B., " Proyecto Experimental de Manila, Filipinas ", Comunicacion personal, 1978.
3. Mackay G " U.S. Patent No. 1643 251 " , 1900.
4. Dwecker, W.W., " Mining and Metalurgy ", 1938.
5. Dwecker, W.W., and Payne C.R., " Construction with Sulphur Cement ", Metalurgical Engineering Journal, Vol. 47, No.1, 1940.
6. Dale J. M., y Ludwig, A.C., " Fire Retarding Elemental Sulphur", -- Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, 1967.
7. Dale, J.M., y Ludwig, A.C., " Reinforcement of Elemental Sulphur ", Sulphur Institute Journal, 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 H, y Ward, M.A., " Sulphur-Concrete A New - Construction Material ", Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 19, No. 1, ene-feb. 1974.
10. Vroom, A.H., " Sulphur Utilization, A Challenge and an Opportunity" National Research Council of Canada, oct, 1971.

11. Dale, J.M. y Ludwig, A.C., "Mechanical Properties of Sulphur Allotropes", Materials Research and Standards, ago. 1965.
12. Kirt-Othmer, " Enciclopedia de Tecnología Química ", Vol.4, Editorial UTEHA, México, 1962.
13. Kobbé, W.H., " Coloured Sulphur ", U.S., Patent No. 1655 504, ----- ene 10, 1928.
14. U.S., Bureau of Reclamation " Concrete Manual ", Department of the Interior, 7a. Edición, Denver Colorado 1963.
15. Texas Gulf Sulphur Company " Facts About 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 Report IR 75-25, Department - of Energy Mines and Resources, Ottawa, Canadá, jun. 1974.
19. Payne, C.R., Dwocker, W.W., "Chemical Resistance of Sulphur Cements"- Transactions of the American Institute of Chemical Engineers, Vol.36 No. 1, 25 feb. 1940.
20. Dwocker, W.W., y Schofield, H.Z., " Results from the Use of Plauti---cized Sulphur as Jointing Materials for Clay Products " The Bulletin of the American Ceramic Society, Vol. 16, No. 4, nov. 1937.

21. Beaudoin, J.J., y Sereda, P.J., " The Freeze-Thaw Durability of Sulphur Concrete ", Building Research Note, División of Building Research, National Research Council, Ottawa, Canadá.
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. Dale, J.M., " Utilizing Sulphur-Based Spray Coatings " Mining Engineering, oct. 1973.
26. Ludwig, A.C., y Dale, J.M., " Fire Retarding Elemental Sulphur ". -- Journal of Materials, Vol. 2, No. 1, ASTM, mar. 1967.

**Impresiones**  
**arles al Instante. s.a. de c.v.**  
REP. DE COLOMBIA No. 6, 1er. PISO  
(CASI ESQ. CON BRASIL)  
MEXICO 1, D. F.  
526-04-72 529-11-19