



7  
2ey.

# Universidad Nacional Autónoma de México

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
A R A G O N

MANUAL DE PRACTICAS PARA  
LABORATORIO DE CONSTRUCCION III

**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

**JESUS ARNOLDO DUARTE LAMADRID**

México, D. F.

1987



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 está 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.

I N D I C EPAGS.

INTRODUCCION:	1
TEMA I: EFECTOS DEL ATAQUE DE SULFATO AL CONCRETO.	3
1.1 INTRODUCCION: (ATAQUE DE SULFATOS).	3
1.2 PRUEBAS DE RESISTENCIA A LOS SULFATOS.	10
1.3 ATAQUE DEL AGUA DE MAR	12
1.4 PRACTICA DE LABORATORIO	14
1.4.1 OBJETIVOS.	14
1.4.2 MATERIAL Y EQUIPO.	14
1.4.3 DESARROLLO.	14
1.4.4 RESULTADOS.	16
1.4.5 CONCLUSIONES.	17
TEMA II: CONTENIDO DE AIRE EN EL CONCRETO.	18
2.1 INTRODUCCION (INCLUSION DE AIRE).	18
2.2 CONTENIDO DE AIRE.	22
2.3 EFECTOS DE LA INCLUSION DE AIRE.	29
2.4 MEDICION DEL CONTENIDO DE AIRE.	34
2.5 EJEMPLO: UTILIZANDO EL METODO DE PRESION:	37
2.5.1 PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA	37
TEMA III: DOSIFICACION Y FABRICACION DE TUBOS DE CON- CRETO SIMPLE PARA ALCANTARILLADO.	47
3.1 INTRODUCCION (CARACTERISTICAS Y SANIDAD DE LOS MATERIALES).	47
3.1.1 CEMENTO.	47
3.1.2 ARENA.	48
3.1.3 AGUA.	49
3.2 PROPORCIONAMIENTO.	50
3.2.1 DATOS.	50
3.2.2 SOLUCION.	51
3.3 PROCEDIMIENTOS DE FABRICACION DE LA TUBERIA.	53
3.3.1 EL PROCEDIMIENTO MANUAL, SE REALIZA DE LA - SIGUIENTE MANERA:	53

3.3.2	LA CONSTRUCCION DE TUBERIAS CON EQUIPO MECANICO PUEDE HACERSE.	53
3.4	CURADO DE LAS TUBERIAS.	59
3.5	IMPERMEABILIZACION DE TUBERIAS.	61
TEMA IV: ELABORACION DE CONCRETOS LIGEROS.		63
4.1	INTRODUCCION.	63
4.2	CLASIFICACION DE LOS CONCRETOS LIGEROS.	64
4.3	AGREGADOS LIGEROS.	66
4.4	CONCRETO DE AGREGADO LIGERO.	73
4.5	DISEÑO DE MEZCLAS DE AGREGADO LIGERO.	84
4.5.1	EJEMPLO:	87
4.6	CONCRETO AIREADO.	94
4.7	CONCRETO SIN FINOS.	100
4.8	CONCRETO CON ASERRIN.	106
TEMA V: ELABORACION DE CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA.		108
5.1	INTRODUCCION	108
5.2	EJEMPLO:	111
5.3	CONCRETO DE RESISTENCIA MUY ELEVADA	121
TEMA VI: PRUEBAS DESTRUCTIVAS Y NO DESTRUCTIVAS PARA EL CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO ENDURECIDO.		123
6.1	INTRODUCCION.	123
6.2	PRUEBA DE FRICCION.	126
6.3	PRUEBA BRASILEÑA DE TENSION.	126
6.4	RESISTENCIA A LA COMPRESION.	132
6.4.1	PRUEBAS DE CORAZONES.	132
6.4.2	PRUEBA DEL MARTILLO DE REBOTE.	132
6.4.3	PRUEBA DE RESISTENCIA A LA PENETRACION.	136
6.4.4	PRUEBA DE PULSO ULTRASONICO.	136
6.4.5	PRUEBA DE EXTRACCION.	138
6.4.6	PRUEBA A LA COMPRESION SIMPLE.	141
TEMA VII: PRUEBAS A LAS TUBERIAS DE CONCRETO PARA AL-CANTARILLADO.		146
7.1	INTRODUCCION (ELECCION DE LOS ESPECIMENES	

	DE PRUEBA)	146
7.2	PRUEBA DE RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO.	149
7.3	PRUEBA DE ABSORCION.	153
7.4	PRUEBA DE PERMEABILIDAD	154
TEMA VIII: PRUEBAS AL CONCRETO LIGERO.		155
8.1	INTRODUCCION: (OBJETIVOS)	155
8.2	MATERIALES Y EQUIPO.	155
8.3	DESARROLLO.	155
8.3.1	COMPACTACION CON VIBRADOR.	156
8.3.2	COMPACTACION CON VARILLA.	157
8.4	CURADO Y ALMACENAMIENTO DE CILINDROS DE - PRUEBA.	158
8.5	PREPARACION DE LAS BASES DE LOS CILINDROS DE PRUEBA.	158
8.5.1	EQUIPO.	159
8.5.2	PROCEDIMIENTO.	160
8.6	RUPTURA DE CILINDROS.	161
8.6.1	EQUIPO.	161
8.6.2	PROCEDIMIENTO.	162
8.6.3	CALCULO.	162
8.6.4	RESULTADOS.	163
TEMA IX: PRUEBAS AL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.		165
9.1	INTRODUCCION (OBJETIVOS).	165
9.2	DATOS.	165
9.3	MATERIALES Y EQUIPO.	165
9.3.1	ESTIMACION DEL CONTENIDO DE AGREGADO GRUE SO.	166
9.3.2	ESTIMACION DEL CONTENIDO DE AGREGADO FINO.	166
9.3.3	AJUSTES A LAS PRUEBAS DE MEZCLA.	170
9.4	RESULTADOS.	171
9.5	CONCLUSIONES.	171
TEMA X: FERROCEMENTO.		172
10.1	INTRODUCCION.	172
10.2	ANTECEDENTES HISTORICOS.	177
10.3	MATERIALES QUE LO CONSTITUYEN.	185

10.3.1	MALLA DE REFUERZO.	185
10.3.2	MALLA DE ALAMBRE HEXAGONAL.	185
10.3.3	MALLA DE ALAMBRE SOLDADO.	187
10.3.4	MALLA ENTRETEJIDA.	188
10.3.5	MALLA DE METAL DESPLEGADO.	188
10.3.6	MALLA WATSON	189
10.3.7	ACERO DEL AMAZON	191
10.3.8	CEMENTO.	192
10.3.9	CEMENTO PORTLAND DE ESCORIA DE ALTO HORNO.	196
10.3.10	CEMENTO PORTLAND PUZOLANICO.	197
10.3.11	AGREGADOS.	198
10.3.12	CALIDAD DEL AGUA DE LA MEZCLA.	201
10.3.13	ADITIVOS.	202
10.3.14	RECUBRIMIENTO.	205
10.4	PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCION.	206
10.4.1	REFUERZO.	207
10.4.2	PREPARACION DEL MORTERO.	209
10.4.3	APLICACION DEL MORTERO.	210
10.4.3.1	TECNICA EN UNA ETAPA.	211
10.4.3.2	TECNICA EN DOS ETAPAS.	212
10.4.3.3	APLICACION DEL MORTERO POR SECCIONES.	212
10.4.4	ACABADO.	213
10.4.5	CURADO.	214
10.4.5.1	CURADO POR HUMEDAD.	214
10.4.5.2	CURADO CON MEMBRANA IMPERMEABLE.	215
10.4.5.3	CURADO CON VAPOR.	216
10.5	PINTURA Y RECUBRIMIENTO.	218
10.5.1	TIPOS DE RECUBRIMIENTO.	218
10.5.2	METODOS DE APLICACION.	219
10.5.2.1	PRIMERA CAPA DE RECUBRIMIENTO.	220
10.5.2.2	RELLENO Y APLANADO.	221
10.5.2.3	SEGUNDA CAPA DE RECUBRIMIENTO.	221
10.5.2.4	RECUBRIMIENTO FINAL.	221
	VOCABULARIO TECNICO.	222
	BIBLIOGRAFIA.	224

## INTRODUCCION

El Manual de Laboratorio de Construcción III, tiene por objeto, reforzar los conocimientos de la Materia de Construcción III, con la observación del fenómeno físico realizado en el Laboratorio, asimismo servir de guía para el profesor en el mismo.

La Materia de Construcción III, se cursa en el 4o. Semestre de la carrera de Ingeniería Civil, y el Laboratorio se imparte simultáneamente teniendo un carácter optativo, permitiendo reconocer el comportamiento de concretos normales y especiales elaborados por el alumno.

Una de las inquietudes en la elaboración de este Manual, es despertar en el estudiante el interés por entender y analizar cada una de las prácticas así como profundizar el estudio en el concreto, haciendo variar sus propiedades, de este material tan usado en la construcción.

Estos apuntes están compendiados, básicamente del ACI -- Tecnología del concreto (colección completa) asimismo en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) así como extractos de la bibliografía que se concluye al final.

En algunos casos se mencionan material y equipo sofisticado con los cuales se pueden elaborar concretos especiales, mejorando aún más sus propiedades, sin embargo en el desarrollo de las pruebas descritas en este Manual se utilizó el Equipo disponible en el Laboratorio para la elaboración de concretos normales. Por lo anterior el trabajo realizado deberá ser continuamente actualizado, debido a que la investigación del concreto tenderá a mejorar sus propiedades así como su uso en obra.

Para tratar de complementar este Manual y mayor claridad se incluye un Apéndice en donde se definen algunos términos importantes.

Es indudable que este tipo de trabajo incrementa el acervo bibliográfico de la Escuela, sin embargo se enriquece aún más con sugerencias y comentarios de Profesores y Alumnos para la enseñanza-aprendizaje de la Ingeniería Civil.

## TEMA I

### EFFECTOS DEL ATAQUE DE SULFATO AL CONCRETO

#### 1.1 INTRODUCCION. (ATAQUE DE SULFATOS).

Las sales en estado sólido no atacan el concreto pero -- cuando se encuentran en solución pueden reaccionar con la -- pasta de cemento endurecida. Por Ejemplo, algunas arcillas contienen álcalis, magnesio y sulfato de calcio y el agua -- subterránea de ese tipo de arcillas es, en realidad, una solución de sulfato; por consecuencia, puede atacar el cemento puesto que el cemento reacciona con el  $\text{Ca(OH)}_2$  y con los hidratos de aluminato de calcio.

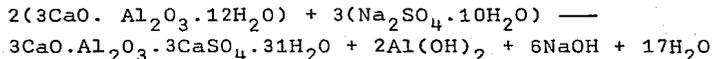
Los productos de la reacción, yeso y sulfoaluminato de -- calcio, tienen un volumen mucho mayor que los compuestos que reemplazan, de modo que su reacción con los sulfatos produce expansión y ruptura del concreto.

La reacción entre el sulfato de sodio y el  $\text{Ca(OH)}_2$  puede expresarse como se indica a continuación:



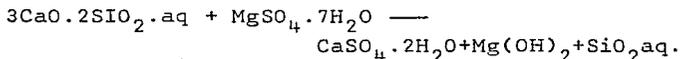
En el agua que fluye, el  $\text{Ca(OH)}_2$  se puede lixiviar completamente, pero, si se acumula el NaOH, se logra el equilibrio y se deposita únicamente parte del  $\text{SO}_2$  como yeso.

La reacción con el hidrato de aluminato de calcio se puede formular de la siguiente manera:



El sulfato de calcio ataca solamente el hidrato de aluminato de calcio y forma sulfoaluminato de calcio ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ).

Por otra parte, el sulfato de magnesio ataca los hidratos de silicato de calcio y  $\text{Ca(OH)}_2$ , lo mismo que el hidrato de aluminato de calcio. El patrón de la reacción es:



Debido a la baja solubilidad del  $\text{Mg(OH)}_2$  la reacción llega a completarse de manera que, en ciertas condiciones, el ataque del sulfato de magnesio es más grave que el de otros sulfatos. Es posible que haya una reacción adicional entre el  $\text{Mg(OH)}_2$  y la sílice del gel, y ésta también puede causar deterioro.

La velocidad de ataque de los sulfatos se incrementa con un aumento de resistencia de la solución, pero con una concentración mayor del 0.5% de  $\text{MgSO}_4$  o el 1% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  la velocidad de aumento de la intensidad del ataque se hace menor. Una solución saturada de  $\text{MgSO}_4$  causa grave deterioro en el concreto, aunque con baja relación agua/cemento esto sucede a los 2 o 3 años. La concentración del sulfato se expresa como el número de partes por peso de  $\text{SO}_3$  por millón (ppm); - 1 000 ppm se considera moderadamente grave y 2 000, sumamente grave, especialmente si el  $\text{MgSO}_4$  es el componente predominante. Los valores paralelos de sulfato soluble en la tierra son del 0.2 y 0.5%.

Además de la concentración del sulfato, la velocidad con que es atacado el concreto depende también de la velocidad con que puede reabastecer el sulfato que se pierde en la reacción con el cemento. Entonces, para calcular el peligro de ataque por los sulfatos, es necesario conocer el movimiento de las aguas subterráneas. Cuando el concreto está sometido por un sólo lado a la presión de aguas que contengan sulfatos, la velocidad de ataque es más alta que ninguna otra. Asimismo, el alternar saturación con secado causa un deterioro rápido. Por otro lado, cuando el concreto está completamente enterrado, sin canal para el paso del agua

subterránea, las condiciones son mucho menos severas.

El ataque de sulfatos contra el concreto tiene una apariencia blanquecina característica. El daño suele iniciarse en bordes y esquinas, y va seguido de agrietamiento y descascamiento progresivo que reduce el concreto a un estado quebradizo y hasta suave.

La vulnerabilidad del concreto al ataque de sulfatos se puede reducir mediante el uso de cementos con bajo contenido de  $C_3A$ . En la práctica, se ha descubierto que un contenido de  $C_3A$  del 7% marca a grandes rasgos la diferencia entre los cementos de buen o mal desempeño en aguas sulfatadas. No obstante, aparentemente existen otros factores que todavía no se conocen y que influyen en la resistencia del cemento al ataque de sulfatos.

También se obtiene mejor resistencia al ataque de sulfatos añadiendo o reemplazando parcialmente el cemento por puzolanas. Estas eliminan el  $Ca(OH)_2$  libre e inactivan las fases que portan aluminio, pero es necesario permitir que pase el tiempo suficiente para que las puzolanas entren en acción antes de exponer el concreto al ataque de sulfatos. Se han descubierto muchas puzolanas eficaces, que hacen que el concreto se vuelva resistente al ataque de sulfatos, especialmente si se usan junto con cemento resistente a los sulfatos. Sin embargo, en el último caso, una cantidad inadecuada de puzolanas puede provocar una interferencia con el aluminio de calcio hidratado, por lo que es posible una reacción con sulfatos intrusivos en una etapa posterior. Por esta razón, el British Code of Practice CP110:1972 y la BS 5328: 1976 prohíben el uso de ceniza volante junto con cemento Portland resistente a los sulfatos cuando es importante la resistencia a los sulfatos.

Las puzolanas también se han utilizado con cemento de fraguado regulado, que por sí solo muestra muy poca resistencia a los sulfatos. Sin embargo, el reemplazo parcial de

ese cemento con puzolanas reduce la resistencia temprana del concreto (20%), de tal manera que es cuestionable el uso - práctico de cemento de fraguado regulado cuando hay riesgo - de ataque de sulfatos.

La resistencia del concreto al ataque de sulfatos depende también de su impermeabilidad. Esto es algo que ya mencionamos antes, pero la importancia de dicho factor no se -- puede soslayar. Por ejemplo, el uso de concreto pobre en el soporte y lecho de las alcantarillas produce partes vulnerables en estas construcciones que, de otra manera, serían durables. Para ser denso, el concreto debe tener una relación agua/cemento baja, es decir, debe ser bastante rico. Incluso un concreto hecho con cemento de alto contenido de alumina no deberá ser de una pobreza menor de 1:8 ó 1:9; de otra manera, se obtiene una estructura porosa y el concreto es -- atacado fácilmente.

La figura 1.1 muestra la influencia de una exposición en el campo durante cinco años en la resistencia a la compresión de las siguientes mezclas:

Mezcla	Contenido de cemento, Kg/m <sup>3</sup>	Relación agua/cemento, promedio.
A	390	0.4
B	307	0.5
C	223	0.75

Se emplearon dos depósitos de prueba; el núm. 1 con alto contenido de sulfato de sodio y el núm. 2 con cantidades tan to de sodio como de magnesio en proporciones variables.

Se puede observar que el concreto con un contenido de ce mento del orden de 390 Kg/m<sup>3</sup> es atacado lentamente, aunque - esté elaborado con cemento Portland normal. Cuando el conte nido de cemento es menor, el ataque es más rápido y la compo

sición del cemento ejerce gran influencia en la durabilidad del concreto.

La tabla 1.1 proporciona los requisitos típicos para concreto expuesto al ataque de sulfatos. Tal vez sea adecuado en este momento preguntar si un contenido suficientemente alto de cemento o una relación agua/cemento bastante baja garantizan la durabilidad del concreto. Es posible que el desacuerdo respecto a cuál de los dos factores se debe utilizar para controlar la durabilidad esté relacionado con los intereses comerciales implicados; por una parte, los fabricantes de cemento y, por otra, los proveedores de concreto de determinada resistencia. Al contenido de cemento no es buena base porque, por ejemplo, con 356 Kg de cemento Portland normal por metro cúbico de concreto se puede obtener concreto cuya resistencia en cilindros esté dentro del rango del  $141 \text{ Kg/cm}^2$  a  $422 \text{ Kg/cm}^2$ , lo que depende de la relación agua/cemento y del revenimiento. Está claro que la durabilidad de estos concretos variará enormemente. Por otro lado, se dice que el contenido de cemento es más fácil de controlar en condiciones prácticas de proporcionamiento que la relación agua/cemento.

El curado mediante vapor a alta presión mejora la resistencia del concreto al ataque de sulfatos. Esto se aplica a concretos hechos tanto con cemento resistente a los sulfatos como con cemento Portland normal, puesto que la mejoría se debe al cambio de  $\text{C}_3\text{AH}_6$  que convierte en una fase menos activa, y también a que la reacción con la sílice elimina el  $\text{Ca(OH)}_2$ . Por otra parte, la adición de cloruro de calcio a la mezcla produce una reducción en la resistencia al ataque de sulfatos, independientemente del tipo de cemento que se emplee.

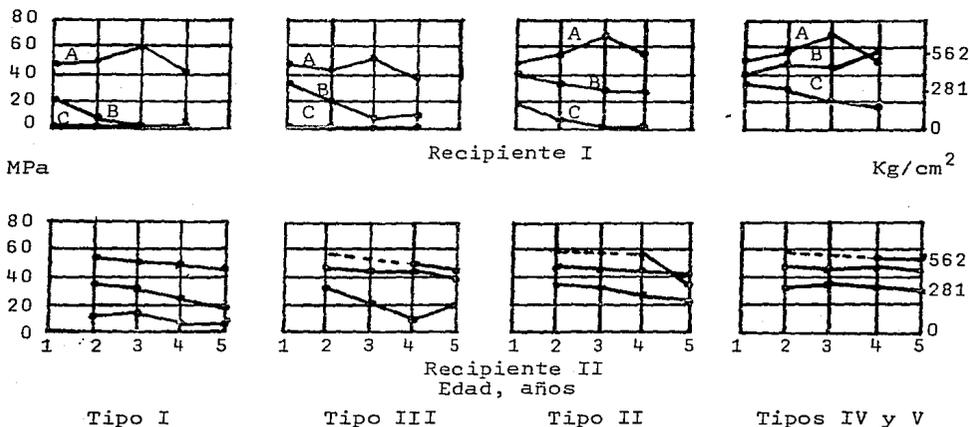


FIG. 1.1 Efectos de la exposición a la intemperie en la resistencia de concretos elaborados con diferentes cementos.

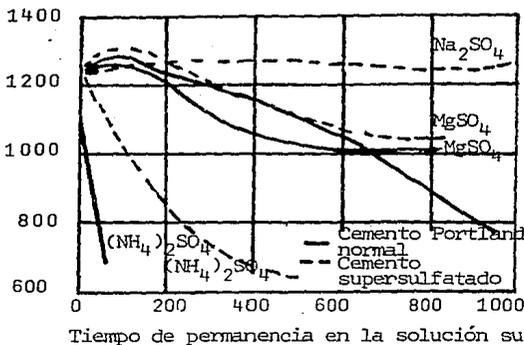


FIG. 1.2 Efecto de la inmersión en una solución sulfatada al 5% sobre el módulo de elasticidad dinámico de morteros de proporción 1:3, elaborados con cementos Portland normal y supersulfatado.

TABLA 1.1 Requisitos de Bulding Research Establislment para concretos expuestos al ataque de sulfatos.

Concentración de sulfatos expresada en SO <sub>3</sub>				Tipo de cemento	Contenido mínimo de cemento en Kg/m <sup>3</sup> para tamaño nominal - máximo de agregado			Relación máxima agua libre/cemento
Clase	En el suelo		En el agua subterránea		40 mm	20 mm	10 mm	
	Total de SO <sub>3</sub> porcentaje	SO <sub>3</sub> en extracto agua:suelo 2:1,g/litro	ppm					
1	menos de 0.2	—	menos de 300	Portland normal o Portland de alto horno	240	280	330	0.55
2	0.2 a 0.5	—	de 300 a 1 200	Portland normal o Portland de alto horno	290	330	380	0.50
				Portland resistente a los sulfatos	240	280	330	0.55
				Supersulfatado	270	310	360	0.50
3	0.5 a 0.10	1.9 a 3.1	de 1 200 a - 2 500	Portland resistente a los sulfatos o supersulfatado	290	330	380	0.50
4	1.0 a 2.0	3.1 a 5.6	de 2 500 a - 5 000	Portland resistente a los sulfatos o supersulfatado	330	370	420	0.45
5	más de 2	más de 5.6	más de 5 000	Igual que para la clase 4, pero añadiendo un revestimiento - protector adecuado de material inerte, como el asfalto o una emulsión bifuminosa reforzada con una membrana de fibra de - vidrio.				

Nota: Estos valores se aplican a concretos en aguas subterráneas con un pH entre 6 y 9, y que no contengan - contaminantes, como sales de amonio.

## 1.2 PRUEBAS DE RESISTENCIA A LOS SULFATOS.

La resistencia del concreto al ataque de sulfatos se puede comprobar en el laboratorio almacenando especímenes sumergidos en soluciones de sulfato de sodio o de magnesio, o en una mezcla de ambos. El mojado y secado alternados acelera el daño causado por la cristalización de las sales dentro de los poros del concreto. El efecto de la exposición se puede calcular por la pérdida de resistencia de los especímenes, por los cambios en el módulo dinámico de elasticidad, por expansión, por su pérdida de peso e incluso a simple vista.

La figura 1.2 muestra los cambios del módulo dinámico de un mortero de 1:3 sumergido (después de 78 días de curado húmedo) en una solución al 5% de diferentes sulfatos. La figura 1.3 indica los resultados de las pruebas de resistencia practicadas a barras de mortero de 1:3, subergidas en una solución molar al 0.15 de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Probablemente el aumento inicial de resistencia se deba a que los cristales llenaron los huecos, lo cual aumenta la densidad del concreto; pero, conforme se impidió la tendencia de los cristales a crecer y expandirse, los esfuerzos internos resultantes destruyeron el concreto.

Las pruebas efectuadas con especímenes de mortero 1:6 cemento/arena de Ottawa, almacenados en una solución similar, han demostrado que una expansión del 0.10% aproximadamente, después de cuatro semanas, proporciona una somera línea divisoria entre el buen y mal funcionamiento en el campo. No obstante, la prueba no es suficientemente exacta para predecir el comportamiento en casos límite, y no existe una prueba satisfactoria. Una falla muy generalizada en los laboratorios es que las pruebas en morteros son lentas y más sensibles a la resistencia química del cemento que a la estructura física de la pasta, pues la influencia de la calidad general del concreto no se refleja en la resistencia de un pequeño espécimen de mortero sujeto a condiciones de prueba severas.

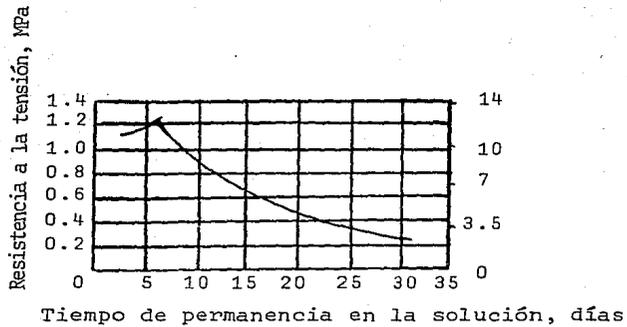


FIG. 1.3 Resistencia de briquetas de mortero de proporción - 1:3 almacenadas en una solución molar de 0.15 de de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

### 1.3 ATAQUE DEL AGUA DE MAR.

El agua de mar contiene sulfatos y ataca el concreto de manera similar a la descrita en este mismo tema, en Ataque de Sulfatos. Además de la acción química, la cristalización de las sales dentro de los poros del concreto puede producir rupturas debidas a la presión ejercida por los cristales de sal. Puesto que la cristalización ocurre en el punto de evaporación del agua, este tipo de ataque se produce en el concreto que se encuentra sobre el nivel del agua. Sin embargo debido a que la sal en solución sube por capilaridad, el ataque se presenta únicamente cuando el agua puede penetrar en el concreto, de tal suerte que la permeabilidad de este material es, una vez más, un factor de gran importancia.

El concreto que se encuentra entre las marcas de las mareas y está sometido a humedecimiento y secado alternados sufre un grave ataque, mientras que el concreto que queda permanente inmerso en el agua sufre un ataque menor. El verdadero progreso del daño causado por el agua de mar varía y se hace más lento cuando los poros del concreto quedan bloqueados por el depósito de hidróxido de magnesio. En climas tropicales el ataque es más rápido.

Hay ciertos casos en los que la acción del agua de mar - sobre el concreto va acompañada de la acción destructiva del hielo, del impacto de las olas y de la abrasión, que tienden todos a gravar el daño. En las construcciones mar adentro - estas consideraciones son muy importantes.

Aunque la acción de los sulfatos contenidos en el agua - salada es similar a la de las aguas subterráneas sulfatadas, en el primero de los casos el ataque no va acompañado de expansión del concreto, como se observa en las pruebas de inmersión en sulfatos que se llevan a cabo en el laboratorio. Esta característica del agua de mar se debe primordialmente a la presencia en ella de grandes cantidades de cloruros que inhiben la expansión: los sulfoaluminatos de calcio y el ye-

so son más solubles en solución clorurada que en agua y, por lo tanto, son lixiviados por el agua de mar, mientras que en el laboratorio permanecen en su sitio y, en consecuencia, -- causan expansión. Este comportamiento nos ofrece otro ejemplo de la dificultad que existe para relacionar los resultados de las pruebas de laboratorio con el desempeño en condiciones reales de exposición.

En el caso de concreto reforzado la absorción de las sales establece áreas anódicas y catódicas; la acción electro-lítica resultante conduce a una acumulación de producción de la corrosión sobre el acero, con la consecuente ruptura del concreto que lo rodea, de tal manera que los efectos del -- agua de mar son mucho peores en el concreto reforzado que en el simple. Por lo tanto, es esencial cubrir lo suficiente -- el acero de refuerzo, 50 mm, o de preferencia 75 mm, y utilizar concreto denso e impermeable. Se recomienda un contenido de cemento de 350 Kg/m<sup>3</sup> sobre la línea de bajamar, y de 300 Kg/m<sup>3</sup> debajo de ésta, o bien una relación agua/cemento de -- 0.40 a 0.45. Se piensa que la relación agua/cemento es un -- factor vital, y que el contenido de cemento es importante só lo porque cuando es alto permite la total compactación de -- las mezclas con baja relación agua/cemento. Un concreto -- bien compactado y una buena mano de obra son de vital importancia, especialmente en la construcción de juntas. El tipo de cemento que se emplee ocupa el segundo lugar; los cementos de alta alúmina, los resistentes a los sulfatos, los Por tland de alto horno y los Portland con puzolana dan buenos -- resultados.

## 1.4 PRACTICA DE LABORATORIO.

### 1.4.1 OBJETIVOS:

Se observará por medio de la prueba de intemperismo acelerado el deterioro producido por el ataque de sulfatos al concreto elaborado con cemento Portland Normal y al concreto elaborado con cemento Portland Tipo V.

### 1.4.2 MATERIAL Y EQUIPO:

- Báscula
- Dos Charolas
- Espátulas
- Probeta
- Varilla
- Seis Cubos
- 750 gr Cemento Portland Normal
- 750 gr Cemento Portland Tipo V
- 1 500 gr Arena
- 350 gr de Solución de Sulfato de Sodio.

### 1.4.3.. DESARROLLO:

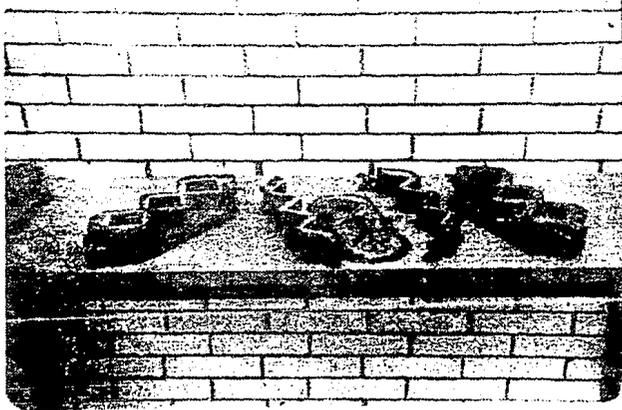
Se elaboran las dos mezclas de concreto con la siguiente dosificación: (Método A.C.I.)

#### Mezcla Uno.

- 750 gr Cemento Portland Normal
- 750 gr Arena
- 450 ml Agua

#### Mezcla Dos.

- 750 gr Cemento Portland Tipo V



Moldes Especiales para elaborar los cubos de concreto que se utilizarán en la Prueba de Intemperismo Acelerado.

- 750 gr Arena
- 450 ml Agua.

1. Se llenan tres cubos con la mezcla uno y tres cubos con la mezcla dos de la siguiente manera:
  - a) Cada cubo se llenará en tres capas, operándose con la primera de ellas ( $1/3$ , de cubo del molde).
  - b) Cada capa se golpeará con la varilla 25 veces consecutivas en toda la superficie del concreto, cuidando -- que al golpear la segunda y tercera capa no penetre -- la varilla más de 5 mm en la anterior compactada.
  - c) Después de compactada la tercera capa, se adiciona -- una pequeña cantidad de concreto con la cuchara y se enrasa al borde del molde.
2. Los seis cubos se colocan dentro de una solución de -- sulfato de sodio (350 gr) diluido en un litro de agua.
3. Los seis cubos se colocarán en el horno durante 18 ho -- ras.
4. Los seis cubos se colocarán de nuevo en la solución -- de sulfato de sodio durante seis horas.
5. Los dos pasos anteriores, tercero y cuarto, se segui -- ran durante cinco ciclos.

#### 1.4.4 RESULTADOS

En la práctica se observó que los cubos elaborados con -- Cemento Portland Normal se redujeron a un estado frágil y -- al contrario los cubos de concreto con Cemento Portland Ti -- po V resistieron más el ataque de los sulfatos.

#### 1.4.5 CONCLUSIONES:

El Cemento Portland Tipo V es el indicado para usarlo en lugares donde el concreto se encuentre expuesto al ataque de sulfatos ya que presenta una mayor resistencia.

La Resistencia del concreto al ataque de los sulfatos se rá mayor si se evita que este entre en contacto con el sulfa to a muy temprana edad.

## TEMA II

### CONTENIDO DE AIRE EN EL CONCRETO

#### 2.1 INTRODUCCION. (INCLUSION DE AIRE)

La inclusión de aire se define como el aire que se incorpora intencionalmente en el concreto mediante un agente adecuado. Es necesario distinguir este aire de aquél que queda atrapado en el concreto accidentalmente; la diferencia entre ellos es la magnitud de las burbujas que los componen.

Las burbujas de aire incluido son del orden de 0.05 mm. mientras que las de aire atrapado suelen ser mucho mayores, algunas de ellas tan grandes como las llamadas marcas de virola que se forman en la superficie de los elementos de concreto.

El aire incluido produce cavidades discretas en la pasta de cemento, de tal suerte que no se forman canales por los que pueda circular el agua y no aumenta la permeabilidad del concreto. Los huecos nunca se llenan con los productos de la hidratación del cemento, ya que el gel se puede formar solamente con agua.

El incremento en la resistencia a la congelación del concreto con aire incluido se descubrió casualmente al triturar cemento con sebo de res, el cual se había añadido para ayudar en la molienda, y se observó que el concreto era más durable que aquél al que no se le había añadido dicho auxiliar. Los tipos principales de agentes inclusores de aire son:

a) Grasas y aceites minerales y animales y sus ácidos -- grasos (el sebo de res es un ejemplo de este grupo).

b) Resinas naturales de madera, que reaccionan con la cal para formar resinato soluble. La resina puede estar previamente neutralizada con NaOH para obtener, de una resina -

ácida, un jabón soluble en agua (por ejemplo resina Vinsol).

c) Agentes humectantes, como son las sales de álcalis de compuestos orgánicos sulfatados o sulfonatados (por ejemplo Darex y Cormix).

En el mercado hay muchas marcas registradas de agentes - inclusores de aire, pero es necesario verificar el desempeño de aquellos que no conozcamos por medio de mezclas de prueba. La norma ASTM C 260-77 y las BS 5075: parte 2; 1981 fijan -- los requisitos de desempeño para los aditivos inclusores de aire. Los principales requisitos para un agente de este tipo son que produzca rápidamente un sistema de espuma fina y estable, cuyas burbujas individuales resistan la coalescencia. La espuma no deberá ejercer efectos perjudiciales sobre el cemento.

Los agentes inclusores de aire se pueden aplicar como -- aditivos, o sea como un material que se incorpora a la mez-- cla cuando se están introduciendo los componentes a la mez-- cladora, o bien como un elemento que se adiciona al cemento en proporciones fijas. Este último método permite menos flexibilidad para alternar el contenido de aire en las diferentes mezclas, especialmente cuando se tiene que usar amplia - variedad de relaciones agragado/cemento, o agragados de diversos tipos. Por otra parte, el uso de aditivos complica - un poco la operación de proporcionamiento. El agente inclusor representa entre el 0.005 y el 0.50% del peso del cemento, pero para facilitar la operación se suele hacer una solución del agente en agua para que las cantidades reales que se manejen sean mayores. Sin embargo, es necesario tener -- cuidado durante la operación de proporcionamiento, puesto -- que no se puede confiar en las ventajas del concreto con - - aire incluido a menos que la cantidad de aire esté dentro de los límites especificados.

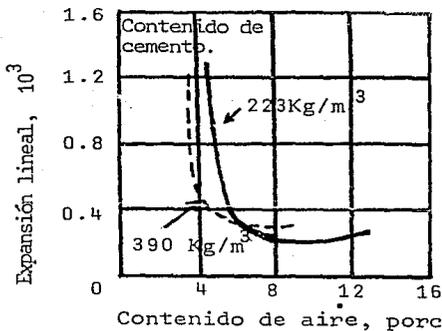


FIG. 2.1 Influencia del contenido de aire del concreto en la expansión, después de 300 ciclos de congelación y deshielo.

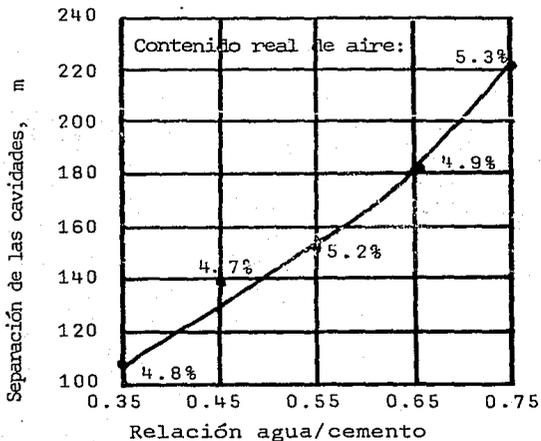


FIG. 2.2 Influencia de la relación agua/cemento en la separación de las cavidades en el concreto con un contenido promedio de aire del 5%.

## 2.2 CONTENIDO DE AIRE.

Para cada mezcla existe un volumen mínimo de cavidades - requerido como protección contra la acción del hielo (figura 2.1) Klieger descubrió que ese volumen corresponde al 20% -- del volumen del mortero y que, por supuesto, es esencial que el aire se distribuya en toda la pasta de cemento. El verdadero factor de control es el espaciamiento de las burbujas, o sea el espesor de la pasta de cemento que se encuentra entre las cavidades de aire adyacentes. Se cree que, para que haya una completa protección contra la congelación, debe haber un espacio entre las cavidades del orden de 0.25mm. (figura 2.2).

Puesto que el volumen total de cavidades de un determinado volumen de concreto afecta la resistencia éste, es obvio que las burbujas deben ser lo más pequeñas posible. Su tamaño depende en gran parte del proceso de formación de espuma que se haya utilizado. De hecho, no todas las cavidades son del mismo tamaño y es conveniente expresar sus dimensiones - en términos de superficie específica (milímetros cuadrados - por milímetros cúbicos).

No debemos olvidar que cualquier concreto contiene aire atrapado, ya sea que se le haya incluido aire o no y, puesto que no es posible distinguir entre los dos tipos de burbujas, la superficie específica representa un valor promedio para - todas las cavidades que contenga una pasta determinada. Para un concreto satisfactorio con aire incluido la superficie específica de cavidades de aire está aproximadamente entre - 16 y 24 mm, pero a veces llega hasta 3.2 mm. Comparativamente, la superficie de aire accidental es de menos de 1.2 mm. Las dimensiones de las burbujas incluidas se encuentran en - un rango que va de 0.05 a 1.25 mm.

Para determinado contenido de aire en el concreto, el espaciamiento de las burbujas dependerá de la relación agua/ cemento de la mezcla, ejemplo de esto es la figura 2.2. La ta

bla 2.1, basada en los resultados de Powers, incluye los valores típicos de la cantidad de aire que debe haber para obtener un espaciamiento entre burbujas de 0.25 mm en diferentes mezclas. A pesar de que el aire se encuentra solamente en la pasta de cemento, es frecuente expresar el contenido de aire como un porcentaje del volumen del concreto, y la de terminación física del contenido de aire de ese valor y no el de la pasta de cemento sola. Normalmente se permite una desviación del  $\pm 1.5\%$  para las determinaciones individuales del contenido de aire y del  $\pm 1.0\%$  para promedios de cuatro lecturas consecutivas. Estos límites se especifican, por ejemplo en la BS 5328; 1976.

La tabla 2.1 indica que, para un valor dado de una superficie específica de cavidades, las mezclas ricas requieren mayor volumen de aire incluido que las pobres. Sin embargo, mientras más rica es la mezcla, mayor es la superficie específica para determinado contenido de aire. Por ejemplo, las verdaderas mezclas con un tamaño máximo de agregados de 19.05 mm (algunos de los cuales aparecen en la figura 2.1) han producido los siguientes valores superficie específica de cavidades: (figura 2.2).

El volumen de aire incluido en cualquier concreto es independiente del de aire atrapado y depende primordialmente de la cantidad en que se aplique el agente inclusor del aire que se haya usado. Mientras mayor sea la cantidad de agente más aire se incluirá, pero con cualquier agente hay una cantidad máxima por encima de la cual no habrá aumento en el volumen de las cavidades.

Hay otros factores que afectan la verdadera cantidad de aire incluido, cuando se añade determinada cantidad de agente inclusor de aire. Una mezcla más trabajable mantiene más aire que la seca. Un aumento en la finura del cemento disminuye la eficacia del aire incluido; por ejemplo, cuando se aumenta la superficie de  $300 \text{ m}^2/\text{Kg}$  a  $500 \text{ m}^2/\text{kg}$ , se necesita duplicar la cantidad del agente inclusor de aire para lograr

TABLA 2.1 Contenido de aire necesario para separar cavidades 0.25 mm.

Contenido de cemento apro- ximado del - concreto Kg/m <sup>3</sup>	Relación agua/cemento	Aire necesario como porcentaje del volúmen de concreto para una superficie específica de cavidades, mm <sup>-1</sup> de				
		14	18	20	24	31
445	0.35	8.5	6.4	5.0	3.4	1.8
390		7.5	5.6	4.4	3.0	1.6
330		6.4	4.8	3.8	2.5	1.3
445	0.49	10.2	7.6	6.0	4.0	2.1
390		8.9	6.7	5.3	3.5	1.9
330		7.6	5.7	4.5	3.0	1.6
280		6.4	4.8	3.8	2.5	1.3
445	0.66	12.4	9.4	7.4	5.0	2.6
390		10.9	8.2	6.4	4.3	2.3
330		9.3	7.0	5.5	3.7	1.9
280		7.8	5.8	4.6	3.1	1.6
225		6.2	4.7	3.7	2.5	1.3

TABLA 2.2 Contenido de aire recomendado para concretos que contengan agregados de diferentes tamaños máximos.

Tamaño máximo de agregado		Contenido total de aire recomendado para el concreto según el nivel de exposición (porcentaje):			
		Norma ACI 211.1-77 <sup>7.12</sup>			Norma Británica CP 110
mm	pulgadas (aprox.)	Ligera	Moderada	Grave	Sujeta a sales deshelantes
10	3/8	4.5	6.0	7.5	7.0
12.5	1/2	4.0	5.5	7.0	-
14	1/2	-	-	-	6.0
20	3/4	3.5	5.0	6.0	5.0
25	1	3.0	4.5	6.0	-
40	1½	2.5	4.5	5.5	4.0
50	2	2.0	4.0	5.0	-
70	3	1.5	3.5	4.5	-
150	6	1.0	3.0	4.0	-
Contenido de cemento		Contenido de aire óptimo, porcentaje		Superficie específica de las cavidades,	
Kg/m <sup>3</sup>				mm <sup>-1</sup>	
223		6.5		13	
307		6.0		17	
391		6.0		23	

los mismos resultados. Un mayor contenido de álcalis en el cemento, especialmente si es de más del 0.8%, hacer crecer la cantidad de aire incluido para una cantidad dada de aditivo. Con la ceniza volante, la cantidad requerida de agente inclusor de aire aumenta al incrementarse el contenido de -- carbono de ésta; un aumento del 1 al 12% puede triplicar la cantidad del agente.

Cuando se usan aditivos reductores de agua por lo general se necesita una cantidad menor del agente inclusor de -- aire, a fin de obtener determinada cantidad de aire, aunque el aditivo reductor no tenga propiedades inclusoras de aire por sí mismo. Lo que sucede es que se alteran las propiedades físicas o químicas del entorno y esto permite que funcionen con más eficacia los aditivos inclusores de aire. No -- obstante, con los superfluidificantes la situación es menos clara, aunque es frecuente que el factor de espaciamiento -- aumente; o sea, que el tamaño de las burbujas sea mayor. A pesar de ello, la resistencia a la congelación y al deshielo no disminuye necesariamente cuando se usan superfluidificantes junto con agentes inclusores de aire. Cabe señalar que algunas combinaciones de aditivos pueden ser incompatibles, de tal manera que siempre se deben efectuar pruebas con los materiales que se vayan a utilizar en el campo.

La granulometría de los agregados afecta también el volumen de aire incluido por determinada cantidad de aditivo. -- Cuando hay exceso de partículas muy finas, el volumen disminuye, pero el material que se localiza dentro del rango de -- 300 a 600 m (tamiz No. 50 a 30 ASTM) aumenta la cantidad de aire incluido, y lo mismo sucede cuando se usan agregados angulares en lugar de redondos. Por lo general, los componentes sólidos del concreto parecen afectar la cantidad de aire incluido, como resultado de la competencia por el agua; cada burbuja de aire necesita una película límite; mientras más -- grande sea la superficie del sólido que se deba mojar, menos líquido habrá disponible para la separación de las cavidades.

Cuando la mezcla se hace con agua dura hay mayor necesidad de agente inductor de aire. Puesto que el agua que se ha utilizado para lavar la olla del camión mezclador es dura, no se debe utilizar para el mezclado del concreto con aire incluido. Especialmente cuando la mezcladora que se ha lavado fue empleada para fabricar concreto con aire incluido.

La operación misma de mezclado también afecta el contenido resultante de aire y la secuencia de carga puede ejercer un efecto significativo. Si el tiempo que se emplea para -- mezclar es demasiado corto, el agente inductor de aire no se dispersa lo suficiente, pero, si es demasiado largo, el aire es expulsado gradualmente, de tal manera que hay un valor óptimo de la duración del mezclado. En la práctica, se fija el tiempo de mezclado a partir de otras consideraciones, y suele ser más corto que el mínimo necesario para que el agente se distribuya totalmente; la cantidad de agente inductor de aire se debe ajustar de acuerdo con este criterio. Si se hace girar la mezcladora con mucha rapidez, se acrecienta la cantidad de aire. Aparentemente la agitación a 300 revoluciones conduce a que haya sólo una pequeña pérdida de aire -- (véase la figura 2.3) pero después de dos horas puede haber pérdida del 20% del contenido original. Las temperaturas -- más altas conducen a una pérdida mayor de aire, o sea que -- muy poco aire seguirá incluido (aunque este efecto se verá -- ligeramente desplazado debido al mayor volumen ocupado por -- un peso determinado de aire a una temperatura más alta). Un aumento de temperatura de 10 a 32°C reduciría a la mitad la cantidad neta de aire verdaderamente incluido. El curado a base de humedad del concreto con aire incluido producirá un agrietamiento incipiente, debido a la expansión del aire.

El transporte del concreto reduce su contenido de aire; -- en una serie de obras en Suecia se descubrió que la pérdida típica era del orden de 0.7 puntos porcentuales. El vibrado del concreto extrae parte del aire incluido, aunque son principalmente las burbujas más grandes que son las menos importantes. Sin embargo, si el vibrado se prolonga, habrá una --

considerable pérdida de aire y es posible que sólo quede la mitad de la cantidad original y, después de 9 minutos, sólo el 20%. Por esta razón, se debe determinar el contenido de aire en el concreto ya colocado.

Si la cantidad de aire incluido es adecuada o no se puede determinar por medio de un factor de espaciamiento, prescrito por la norma ASTM C 457-71. El factor de espaciamiento es un índice útil para saber la distancia máxima desde cualquier punto de pasta de cemento hasta la periferia de la burbuja de aire más cercana. El cálculo de dicho factor se basa en la suposición de que las cavidades de aire son esferas igual tamaño distribuidas en una rejilla cúbica simple. El cálculo está incluido en la norma ASTM C 457-71 y requiere del conocimiento de los siguientes factores; aire del concreto, determinado por un microscopio lineal transversal, el número promedio de cortes de cavidades de aire por centímetro o el promedio de la intercepción de la cuerda de las cavidades y el contenido de pasta de cemento por volumen. El factor se expresa en centímetros; generalmente, el valor máximo que se requiere para lograr una protección adecuada contra la congelación es un valor neto no mayor de 0.2 mm.

La principal dificultad ocasionada por el uso de aditivos inclusores de aire es que el contenido de aire del concreto no se puede controlar directamente; se conoce la cantidad de aditivo pero, como dijimos antes, el verdadero contenido de aire en el concreto endurecido se ve afectado por muchos factores. El problema se puede solucionar si, en lugar de burbujas de aire, se utilizan partículas de espuma rígida del tamaño adecuado. Esas "píldoras de aire" (según el modo de las microcápsulas médicas) son de reciente fabricación. Tienen un diámetro de 10 a 60  $\mu$ m, el cual es un rango más estrecho que el de las burbujas de aire incluido. Por lo tanto, se puede utilizar un volumen menor de píldoras de aire para obtener la misma protección contra la congelación y el deshielo, y la pérdida de resistencia del concreto es menor. El uso de aproximadamente el 2.8% del volumen de la pasta de

cemento endurecida proporciona el factor de espaciamento de 0.07 mm, que está muy por debajo del valor de 25 mm, que es el que se recomienda normalmente en el caso de aire incluido.

El peso específico de las píldoras de aire es de 45 - - Kg/m<sup>3</sup> y mejoran la trabajabilidad del concreto tanto como lo hace el aire incluido, aunque su volúmen total en la mezcla es menor; sin embargo, todas ellas son pequeñas. Cuando se usan tiempos normales de mezclado, las píldoras no se desintegran y no interactúan con otros aditivos. Las píldoras se añaden premezcladas con agua-el producto tiene una consistencia parecida a la leche búlgara-. En caso de que sea necesario determinar el contenido de píldoras en el concreto fresco, esto se puede hacer fácilmente lavando las píldoras y midiendo el volumen de la "espuma". La principal desventaja de las píldoras es su alto costo.

### 2.3 EFECTOS DE LA INCLUSION DE AIRE.

Como mencionamos anteriormente, el propósito original de la inclusión de aire era fabricar concreto resistente a la congelación. En las etapas iniciales de congelación las cavidades alivian la presión hidráulica que se desarrolló en los canales de la pasta y, conforme va progresando la congelación, impiden o limitan el crecimiento de cuerpos microscópicos de hielo en la pasta de cemento. Cada cavidad protege sólo una delgada "cáscara" que la rodea y, si el espaciamiento entre las cavidades es demasiado grande, habrá cierta expansión de la pasta. Sin embargo, cuando los cascarrones protectores se traslapan, no hay parte de la pasta que sea vulnerable a la congelación y, de hecho, debido al acomodamiento de agua en las cavidades una pasta de cemento en proceso de congelación se contrae a medida que baja la temperatura - como pasaría con cualquier cuerpo sólido al enfriarse. Durante el deshielo, el agua regresa de las cavidades a la pasta de cemento, de tal manera que la protección del aire incluido continúa permanentemente durante congelaciones y deshielos repetidos. El deshielo rápido seguido de congelación no es perjudicial, ya que el agua se encuentra dentro de las cavidades; por otra parte, el deshielo lento seguido de congelación veloz no permite suficiente movimiento del agua. - La inclusión de aire aumenta también la resistencia del concreto contra la acción destructiva de los agentes deshelantes.

Hay algunos otros efectos producidos por el aire incluido en el concreto, algunos de ellos son beneficiosos y otros no. Uno de los más importantes es la influencia de las burbujas de aire en la resistencia del concreto a todas las edades. Hay que recordar que la resistencia del concreto es -- una función directa de su relación de densidad y las cavidades originadas por el aire incluido afectarán la resistencia del concreto en la misma medida que lo harían si provinieran de otra fuente. La figura 2.4 demuestra que cuando se añade aire a una mezcla sin que haya ningún otro cambio en sus --

proporciones, la disminución de la resistencia del concreto es proporcional al volumen de aire que esté presente. El -- rango considerado es hasta del 8% de aire, y por eso es que la curva de la relación cavidades-resistencia no es aparente.

La curva punteada de la figura 2.4 permite observar fá-- cilmente que el origen del aire no es importante; en dicha - figura también se muestra la relación entre las cavidades y la resistencia, para el caso en que las burbujas se deban a una compactación pobre y no a la inclusión de aire. Los ran-- gos de las pruebas incluyeron mezclas con relaciones agua/ce mento entre 0.45 y 0.72, lo cual demuestra que la pérdida de resistencia, expresada como una fracción de la resistencia -- del concreto libre de aire, es independiente de las propor-- ciones de la mezcla. El promedio de pérdida de resistencia a la compresión es del 5.5% por cada porcentaje del aire pre-- sente. El efecto ejercido sobre el módulo de ruptura es mu-- cho menor.

Cabe señalar que la resistencia resulta afectada por el volumen total de todas las cavidades presentes en el concre-- to; aire atrapado, aire incluido, poros capilares y poros de gel. Cuando una mezcla contiene aire incluido, el volumen - bruto de la pasta de cemento está constituido por el aire in-- cluido, el volumen de los poros capilares es inferior debido a que parte del volumen bruto de la pasta de cemento está -- constituido por el aire incluido. Este no es un valor insig-- nificante, puesto que una proporción significativa de volu-- men bruto de la pasta la forma el aire incluido. Por ejem-- plo, se observó que en una mezcla de 1:3,4:4.2 con relación agua/cemento de 0.80, los poros capilares a la edad de 7 - - días ocupaban el 13.1% del volumen del concreto. Con aire - incluido en una mezcla de la misma trabajabilidad (1:3.0:4.2 con una relación agua/cemento de 0.68), los poros capilares ocuparon el 10.7%, pero el volumen de aire (incluido y atra-- pado) fue del 6.8% (comparando con el 2.3% de la mezcla ante-- rior).

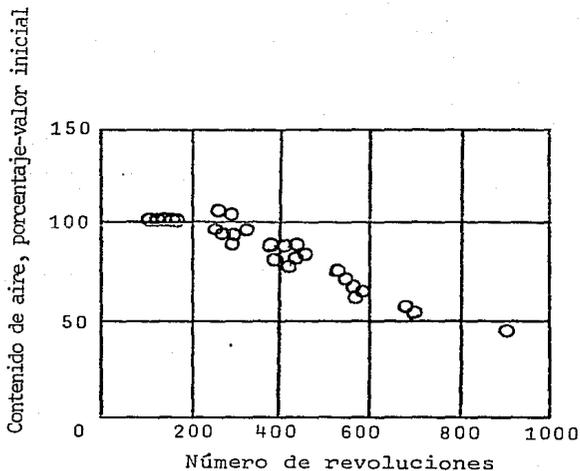


FIG. 2.3 Relación entre el contenido de aire y el número de revoluciones de la mezcladora. Lotes de 6 m<sup>3</sup> mezclados a 18 rpm y agitados a 4 rpm.

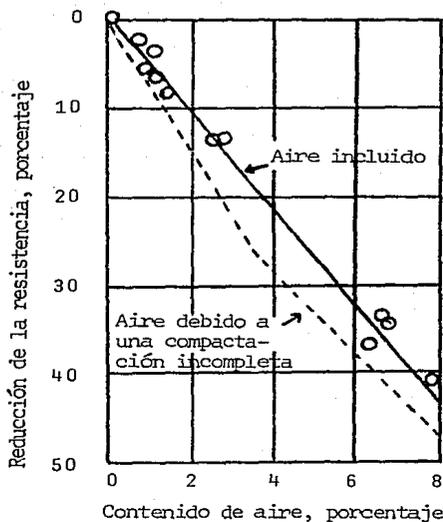


FIG. 2.4 Efecto del aire incluido y accidental en la resistencia -- del concreto.

Esta es una de las razones por las que el aire incluido no causa una pérdida de resistencia tan grande como era de esperarse. Pero una razón de más peso es que el aire incluido tiene efectos sumamente beneficiosos sobre la trabajabilidad del concreto. Por lo tanto, para poder mantener una trabajabilidad constante, la adición de aire puede ir acompañada de una reducción de la relación agua/cemento, lo cual no ocurriría con una mezcla similar a la que no se le haya incluido aire. Para mezclas pobres, con una relación agregado/cemento de, por ejemplo, 8 o más de especialmente cuando se utilizan agregados angulares, la mayoría de la trabajabilidad debida a la inclusión de aire es tal, que la posible disminución de la relación agua/cemento compensa completamente la pérdida de resistencia causada por la presencia de cavidades. Cuando se trata de concreto masivo, en el que es más importante el calor de hidratación del cemento que la resistencia, la inclusión de aire permite usar mezclas con bajo contenido de cemento y, por lo tanto, con poco incremento de temperatura. En las mezclas ricas, el efecto del aire incluido sobre la trabajabilidad es menor, de manera que se puede disminuir sólo un poco la relación agua/cemento y hay una pérdida neta de resistencia. En términos generales, la inclusión del 5% de aire aumenta el factor de compactación entre 0.03 y 0.07, y el revenimiento de 15 a 50 mm (figura 2.5), pero los valores reales varían según las propiedades de la mezcla. El aire incluido es también útil para aumentar la trabajabilidad de mezclas burdas, hechas con agregados de peso ligero.

Posiblemente la razón para que el aire incluido mejore la trabajabilidad es que las burbujas de aire, al mantenerse esféricas por la tensión superficial, actúan como un agregado fino de muy poca fricción en su superficie y mucha elasticidad. En realidad, al incluir aire en una mezcla se logra que éste se comporte como si tuviera demasiada arena y, por esta razón, al incluir aire se debe reducir el contenido de arena de la mezcla. Este último cambio permite una nueva reducción del agua de la mezcla, o sea que es posible lograr -

otra compensación de la pérdida de resistencia causada por las cavidades.

Es interesante observar que el aire incluido afecta la consistencia o "movilidad" de la mezcla de una manera cualitativa; se puede decir que ésta es más plástica, de manera que con la misma trabajabilidad, medida por ejemplo mediante el factor de compactación, la mezcla que contiene aire es -- más fácil de colar y compactar que la que no lo tiene.

La presencia de aire incluido es también útil porque reduce el sangrado; parece ser que las burbujas de aire mantienen las partículas sólidas en suspensión, de tal modo que se reduce la sedimentación y el agua es expulsada. Por esa razón también se reducen la permeabilidad y la formación de nata, lo cual da como resultado una mayor resistencia a la congelación por parte de la capa superior de una losa o colado.

Se dice a veces que el aire incluido reduce la segregación. Esto es cierto en lo que se refiere a la segregación que se produce durante el manejo y transporte, ya que la mezcla es más cohesiva, pero todavía es posible que haya segregación causada por el vibrado excesivo, especialmente porque en dichas circunstancias las burbujas de aire son expulsadas con gran rapidez.

La adición de aire reduce la densidad del concreto y hace que rindan más el agregado y el cemento. Esto ofrece una ventaja económica, la cual se compensa con el costo del agente inclusor de aire (aunque éste es barato) y probablemente con el aumento en el costo de la supervisión.

La inclusión de aire se ha aplicado con éxito en cementos resistentes al sulfato y en otros cementos Portland, así como cuando se añade  $\text{CaCl}_2$  como acelerante.

## 2.4 MEDICION DE CONTENIDO DE AIRE.

Existen tres métodos para medir el contenido total de -- aire en el concreto fresco. Puesto que en estas pruebas no se puede distinguir el aire incluido de las burbujas grandes del aire accidental, es importante que el concreto sometido a pruebas esté bien compactado.

El Método Gravimétrico es el más antiguo. Se basa sim-- plemente en comparar la densidad de un concreto compactado - al que se le ha incluido aire, "Pa", con la de un concreto - libre de aire y con las mismas proporciones de mezcla, "p". Entonces el contenido de aire, expresado como parte del volú-- men total del concreto, es:

$$I = \frac{Pa}{p}$$

Este método está considerado en la norma ASTM C 138-77 y se puede utilizar cuando el peso específico de los agregados y las proporciones de mezcla sean constantes. Es fre-- cuente encontrar un error del 1% en el contenido de aire cal-- culado. Este error podría esperarse a partir de la simple - experiencia de determinar la densidad de especímenes de prue-- ba de concreto sin aire incluido nominalmente similares.

En el Método Volumétrico se determina la diferencia de - volúmenes de una muestra de concreto compactado, antes y des-- pués de que el aire ha sido expulsado. El aire se extrae -- por medio de agitación, rodado y movimiento, y la operación se efectúa en un picnómetro u otro recipiente adecuado. La norma ASTM C 173-78 proporciona los detalles de la prueba. La principal dificultad radica en que el peso del agua que - toma el lugar del aire es pequeño, si se compara con el peso total del concreto. La presencia del aire en las partículas de agregado también puede alterar los resultados.

El método más común y adecuado en las obras en el Método de Presión. Se basa en la relación que existe entre el volú-- men de aire y la presión aplicada (a una temperatura constan--

te) dada por la ley de Boyle. No es necesario conocer las - proporciones de la mezcla, ni las propiedades de los materia les y, cuando se emplean medidores de aire comerciales, no - se requiere calcular el aire, ya que éstos tienen una gradua ción directa para porcentaje de aire. No obstante, a grandes altitudes, se debe recalibrar el medidor de aire, el cual no es adecuado para usarse con agregados porosos.

La figura 2.6 muestra el típico medidor de aire. El pro cedimiento consiste esencialmente en observar la disminución de volumen de una muestra de concreto compactado sujeta a -- una presión conocida. La presión se aplica por medio de una pequeña bomba, como las que se usan para inflar las llantas de las bicicletas, y se calibra por medio de un medidor de - presión. Debido a que hay un aumento en la presión que reba -sa la atmosférica, el volumen de aire contenido en el concre to disminuye, lo que hace que descienda el nivel de agua que estaba por encima del concreto. Cualquier operario sin expe riencia puede leer fácilmente y de manera directa el conteni do de aire, si se logra que el nivel de agua varíe dentro de un tubo calibrado.

La norma ASTM C 231-78 y la BS 1881; parte 2:1970 cubren la prueba mencionada y ésta representa el método más preciso y confiable para medir el contenido de aire de un concreto.

Nasser y Beaton desarrollaron un método nuevo para deter minar el contenido de aire del concreto en obra, el cual con siste primordialmente en insertar en el concreto un tubo y - calentarlo. El aumento de la temperatura expande el aire in cluido y hace subir la presión dentro de un espacio confina do: dicho aumento es lo que se mide.

El contenido de aire en el concreto endurecido se mide - en secciones pulidas de éste por medio de un microscopio y - utilizando la técnica lineal transversal (prescrita por la - norma ASTM C 457-71) o gracias a un medidor de aire a alta - presión.

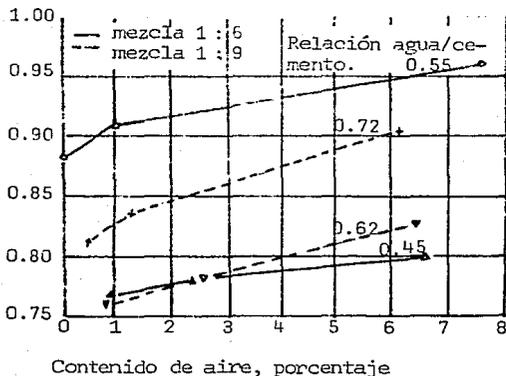


FIG. 2.5 Efecto del aire incluido en el factor de compactación del concreto (para proporciones constantes de la mezcla)

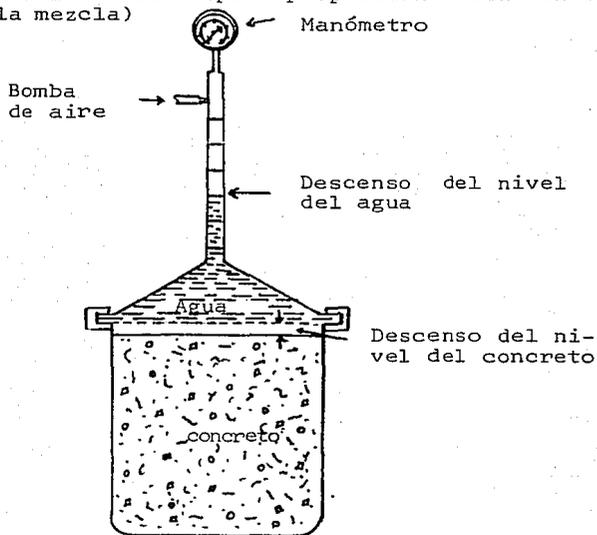


FIG. 2.6 Medidor de aire del tipo de presión.

## 2.5 EJEMPLO: UTILIZANDO EL METODO DE PRESION:

Dosificación de un Aditivo Inclusor de Aire.

Se desea dosificar una mezcla de concreto cuya resistencia a la compresión a los 28 días sea de  $140 \text{ Kg/cm}^2$  y con un contenido de aire del 6%.

Primeramente se dosificará la mezcla de concreto con las características arriba descritas, enseguida se procederá a verificar la cantidad de aire que contiene la mezcla de concreto, debido a la adición de un aditivo inclusor de aire y finalmente se elaborarán muestras de prueba para determinar la resistencia a la compresión y observar en que grado afecta la inclusión de aire a la resistencia del concreto.

### 2.5.1. Proporcionamiento de la mezcla.

Materiales y equipo necesarios en este procedimiento:

Cemento,  
Agregados: arena y grava,  
Medida cilíndrica de 51,  
Artesa de lámina de 30 X 50 cm,  
Báscula que pese hasta 10 Kg,  
Balanza que pese hasta 250 grs,  
Probeta graduada de un litro.

Operaciones similares:

Peso Volumétrico =  $\frac{\text{Promedio pesos} - \text{Peso de Vasija vacía}}{5 \text{ litros}}$

Peso específico.- De la muestra del material perfectamente seca se toman 200 gr. se introducen lentamente en la probeta graduada, misma que previamente se ha llenado hasta la marca de 500; se deja reposar unos 10 minutos y se lee el volúmen.

$$\text{Peso específico} = \frac{\text{Peso del material seco}}{\text{Volúmen de agua desalojado}}$$

Determinación de la proporción de agregados que contiene al mínimo de huecos.- Para alcanzar este valor se sigue el siguiente procedimiento:

- a) Se toman varias muestras de igual peso del agregado - grueso.
- b) A cada una de estas muestras se le agrega determinado peso de arena y se mezclan perfectamente bien.
- c) Con las mezclas así obtenidas, determinamos sus pesos volumétricos por el método descrito, llenando la vasija de 5 litros con la mezcla colocada en capas de 10 cm apisonadas con una varilla de 5/8".
- d) Registramos el peso de la arena y el peso volumétrico de la mezcla en cada tanteo.
- e) Dibujamos una gráfica en donde las absisas representan los pesos de la arena y las ordenadas el peso volumétrico de la mezcla.

EJEMPLO: (PRACTICA DE LABORATORIO).

CALCULO DEL MATERIAL:

- a) Determinación de los pesos volumétricos.

Arena:

Peso promedio de distintas llenadas	=	9,100 kg.
Peso de la vasija vacía	=	<u>1,450 Kg.</u>
Peso neto de la arena	=	7,650 Kg.

$$\text{Peso Vol. de la Arena} = \frac{7,650 \text{ Kg.}}{5 \text{ litros}} = 1.53 \text{ Kg/1}$$

Grava:

Peso promedio de distintas pesadas = 10.20 Kg.

Peso de la vasija vacía = 1.45 Kg.

Peso neto de la grava = 8.75 Kg.

$$\text{Peso Vol. de la grava} = \frac{8.75 \text{ Kg.}}{5 \text{ litros}} = 1.75 \text{ Kg/l}$$

$$= 1750 \text{ Kg/m}^3$$

b) Determinación de pesos específicos.

Arena:

Peso de la muestra seca = 200 g.

Volumen de agua desalojada = 80 cm<sup>3</sup>

$$\text{Peso específico} = \frac{200}{80} = 2.5$$

Grava:

Peso de la muestra seca = 200 g.

Volumen de agua desalojada = 77 cm<sup>3</sup>

$$\text{Peso específico} = \frac{200}{77} = 2.60$$

c) Determinación de la relación de la mezcla de agregados con mínimos de huecos.

Proporción de la mezcla de agregados en peso		Volúmen pesado	Peso de la mezcla
Arena	Grava	L	Kg.
4.5 Kg.	10.0 Kg	5.0	9.0
5.1 Kg.	10.0 Kg	5.0	9.61
5.50 Kg.	10.0 Kg	5.0	9.40

Grava:

Peso promedio de distintas pesadas = 10.20 Kg.

Peso de la vasija vacía = 1.45 Kg.

Peso neto de la grava = 8.75 Kg.

Peso Vol. de la grava =  $\frac{8.75 \text{ Kg.}}{5 \text{ litros}} = 1.75 \text{ Kg/l}$

= 1750 Kg/m<sup>3</sup>

b) Determinación de pesos específicos.

Arena:

Peso de la muestra seca = 200 g.

Volumen de agua desalojada = 80 cm<sup>3</sup>

Peso específico =  $\frac{200}{80} = 2.5$

Grava:

Peso de la muestra seca = 200 g.

Volumen de agua desalojada = 77 cm<sup>3</sup>

Peso específico =  $\frac{200}{77} = 2.60$

c) Determinación de la relación de la mezcla de agregados con mínimos de huecos.

Proporción de la mezcla de agregados en peso		Volumen pesado	Peso de la mezcla
Arena	Grava	L	Kg.
4.5 Kg.	10.0 Kg	5.0	9.0
5.1 Kg.	10.0 Kg	5.0	9.61
5.50 Kg.	10.0 Kg	5.0	9.40

De la tabla se obtiene la mezcla más compacta, que es la producida por 5.1 Kg. de arena y 10 Kg de grava, - con un peso máximo de 9.61 Kg. por lo tanto, dentro - de la vasija de 5 litros habrá:

$$\text{Arena} = \frac{9.61 \times 5.1}{10 + 5.1} = 3.25 \text{ Kg.}$$

$$\text{Grava} = \frac{9.61 \times 10.0}{10 + 5.1} = 6.36 \text{ Kg}$$

d) Determinación de la cantidad de lechada:

El volumen absoluto de los agregados se obtienen dividiendo sus pesos entre sus pesos específicos.

$$\text{Volumen absoluto de arena} = \frac{3.25}{2.50} = 1.30 \text{ l}$$

$$\text{Volumen absoluto de grava} = \frac{6.36}{2.60} = 2.45 \text{ l}$$

$$\text{Volumen total absoluto} = 3.75 \text{ l}$$

$$\text{Volumen absoluto de lechada} = 5 - 3.75 = 1.25 \text{ l}$$

Por lo tanto los porcentajes de estos tres ingredientes son los siguientes:

$$\text{Lechada} = \frac{1.25}{5} = 0.250 = 25\%$$

$$\text{Arena} = \frac{1.30}{5} = 0.260 = 26\%$$

$$\text{Grava} = \frac{2.45}{5} = 0.490 = 49\%$$

FATIGAS DE FRACTURA PARA DISTINTAS RELACIONES AGUA-CEMENTO

LITROS DE AGUA POR SACO DE CEMENTO

$\frac{f'}{c}$	$\frac{f}{c} = 0.45\frac{f'}{c}$	Condiciones comunes de trabajo	Condiciones rígidas de trabajo
62.5	28.0	41.3	46.6
75.0	34.0	38.6	43.5
87.5	39.0	36.2	41.0
100.0	45.0	34.2	38.7
112.5	50.0	32.5	36.7
125.0	56.0	30.9	34.9
137.5	62.0	29.5	33.3
150.0	67.0	28.2	31.8
162.5	73.0	27.0	30.5
175.0	79.0	25.8	29.2
187.0	84.0	24.8	28.0
200.0	90.0	23.9	27.0

e) Cálculo de la revoltura. Para una resistencia de - - 140 Kg/cm<sup>2</sup> a la compresión a los 28 días, se necesita agregar 33 litros de agua por saco de cemento, y por lo tanto, las proporciones de la mezcla referidas al volumen absoluto, serán las siguientes:

Volumen de agua = 33 l  
 Volumen de un saco de cemento = 16.10 l  
 Volumen de la lechada = 49.10 l

$$\text{Volumen de arena} = \frac{49.1 \times 26}{25} = 51.06 \text{ l}$$

$$\text{Volumen de grava} = \frac{49.1 \times 49}{25} = 96.23 \text{ l}$$

En peso:

Agua = 33.00 Kg.  
 Cemento = 50.00 Kg.

Arena = 127.65 Kg.

Grava = 250.20 Kg.

En volúmenes aparentes:

Agua = 33 litros

Cemento = 33 litros

Arena =  $\frac{127.65}{1.530}$  = 83.4 litros

Grava =  $\frac{250.20}{1.750}$  = 142.97 litros

Para 5 lt de concreto se requieren:

En volumen absoluto:

Agua = 0.84 lt.

Cemento = 0.41 lt.

Arena = 1.30 lt.

Grava = 2.45 lt.

En peso:

Agua = 0.84 Kg.

Cemento = 1.27 Kg.

Arena = 3.27 Kg.

Grava = 6.37 Kg.

En volúmenes aparentes:

Agua = 0.84 lt.

Cemento = 0.77 lt.

Arena = 2.14 lt.

Grava = 3.64 lt.

2. Con las proporciones calculadas, se elaborarán dos -- mezclas, una mezcla testigo (sin aditivo) y otra mezcla de -- prueba (con aditivo) para comparar la resistencia a la com-- presión a los 28 días de ambas muestras.

A continuación se describe el procedimiento para determi-- nar la cantidad de aire en el concreto de la mezcla de prue-- ba a la cual se le añadió el aditivo en una proporción de --  $30 \text{ cm}^3$  por saco de cemento.

### Equipo

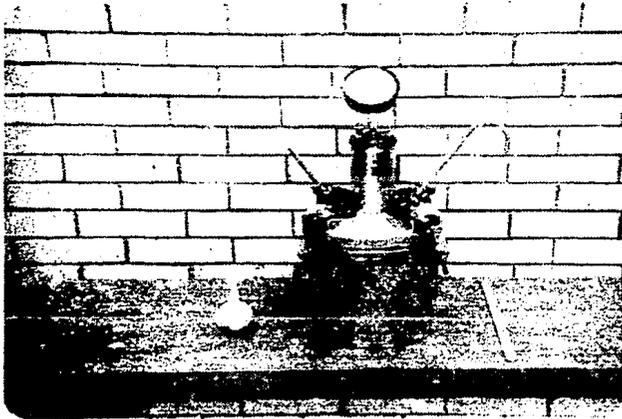
- 1.- Aparato medidor de aire,
- 2.- Varilla metálica de 1.58 cm (5/8") de diámetro y 40 cm de largo.
- 3.- Varilla plana de 40 cm de largo
- 4.- Perilla de hule.
- 5.- Aditivo inclusor de aire.

a) Se toma una muestra del concreto elaborado de manera que sea representativo del volumen total y se agrega el aditivo (para 1.27 Kg. de cemento se añaden  $0.762 \text{ cm}^3$  del aditi-- vo inclusor de aire.

b) Se deposita el concreto en tres capas de la tercera -- parte de la altura del recipiente y cada cara se apisona -- 25 veces. cuidando que la punta de la varilla no pase a la -- capa anterior compactada.

c) Se enrasa el recipiente cuidadosamente y con la ayuda de la varilla plana, se alisa mediante un movimiento de sie-- rre; debe tenerse la precaución de que la superficie del con-- creto quede perfectamente lisa, para evitar errores en la -- prueba.

d) Se limpia perfectamente el borde del recipiente.



Medidor de Aire del Tipo de Presión en el momento de efectuar la Prueba de Medición del contenido de aire.

e) Se coloca la tapa sobre el recipiente y se aprieta me diante las abrazaderas de presión que para ese fin tienen co locadas diametralmente opuestas en dicha tapa.

f) Con la perilla de hule llena de agua se introduce par te de ella por uno de los orificios de la tapa y al salir el líquido por el que se encuentra diametralmente opuesto, se - cierran las llaves de paso rápidamente.

g) Se produce a continuación a inyectar agua a presión - mediante el émbolo que se tiene también en la tapa, hasta -- que la aguja del manómetro llegue al punto de calibración de éste. Al suceder lo anterior se atornilla el émbolo en su - posición final de descenso y acto seguido se procede a oprimir la válvula de paso que se tiene a un lado para que se in cremente la presión en el recipiente donde se encuentra el - concreto.

h) A continuación se hace la lectura en la carátula del manómetro, en donde se observa directamente el porciento de aire existente y finalmente se procede a abrir lentamente -- una de las llaves de paso de los orificios de llenado y se - deja salir parte del agua a presión. Una vez que la presión anterior se ha reducido igualándose con la atmosférica se -- destapa el recipiente.

De aquí se puede concluir que la cantidad de aditivo que se adicionó es suficiente para darle a la mezcla la cantidad de aire que marcan las especificaciones (se puede apreciar - en la figura que el contenido de aire fue del 6%).

3. Se procede a probar los cilindros a la compresión por medio de la máquina universal.

La resistencia del cilindro testigo fue de  $141 \text{ Kg/cm}^2$ , - mientras que la del cilindro de prueba fue de  $134 \text{ Kg/cm}^2$ .

Según se especifica en los reglamentos, en lo referente a aditivos, que la resistencia de los cilindros de prueba no deberá ser menor del 90% de la correspondiente de los testigos, por lo tanto, la resistencia del cilindro de prueba está dentro del rango especificado.

## TEMA III

### DOSIFICACION Y FABRICACION DE TUBOS DE CONCRETO SIMPLE PARA ALCANTARILLADO

#### 3.1 INTRODUCCION (CARACTERISTICAS Y SANIDAD DE LOS MATERIALES).

En la fabricación de tubería de concreto simple deberá verificarse el grado de calidad de la misma, y ésta dependerá principalmente:

- a) De las propiedades físico-químicas de los agregados, los cuales, al ser mezclados con agua y cemento, formarán el concreto.
- b) Del cuidado adecuado en el proceso de fabricación.

A continuación se mencionan las propiedades pertinentes que deben tener los elementos constitutivos del concreto:

##### 3.1.1 CEMENTO.

El cemento que se utilice deberá ser cemento portland tipo V, que llene los requisitos ASTM-C-150 o cemento portland de escorias de fundición que llene los requisitos ASTM-C-205. Entre los cementos de línea comercial deberá utilizarse exclusivamente el portland tipo V, ya que se requiere una alta resistencia a los sulfatos que se encuentran abundantemente en las aguas negras, y en las cuales se generan diferentes compuestos: amoniaco, ácido nítrico, nitrógeno orgánico, sulfuro de hidrógeno y sulfuros en general.

Estos compuestos son los causantes del resquebrajamiento y destrucción de la masa del concreto porque lo atacan de la siguiente manera:

El desprendimiento de gas de ácido sulfhídrico se desarrolla como resultado de la acción de oxidación de bacterias

anaeróbicas sobre compuestos sulfurosos orgánicos e inorgánicos, presentes en el agua de drenaje.

El gas de ácido sulfhídrico, por sí mismo, no tiene acción sobre el concreto, pero cuando se libera en el espacio libre entre el área longitudinal de la "clave" y el líquido, se condensa en la superficie arribadel nivel del agua, es oxidado por la bacteria anaeróbica y transformado en ácido sulfúrico, el cual si ataca la superficie del concreto, pues al combinarse con el aluminato tricálcico del cemento, reacciona y empieza a disolver y resquebrajar la masa del concreto.

Por esta razón se debe usar exclusivamente cemento Portland tipo V para la fabricación de tubería para alcantarillado, ya que es el que garantiza una mayor resistencia a los efectos agresivos de compuestos sulfurosos, por su bajo contenido de aluminato tricálcico, bajo porcentaje de cal libre y de óxidos alcalinos.

A continuación se muestra el estudio de las características físicas de una arena:

### 3.1.2 ARENA.

Este agregado no deberá contener contaminación de sales, arcillas, ni demás agentes nocivos (como cloruros, sulfatos, hidróxidos, etc); esto se obtiene por medio de un estudio químico a la arena para determinar su sanidad y propiedades.

También deberá efectuarse el estudio de las propiedades físicas de la arena (absorción, peso volumétrico, granulometría, etc.); este estudio es indispensable para el cálculo óptimo del proporcionamiento base, pues en función de éste se podrá contar con bases para fabricar tubería de calidad satisfactoria, ya que la mezcla con que se elabore tendrá manejabilidad y alcanzará máxima resistencia con mayor economía.

### 3.1.3 AGUA

Es el elemento con el cual se verifican las reacciones - de los diversos componentes del cemento. Para que sea útil, deberá ser potable; no deberá utilizarse un tipo de agua que contenga impurezas (arcilla, sales en solución ni materia orgánica en suspensión), pues esto origina disminución en la - resistencia del concreto y puede llegar a la desintegración del mismo.

### 3.2 PROPORCIONAMIENTO.

Los agregados, el cemento y el agua, se medirán y proporcionarán en una forma adecuada tal, que los tubos lleguen a cumplir con un satisfactorio grado de calidad. En ningún caso, la proporción de cemento portland contenido en la mezcla, podrá ser menor de  $350 \text{ Kg/m}^3$  de concreto.

Para la fabricación de tubos de 10, 15, 20 y 25 cm. de diámetro, deberá utilizarse arena que haya sido cribada por la malla 3/16" (4.76 mm), y para tubos de 30, 38 y 45 cm. de diámetro, el volumen total de arena (dependiendo de la granulometría de ésta), deberá añadirse un contenido del 12 al -- 20% de gravilla que cumpla con el requisito de ser mayor de 3/16" y menor de 3/8" (en el caso de tubería de 45 cm. de diámetro, se usará gravilla hasta 1/2").

El mortero empleado en la fabricación de tubería, deberá ser una mezcla (arena-agua-cemento) con una relación agua/cemento que tenga un rango entre 0.32 y 0.40, dependiendo de la humedad y absorción de la arena, que nos proporcione la humedad óptima, arrojando el máximo, peso volumétrico y por ende la menor relación de vacíos. Esto permite la correcta hidratación del cemento, sin afectar la consistencia inicial del tubo al efectuar su descimbrado, inmediatamente después de su fabricación.

Aprovechamos el estudio de las características físicas de la arena, mostradas en el capítulo anterior, para determinar el proporcionamiento base para la fabricación de tubos:

#### 3.2.1. DATOS:

Consumo de cemento	400 $\text{Kg/m}^3$
Relación agua/cemento	0.40
Densidad del cemento	3.1
Densidad de la arena	2.34
Absorción arena	4.6%

Humedad arena	6.0 %
P.V.S. cemento	1 515 Kg/m <sup>3</sup>
P.V.S. arena	1 459 Kg/m <sup>3</sup>

### 3.2.2 SOLUCION:

$$1. \quad \text{Vol. de cemento} = \frac{400}{3.1} = 129 \text{ lts.}$$

$$2. \quad \text{Vol. de agua} = (0.40) \times \frac{(400)}{1.25} = 289 \text{ lts.}$$

El Vol. de arena será  $1\ 000 - 289 = 711$  lts.

El peso de la arena =  $2.34 \times 711 = 1\ 663.74$  Kg.

La relación arena/cemento =  $1\ 663.74/400 = 4.159$

Proporción inicial		Corrección		Corrección		Cant.
Kg.	Absorción	Absorción	Humedad	Humedad	Correg.	
Cemento	1.000					1.000
Arena	4.159	4.6%	-0.191	6.0%	+0.249	4.217
Agua	0.400		+0.191		-0.249	0.342

La proporción base en peso, sería entonces:

1.00 Kg. de cemento  
 4.21 Kg. de arena  
 0.34 Kg. de agua

Si quisiéramos dar la cantidad total de materiales para hacer la mezcla, por saco de cemento, tendríamos:

1.00 X 50 = 50.00 Kg. cemento  
 4.21 X 50 = 210.5 Kg. arena  
 0.34 X 50 = 17.0 Kg. agua

Si quisiéramos dar el proporcionamiento en volumen, por saco de cemento:

$$\text{Cemento} = \frac{50}{1.515} = 33 \text{ lts.}$$

$$\text{Arena} = \frac{210.5}{1.459} = 144 \text{ lts.}$$

$$\text{Agua} = \frac{17}{1} = 17 \text{ lts.}$$

Generalmente la recomendación que se da para la mezcla - de materiales, es en volumen y la cantidad de arena se mide por medio de latas alcohólicas de 18 lts. de tal manera que la recomendación final sería:

$$1 \text{ saco de cemento} = 33 \text{ lts.}$$

$$8 \text{ latas de arena de } 18 \text{ lts./C.U.} = 144 \text{ lts.}$$

$$\text{Agua} = 17 \text{ lts.}$$

Verificaremos el consumo de cemento empleado por saco ob teniendo el volumen de mezcla compactada:

$$\text{Cemento} = \frac{50}{3.1} = 16.1 \text{ lts.}$$

$$\text{Arena} = \frac{144}{2.34} \times 1.459 = 89.9 \text{ lts.}$$

$$\text{Agua} = (0.34) (50) = \frac{17.0}{\text{TOTAL } 122.9} \text{ lts.}$$

El consumo de cemento por  $\text{m}^3$  de mezcla:

$$\frac{50}{122.9} \times 1000 = 406 \text{ Kg/m}^3 = 400 \text{ Kg/m}^3$$

### 3.3 PROCEDIMIENTOS DE FABRICACION DE LA TUBERIA.

Existen dos procedimientos para la fabricación de tuberías de concreto simple:

MANUAL

CON EQUIPO MECANICO.

#### 3.3.1 EL PROCEDIMIENTO MANUAL, SE REALIZA DE LA SIGUIENTE MANERA:

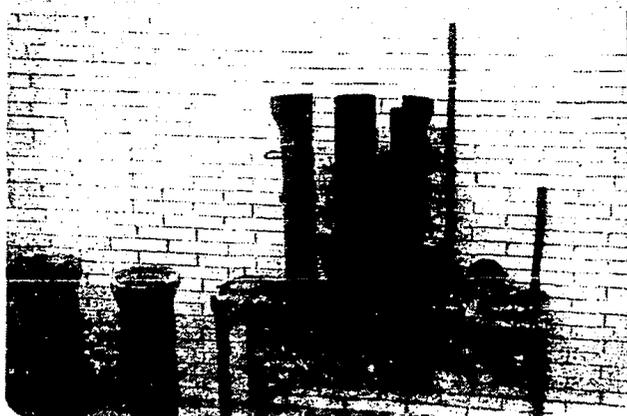
Teniéndose ya calculado el proporcionamiento base, se mezclan los materiales usados y posteriormente se vacía la mezcla en el interior del molde en capas de 5.0 cm. aproximadamente; en seguida se procede a compactar el material con ayuda de un pisón manual metálico (figura 1), que será de las características indicadas en la tabla 3.1.

La compactación se efectúa hasta que el pisón rebote en la superficie del material (compactación óptima), siguiendo esta operación hasta llenar completamente el molde. Inmediatamente, se descimbra en un local techado y con el cuidado requerido, para que el tubo quede libre de grietas o rupturas. Posteriormente se someterá la tubería al curado.

#### 3.3.2 LA CONSTRUCCION DE TUBERIA CON EQUIPO MECANICO PUEDE HACERSE:

Mediante apisonado mecánico,  
Por vibrado, y  
Por compresión lateral.

La fabricación por compresión mecánica se realiza en moldes metálicos verticales, constituidos por dos semicilindros que forman la pared exterior, y en el centro de éstos, existe una pieza cilíndrica cuya función es formar la parte interior del tubo.



Equipo que se utiliza en la Fabricación manual de tubos de Albañal

TABLA 3.1 Características del Pisón.

Diámetro del tubo cm.	Peso Kg.	Area contacto cm <sup>2</sup>	A cm.	B cm.	C cm.	D cm.	E cm.
15	3.0	9.1	11.2	10.0	0.9	3.5	105
20	3.5	14.5	10.0	12.1	1.2	3.5	105
25	3.5	14.5	10.0	12.1	1.2	3.5	105
30	3.5	14.5	10.0	12.1	1.2	3.5	105
38	4.7	31.3	9.7	12.5	2.5	3.5	105
45	4.7	31.3	9.7	12.5	2.5	3.5	105

La secuela que se realiza para la construcción de tubería mediante apisonado mecánico, es la siguiente:

-Un operario alimenta el molde con la mezcla y la compactación la realiza la máquina operando uno o dos pisonos simultáneamente; la operación de llenado es automática y los pisonos consolidan la mezcla conforme va girando el molde, el cual previamente se ha colocado sobre la cama giratoria de la propia máquina. Una vez que la pieza ha sido moldeada, se transporta al lugar de curado con todo y molde, en donde se descimbra inmediatamente para utilizar nuevamente los moldes.

-Fabricación por vibrado. Esto se logra mediante mesas vibratorias, sobre las cuales se fijan verticalmente los moldes metálicos, estas mesas transmiten las vibraciones a la mezcla del mortero en zonas horizontales y paralelas, provocando su consolidación. Las mesas pueden recibir un solo molde o varios simultáneamente; esta operación obliga a un cuidado extremo, ya que el vibrado puede no ser uniforme, apareciendo zonas no consolidadas que debilitan su resistencia. Posteriormente se realiza el descimbado similar al anterior.

Fabricación por compresión lateral.

En este método, se usa un equipo (figura 3.2) que consta de:

- 1) Base de soporte en la que se apoya todo el equipo.
- 2) Anillo removible, el cual sirve para sujetar el molde en su base usándose un anillo diferente para cada diámetro de tubería.
- 3) Molde
- 4) Mandril que sirve como cimbra interior del tubo.
- 5) Aspas de compactación, las cuales están sujetas al mandril y efectúan la función de acomodo y compactado de material.

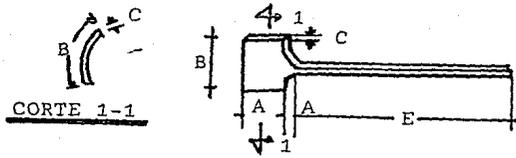
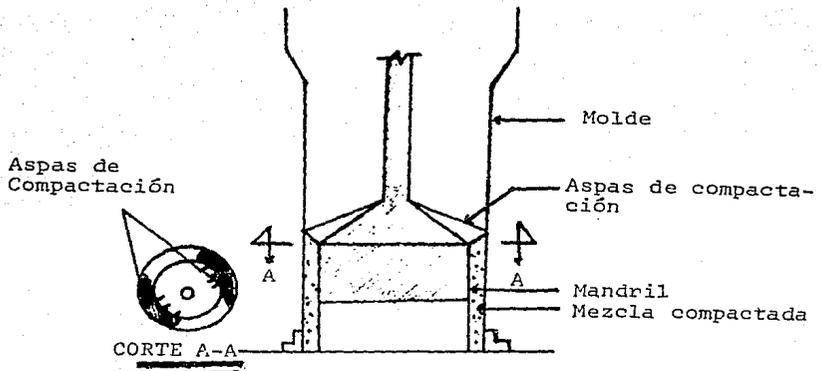


FIG. 3.1.

FIG. 3.2.



6) Flecha, cuya principal función es transmitir los movimientos; además de sostener al mandril y a las aspas de compactación.

El mecanismo que se sigue es el siguiente:

-Se baja el mandril hasta la parte inferior del molde, - al hacerlo girar se introduce el mortero, saturado y superficialmente seco; la mayor parte del material cae en la parte superior del mandril, pero la acción rotatoria del mismo hace que se acomode en la parte interior del molde.

-El espacio entre el perímetro exterior del mandril y el interior del molde, en unos pocos segundos se llena con el mortero, formando la porción interior del tubo y las aspas girando con el mandril, presionan hacia abajo y lo compactan; cuando la pared del tubo está suficientemente compactada, el mandril es obligado a desalojarse hacia arriba. Cuando el mandril sale completamente, se saca la pieza moldeada con todo y molde y se descimbra en forma similar a los dos casos anteriores.

### 3.4 CURADO DE LAS TUBERIAS

Debido a las reacciones químicas que se verifican entre los componentes del cemento y el agua, el mortero con el - - cual se elabora la tubería endurece y presenta un aspecto pétreo. Para el correcto fraguado del cemento es necesario -- evitar la evaporación de la humedad contenida y para ello se necesita someter los tubos a un proceso de curado, el cual - puede efectuarse por medio de:

- 1) Agua
- 2) Vapor.
- 3) Películas impermeables.

1) El curado por medio de agua, puede ser:

- <sup>1</sup>  
a) Por inmersión
- <sup>2</sup>  
b) Por riego.

1.a) El curado por inmersión consiste en sumergir la tubería completamente en agua: después de ocho horas de descimbrada, hasta su saturación por un período mínimo de 3 (tres) días.

Respecto a este punto se tiene la experiencia del curado por inmersión en las localidades de Yautepec, Mor. y Chilpancingo, Gro.

En dichas zonas, se construyeron pilas de curados con dimensiones de 8.00 m. de ancho por 25.00 m de largo y 125 m. de profundidad. Estas dimensiones fueron calculadas de tal manera que la fabricación máxima diaria tuviera cabida en dicha pila sin excedentes, ni falta de espacio.

El resultado obtenido, fue una tubería con un curado - - ideal, lo cual repercutió en la resistencia al aplastamiento, incrementándola un 30% aproximadamente, lo que permite una - reducción en el cemento y además le proporcionó una impermea

bilidad y absorción excelentes, ya que se contó con la suficiente humedad al momento de efectuarse la hidratación en el cemento, impidiendo de esta manera la formación de vacíos y conductos capilares, evitándose de este modo la permeabilidad y absorción excesiva que presentan las tuberías por -- otros métodos.

1.b) Curado por riego. Este consiste en mantener húme-- dos los tubos por un período mínimo de 7 (siete) días a base de tres riegos diarios, por ejemplo: 8 a.m., 12 p.m. y 17 -- p.m. Hrs., para que se realice el correcto fraguado del ce-- mento, evitando la evaporación de la humedad contenida y -- agrietamientos por contracción.

2) El curado por Vapor, puede ser:

Se efectúa en un local acondicionado para tal fin; duran-- te el proceso de fabricación los tubos se descimbran dentro de este lugar y se mantienen en contacto con vapor húmedo a una temperatura de por lo menos  $43^{\circ}\text{C}$  y no mayor de  $66^{\circ}\text{C}$ , en un período no menor de 36 (treinta y seis) horas.

3) El curado por Películas Impermeables, puede ser:

El curado por medio de películas impermeables, se efec-- túa inmediatamente después de que los tubos han sido removi-- dos de sus formas y consiste en aplicar en sus paredes tanto interior, como exterior, un líquido especialmente fabricado con ceras y resinas, el cual forma una membrana impermeable en toda la superficie del tubo, que evita la evaporación del agua. Esta es otra forma de curado, sin embargo, no se reco-- mienda su empleo, por ser antieconómico.

### 3.5 IMPERMEABILIZACION DE TUBERIAS.

Después de quedar concluido el proceso de curado, una -- vez que el tubo no tenga humedad, la tubería deberá ser impermeabilizada interiormente con el producto asfáltico Pemex "F.M.O."; o bien, con el producto asfáltico emulsión amiónica para cargas inertes.

1. La secuela para impermeabilizar un tubo con el producto asfáltico Pemex "F.M.O.", es la siguiente:

1.a. Se limpiará perfectamente el interior del tubo de - manera que quede libre de polvo, grasa o cualquier otra sustancia.

1.b. Se aplicará el producto a una temperatura de 25°C, dejando libre el área de la campana.

1.c. Generalmente se aplicará con una brocha o aspesor - en una proporción de 0.5 a 0.7 litros por metro cuadrado de superficie.

1.d. Deberá colocarse en dos capas, teniendo cuidado de no aplicar la segunda capa, hasta que haya secado - perfectamente la primera.

2. También podrá impermeabilizarse la tubería con la - emulsión amiónica para cargas inertes, siguiendo una secuela similar a la anteriormente descrita y de acuerdo a la tabla

TABLA 3.2

Tubo Ø cm.	Aplicación de emulsión X tubo (lts)
15	0.086
20	0.114
25	0.143
30	0.172
38	0.261
45	0.309

## TEMA IV

### ELABORACION DE CONCRETOS LIGEROS

#### 4.1 INTRODUCCION:

Esta práctica trata de concreto aislante y de concretos estructurales cuyo peso volumétrico es apreciablemente menor o mayor que el rango usual de 2 200 a 2 600 Kg/m<sup>3</sup>.

El concreto de densidad elavada se emplea ante todo en la construcción de escudos biológicos, mientras el empleo de concreto ligero se rige principalmente por consideraciones - económicas.

En las construcciones de concreto, el propio peso representa una gran proporción de la carga total sobre la estructura y existen considerables ventajas al reducir la densidad del concreto, siendo la principal de dichas reducciones el - empleo de secciones de menor tamaño y la correspondiente reducción del tamaño de los cimientos.

Además, con concretos ligeros, la cimbra soporta menor presión que la que tendría que resistir con concreto normal y, por otro lado, el peso total de los materiales que se manejan se reduce con un consiguiente incremento en la productividad.

Asimismo, el concreto ligero proporciona mejor aislamiento térmico que el concreto normal (véase la figura 4.2). El rango práctico de densidades del concreto ligero es de 300 - 1 850 Kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.2 CLASIFICACION DE LOS CONCRETOS LIGEROS.

Existen tres métodos amplios para producir concreto ligero. En el primero se emplea agregado ligero poroso de baja densidad relativa aparente, en vez de agregado normal cuya densidad relativa es aproximadamente de 2.6. El concreto resultante se conoce generalmente con el nombre del agregado ligero empleado.

El segundo método para producir concreto ligero consiste en la formación de grandes cavidades dentro del concreto o de la masa de mortero. Estas cavidades deben distinguirse claramente de las cavidades muy finas producidas por la inclusión de aire. Este tipo de concreto se conoce con diversos nombres, como concreto aireado, celular, espumoso o gasificado.

El tercer método para obtener concreto ligero es simplemente omitiendo en la mezcla el agregado fino, de manera que queden en ella grandes cavidades intersticiales. Por lo general se emplea agregado grueso de peso normal. Este concreto se conoce simplemente con el nombre de concreto sin finos.

Esencialmente, entonces, la disminución de la densidad se obtiene en cada caso gracias a la presencia de cavidades, ya sea en el agregado, en el mortero o en los intersticios entre las partículas gruesas. Es obvio que la presencia de estas cavidades reduce la resistencia del concreto ligero, en comparación con la del concreto normal, pero en muchas aplicaciones no es esencial una resistencia elevada. El concreto ligero proporciona muy buen aislamiento térmico y tiene durabilidad satisfactoria, pero no es muy resistente a la abrasión. En general, el concreto ligero es más costoso que el concreto normal, y el mezclado, manejo y colado requieren también mucho más cuidado y atención que el concreto normal. No obstante, para muchos fines, las ventajas del concreto ligero, así como a probarlo en nuevas aplicaciones, incluyendo

concreto preforzado, edificios altos y aun techos de casca--  
rón.

El concreto ligero también puede clasificarse de acuerdo con el uso que se le va a dar: se distingue entre el concreto ligero estructural y el concreto empleado en muros divisivos con fines de aislamiento y similares. En el pasado, el concreto estructural ligero tendía a ser un concreto de textura cerrada hecho con agregado ligero, pero, puesto que actualmente no siempre es este el caso, es preferible basar la clasificación del concreto estructural ligero en una resistencia mínima a la compresión. Por ejemplo, según la norma ASTM C 330-77, el concreto estructural ligero debe tener una resistencia a la compresión, medida en un cilindro estándar a los 28 días, no menos de  $176 \text{ Kg/cm}^2$ .

La densidad de dicho concreto, determinada en estado seco, no debe exceder de  $1850 \text{ Kg/m}^3$ , y normalmente fluctúa entre  $1400$  y  $1800 \text{ Kg/m}^3$ , y una resistencia entre  $7$  y  $70$  --  $\text{Kg/cm}^2$ .

La característica principal del concreto aislante es su coeficiente de conductividad térmica, que debe estar por debajo de  $0.3 \text{ J/m}^2 \text{ s}^\circ\text{C/m}$ .

### 4.3 AGREGADOS LIGEROS.

La característica principal del agregado ligero es su -- gran porosidad, que da como resultado una baja densidad relativa aparente. Algunos agregados ligeros son de origen natural; otros se fabrican.

#### Agregados Naturales.

Los principales agregados de esta categoría son la diatomita, la piedra pómez, la escoria, las cenizas volcánicas y la tufa; con excepción de la diatomita, todas las demás son de origen volcánico.

Puesto que sólo se encuentran en cierta área, los agregados naturales no se utilizan en gran medida. La piedra pómez se emplea más extensamente que cualquiera de las demás.

La Piedra Pómez es un vidrio volcánico espumoso de color claro, con peso volumétrico de alrededor de 500 a 900 Kg/m<sup>3</sup>. Las variedades que no son demasiado débiles estructuralmente hacen un concreto satisfactorio con densidad de 700 a 1 400 Kg/m<sup>3</sup> y buenas características aislantes, pero con absorción y contracción elevadas.

La Escoria, que es una roca vítrea vesicular, parecida a la ceniza industrial, hace un concreto de propiedades similares.

#### Agregados Artificiales.

Los agregados artificiales se conocen comúnmente con diversos nombres comerciales, pero es mejor su clasificación con la base en la materia prima empleada para su manufactura y el método de fabricación.

En el primer grupo se incluyen los agregados producidos por aplicación de calor para provocar la expansión de arci--

llas, esquistos, pizarra, esquisto diatomáceo, perlita, obsidiana y vermiculita.

El segundo tipo se obtiene a través de un proceso espe-- cial de enfriamiento, mediante el cual se obtiene la expan-- sión de la escoria de alto horno. Las cenizas industriales forman el tercero y último grupo.

La Arcilla, El Esquisto y La Pizarra Expandidas se obtienen calentando las materias primas adecuadas en un horno ro- tatorio hasta su fusión incipiente (a temperaturas de 1 000 a 1 200°C), cuando tiene lugar la expansión del material gracias a la generación de gases que quedan atrapados en una ma sa piroplástica viscosa.

Esta estructura porosa queda retenida al enfriarse, por lo que la densidad relativa del material expandido es infe- rior a la del material original antes de calentarse.

A veces la materia prima se reduce al tamaño deseado antes de calcinarse, pero también puede triturarse después de la expansión. Esta última también puede lograrse mediante - el empleo de un cordón de sinterización. En este caso, el - material humedecido es conducido por una rejilla móvil hacia los quemadores, de manera que todo el espesor de la cama del material se cueza gradualmente.

Su viscosidad es tal, que los gases quedan atrapados. - Al igual que con el horno rotatorio, la masa enfriada se tritura o se emplea el material peletizado inicialmente.\*

\*La arcilla expandida producida con el método de cordón de concreción se conoce como Aglita; el producto del horno rotatorio, como Leca. En Europa Oriental el esquisto expandido y otros agregados preparados con cordón de sintetiza- ción se conocen como Agloporita, en tanto que el producto -- de horno rotatorio lo llaman Keramcita.

El empleo de material peletizado produce partículas con un cascarón o "cubierta" lisa (de 50 a 100  $\mu$  de espesor) - sobre el interior celular. Estas partículas casi esféricas con un satinado casi impermeable tienen menor absorción de agua que las partículas no cubiertas, cuya velocidad de absorción varía del 12 al 30%. Las partículas recubiertas se manejan más fácilmente, se mezclan mejor, y producen concreto de elevada trabajabilidad, pero por lo general son más -- costosas que el agregado angular no recubierto.

Los agregados de esquisto y arcilla expandidos hechos mediante el proceso de cordón de sinterización tienen una densidad de 650 a 900  $\text{Kg/m}^3$ , y cuando se hacen en horno rotatorio, de 300 a 650  $\text{Kg/m}^3$ . Producen concreto con una densidad entre 1 400 y 1800  $\text{Kg/m}^3$  aunque se han obtenido valores de - hasta 800  $\text{Kg/m}^3$ . El concreto hecho con agregados de esquisto o arcilla expandidos tienen por lo general más resistencia que cuando se emplea cualquier otro agregado ligero.

La Perlita es una roca vítrea volcánica, que se encuentra en América Ulster, Italia y otros lugares. Cuando se calienta rápidamente hasta el punto de fusión incipiente (de 900 a 1 100°C) se expande debido a la evolución de vapor y forma un material celular con un peso volumétrico hasta de 30 a 240  $\text{Kg/m}^3$ . El concreto hecho con perlita tiene muy baja resistencia y se emplea principalmente como aislante. Una ventaja de este tipo de concreto es que seca rápidamente y puede dársele también un acabado rápido.

La Vermiculita es un material de estructura laminada similar a la de la mica, que se encuentra en América y en África. Cuando se calienta a una temperatura de 650 a 1 000°C se expande varias veces su tamaño, hasta 30 veces, por exfoliación de sus delgadas láminas. Como resultado de esto, el peso volumétrico de la vermiculita exfoliada es de solo 60 a 130  $\text{Kg/m}^3$  y el concreto hecho con ella es de muy baja resistencia y exhibe contracción elevada; sin embargo, es un -

excelente aislante del calor.

La Escoria Expandida de Alto Horno se produce de dos maneras. Una de ellas consiste en hacer que una cantidad limitada de agua en forma de rocío entre en contacto con la escoria fundida al descargarla del horno (en la producción de --hierro en lingotes). La generación de vapor infla la escoria que aún está en estado plástico, de manera que se endurece en forma porosa, bastante similar a la de la piedra pómez. Este es el proceso con chorro de agua. En el proceso mecánico la escoria fundida se agita rápidamente con una cantidad controlada de agua. El vapor queda atrapado, y se forman --también algunos gases debido a la reacción química de ciertos componentes de la escoria con el vapor de agua.

En forma expandida o espumosa la escoria se ha empleado durante muchos años y se produce con un peso volumétrico que varía entre 300 y 1 100 Kg/m<sup>3</sup>, lo que depende de los detalles del proceso de enfriamiento y, hasta cierto punto, del tamaño y granulometría de la partícula. Las especificaciones para la espuma de escoria como agregado se incluye en la BS 877; parte 2: 1973, mientras que la BS 1047; parte 2: --1974, especifica el agregado de escoria no expandida enfriada a base de aire. El concreto hecho con espuma de escoria tiene una densidad de 950 a 1 750 Kg/m<sup>3</sup>.

También se dispone de escoria peletizada, la cual se obtiene expandiendo la escoria fundida bajo el agua y rompiéndola en partículas que se impulsan a través de aire para formar bolitas uniformes.

El Agregado de Clinker, conocido en Estados Unidos como ceniza, se hace con residuos bien quemados de horno industrial de alta temperatura, sinterizados o aglomerados en terrones. Es importante que este clinker esté libre de las variedades perjudiciales del carbón sin quemar, las cuales --pueden expandirse en el concreto, causando así inestabilidad. La BS 1165; 1966 establece los límites de pérdida de igni-

ción y de contenido de sulfatos solubles para diferentes concretos; concreto sencillo para fines generales, concreto interior hecho en obra y bloques prefabricados de concreto de clinker en el concreto reforzado o en concreto que requiera tener durabilidad especialmente elevada.

El hierro o las piritas en el clinker pueden causar manchas en la superficie y, por lo tanto, deben eliminarse. La inestabilidad debida a la cal muy quemada puede evitarse dejando que el clinker permanezca mojado durante un período de varias semanas; con ésto la cal se apagará y no se expandirá en el concreto.

Cisco es el nombre que se le dá a un material similar a la escoria de cemento, pero da aglomeración más ligera y menor calidad de incineración. No existe una diferencia precisa entre cisco y clinker.

Cuando se emplean cenizas, ya sea como agregado fino o como agregado grueso, se obtiene un concreto con densidad de 1 100 a 1 400 Kg/m<sup>3</sup>, pero a menudo se emplea arena natural para mejorar la trabajabilidad de la mezcla; la densidad del concreto resultante es entonces de 1 750 a 1 850 Kg/m<sup>3</sup>.

La Ceniza Volante o ceniza pulverizada de combustible -- (conocida como pfa) es un residuo finamente dividido de la combustión de carbón pulverizado en calderas de plantas modernas, tales como las plantas de energía eléctrica. La ceniza se humedece, se forman bolitas y, después, se aglomera en un horno adecuado; la pequeña cantidad de combustible no quemado presente en la ceniza, mantendrá por lo general este proceso sin adición de combustible. Los nódulos aglomerados proporcionan un agregado redondeado muy bueno, conocido como Lytag, con peso volumétrico de alrededor de 1 000 Kg/m<sup>3</sup>; la fracción fina puede alcanzar los 1 200 Kg/m<sup>3</sup>.

Cabe señalar que, generalmente, las partículas más finas tienen un peso volumétrico mayor que las partículas gruesas.

Esto está relacionado con el proceso de trituración; la fractura ocurre a través de los poros más grandes, por lo -- que mientras más pequeña sea la partícula menores serán sus poros y, por lo tanto, mayor será la densidad aparente. Los - valores proporcionados en la tabla 4.3 apoyan este punto.

Vale la pena señalar una característica general de los - agregados artificiales. Puesto que las partículas se hacen en una fábrica, son menos variables que muchos de los agrega dos naturales.

En la figura 4.1 se muestra la variedad normal de densidades de los concretos hechos con diversos agregados ligeros, basados principalmente en la clasificación del ACI. La norma ASTM C 330-77, C 331-77, C 332-77a y la BS 3797; parte 2; 1976 prescriben algunos requisitos generales para agregados ligeros.

En circunstancias especiales la gama de materias primas con las cuales pueden hacerse agregados ligeros es muy am- - plia. Por ejemplo, en Berlín se ha empleado basura aglomera da en escoria para hacer concreto. Con un contenido de ce- mento de 230 a 360 Kg/m<sup>3</sup> se obtuvo una densidad de 1 900 - - Kg/m<sup>3</sup> y resistencias entre 162 y 302 Kg/cm<sup>2</sup>.

Concreto aislante

Concreto de resistencia  
moderada

Concreto estructural

Arcilla o pizarra expandidas  
producidas en cordón de sinterización,  
ceniza volante y escoria expandida.

Arcilla, esquisto y pizarra expandidos,  
producidos en horno rotatorio.

Escoria

Piedra Pómez

Perlita

Vermiculita

400

600

800

1000

1200

1400

1600

1800

Kg/m<sup>3</sup>

Densidades a los 28 días, secado al aire

FIG. 4.1. Variaciones típicas de las densidades de concretos elaborados con diversos agregados ligeros.

#### 4.4 CONCRETO DE AGREGADO LIGERO.

Ya hemos visto que el concreto de agregado ligero comprende un campo de aplicaciones extremadamente amplio; si se emplean materiales y métodos apropiados la densidad del concreto puede variar de poco más de 300 hasta unos 1 850 Kg/m<sup>3</sup>, y el rango correspondiente de resistencia está entre 3.5 y 422 Kg/cm<sup>2</sup> y, a veces, aún más elevado. Pueden obtenerse resistencias hasta de 633 Kg/cm<sup>2</sup> con contenidos muy elevados de cemento (560 Kg/m<sup>3</sup>). Para cualquier agregado en particular, la resistencia aumenta con la densidad, pero según el tipo de agregado un concreto de 211 Kg/cm<sup>2</sup> puede requerir de 240 a 400 Kg de cemento por metro cúbico de concreto; lo que corresponde a un concreto de 316 Kg/cm<sup>2</sup> es de 330 a 500 -- Kg/m<sup>3</sup>.

Por lo general, con agregado ligero, el contenido de cemento varía desde el mismo del agregado normal hasta dos tercios más para la misma resistencia de concreto.

No existe ninguna correlación simple entre la resistencia del agregado como tal y la resistencia del concreto hecho con dicho agregado, pero sí existe un tope superior, de resistencia sobre el cual el aumento del contenido de cemento incrementa muy poco la resistencia del concreto.

Los agregados ligeros, aun con apariencia similar, pueden producir concretos muy variables en cuanto a sus propiedades estructurales, por lo cual es necesario practicar una cuidadosa comprobación del comportamiento de cada agregado nuevo. Es difícil hacer una clasificación del concreto de acuerdo con el tipo de agregado empleado, ya que las propiedades del concreto se ven afectadas también por la granulometría del agregado, el contenido de cemento, la relación agua /cemento y el grado de compactación. Las propiedades normales aparecen en la tabla 4.3.

Los principales aspectos que deben considerarse se refie

ren a la trabajabilidad del concreto, a su contracción por secado y al movimiento de humedad. Otros factores, tales como la resistencia y la conductividad térmica (véase la figura 4.2 y la tabla 4.3), ambos estrechamente relacionados con la densidad y el costo, también deben, por supuesto, tomarse en cuenta. Obviamente, la baja conductividad térmica del concreto de agregado ligero es conveniente, pero el aumento de temperatura en condiciones de curado masivo es mayor.

Muchos agregados ligeros son angulares y tienen una superficie áspera que produce mezclas ásperas, las cuales son más adecuadas para producción en serie de bloques para construcción que para trabajos en obra. En este último caso puede ser necesario insertar vibradores a distancias más cortas.

Es esencial que todas las partículas de agregado estén recubiertas uniformemente con una película de pasta de cemento, pero la evaluación de la trabajabilidad y la determinación del contenido necesario de agua no son fáciles. Una manera sencilla, aunque nada científica, de juzgar la consistencia de la mezcla es apretar fuertemente en la mano un poco del concreto, arrojarlo y observar el patrón de la lechada en la palma de la mano; si la mano está muy manchada, la mezcla es demasiado seca y friable; por el contrario, si la palma de la mano está cubierta de lechada, la mezcla está demasiado húmeda y, por consiguiente, tiene mayor densidad y menores propiedades de aislamiento térmico. Con la experiencia también se logra juzgar la consistencia a simple vista, pero los diferentes agregados darán distintas apariencias a la mezcla.

Cuando se toma la trabajabilidad como facilidad de compactación, para trabajabilidades iguales el concreto de agregado ligero registra menor revenimiento y factor de compactación que el concreto de peso normal. La razón para esto es que el efecto de la gravedad es menor en el caso del material ligero. Puesto que la penetración de la esfera de Kelly es independiente de la gravedad, el valor registrado en

la prueba de la esfera de Kelly no se ve afectado por el -- agregado. Sin embargo, cuando la gravedad deba hacer la compactación por sí misma práctica nada recomendable, es el revenimiento o el factor de compactación el que proporciona el indicio correcto.

Por lo anterior puede observarse que un revenimiento de 50 a 75 mm representa una elevada trabajabilidad y que un -- factor de compactación no menor de 0.8, o un tiempo de Vebe de menos de 12 segundos corresponden aproximadamente a una -- trabajabilidad mediana. Un exceso de revenimiento de 75 a -- 100 mm puede causar segregación con grandes partículas ligeras de agregado flotando en la superficie. Asimismo, la vibración prolongada puede ocasionar segregación mucho más rápido que con agregados de peso normal.

Si los agregados están secos en el momento, de introducirlos en la mezcladora, absorberán agua rápidamente y la -- trabajabilidad de la mezcla decrecerá pronto. Por lo tanto, cuando el concreto está hecho con un agregado ligero que tiene gran velocidad de absorción, pero bajo contenido inicial de humedad es conveniente, primero, mezclar el agregado al -- menos con la mitad del agua de mezclado y, sólo entonces, -- añadir el cemento a la mezcladora. Este procedimiento impide que se formen bolas de cemento y que se pierda revenimiento.

La naturaleza porosa de la superficie de las partículas del agregado se incrementa al triturarlas en la producción -- de partículas más pequeñas. En consecuencia, puede ser preferible no usar agregado ligero fino y mejorar la trabajabilidad empleando agregado fino de peso normal, pero la densidad y la conductividad térmica de dichos concretos son mayores que cuando se emplea agregado fino de peso ligero. No -- obstante, debido a la trabajabilidad mejorada, se observa -- una reducción en el requerimiento de agua de la mezcla con -- arena natural y, a veces, también en el contenido de cemento. La sustitución de finos ligeros por arena se hace normalmen-

te con base en volúmenes iguales; se realiza sustitución parcial o total. En el último caso, se ha sugerido una reducción en el contenido de agua del 12 al 24% en comparación -- con mezclas integrales de agregado ligero. El concreto con sustitución total por arena tiene un módulo de elasticidad -- más elevado que el concreto integral de agregado ligero de -- un 10 a un 30%, lo que depende del agregado empleado y del -- nivel de resistencia de la mezcla. La contracción se reduce del 15 al 35%. La sustitución parcial por arena afecta -- estas propiedades en proporción a la fracción del agregado -- fino sustituido.

La trabajabilidad de las mezclas de agregado ligero que tienden a ser ásperas también puede mejorarse considerablemente mediante la inclusión de aire; se reduce el requerimiento de agua, y con él la tendencia al sangrado y a la segregación. Los contenidos normales de aire total por volumen son: del 4 al 8% para agregado de 19 mm (3/4 de pulgada) de tamaño máximo; del 5 al 9% para agregado de 9.5 mm (3/8 de pulgada) de tamaño máximo.

El contenido de aire que exceda de estos valores reduce la resistencia a la compresión en aproximadamente 10.5 Kg/cm<sup>2</sup> por cada punto adicional en el porcentaje del aire.

La mayoría de los agregados ligeros tienen absorción rápida y elevada, pero es posible impermeabilizar el agregado mediante un recubrimiento bituminoso aplicado con un proceso especial. Cuando no se hace esto, el agregado puede absorber una cantidad considerable de agua durante el mezclado, -- lo cual causa un incremento en la densidad del concreto y un descenso en su valor de aislamiento térmico. En algunos casos, el agua absorbida puede representar hasta un 25% del -- peso del agregado; esta masa de agua no contribuye a la trabajabilidad de la mezcla.

Cuando se emplea agregado ligero en concreto reforzado, debe prestarse atención especial a la protección del acero --

de refuerzo contra la corrosión. Las mediciones de la profundidad de la carbonatación, es decir, la profundidad a la que puede ocurrir corrosión en condiciones favorables, han demostrado que con algunos agregados ligeros esta profundidad puede ser hasta del doble de la afectada con agregado normal. El comportamiento de los diferentes agregados varía considerablemente, pero por lo general con agregados ligeros es conveniente aplicar una cubierta más gruesa al acero de refuerzo. En el caso del concreto hecho con agregado de clinker es necesario aplicar recubrimiento al acero debido al peligro adicional de corrosión por la presencia de azufre, pero el empleo de agregado de clinker en el concreto refuerza do es poco común.

Todos los concretos hechos con agregado ligero muestran más movimiento de humedad del que suele observarse en el caso del concreto de peso normal. Presentan una elevada contracción inicial por secado, del 5 al 40% más que el concreto normal, pero la contracción total con algunos agregados ligeros puede ser aún más elevada; los concretos hechos con arcilla y esquistos expandidos y escoria espumosa de alto horno están dentro del rango de contracción inferior. En vista de la resistencia a la tensión relativamente baja del concreto ligero, existe mucho peligro de agrietamiento por contracción, aunque el menor módulo de elasticidad y la mayor extensibilidad del concreto ligero proporcionan cierta compensación. La relación entre las resistencias a la tensión y a la compresión del concreto con agregado ligero es, por lo menos, la misma que en el concreto normal, excepto para concretos de resistencia muy elevada. En concreto aireado la relación es más alta; alrededor de 0.3. Generalmente deben proporcionarse juntas de contracción y, tomando las debidas precauciones, pueden evitarse los problemas ocasionados por el movimiento de humedad.

En lo que se refiere a otras características generales de los concretos ligeros parece que la fluencia, considerada con base en la relación esfuerzo/resistencia, es del mismo -

orden que para el concreto normal, pero debe darse margen para el módulo de elasticidad, generalmente inferior, del agregado ligero. Se ha sugerido que la fluencia a largo plazo del concreto ligero es en cierto modo superior, pero esto no ha sido confirmado. La relación de Poisson parece ser similar a la del concreto de peso normal. El módulo de elasticidad es de aproximadamente 1/2 a 3/4 del concreto de peso normal de la misma resistencia.

La velocidad de adquisición de resistencia del concreto ligero es similar a la del concreto normal en las mismas condiciones de curado, pero generalmente es menos sensible a la falta de curado húmedo. Debido a la naturaleza del agregado, la resistencia a la abrasión del concreto de agregado ligero no es muy buena. Por otra parte, la resistencia a la congelación es excelente, excepto cuando el agregado ha sido saturado antes de mezclarlo.

La absorción de sonido del concreto ligero puede considerarse como buena porque la energía del sonido transportada por el aire se convierte en calor dentro de los diminutos canales del concreto, de manera que el coeficiente de absorción del sonido es aproximadamente el doble que el del concreto de peso normal. Sin embargo, una superficie enlucida presentaría una reflexión del sonido mucho mayor. El concreto ligero no posee propiedades de aislamiento acústico particularmente buena, ya que este aislamiento es mejor cuanto mayor es la densidad del material.

La tabla 4.1 proporciona algunos valores del coeficiente de expansión térmica. Si se comparan con los de la figura 4.1.1 puede observarse que el concreto agregado ligero tiene generalmente menos expansión térmica que el concreto de peso normal.

Esto puede ocasionar algunos problemas cuando se emplean concreto ligero y concreto de peso normal uno junto a otro.

Cabe señalar que la baja expansión térmica del concreto de agregado ligero reduce la tendencia al alabeo o al pandeo cuando las dos caras de un elemento de concreto se exponen a temperaturas diferentes. Asimismo, la baja conductividad -- térmica del concreto reduce el aumento de temperatura del -- acero ahogado.

TABLA 4.1 Coeficiente de expansión térmica de concretos elaborados con agregado ligero.

Tipo de agregado empleado	Coeficiente lineal de expansión térmica (determinado sobre el rango de -22°C a 52°C) 10 <sup>-6</sup> por°C
Piedra pómez	9.4 a 10.8
Perlita	7.6 a 11.0
Vermiculita	8.3 a 14.2
Cenizas Industriales	aproximadamente de 3.8
Esquisto Expandido	6.5 a 8.1
Escoria Expandida	7.0 a 11.2

El concreto de agregado ligero no presenta problemas especiales con respecto a la congelación y al deshielo, ya que es poco probable que los grandes poros del agregado queden saturados, siempre que la pasta de cemento esté protegida -- por el aire incluido.

La resistencia del concreto de agregado ligero al fuego es, por lo general, mayor que la del concreto normal (tabla 4.2), porque el concreto de agregado ligero tiene menor tendencia a descascararse; este concreto también pierde una proporción menor de su resistencia original con el aumento de temperatura.

En la tabla 4.3 se presenta un resumen de las propiedades de diferentes concretos ligeros. Debe hacerse énfasis -- en que los valores incluidos son típicos, pero no necesariamente límite. Además, la densidad del concreto se especifica en condiciones de secado al horno, las cuales son más cómodas para fines de comparación, ya que se pueden reproducir, aunque no es la condición del concreto en la práctica.

A diferencia del concreto estructural ligero de textura cerrada mencionado anteriormente, los bloques prefabricados y muros hechos en obra con fines no estructurales se elaboraron con concreto de textura alveolada. Esta se obtiene empleando mayor cantidad de agregado grueso ligero en la mezcla, con la correspondiente reducción de la cantidad de agregado fino. Este tipo de concreto es bastante similar al concreto sin finos.

La resistencia del concreto ligero empleado para propósitos no estructurales no es de primordial importancia; los requisitos principales son; aislamiento térmico, buena superficie para el enlucido y que no haya un alto grado de contracción. Con frecuencia son importantes las propiedades de retención de clavos y, en el caso de bloques prefabricados, la facilidad de corte.

TABLA 4.2 Estimación de la resistencia de muros huecos de mampostería al fuego.

Tipo de agregado empleado	Espesor mínimo equivalente para evaluaciones de:			
	4h mm	3h mm	2h mm	1h mm
Escoria expandida o piedra pómez	119	102	81	53
Esquisto o arcilla expandida	145	122	96	66
Piedra caliza, cenizas industriales o escoria sin expandir	150	127	102	69
Grava Calcárea	157	135	107	71
Grava silíceas	170	145	114	76

TABLA 4.3 Propiedades Típicas de los Concretos Ligeros.

Tipo de Concreto		Peso Volu-	Proporciones	Densidad	Resistencia	Contracción	Conductividad
		métrico del agregado, Kg/m <sup>3</sup>	de la mezcla por volumen cemento: agregado	del concreto en seco, Kg/m <sup>3</sup>	a la compra sión, Kg/cm <sup>2</sup>	por secado, 10 <sup>-6</sup>	térmica, J/m <sup>2</sup> s°C/m
Aireado	ccp*	950	1:3	750	49	700	0.19
	arena	1 600	1:3	900	56		0.22
Aireado y procesado en autoclave		-	-	800	42	600	0.25
Escoria espumosa	Fina	900	1:8	1 700	70	400	0.45
	Gruesa	650	1:6 1:3.5	1 850 2 100	211 422	500 600	0.69 0.76
Arcilla expandida en horno rotatorio	Fina	700	1:11	650-1 000	28-42	-	0.17
			1:6	1 100	141	550	0.31
	Gruesa	400	1:5 1:4	1 200 1 300	176 197	600 700	0.38 0.40
Arcilla expandida en horno rotatorio con arena natural	Gruesa	400	1:5	1 350-1 500	176	-	0.57
Arcilla expandida producida en cor- dón de sinterización	Fina	1 050	1:5	1 500	246	600	0.55
	Gruesa	650	1:4	1 600	316	750	0.61
Pizarra expandida en horno rotatorio	Fina	950	1:6	1 700	281	400	0.61
	Gruesa	700	1:4.5	1 750	352	450	0.69

Cont....

TABLA 4.3 (continuación) Propiedades Típicas de los Concretos Ligeros.

Tipo de Concreto		Peso Volu- métrico del agregado, Kg/m <sup>3</sup>	Proporciones de la mezcla por volumen cemento: agregado	Densidad del concreto en seco, Kg/m <sup>3</sup>	Resistencia a la compre- sión, Kg/cm <sup>2</sup>	Contracción por secado, 10 <sup>-6</sup>	Conductividad térmica, J/m <sup>2</sup> s°C/m
Ceniza volante sinterizada y pulverizada	Fina	1 050	1:5.9	1 490	204	300	-
			1:5.3	1 500	253	300	-
	Gruesa	800	1:4.5	1 540	309	350	-
			1:3.1	1 570	408	400	-
Ceniza Volante sinterizada y pulverizada con arena natural	Gruesa	800	1:6.1	1 670	204	300	-
			1:5.5	1 700	253	300	-
			1:5.0	1 750	309	350	-
			1:3.6	1 790	408	400	-
Piedra pómez	500-800	1:6	1 200	141	1 200	-	
		1:4	1 250	197	1 000	0.14	
		1:2	1 450	295	-	-	
Vermiculita exfoliada	65-130	1:6	300-500	21	3 000	0.10	
Perlita	95-130	1:6	-	-	2 000	0.05	

Nota: \* cop - ceniza combustible pulverizada (ceniza volante).

#### 4.5 DISEÑO DE MEZCLAS DE AGREGADO LIGERO.

La 'ley' de la relación agua/cemento se aplica al concreto hecho con agregado ligero de la misma manera que al concreto de agregado normal, y es posible seguir el procedimiento usual de diseño de mezclas cuando se emplea agregado ligero. Es muy difícil, sin embargo, determinar qué cantidad de agua total de la mezcla es absorbida por el agregado y cuánta, en realidad, ocupa espacio dentro del concreto, es decir, forma parte de la pasta de cemento. Esta dificultad la causa no sólo el elevado valor de la absorción de agua de los agregados ligeros -en algunos casos hasta del 20%- , sino también el hecho de que la absorción varía mucho en velocidad y con algunos agregados, puede continuar a una velocidad apreciable durante varios días. Parece, entonces, extremadamente difícil determinar de manera confiable la densidad relativa bruta del agregado saturado y superficialmente seco.

Así pues la relación neta agua/cemento dependería de la velocidad de absorción en el momento de hacer la mezcla, y no sólo del contenido de humedad del agregado. Por lo tanto la consideración de la relación agua/cemento en los cálculos para el diseño de mezclas es bastante difícil. Por esta razón, es preferible dosificar con base en el contenido de cemento, aunque en el caso del agregado ligero redondeado, con una superficie recubierta o sellada y una absorción relativamente baja es directamente aplicable el método estándar de diseño de mezclas.

Por lo general, el agregado ligero producido por medios artificiales está totalmente seco y tiene tendencia a la segregación. Cuando el agregado se satura antes de mezclarlo la resistencia del concreto resultante es del 5 al 10% menor que cuando se emplea agregado seco, para el mismo contenido de cemento y la misma trabajabilidad. Esto se debe al hecho de que, en este último caso, parte del agua de mezclado es absorbida antes del fraguado, cuando ha contribuido a la trabajabilidad en el momento del colado. Además, la densidad -

del concreto hecho con agregado saturado es más elevada y su durabilidad, especialmente su resistencia a las heladas, es inigualable. Por otra parte, cuando se emplea agregado de gran absorción es difícil obtener una mezcla bastante trabajable y a la vez cohesiva, por lo que, en general, los agregados con absorción superior al 10% se remojan previamente.

Es importante señalar que el agregado ligero inicialmente húmedo contiene por lo general más agua total absorbida - después de una corta inmersión en agua, que el agregado inicialmente seco sumergido en agua durante el mismo período. La razón para esto es quizá que una pequeña cantidad de agua que apenas humedece una partícula de agregado no permanece - en los poros de la superficie, sino que se difunde hacia - - adentro y llena los pequeños poros interiores. De acuerdo - con Hanson, esto libra del agua a los poros grandes de la su - perficie, por lo que, con la inmersión, aceptan un influjo - de agua casi tan grande como cuando el agregado no contiene agua absorbida inicialmente.

El método de diseño de mezclas del American Concrete Ins - titute, puede aplicarse a agregados en cualquier condición - de humedad. El método no requiere de la determinación de la absorción o la densidad relativa del agregado ligero, ya que las mezclas de prueba forman la base del diseño. Sin embar - go, debe conocerse el contenido real de humedad del agregado y debe mantenerse constante para todas las mezclas.

En muchos agregados ligeros la densidad relativa de las partículas varía según su tamaño, siendo las partículas fi - nas más pesadas que las grandes. Por lo tanto, con base en el peso, el porcentaje de material más fino tiene que ser ma - yor que en el caso de agregado normal. En lo que se refiere a la dosificación, el volumen ocupado por cada fracción de - tamaño, y no su peso, es lo que determina el volumen final - de cavidades, el contenido de pasta y la trabajabilidad de - la mezcla. Un agregado bien graduado con un volumen mínimo de cavidades requiere sólo una cantidad moderada de cemento,

y posiblemente produzca concreto con contracción por secado y movimiento térmico relativamente reducidos.

Cuando el tamaño máximo del agregado es de 19mm (3/4 de pulgada) el agregado fino forma por lo general del 40 al 60% del volumen total del agregado, medido con agregado seco y -suelto. Con frecuencia es conveniente comenzar con volúmenes iguales de agregado fino y grueso y hacer los ajustes necesarios. Se hace una mezcla de prueba con la trabajabilidad requerida y un contenido dado de cemento. No es aconsejable una consistencia demasiado húmeda (digamos con revenimiento de 75 mm), ya que puede ocurrir segregación, bien sea por separación del mortero o porque las partículas grandes de agregado floten en la superficie. A partir del conocimiento del contenido de humedad del agregado y de la densidad del concreto, pueden deducirse las proporciones de la mezcla. Se acostumbra hacer tres mezclas de prueba, cada una con diferente contenido de cemento, pero con la trabajabilidad requerida. Así puede obtenerse una relación entre el contenido de cemento y la resistencia, para una consistencia dada. Una idea general de esta relación se muestra en la tabla 4.4., pero los valores reales para los diferentes agregados varía ampliamente.

Las proporciones de las diversas mezclas de prueba pueden relacionarse con la primera mezcla de trabajabilidad satisfactoria mediante el empleo del llamado factor de densidad relativa, que es una relación entre el peso del agregado seco y el espacio que ocupa. Este espacio es el volumen del concreto menos el volumen absoluto del cemento y menos el volumen del agua, incluyendo la absorbida durante el mezclado. La diferencia entre un factor de densidad relativa y la densidad relativa real reside en no dar margen para la absorción de agua, pero para determinado agregado, en ciertas condiciones de humedad, el volumen del agua absorbida durante el mezclado es aproximadamente constante. Así pues, el factor de densidad relativa puede emplearse como si fuera la densidad relativa real. El factor tiene, por supuesto, dis-

tinto valor para el agregado fino y para el agregado grueso.

TABLA 4.4 Relación aproximada entre la resistencia del concreto de agregado ligero y su contenido de cemento.

Resistencia a la compresión de cilindros estandar	Contenido de cemento
Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
176	de 250 a 420
211	de 280 a 450
281	de 330 a 510
352	de 390 a 560

#### 4.5.1. EJEMPLO:

Supongamos que las densidades sueltas y secas de los -- agregados fino y grueso son 897 y 705 Kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

La suma de los volúmenes brutos de los dos agregados en 1 metro cúbico de concreto fluctúa por lo general entre 1.1 y 1.22 m<sup>3</sup>. Supongamos que en este caso se requieren 1.19m<sup>3</sup> y se emplean 0.60 m<sup>3</sup> de cada tamaño.

Entonces los pesos requeridos para un concreto con un -- contenido de cemento de 325 Kg/m<sup>3</sup> son:

Cemento	=	.325 Kg
Agregado fino = 0.60 x 897	=	538 Kg
Agregado grueso = 0.60 x 705	=	423 Kg
Total de agua para lograr la trabajabilidad requerida	=	288 Kg
Total	=	1 574 Kg

La densidad del concreto resultante es, entonces de: --  
1 574 Kg/m<sup>3</sup>.

Los volúmenes de los componentes son:

$$\text{Volumen absoluto de cemento} = \frac{325}{3.15 \times 1\,000} = 0.103\text{m}^3$$

$$\text{Volumen del agua} = \frac{288}{1\,000} = 0.288\text{ m}^3$$

Entonces, haciendo caso omiso de cualquier cantidad de -  
aire atrapado, el volumen del agregado es: 1 - (0.103 + - --  
0.288 = 0.609 m<sup>3</sup>; es decir, 0.305 m<sup>3</sup> de cada uno de los agre-  
gados.

Por lo tanto, los factores de densidad relativa son:

$$\text{Para el agregado fino: } \frac{538}{0.305 \times 1\,000} = 1.76$$

$$\text{Para el agregado grueso: } \frac{423}{0.305 \times 1000} = 1.39$$

Para dosificar ahora una mezcla con un contenido de ce-  
mento de 445 Kg por metro cúbico de concreto, suponemos inal-  
terado el requerimiento total de agua y conservamos igual el  
peso del agregado grueso. Por lo tanto, la relación entre  
el agregado fino y el grueso será inferior, pero el incremen-  
to en la cantidad de cemento proporciona algo de material fi-  
no. (Por supuesto, este argumento es aplicable también al -  
agregado normal).

Las cantidades requeridas serán entonces:

$$\text{Volumen absoluto de cemento} = \frac{445}{3.15 \times 1\,000} = 0.141\text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de agua (igual que el anterior)} = 0.288\text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de agregado grueso (Igual que el anterior)} = 0.305\text{ m}^3$$

$$\text{Total} = 0.734 \text{ m}^3$$

Así pues, el volumen requerido de agregado fino es de --  
 $1 - 0.734 = 0.266 \text{ m}^3$ , y su peso es de  $0.266 \times 1.75 \times 1\,000 =$   
466 Kg.

Una mezcla de prueba mostraría si es necesario hacer algún ajuste en el contenido de agua, y la medición real de la densidad del concreto mostraría si difiere del valor esperado de:

$$445 + 288 + 423 + 466 = 1\,622 \text{ Kg/m}^3$$

El método de diseño de mezcla precedente sufrió alteraciones en la revisión de 1969 de la norma del ACI 211.2-69 - (revisada en 1977) principalmente con respecto a la determinación del factor de densidad relativa. En el nuevo método, el factor se determina para cada agregado (fino o grueso) -- por método picnométrico directo. La determinación se hace con todos los contenidos de humedad que se espera encontrar. Las proporciones de mezcla, o sus ajustes, se calculan en este caso con base en los agregados en su condición real de humedad, aplicando el factor de densidad relativa apropiado y para la cantidad real de agua añadida. Puesto que los valores numéricos de los factores de densidad relativa anteriores y actuales no son los mismos, es importante referirse a este último como factor picnométrico de densidad relativa. Dicho factor es la relación entre el peso de agregado al ser introducido en la mezcladora y el volumen efectivo desplazado por el agregado. El peso del agregado incluye, por lo tanto, cualquier humedad, absorbida o libre, en el momento de colocar el agregado en la mezcladora.

Las mediciones picnométricas proporcionan el factor picnométrico de densidad relativa como,

$$S = \frac{C}{B - A + C}$$

donde A = peso del picnómetro con la muestra y lleno de agua al ras (por lo general después de una inmersión de 10 minutos).

B = Peso del picnómetro lleno de agua

C = Peso del agregado probado en la condición dada, húmedo o seco.

Empleando los factores picnométricos de densidad relativa es posible dar margen al hecho de que el requerimiento to tal de agua cambie realmente con los cambios de la condición de humedad de los agregados en el momento de mezclarlos.

Según la práctica en Inglaterra, los procedimientos de - diseño de mezcla que se aplican generalmente son similares - a los del concreto de peso normal, y se apoyan en los requisitos de granulometría establecidos por la BS 3797; parte 2 1976. Esta norma prescribe la granulometría de agregados -- gruesos de tamaño normal y de un solo tamaño (tabla 4.5) y - permite dos zonas de granulometría para el agregado fino (ta bla 4.6). La norma admite que diferentes tipos de concreto, ligero requieren agregados con diferentes granulometrías y - que una granulometría particular adecuada para emplearse con un tipo de agregado ligero puede no ser adecuada para otro - tipo de agregado. Sin embargo, la relación de agregado lige ro fino con agregado ligero grueso debe ser por lo general - inferior para agregados en la Zona L2 que para los de la Zo- na L1 de la tabla 4.6, así como para mezclas con contenidos más elevados de cemento. La selección de la relación corre cta es particularmente importante, ya que la granulometría -- del agregado fino se aproxima al límite inferior de la Zona L1 o al límite superior de la Zona L2.

Cabe señalar que el material que pasa por la malla de -- 150 m (núm. 100 ASTM) representa la frontera entre las dos zonas. Este material puede ser útil para reducir la segrega ción, en especial de las mezclas pobres.

TABLA 4.5 Requisitos de granulometría para agregado ligero grueso señalados por la BS-3797; parte 2; 1976

Tamaño de la malla (mm)	Porcentajes por peso que pasan los tamices BS					
	Tamaño nominal del agregado graduado (mm)			Tamaño nominal del agregado de un solo tamaño (mm)		
	20 a 5	14 a 5	10 a 2.36	20	14	10
37.5	100	-	-	100	-	-
20.0	95-100	100	-	85-100	100	-
14.0	-	95-100	100	-	90-100	100
10.0	30-60	50-90	85-100	5-25	20-45	85-100
5.0	0-10	0-15	15-50	0-5	0-10	15-35
2.36	-	-	0-15	-	-	0-5

Para fines de comparación, en la tabla 4.7 se incluyen los requisitos de granulometría de la norma ASTM C 330-77.

Debe señalarse que los valores de las tablas 4.5 a 4.7 están basados en el peso; debido al incremento en la densidad relativa de cualquier agregado ligero y a la reducción del tamaño de la partícula, los porcentajes de material fino no son tan elevados como puede parecer a primera vista.

TABLA 4.6 Requisitos de granulometría para agregado ligero fino señalados por la BS 3797; parte 2; 1976.

Tamaño de la malla.	Porcentajes por peso que pasan los tamices BS	
	Zona de granulometría L1	Zona de granulometría L2
10.00 mm	100	100
5.00 mm	90-100	90-100
2.36 mm	55-95	60-100
1.18 mm	35-70	40-80
600 m	20-50	30-60
300 m	10-30	25-40
150 m	5-19	20-35

NOTA: Se toleran determinados valores de una zona específica cada, excepto para el porcentaje máximo que pasa por el tamiz de 150 m en el caso de la Zona de granulometría L1, y del mínimo en el caso de la Zona de granulometría L2.

TABLA 4.7 Requisitos de granulometría para agregados ligeros para concreto estructural señalados por la norma ASTM C 330-77.

Tamaño de la malla ASTM		Porcentaje por peso que pasa los tamices ASTM							
		Tamaño nominal del agregado grueso graduado					Agregado fino	Tamaño nominal del fino y agregado grueso combinados	
		1" a 1/2" (25 mm- 12.5 mm)	1" a No. 4 (25 mm- 4.75 mm)	3/4" a No. 4 (19 mm- 4.75 mm)	1/2" a No. 4 (12.5 mm- 4.75 mm)	3/8" a No. 8 (9.5 mm- 2.36 mm)		1/2" (12.5 mm)	3/8" (9.5 mm)
1"	(25.0 mm)	95-100	95-100	100	-	-	-	-	-
3/4"	(19.0 mm)	-	-	90-100	100	-	-	100	-
1/2"	(12.5 mm)	0-10	25-60	-	90-100	100	-	95-100	100
3/8"	(9.5 mm)	-	-	20-60	40-80	80-100	100	-	90-100
No. 4	(4.75 mm)	-	0-10	0-10	0-20	5-40	85-100	50-80	65-90
8	(2.36 mm)	-	-	-	0-10	0-20	-	-	35-65
16	(1.18 mm)	-	-	-	-	-	40-80	-	-
50	(300 m)	-	-	-	-	-	10-35	5-20	10-25
100	(150 mm)	-	-	-	-	-	5-25	2-15	5-15

#### 4.6 CONCRETO AIREADO.

Como se mencionó anteriormente, un medio de obtener concreto ligero es introducir burbujas de gas dentro de la mezcla fluida de cemento y arena para producir un material de estructura celular, bastante similar al hule espuma, que tenga celdas de tamaños entre 0.1 y 1 mm. La "piel" de las celdas debe ser capaz de resistir el mezclado y la compactación. Por esta razón, el concreto resultante se conoce como concreto celular o aireado. Hablando estrictamente, en este caso el término concreto es inapropiado, ya que la mezcla no suele contener agregado grueso. Existen dos métodos básicos para producir la aireación, dándose un nombre apropiado al producto final de cada uno.

El Concreto Gasificado se obtiene por una reacción química que genera gas en el mortero fresco, de manera que al fragar contiene ya gran número de burbujas de gas. El mortero debe tener la consistencia correcta para que el gas pueda expandir el mortero sin escaparse. Por lo tanto, deben hacerse coincidir la velocidad de evolución del gas, la consistencia del mortero y su tiempo de fraguado. Lo que se emplea con más frecuencia, es polvo de aluminio finalmente dividido, en una proporción del orden del 0.2% del peso del cemento.\* La reacción del polvo activo con un hidróxido de cal--cio o álcali libera hidrógeno, el cual forma las burbujas; - también puede emplearse una aleación de zinc en polvo o de - aluminio; algunas veces se emplea peróxido de hidrógeno, el cual genera oxígeno.

\*El polvo de aluminio se emplea también en la lechada para concreto postensado con el fin de asegurar el llenado completo de la cavidad por la lechada en expansión.

El Concreto Espumoso se produce por la adición de un - agente espumante a la mezcla (por lo general alguna forma de proteína hidrolizada o jabón de resina) que introduce y estabiliza las burbujas de aire durante el mezclado a alta velo-

cidad. En algunos procesos, una espuma estable preformada - se agrega al mortero durante el mezclado en una mezcladora - normal.

El concreto aireado puede contener o no agregado, siendo más frecuente lo segundo en el caso de concreto no estructural para aislamiento contra el calor, cuando puede obtenerse una densidad de  $300 \text{ Kg/m}^3$  y excepcionalmente más baja, de --  $200 \text{ Kg/m}^3$ . Las mezclas más comunes tienen densidades entre  $500$  y  $1\ 100 \text{ Kg/m}^3$ , cuando se emplea una mezcla de cemento - y arena muy fina o molida. Al igual que en otros concretos ligeros, la resistencia varía en proporción a la densidad, y lo mismo sucede con la conductividad térmica. Hoff sugiere - que la resistencia del concreto celular puede expresarse como función del contenido de cavidades, considerado como la - suma de vacíos inducidos y el volumen de agua evaporable. Un concreto con una densidad de  $500 \text{ Kg/m}^3$  tendría una resistencia de  $32$  a  $42 \text{ Kg/cm}^2$  y una conductividad térmica de alrededor de  $0.1 \text{ J/m}^2 \text{ s}^\circ\text{C/m}$ . Para un concreto con densidad de -  $1.400 \text{ Kg/m}^3$  los valores correspondientes serían de aproximadamente  $127$  a  $141 \text{ Kg/cm}^2$  y de  $0.4 \text{ J/m}^2 \text{ s}^\circ\text{C/m}$ . Comparando, - la conductividad del concreto normal es alrededor de  $10$  veces mayor. Debe recordarse que la conductividad térmica se incrementa linealmente con el contenido de humedad; cuando - este es del  $20\%$ , la conductividad es por lo general de casi el doble que cuando el contenido de humedad es cero.

La figura 4.3 muestra los valores de resistencia para -- una mezcla con un contenido de cemento de  $390 \text{ Kg/m}^3$ . Normalmente el módulo de elasticidad del concreto aireado es de --  $1.8 \times 10^4$  a  $3.5 \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$ . La fluencia expresada con base en la relación esfuerzo/resistencia es sensiblemente la - misma que la del concreto normal.

El concreto aireado tiene gran movimiento térmico, elevada contracción y considerable movimiento de humedad (bastante más elevado que el concreto de agregado ligero de la misma resistencia), pero es posible reducir todos mediante el -

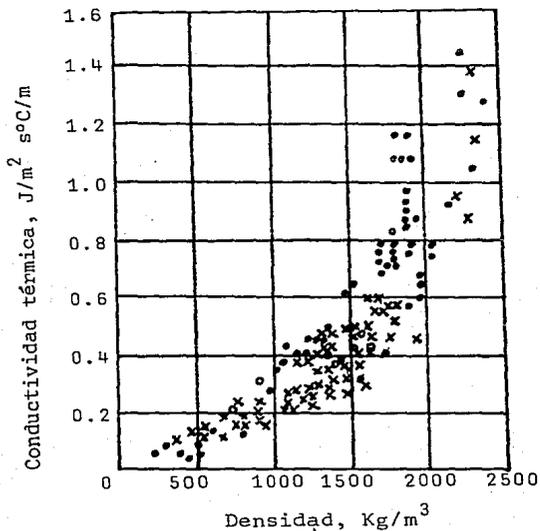


FIG. 4.2 Conductividad térmica de concretos de agregado ligero de diversos tipos.

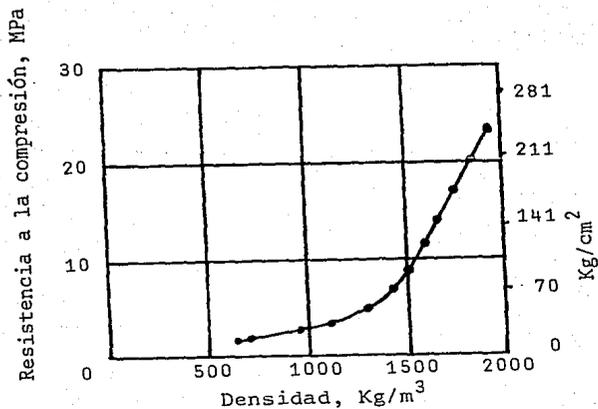


FIG. 4.3 Relación entre la resistencia a la compresión y la densidad húmeda de concreto aireado hecho con 390 - Kg/m<sup>3</sup> de contenido de cemento.

curado con vapor a alta presión, que también mejora la resistencia a la compresión (véase la figura 4.4).

Cuando el concreto se va a curar con vapor a alta presión (en autoclave), generalmente se añade material puzolánico a la mezcla, o se emplea ceniza pulverizada de combustible (ceniza volante) en vez del agregado fino; también se emplea escoria de alto horno. Puede emplearse cal en la mezcla, como en el Ytong sueco; un producto similar, Siporex, emplea una base de cemento. Algunas propiedades comunes se enumeran en la tabla 4.8.

La permeabilidad al aire del concreto aireado curado en autoclave disminuye al aumentar su contenido de humedad, pero, incluso cuando el concreto está seco, su permeabilidad a presiones bajas (como las generadas por el viento) es insignificante.

El concreto aireado se utiliza principalmente para muros divisorios con fines de aislamiento térmico por su baja conductividad térmica, y como protección contra el fuego, gracias a que ofrece mayor resistencia al fuego que el concreto normal. Estructuralmente se le emplea mucho en forma de bloques o elementos prefabricados curados con vapor a alta presión, pero también puede emplearse para la construcción de pisos en vez de piso hueco de mosaico. Recientemente se ha probado el concreto aireado flotante para capas ligeras de aislamiento.

El concreto aireado puede aserrarse y se le pueden introducir clavos; es bastante durable ya que, a pesar de su elevada absorción de agua, la velocidad de penetración a éstas a través del concreto es lenta porque los poros grandes no se llenan por succión. Por esta razón el concreto aireado tiene una resistencia a la congelación relativamente buena y, si está enlucido, puede emplearse en la construcción de muros. Existen algunos agentes espumantes especiales que proporcionan al concreto características repelentes al agua, pe

TABLA 4.8 Propiedades típicas del concreto aireado y procesado en autoclave (curado con vapor a alta presión)

Densidad en seco	Resistencia típica a la compresión (probada en húmedo)	Módulo de elasticidad	Conductividad térmica a 3% de contenido de humedad
Kg/m <sup>3</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup> Kg/cm <sup>2</sup>	J/m <sup>2</sup> s°C/m
500	29	1.4	0.16
600	36	1.8	0.19
700	-	-	0.21
750	36	2.9	-
800	43	3.3	0.23
830	46	-	-
880	61	-	-
900	-	-	0.27
1000	-	-	0.30

ro su comportamiento durante largos períodos está aún por --comprobarse. El concreto aireado no tratado no debe exponerse a una atmósfera agresiva.

El acero de refuerzo sin protección en el concreto aireado sería vulnerable a la corrosión, aun cuando el ataque externo no fuera muy severo. Por lo tanto, el acero de refuerzo debe tratarse remojándolo en un líquido anticorrosivo adecuado; se han encontrado satisfactorias las soluciones bituminosas y las resinas epóxicas. El cemento de hule látex es apropiado cuando el concreto se cura en autoclave, ya que la capa protectora se vulcaniza y, entonces, la adherencia del acero es especialmente buena, en tanto que otros recubrimientos anticorrosivos afectan en forma nociva la adherencia.

#### 4.7 CONCRETO SIN FINOS.

El concreto sin finos es una forma de concreto ligero obtenido cuando se prescinde del agregado fino, es decir, formado sólo de cemento, agua y agregado grueso.

El concreto sin finos es, por lo tanto, un aglomerado de partículas de agregado grueso rodeadas por un recubrimiento de pasta de cemento de hasta 1.3 mm de espesor. Existen, -- por consiguiente, grandes poros dentro del cuerpo del concreto que son la causa de su baja resistencia, pero su gran tamaño significa que no puede tener lugar ningún movimiento capilar de agua.

Aunque la resistencia del concreto sin finos es considerablemente menor que la del concreto de peso normal, dicha resistencia, junto con la carga muerta más baja de la estructura, es suficiente para edificios de hasta 20 pisos, así como para muchas otras aplicaciones. Puesto que el concreto sin finos no se segrega, puede colocarse desde una altura -- considerable y en elementos de gran elevación. El costo del concreto sin finos es relativamente bajo, ya que tiene poco cemento; en mezclas pobres puede ser hasta de 70 a 130 Kg de cemento por metro cúbico de concreto. Esto se debe a la -- ausencia de un área superficial grande de partículas de arena, que tendría que cubrirse con pasta de cemento.

La densidad del concreto sin finos depende principalmente de la granulometría del agregado. Puesto que el agregado bien graduado se compacta a pesos volumétricos más elevados que cuando todas las partículas son de un solo tamaño, el -- concreto sin finos de peso volumétrico bajo se obtiene con -- agregado de un solo tamaño. El tamaño habitual es de 9.5 a 19 mm (de 3/8 a 3/4 de pulgada), y se permite un 5% de tamaño mayor y un 10% de tamaño menor, pero no debe haber material menor de 4.76 mm (3/16 de pulgada). Ocasionalmente se han empleado partículas hasta de 50 mm. Para agregado con -- determinada densidad relativa el empleo de agregado graduado

daría como resultado una densidad un 10% más elevada que - - cuando se emplea agregado de un solo tamaño. Con agregado - normal la densidad del concreto sin finos oscila entre 1 600 y 2 000 Kg/m<sup>3</sup>, pero si se utiliza agregado ligero, puede obtenerse concreto sin finos con peso muy bajo, 840 kg/m<sup>3</sup>. No es recomendable el empleo de agregado triturado con bordes - agudos, ya que puede ocurrir trituración local bajo carga.

La densidad del concreto sin finos se calcula simplemente como la suma del peso volumétrico del agregado (en estado de compactación apropiado), más el contenido de cemento en - Kg/m<sup>3</sup>, más el contenido de agua en Kg/m<sup>3</sup>. Esto se debe a +- que el concreto sin finos se compacta muy poco y, de hecho, el vibrado se puede aplicar sólo por períodos muy breves, ya que de lo contrario se corre la pasta de cemento. No es recomendable el varillado, pues puede producir elevada densidad local, pero se requiere tener cuidado para evitar el - - efecto de arco. No existen pruebas de trabajabilidad para - concreto sin finos; lo más adecuado es la verificación vi- - sual para asegurar el recubrimiento uniforme de todas las -- partículas.

TABLA 4.9 Datos típicos para un concreto sin finos, con agregado de 9.5 a 19 mm (de 3/8 a 3/4 de pulgada).

Relación agregado/ cemento por volumen	Relación agua/ cemento por peso	Densidad Kg/m <sup>3</sup>	Resistencia a la compresión a los 28 días. Kg/cm <sup>2</sup>
6	0.38	2 020	148
7	0.40	1 970	120
8	0.41	1 940	102
10	0.45	1 870	70

La resistencia del concreto sin finos a la compresión - varía por lo general entre 14 y 141 Kg/cm<sup>2</sup>, lo que depende - principalmente de su densidad, la cual se rige por el conte- nido de cemento (figura 4.5). La relación agua/cemento co- mo tal no es el factor de control más importante y, de hecho existe una relación agua/cemento óptima muy estrecha para -- cualquier agregado dado. Una relación agua/cemento más ele- vada que la óptima haría que la pasta de cemento se drenara por entre las partículas de agregado, mientras que con una - relación agua/cemento demasiado baja la pasta no sería lo su- ficientemente adhesiva y no podría lograrse la composición - apropiada.

Es bastante difícil predecir la relación agua/cemento óp- tima, en particular porque ésta se ve afectada por la absor- ción del agregado; sin embargo, como regla general, el conte- nido de agua de la mezcla puede tomarse como de 180 Kg por - metro cúbico de concreto. La relación agua/cemento depende- rá entonces del contenido de cemento necesario para recubrir bien el agregado; generalmente, la relación agua/cemento es de 0.38 a 0.52. La resistencia resultante debe determinarse mediante pruebas. El incremento de la resistencia con el -- tiempo se produce de la misma forma que en concreto normal. El módulo de ruptura es por lo general del 30% de la resis- tencia a la compresión, es decir, relativamente más elevado que para concreto normal.

En la práctica, las mezclas varían dentro de un rango -- bastante amplio, con el límite pobre entre una relación agre- gado/cemento de 1:10 por volumen (correspondiente a un conte- nido de cemento aproximado de 130 Kg/m<sup>3</sup>) y una mezcla de - - 1:20 por volumen (con un contenido de cemento de 70 Kg/m<sup>3</sup>).

Puesto que el concreto sin finos exhibe muy poca cohe- sión, las cimbras no deben retirarse hasta que se haya desa- rrollado suficiente resistencia para mantener junto el mate- rial. El curado húmedo es importante especialmente en cli- mas secos o en lugares de mucho viento, debido al escaso es-

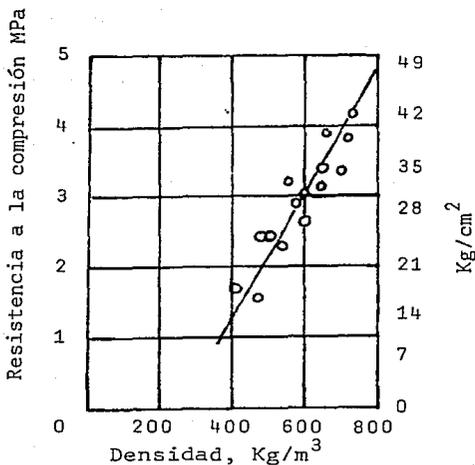


FIG. 4.4 Relación entre la resistencia y la densidad del -- concreto aireado curado con vapor a alta presión.

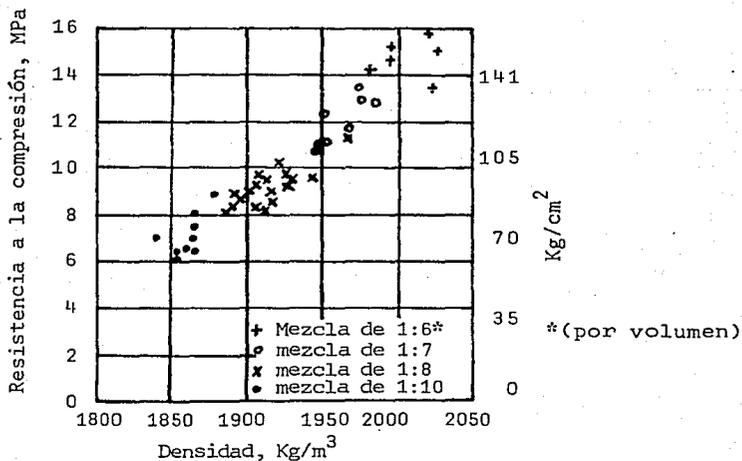


FIG. 4.5 Resistencia a la compresión del concreto sin finos a la edad de 28 días en función de su densidad en el momento de la prueba.

pesor de la pasta de cemento.

Se sabe relativamente, poco respecto a las diversas propiedades físicas del concreto sin finos. Los valores más comunes del módulo de elasticidad para concretos de diferentes resistencias se proporcionan en la siguiente tabla.

TABLA                      Valores Módulo de Elasticidad.

Resistencia a la Compresión Kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad 10 <sup>5</sup> Kg/cm <sup>2</sup>
49	1.1
35	0.9
25	0.7

La contracción del concreto sin finos es considerablemente menor que la del concreto normal; un valor típico es de  $120 \times 10^{-6}$ , pero puede ser hasta de  $200 \times 10^{-6}$  cuando la humedad relativa es extremadamente baja. Esto se debe a que la pasta de cemento está presente sólo en forma de cubierta delgada y la contracción por secado está restringida en gran parte por el agregado. Puesto que la pasta tiene un área superficial grande expuesta al aire, la velocidad de contracción es muy elevada; el movimiento total puede completarse en un poco más de un mes y la mitad de la contracción puede ocurrir en 10 días.

El movimiento térmico del concreto sin finos es aproximadamente de 0.6 a 0.8 del que se observa en el concreto normal, pero el valor real del coeficiente de expansión térmica depende, por supuesto del tipo de agregado empleado.

Debido a la ausencia de capilares, el concreto sin finos es altamente resistente a la congelación, siempre que los poros no estén saturados, en cuyo caso la congelación causaría una rápida desintegración. No obstante, su gran ab

sorción de agua hace que el concreto sin finos no sea adecuada para cimentaciones, ni para ubicaciones en las que tenga que estar en contacto con agua. La absorción máxima puede ser tan elevada como del 25% por volumen, o la mitad de dicha cantidad por peso, pero en condiciones normales el agua absorbida no excede de una quinta parte del máximo. Sin embargo, los muros externos deben enlucirse por ambos lados, lo que también tiene el objeto de reducir la permeabilidad al aire. El enlucido y la pintura reducen la propiedad de absorber el sonido del concreto sin finos (debido a que cierran los poros), por lo que cuando se consideran de primordial importancia las propiedades acústicas un lado del muro debe quedar sin enlucido.

El coeficiente de conductividad térmica del concreto sin finos fluctúa entre 0.69 y 0.94  $J/m^2 \text{ s}^\circ C/m$ , cuando se emplea agregado normal, pero es de sólo 0.22  $J/m^2 \text{ s}^\circ C/m$  con agregado ligero. Sin embargo, un elevado contenido de humedad en el concreto incrementa apreciablemente la conductividad térmica.

Normalmente el concreto sin finos no se emplea para concreto reforzado, pero, si se requiere, el acero de refuerzo debe recubrirse con una capa delgada, de 3 mm, de pasta de cemento para mejorar las características de adherencia y evitar la corrosión. La manera más fácil de recubrir el acero de refuerzo es aplicar concreto lanzado.

#### 4.8 CONCRETO CON ASERRIN.

En ocasiones se requiere hacer concreto Clavable, lo -- cual se logra empleando aserrín como agregado. El concreto -- clavable es un material en el que se pueden introducir cla-- vos y los retiene firmemente. Esta última aseveración se ha -- ce porque, por ejemplo, en algunos de los concretos de peso -- muy ligero pueden introducirse clavos fácilmente, pero no -- quedan sujetos con firmeza. La propiedad de aceptar clavos -- es necesaria en la construcción de ciertos tipos de techado, -- en unidades prefabricadas para casas habitación, etc. Debi-- do a su gran movimiento de humedad, el concreto con aserrín -- no debe emplearse en ubicaciones en las que esté expuesto al -- agua.

El concreto con aserrín consta de partes por volumen -- aproximadamente iguales de cemento Portland, arena y aserrín -- de pino, con el agua necesaria para dar un revenimiento de -- 25 a 50 mm. Dicho concreto se adhiere bien al concreto nor-- mal y es un buen aislante. El aserrín debe estar limpio y -- sin cantidades apreciables de corteza, ya que ésta introduce -- un elevado contenido orgánico y altera las reacciones de hi-- dratación. Es recomendable someter al aserrín a tratamiento -- químico para evitar efectos adversos sobre el fraguado y la -- hidratación, para impedir que el aserrín se pudra y para -- reducir el movimiento de humedad. Los mejores resultados se -- obtienen con aserrín de tamaño de criba entre 6.3 mm (1/4 de -- pulgada), y 1.18 mm (núm. 16 ASTM), pero debido al variable -- comportamiento de las diferentes clases de aserrín, se reco-- mienda hacer mezclas de prueba. El concreto con aserrín -- tiene una densidad entre 650 y 1 600 Kg/m<sup>3</sup>.

El concreto clavable también puede hacerse con algunos -- otros agregados como la escoria, escoria expandida, piedra -- pómez y perlita.

Otros desechos de madera, tales como las astillas y viru -- tas, debidamente tratadas con productos químicos, también se

han empleado para hacer concreto que no sea de carga, con -- densidad de 800 a 1 200 Kg/m<sup>3</sup>. En algunos países se han empleado cáscaras de arros e incluso de trigo para hacer con-- creto, pero no son éstos materiales de gran importancia. -- También pueden usarse gránulos de corcho.

Asimismo, se han empleado materiales orgánicos sintéti-- cos, por ejemplo, poliestireno expandido, que tiene un peso volumétrico menor de 10 Kg/m<sup>3</sup> y produce concreto con propiedades aislantes particularmente buenas. Una mezcla con 410 Kg de cemento por metro cúbico tiene una densidad de 550 - - Kg/m<sup>3</sup> y una resistencia de 21 Kg/m<sup>2</sup>. Sin embargo, debido a una amplia disparidad en la densidad de los componentes de - la mezcla, el mezclado es difícil y puede requerirse un gran volumen de aire incluido hasta un 15%. Aún no se han desa-- rrollado técnicas de colado completamente satisfactorias.

## TEMA V

### ELABORACION DE CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA

#### 5.1 INTRODUCCION:

Las propiedades del concreto de alta resistencia (por ejemplo de resistencia a la compresión a los 28 días superior a 422 o 492 Kg/cm<sup>2</sup>), dependen de factores adicionales a los considerados en el diseño de Concreto Normal por lo que debe modificarse el procedimiento de diseño de mezcla. Estamos considerando, por supuesto, concreto cuya alta resistencia se logra mediante dosificaciones adecuadas y no mediante curado con vapor o aplicación de presión. La principal diferencia reside en el hecho de que la trabajabilidad de la mezcla y el tipo de tamaño máximo del agregado (que, supuestamente, tiene un topo elevado de resistencia), así como el requisito de resistencia influyen en la selección de la relación agua/cemento.

Por consiguiente, además del tipo de agregado grueso, debe conocerse ya sea la relación agregado/cemento o la trabajabilidad; a fin de elegir la relación agua/cemento adecuada para la resistencia requerida. Por esto, Entroy y Shacklock, han realizado gráficas empíricas que relacionan la resistencia a la compresión con un 'número de referencia' arbitrario, para concretos hechos con agregados gruesos de grava irregular y de granito triturado. Las gráficas para los dos agregados, respectivamente, se reproducen en las figuras 5.1 y 5.2 para mezclas con cemento Portland normal, y en las figuras 5.3 y 5.4 para mezclas de cemento Portland de fraguado rápido.

Una vez obtenido el número de referencia para la resistencia deseada, la relación agua/cemento para dar la trabajabilidad requerida se encuentra con la ayuda de las figuras 5.5 y 5.6 para agregados con tamaño máximo de 19.05 mm. (3/4 de pulgada) y de 9.52 mm (3/8 de pulgada), respectivamente.

Resistencia a la compresión, MPa

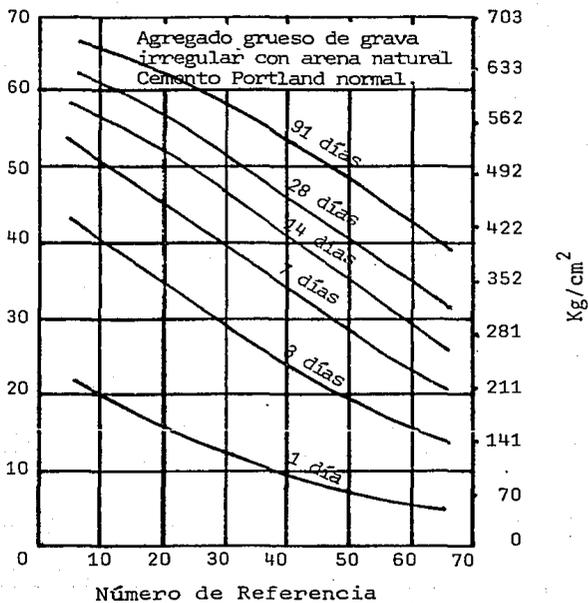
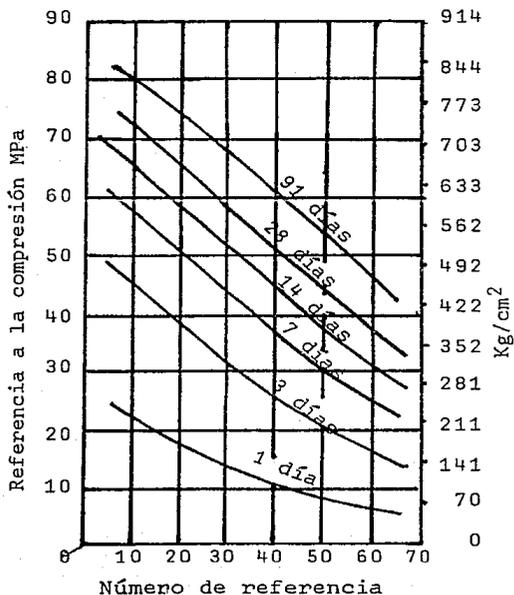


FIG. 5.1. Relación entre la resistencia a la compresión de cubos de 102 mm y el "número de referencia" para mezclas que contienen agregado grueso de grava irregular, arena natural y cemento Portland normal.

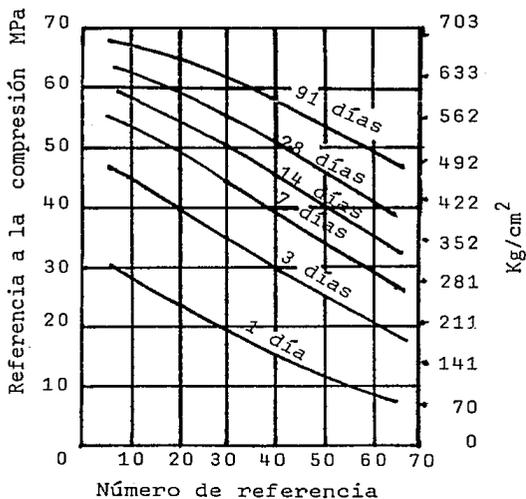


Agregado grueso de grani-  
to triturado con arena -  
natural.  
Cemento Portland normal

FIG. 5.2. Relación entre la resistencia a la compresión y el "número de referencia" para mezclas que contienen agregado grueso de granito triturado, arena natural y cemento Portland normal.

Agregado grueso de grava irregular con arena natural.  
Cemento Portland de fraguado rápido.

FIG. 5.3. Relación entre la resistencia a la compresión y el "número de referencia" para mezclas que contienen agregado grueso de grava irregular, arena natural y cemento Portland de fraguado rápido.



La relación agregado/cemento puede ahora encontrarse a - partir de las tablas 5.1 y 5.2. Los valores indicados en di- chas tablas se obtuvieron con agregados que contenían un 30% de material que pasaba por la malla de 4.76 mm (3/16 de pul- gada), por lo que debieron hacerse ajustes adecuados para -- otras granulometrías.

Debido a la considerable variación en las propiedades de los agregados gruesos, los datos proporcionados en esta se- ción son aún menos precisos que los de la Road Note No. 4 y, por tanto, deben prepararse mezclas de prueba en las etapas preliminares del diseño de mezclas.

Debemos añadir una nota de advertencia: en elementos - - grandes deben observarse las consecuencias del intenso calor de hidratación que surge por el elevado contenido de cemen- to. El aumento de temperatura puede afectar el fraguado. -- Asimismo, la contracción puede ser excesiva.

## 5.2 EJEMPLO:

Se requiere una mezcla de muy baja trabajabilidad con -- resistencia a la compresión media a los 28 días de 598 Kg/--  $\text{cm}^2$ , utilizando cemento Portland normal y agregado de 19.05 mm (3/4 de pulgada), ya sea de grava irregular o de granito triturado.

La tabla que se incluye a continuación indica los núme-- ros de referencia de las figuras 5.1 y 5.2, así como los va- lores correspondientes de la relación agua/cemento de la fi- gura 5.5. La tabla 5.1 indica, entonces, la relación agrega- do/cemento para cada mezcla. Dadas las relaciones agua/ce-- mento y agregado/cemento, así como las densidades relativas de los materiales (digamos 2.6 para todos los agregados), el contenido de cemento de la mezcla puede calcularse aplicando la fórmula del Método de Cálculo por Volumen Absoluto, que - se explica a continuación:

TABLA 5.1 Relación agregado/cemento (por peso) requerida para proporcionar cuatro grados de trabajabilidad con diferentes relaciones agua/cemento empleando cemento Portland normal.

Tipo de agregado grueso*	Grava irregular								Granito triturado.								
	19.05 mm (3/4")				9.52 mm (3/8")				19.05 mm (3/4")				9.52 mm (3/8")				
Tamaño máximo del agregado	EB	MB	B	M	EB	MB	B	M	EB	MB	B	M	EB	MB	B	M	
Relación agua/cemento por peso	0.30	3.0	-	-	-	2.4	-	-	-	3.3	-	-	-	2.9	-	-	
	0.32	3.8	2.5	-	-	3.2	-	-	-	4.0	2.6	-	-	3.6	2.3	-	
	0.34	4.5	3.0	2.5	-	3.9	2.6	-	-	4.6	3.2	2.6	-	4.2	2.8	2.3	
	0.36	5.2	3.5	3.0	2.5	4.6	3.1	2.6	-	5.2	3.6	3.1	2.6	4.7	3.2	2.7	2.3
	0.38	-	4.0	3.4	2.9	5.2	3.5	3.0	2.5	-	4.1	3.5	2.9	5.2	3.6	3.0	2.6
	0.40	-	4.4	3.8	3.2	-	3.9	3.3	2.7	-	4.5	3.8	3.2	-	4.0	3.3	2.9
	0.42	-	4.9	4.1	3.5	-	4.3	3.6	3.0	-	4.9	4.2	3.5	-	4.4	3.6	3.1
	0.44	-	5.3	4.5	3.8	-	4.7	3.9	3.3	-	5.3	4.5	3.7	-	4.8	3.9	3.3
	0.46	-	-	4.8	4.1	-	5.1	4.2	3.6	-	-	4.8	4.0	-	5.1	4.2	3.6
	0.48	-	-	5.2	4.4	-	5.4	4.5	3.8	-	-	5.1	4.2	-	5.5	4.5	3.8
	0.50	-	-	5.5	4.7	-	-	4.8	4.1	-	-	5.4	4.5	-	-	4.7	4.0

\* Arena natural empleada en combinación con los dos tipos de agregado grueso.

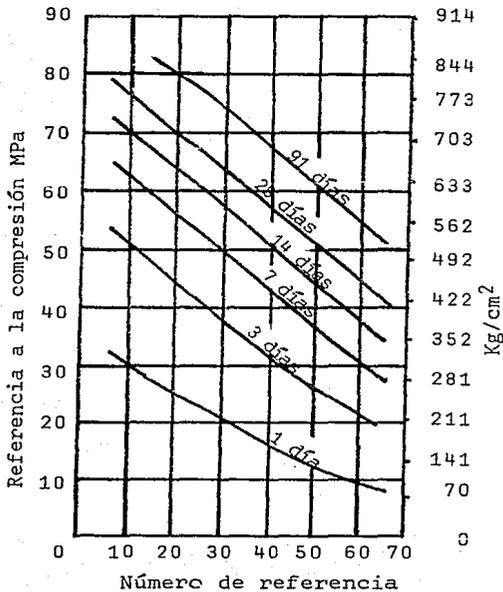
EB = Extremadamente bajo; MB = Muy bajo; B = Bajo; M = Medio.

TABLA 5.2 Relación agregado/cemento (por peso) requerida para proporcionar cuatro grados de trabajabilidad con diferentes relaciones agua/cemento, empleando cemento Portland de fraguado rápido.

Tipo de agregado grueso*	Grava irregular								Granito triturado								
	19.05 mm (3/4")				9.52 mm (3/8")				19.05 mm (3/4")				9.52 mm (3/8")				
Tamaño máximo del agregado	EB	MB	B	M	EB	MB	B	M	EB	MB	B	M	EB	MB	B	M	
Relación agua/cemento por peso	0.32	2.6	-	-	-	-	-	-	2.9	-	-	-	2.5	-	-	-	
	0.34	3.4	2.2	-	-	2.8	-	-	3.6	2.4	-	-	3.2	-	-	-	
	0.36	4.1	2.7	2.3	-	3.5	2.4	-	4.3	2.9	2.4	-	3.9	2.5	-	-	
	0.38	4.8	3.2	2.8	2.3	4.2	2.9	2.4	-	4.9	3.4	2.9	2.4	4.5	3.0	2.5	-
	0.40	5.5	3.7	3.2	2.7	4.9	3.3	2.8	2.3	5.5	3.9	3.3	2.7	5.0	3.4	2.9	2.4
	0.42	-	4.2	3.6	3.0	-	3.7	3.1	2.6	-	4.2	3.6	3.0	5.5	3.8	3.2	2.7
	0.44	-	4.6	4.0	3.4	-	4.1	3.5	2.9	-	4.7	4.0	3.3	-	4.2	3.5	3.0
	0.46	-	5.0	4.3	3.7	-	4.5	3.8	3.2	-	5.1	4.3	3.6	-	4.6	3.8	3.2
	0.48	-	5.5	4.7	4.0	-	4.9	4.1	3.5	-	5.5	4.6	3.9	-	5.0	4.1	3.4
	0.50	-	-	5.0	4.3	-	5.2	4.4	3.7	-	-	4.9	4.1	-	5.3	4.4	3.7

\*Arena natural empleada en combinación con los dos tipos de agregado grueso.

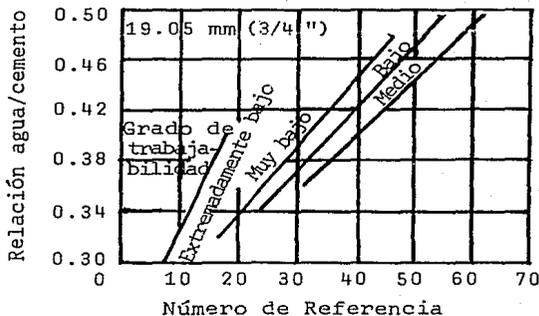
EB = Extremadamente bajo; MB = Muy bajo; B = Bajo; M = Medio.



Agregado grueso de granito triturado con arena natural. Cemento Portland de Fraguado rápido.

FIG. 5.4 Relación entre la resistencia a la presión y el "número de referencia" para mezclas que contienen agregado grueso de granito triturado, arena natural y cemento Portland de Fraguado rápido.

FIG. 5.5. Relación entre la relación agua/cemento y el "número de referencia" para tamaño máximo de agregado de 19.05 mm (3/4").



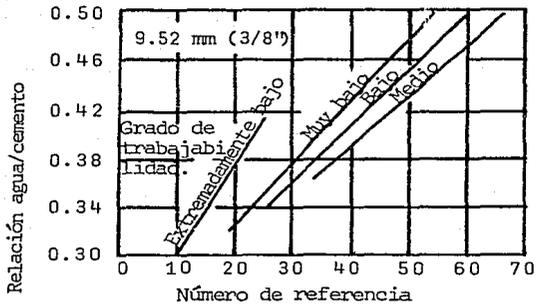


FIG. 5.6 Relación entre la relación agua/cemento y el "número de referencia" para tamaño máximo de agregado - de 9.52 mm (3/8").

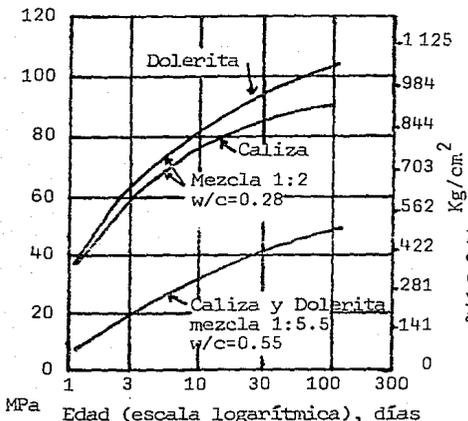
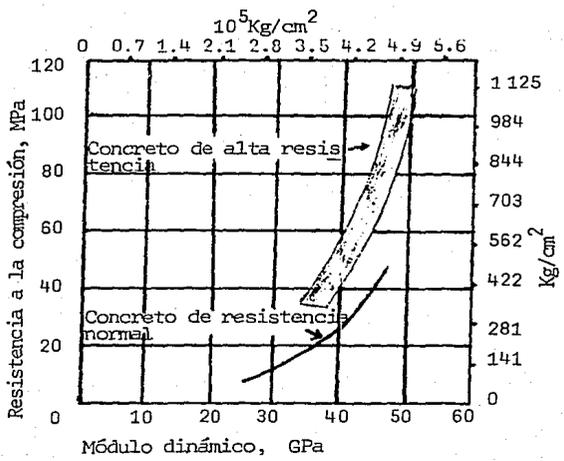


FIG. 5.7 Relación entre la edad y la resistencia para concretos de resistencia muy alta y normales elaborados con dos agregados.

FIG. 5.8 Relación entre la resistencia y el módulo dinámico de elasticidad para concreto de resistencia muy alta.



Se obtiene mediante un cálculo sencillo, empleando el -- llamado método de volumen absoluto, que presupone que el volumen del concreto compactado es igual a la suma de los volúmenes absolutos de todos los componentes.

Es común calcular las cantidades de los componentes para producir 1 metro cúbico de concreto. Entonces, si W, C, A<sub>1</sub> y A<sub>2</sub> son los pesos requeridos de agua, cemento, agregado fino y agregado grueso respectivamente; para un metro cúbico -- tenemos:

$$\frac{W}{1\ 000} + \frac{C}{1\ 000p_c} + \frac{A_1}{1\ 000p_1} + \frac{A_2}{1\ 000p_2} = 1$$

donde p con el sufijo apropiado representa la densidad relativa de cada material. Puesto que la densidad del agua -- (1000) se expresa en Kilogramos por metro cúbico, el volumen total tiene que expresarse en metros cúbicos.

Los cálculos de diseño de mezcla proporcionan los valores de W/C, C/(A<sub>1</sub>+A<sub>2</sub>) y A<sub>1</sub>/A<sub>2</sub>, de donde pueden deducirse los valores de W, C, A<sub>1</sub> y A<sub>2</sub>.

Cuando se encuentra presente algún componente adicional, como una puzolana, o cuando el agregado grueso o fino se encuentra en más de un apilamiento, se añaden a la ecuación -- términos adicionales de forma similar. Cuando hay aire incluido presente, en un porcentaje de a% del volumen del concreto, la parte de la derecha de la ecuación del metro cúbico sería:

$$1 \times 1 - \frac{a}{100}$$

C representa el contenido de cemento en Kilogramos por metro cúbico del concreto y W representa el contenido de agua en -- las mismas unidades; esto último no debe confundirse con la relación agua/cemento.

Al comparar diversas mezclas, a veces es conveniente convertir rápidamente la relación agregado/cemento a contenido de cemento, o viceversa; la figura 5.9 facilita dicha conversión.

Cuando el agregado contiene humedad libre cuyo peso es - un porcentaje  $m$  del peso del agregado seco, entonces los pesos del agua agregada,  $W$  y del agregado (mojado) deben ajustarse.

El peso del agua libre en  $A'$  Kg de agregado es  $x$ , de manera que,

$$\frac{m}{100} = \frac{x}{A' - x}$$

y el peso del agregado grueso es  $A = A' - x$ . Donde,

$$x = \frac{Am}{100}$$

Este peso se añade a  $A$  para obtener el peso del agregado mojado por lote,  $A(1 + m/100)$ , y se resta de  $W$  para obtener el peso del agua agregada,  $W - Am/100$ .

Generalmente cada fracción de tamaño de agregado tiene - diferente contenido de humedad y la corrección debe aplicarse a  $A_1, A_2$ , etc., con un valor apropiado de  $m$ .

Tipo de agregado grueso	Número de referencia	Relación Agua/cemento	Relación Agregado/cemento	Contenido de cemento Kg/m <sup>3</sup>
Grava irregular	21	0.35	3.2	526
Granito triturado	37	0.43	5.1	370

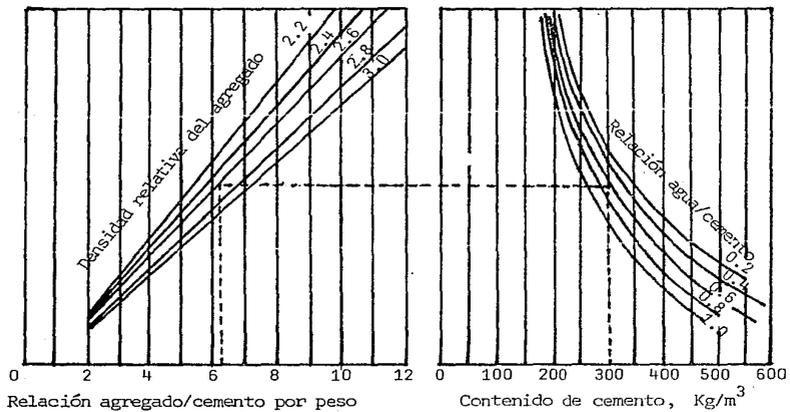


FIG. 5.9 Gráfica de conversión para relación agregado/cemento y contenido de cemento (cortesía de la Cement and Concrete Association).

El empleo de granito triturado produce una mezcla más po  
bre, pero la elección del agregado dependería, naturalmente,  
de su disponibilidad y costo. Ahora deben hacerse las mez--  
clas de prueba, seguidas de ajustes de granulometría y dosi-  
ficación de mezcla, según se requiera.

### 5.3 CONCRETO DE RESISTENCIA MUY ELEVADA:

El concreto de resistencia muy elevada, bastante mayor - que las consideradas hasta ahora, puede obtenerse empleando técnicas especializadas, pero no existen procedimientos de - diseño de mezcla de este tipo.

Son posibles las resistencias hasta de  $1\ 406\ \text{Kg/cm}^2$ , empleando técnicas comerciales de combinación de presión y vibración. El empleo de agregado aglutinante también eleva la resistencia del concreto, proporcionando una mejor resistencia de adherencia entre la pasta de cemento y el agregado, - pero su costo es, naturalmente, bastante elevado.

Pueden obtenerse más fácilmente resistencias hasta de --  $984\ \text{Kg/cm}^2$ . El mezclado de la lechada a alta velocidad es - uno de los medios disponibles; el costo adicional es moderado. Los vibradores electromagnéticos operados a frecuencias hasta de  $5\ 000\ \text{Hz}$  pueden compactar el cemento, no sólo el -- agregado, a una densidad mayor. Pero aun las técnicas y materiales convencionales pueden producir dichas resistencias; Parrott empleó una mezcla 1:2 con un 90% de agregado de 3.52 a 4.76 mm (de 3/8" a 3/16"), 10% de agregado fino, cemento Portland tipo fraguado rápido y relación agua/cemento de 0.28 (véase la figura 5.7). Cabe señalar que la gran diferencia entre la resistencia de esta mezcla y una convencional se -- puede observar después de un día; la adquisición posterior - de resistencia no es mucho mayor. La resistencia a la ten-- sión de dichas mezclas también es mayor pero parece que exis te un tope de aproximadamente  $63\ \text{Kg/cm}^2$ .

Parenchio y Klieger hicieron concretos con resistencia - hasta de  $816\ \text{Kg/cm}^2$ , medida en cilindros estándar a los 28 días, empleando relación agua/cemento de 0.3, contenido de - cemento tipo III de casi  $600\ \text{Kg/m}^3$  y tamaño máximo de agrega do de 4.75 mm (3/16"), que rinde un contenido de pasta de ce mento del 36% por volumen.

El empleo de concreto de muy elevada resistencia requiere cuidado en el diseño estructural, ya que las deformaciones implicadas son grandes. Asimismo, la relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia no es la misma en lo que se refiere a que el incremento en la resistencia no va acompañado por el incremento en el módulo (véase la figura - 5.8).

Así pues, una relación esfuerzo/resistencia dada produciría una deformación mayor en elementos de concreto de muy elevada resistencia que cuando se emplean mezclas convencionales.

Pueden alcanzarse resistencias mucho más elevadas con el curado con vapor a alta presión; se han obtenido 1 737 -- -- Kg/cm<sup>2</sup> empleando cemento Portland de fraguado rápido, cuarzo triturado, agregado silíceo (8 mm de tamaño máximo) y superfluidificante; la relación agua/cemento era de 0.35 y la relación agregado/cemento era de 2.5. Después de 10 horas el concreto se curó con vapor a baja presión a 60°C, durante 5 u 8 horas y, posteriormente, se curó con vapor a alta presión, de 180 a 200°C, durante 15 horas. En tanto que el concreto resultante tuvo una deformación por falla de no menos de  $4\ 000 \times 10^{-6}$ , la curva esfuerzo-deformación fue casi lineal y la falla fue frágil.

## TEMA VI

### PRUEBAS DESTRUCTIVAS Y NO DESTRUCTIVAS PARA EL CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO ENDURECIDO

#### 6.1 INTRODUCCION:

Debido al proceso continuo de hidratación del concreto, el concreto tiende a aumentar su resistencia y en general, a mejorar sus características, con la edad. Este proceso de hidratación puede ser más o menos efectivo, según sean las condiciones de intercambio de agua con el ambiente después del colado. Por lo tanto, las propiedades del concreto endurecido, dependen generalmente de las condiciones de curado a través del tiempo, no obstante como veremos más adelante, existen otros factores que afectan a éstas.

Las principales propiedades y características del concreto endurecido, son las siguientes:

- Resistencia a la Compresión Simple
- Resistencia a la Tensión
- Resistencia a la Flexión
- Resistencia al Esfuerzo Cortante
- Resistencia a la Compresión Triaxial
- Resistencia a la Torsión
- Resistencia al Impacto
- Resistencia a la Fatiga
- Resistencia al Intemperismo
- Resistencia a la Abrasión
- Resistencia al Fuego
- Adherencia
- Permeabilidad
- Durabilidad
- Conductividad Térmica y Acústica
- Flujo Plástico
- Absorción de Radiaciones
- Contracción por Hidratación del Cemento
- Contracción por Secado.

- Expansión por Saturación
- Expansión por Reacción Química
- Expansión Térmica
- Módulo de Elasticidad a la Compresión
- Módulo de Elasticidad al Esfuerzo Cortante
- Coeficiente de Poisson
- etc.

De éstas la resistencia del concreto endurecido, se considera como su propiedad más importante, sin embargo, en algunos casos especiales, otras propiedades, tales como: impermeabilidad, durabilidad, conductividad térmica, etc., pueden resultar más valiosas. Además, muchas de las características deseables del concreto, aunque no todas, se relacionan - cualitativamente con su resistencia a la compresión, ya que ésta ofrece un panorama general de la calidad del concreto, porque está relacionada directamente con la estructura de la pasta de cemento endurecido. Sin embargo, la razón principal consiste en la importancia intrínseca que tiene dicha resistencia en el comportamiento de las estructuras de concreto, bajo la gama total de sollicitaciones a que pueden quedar sujetas.

Para determinar las características antes indicadas las pruebas de concreto endurecido pueden clasificarse en: ENSAYES DESTRUCTIVOS Y ENSAYES NO DESTRUCTIVOS. Las pruebas destructivas, se han venido usando desde hace muchos años, sin embargo, hasta la fecha no existe una prueba de este tipo -- que sea mundialmente aceptada; de aquí, que en diversos países se utilizan distintos métodos y técnicas. Por lo que -- respecta a pruebas no destructivas, éstas hacen posible probar repetidamente la misma muestra, y consecuentemente, estudiar la variación de las propiedades del concreto con el paso del tiempo.

A continuación se describen brevemente las pruebas de -- concreto endurecido que se usan comunmente en nuestro medio; de éstas las Pruebas Destructivas más comunes son: Prueba a

la Compresión Simple, Prueba de Flexión, Prueba Brasileña de Tensión; las Pruebas No Destructivas más comunes son: Prueba del Martillo de Rebote (Esclerómetro), Prueba de Resistencia a la Penetración (Pistola Windsor), Prueba de Pulsos Ultrasonico, Prueba de corazonces extraídos del Concreto Endurecido y Prueba de Extracción (Puil-Out) en Concreto Endurecido, -- los tres últimos tipos de pruebas son consideradas, por algunos autores, como pruebas semidestructivas

## 6.2 PRUEBA DE FLEXION:

El índice de resistencia a la flexión de concreto simple se obtiene del ensaye de vigas de sección cuadrada, simplemente apoyadas y sujetas a una o dos cargas concentradas, como puede observarse en la figura 6.1. Como en el caso de -- Pruebas de Resistencia a la Compresión, (NOM-C84-1966) existen Normas en las cuales se especifica también el modo de -- muestreo, el curado y las condiciones del ensaye, en nuestro medio, las normas usuales están basadas, entre otras, en las NOM-C-161-1974, C-160-1976.

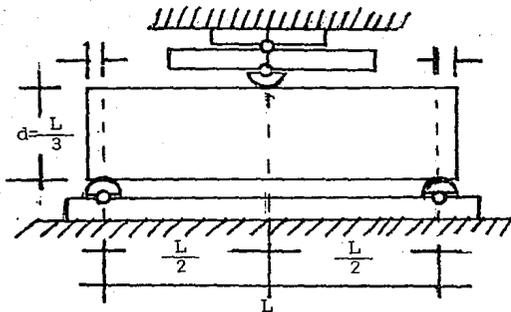
La resistencia en la flexión es mayor en especímenes sujetos a una carga concentrada que en aquellos sujetos a dos cargas simétricas porque en el segundo caso la zona de esfuerzos máximos se presentan en una porción mayor del espécimen, lo que aumenta las posibilidades de que una región de menor resistencia que la promedio se encuentre en dicha zona; como puede observarse en la figura 6.2, donde se presentan los resultados de módulos de ruptura de vigas de diferentes tamaños, sometidas a cargas concentradas en el centro y a los tercios del claro.

La resistencia a la flexión (NOM-C191-1978) se usa como índice de la resistencia de pavimentación de concreto simple. No obstante, el prisma de concreto simple se usa también para medir la resistencia del concreto en tensión (módulo de ruptura) originada por flexión.

## 6.3 PRUEBA BRASILEÑA DE TENSION:

Esta prueba es utilizada debido a las dificultades que existen para realizar un ensaye en tensión uniaxial, tensión pura.

Por lo tanto un método indirecto de aplicar la tensión en forma de separación longitudinal, es la prueba brasileña, llamada así por deberse a Fernando Carneiro, de Brasil, aun



posiciones opcionales para una varilla de acero y un rodillo de acero.

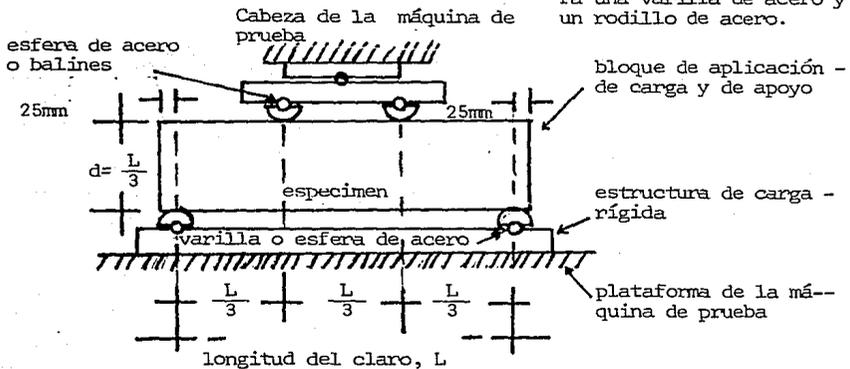


FIG. 6.1 Equipo para ensayar a flexión por el método de carga en los tercios y al centro del claro.

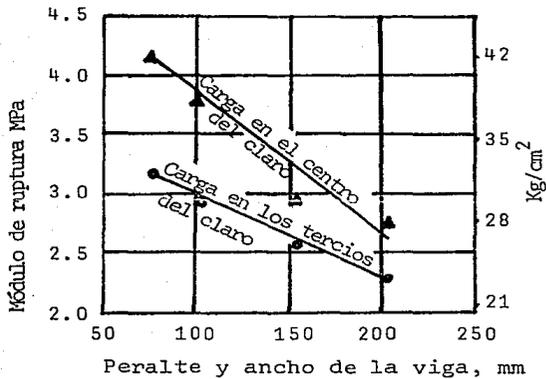
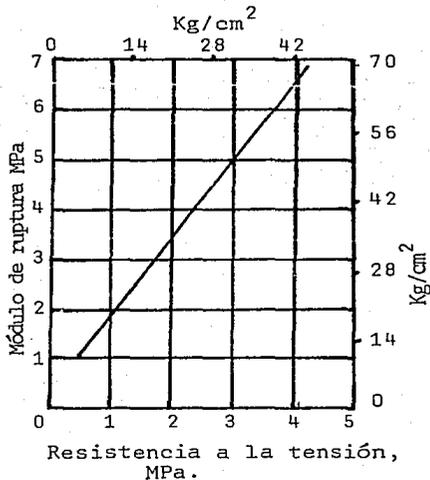


FIG. 6.2 Módulo de ruptura de vigas de diferentes tamaños.

FIG. 6.2 Relación entre el módulo de ruptura y la resistencia en tensión directa.



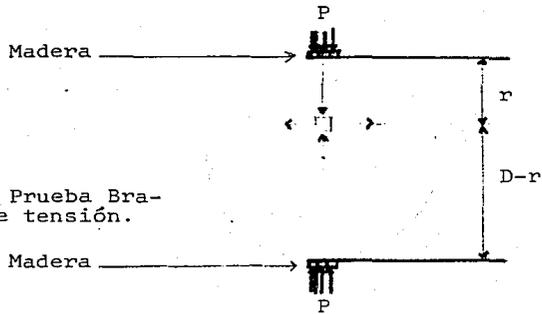


FIG. 6.3 Prueba Brasileña de tensión.

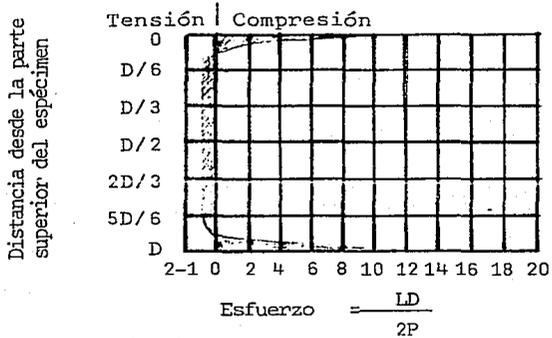
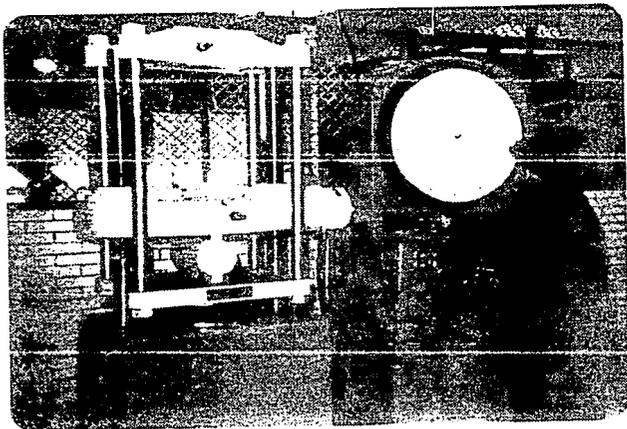
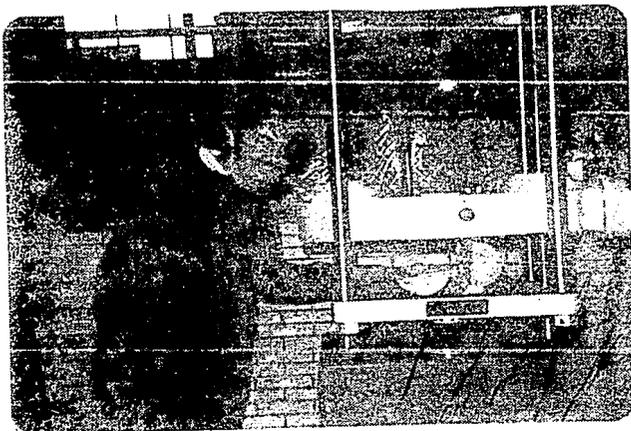


FIG. 6.3 Distribución del esfuerzo horizontal en un cilindro cargado sobre un ancho igual a  $1/12$  del diámetro.



Preparación del Equipo para efectuar la Prueba Brasileña de Tensión.



Cubo Fallado, Resultado de la Prueba Brasileña de Tensión.

cuando independientemente, también se desarrolló en Japón. En esta prueba; un cilindro de concreto de los que se utilizan para las pruebas de compresión se coloca con su eje en posición horizontal entre las platinas de una máquina de prueba, y se aumenta la carga hasta observar una falla de separación por compresión a lo largo del diámetro vertical.

En esencia consiste en someter un cilindro a compresión lineal diametral, como se muestra en la figura 6.3, la carga se aplica a través de un material relativamente suave, como triplay o corcho. Si el material fuera perfectamente elástico, se originarían esfuerzos de tensión uniformemente distribuidos en la mayor parte del plano diametral de carga, como se muestra en la figura 6.3. La resistencia en tensión se calcula con la expresión.

$$f_t = \frac{2P}{DL}$$

Dónde

P = Carga máxima

D = Diámetro del espécimen

L = Longitud del espécimen

El muestreo, curado y ensayo de los especímenes, deberá realizarse de acuerdo con las Normas establecidas, que para esta prueba están basadas.

La prueba brasileña se base en la NOM-C-163-1978 (determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto, es fácil de efectuar y produce resultados más uniformes que otras pruebas de tensión. La resistencia determinada en la prueba brasileña es, según se cree más apegada a la verdadera resistencia a la tensión del concreto que en el módulo de ruptura; la resistencia a la tensión longitudinal es del 5 al 12% más alta que la resistencia a la tensión directa. Otra de las ventajas de la prueba brasileña consiste en que se puede usar el mismo tipo de muestra para las pruebas de compresión y de tensión.

#### 6.4 RESISTENCIA A LA COMPRESION:

En virtud que la resistencia a la compresión del concreto, es la característica que se utiliza normalmente para definir la calidad de éste, hablaremos de las pruebas principales que se utilizan para medirla.

##### 6.4.1 PRUEBAS DE CORAZONES:

Cuando por algún motivo existen dudas sobre la resistencia de un elemento de concreto, se procede a extraer un corazón por medios de una herramienta cortante giratoria con diamante en sus bordes, estos especímenes pueden ser cilindros o prismas, dependiendo si se requieren para determinar la resistencia a la compresión o a la flexión, respectivamente. En la figura 6.4, se presenta un equipo de extracción de corazones.

Como en los casos anteriores, existen una Norma que especifica el modo de obtención, preparación y ensaye de especímenes de concreto endurecido para ensaye de resistencia a la compresión y flexión.

La resistencia de los corazones es, en general, inferior a la de los cilindros estándar, porque el curado en la obra es siempre de menor calidad que el curado bajo condiciones estándar de humedad. Además, la relación de la resistencia de corazones a la resistencia de cilindros estándar (de la misma edad) no es constante, sino que decrece al aumentar el nivel de resistencia del cilindro.

##### 6.4.2 PRUEBA DEL MARTILLO DE REBOTE:

Se han realizado diversos intentos para elaborar pruebas no destructivas, pero pocas han tenido éxito. Uno de los métodos que se le ha encontrado aceptación práctica, dentro de alcances limitados, es el de martillo de rebote, una prueba se llama también prueba de martillo de impacto o del esclerómetro

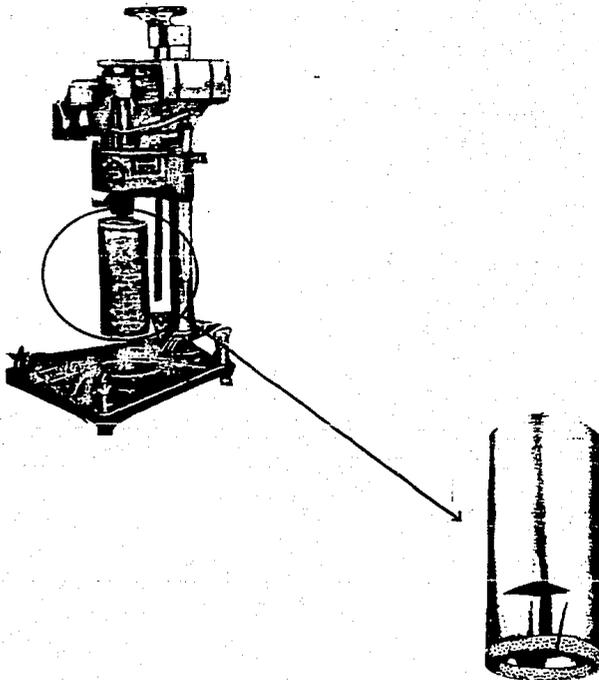


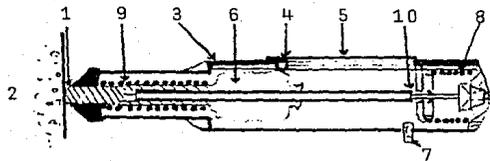
FIG. 6.4 Equipo para la extracción de corazones.

metro; en la figura 6.5 se muestra un esquema de éste.

Esta prueba se basa en el principio de que el rebote de una masa elástica depende de la dureza de la superficie en contra de la cual la masa incide. En la prueba del martillo de rebote, una masa impulsada por medio de un resorte recibe una determinada cantidad de energía al extender el resorte a una posición constante; esto se lleva a cabo al presionar el émbolo contra la superficie del concreto por probar. Al ser liberada la masa, rebota el émbolo que sigue en contacto con la superficie de concreto, y la distancia recorrida por la masa, que se expresa como porcentaje de la extensión inicial del resorte, se llama número de rebote; este número queda señalado por un indicador móvil sobre una escala graduada.

Esta prueba determina, en realidad, la dureza de la superficie de concreto y, aún cuando no existe una relación simple entre la dureza y la resistencia del concreto, se puede determinar relaciones empíricas para concretos similares, como la mostrada en la figura 6.6 y 6.7, donde podemos observar, que el número de rebote se ve afectado por factores tales como grado de saturación de la superficie, entre otros.

Esta prueba tiene carácter tan solo comparativo, y no se justifican las afirmaciones de algunos fabricantes de que el número de rebotes puede convertirse directamente a un valor de resistencia a la compresión. De cualquier manera, la prueba es útil como medida de la uniformidad del concreto y tiene gran valor para verificar la calidad del material sobre toda una estructura, es especial cuando se cuenta con una correlación entre el número de rebote y la resistencia a la compresión, determinada en pruebas destructivas del mismo tipo de concreto. Una utilidad más es, durante la construcción de una estructura de concreto, probar con el martillo para determinar si el número de rebote alcanza un valor que se conoce como correspondiente a la resistencia deseada.



- |                   |                                 |
|-------------------|---------------------------------|
| 1. Embolo         | 6. Masa                         |
| 2. Concreto       | 7. Botón asegurador de lectura. |
| 3. Camisa Tubular | 8. Resorte                      |
| 4. Guía           | 9. Resorte                      |
| 5. Escala         | 10. Seguro                      |

FIG. 6.5 Martillo de Rebote.

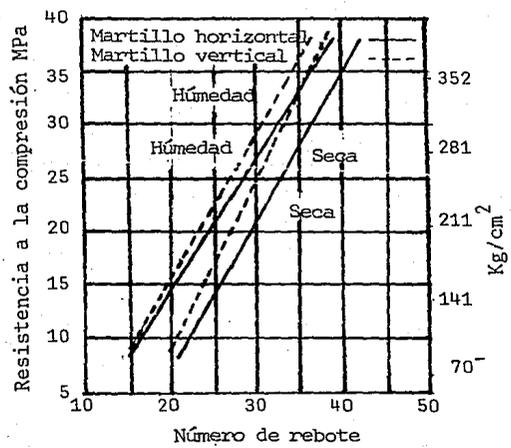


FIG. 6.6 Relación entre la resistencia a la compresión de los cilindros y el número de rebote, para lecturas de martillo en posición horizontal y vertical, sobre una superficie de concreto húmeda y seca.

#### 6.4.3 PRUEBA DE RESISTENCIA A LA PENETRACION:

Mediante la prueba con Pistola Windsor o de resistencia a la penetración, es posible calcular la resistencia del concreto a partir de la profundidad de penetración de un proyectil metálico impulsado por una carga estándar de pólvora. El principio básico es que, la penetración es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión del concreto, pero, en la escala de Mohs debe determinarse la dureza del agregado y esto no presenta dificultad. Hay cuadros publicados de la resistencia vs, la penetración (o longitud del sondeo expuesto) para agregados con dureza entre 3 y 7 en la escala, pero en la práctica la resistencia a la penetración debe relacionarse con la resistencia a la compresión de muestras de prueba estándar o corazones del concreto utilizado. En la figura 6.8 aparece una relación característica. Debe tenerse presente que la prueba mide básicamente la dureza, y no puede producir valores absolutos de resistencia, pero resulta de gran utilidad para determinar la resistencia relativa, es decir para comparaciones.

La prueba de resistencia a la penetración es por lo menos en parte, superior a la prueba del martillo de rebote, por que la medida no se limita a la superficie del concreto, sino en su profundidad; el Proyectil, fractura el agregado y comprime el material en el cual se introduce.

Los sondeos se hacen en grupos de tres en estrecha vecindad, y la penetración promedio se utiliza para estimar la resistencia.

#### 6.4.4 PRUEBA DE PULSO ULTRASONICO:

Aunque no existe una relación directa entre la velocidad de onda longitudinal en el concreto y la resistencia de éste, las dos cantidades si tienen una relación directa con el peso específico ocasionada por un aumento en la relación agua/cemento reduce tanto la resistencia a la compresión del con-

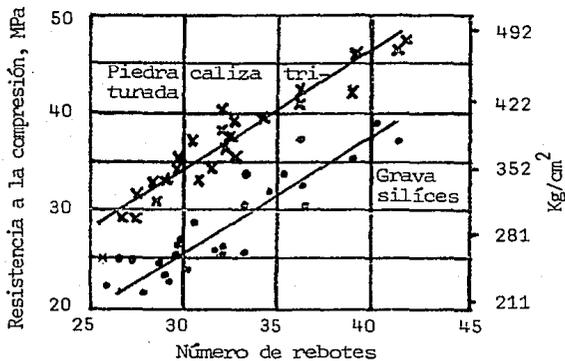


FIG. 6.7 Relación entre la resistencia a la compresión y el número de rebote.

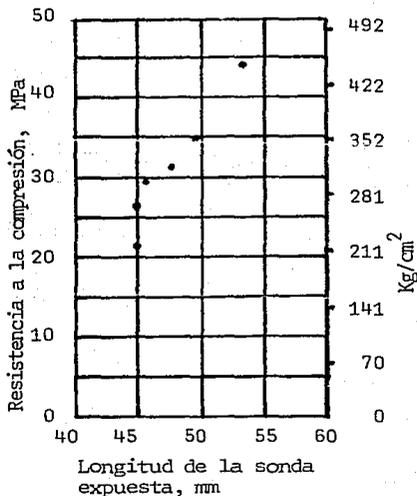


FIG. 6.8 Relación entre la longitud expuesta de la sonda y la resistencia de cubos aserrados de 152 mm a la edad de 35 días.

creto como la velocidad de un pulso transmitido a través de él.

La velocidad de onda no se determina directamente, sino se calcula a partir del tiempo que tarda un pulso en recorrer una distancia medida. Este pulso ultrasónico, se mide mediante un aparato de pulso ultrasónico, como el representado esquemáticamente en la figura 6.9, y cuya técnica se describe en la Norma B.S 4408; parte 5.

El transductor está en contacto con el concreto, de modo que las vibraciones viajan a través de él y son recogidas -- por otro transductor en contacto con la cara opuesta de la muestra probada. Normalmente, se pueden probar concretos de 0.1 a 2.5 m de espesor, sin embargo, se han efectuado pruebas de concretos con espesor hasta de 15 m.

La técnica de velocidad de un pulso ultrasónico se usa -- como medio de control de calidad en productos que supuestamente están elaborados de concretos semejantes, así, se detectan con facilidad la falta de compactación y un cambio en la relación agua/cemento. Sin embargo, la técnica no se puede emplear para determinar la resistencia en concretos elaborados con distintos materiales en proporciones desconocidas, no obstante, es posible hacer una clasificación de la calidad del concreto, como la mostrada en la tabla de la figura 6.10.

Además del control de calidad del concreto, las medidas de pulso ultrasónico pueden usarse para detectar el desarrollo de grietas, oquedades y deterioro en el concreto endurecido.

#### 6.4.5. PRUEBA DE EXTRACCION:

Es una prueba que mide mediante un ariete de tensión, la fuerza requerida para desprender una varilla de acero, con su extremo de mayor sección transversal previamente empotra-

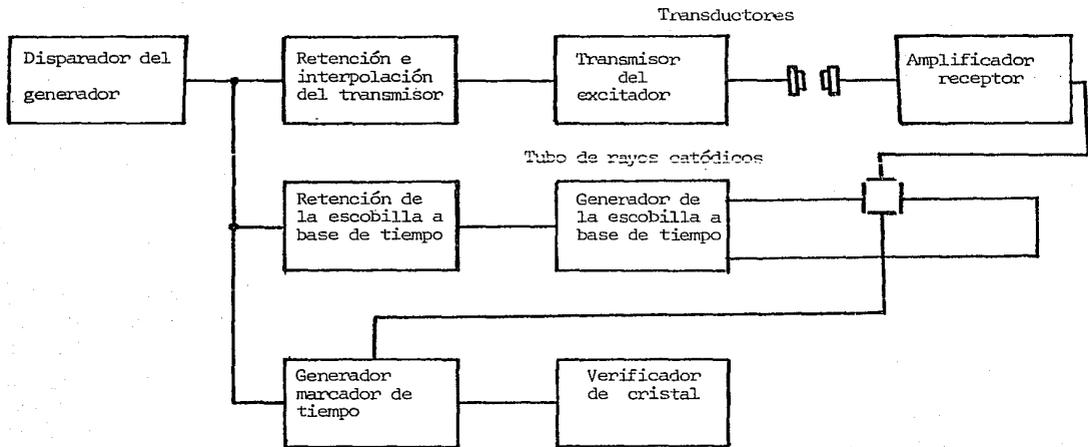


FIG. 6.9 Esquema del aparato de pulso ultrasónico.

FIG. 6.10 Clasificación de la calidad del concreto con base en la velocidad de pulso.

---

Velocidad longitudinal del pulso Km/s	Calidad del concreto
4.5	Excelente
3.5-4.5	Buena
3.0-3.5	Dudosa
2.0-3.0	Deficiente
2.0	Muy deficiente

---

da generalmente de 25 mm. de diámetro (figura 6.11). Durante la operación se extrae un cono de concreto y la fuerza requerida para ello está relacionada con la resistencia a la compresión del concreto original.

Debido a su forma, la varilla de acero se arranca adherida a un trozo de concreto, este último de forma troncoconica. La resistencia a la extracción se calcula como la relación de la fuerza de extracción con el área idealizada del cono troncado.

Esta prueba es superior a la prueba del martillo y a la resistencia a la penetración, pues la de extracción implica mayor volumen y mayor profundidad del concreto. El aspecto negativo es que hay necesidad de reparar el concreto. Además, las varillas para la prueba deben situarse antes del colado, por lo que la prueba debe ser planeada de antemano.

Ya que la más común de todas las pruebas de concreto endurecido es la prueba de resistencia a la compresión simple, lo cual en parte obedece a que es una prueba fácil de ejecutar y en parte a que muchas de las características deseables del concreto, aunque no todas, se relacionan cualitativamente con su resistencia; a un más, a través de los años, se ha correlacionado la resistencia a la compresión simple, con la resistencia de elementos estructurales de diversos tipos, sujetos a distintas solicitaciones, hablaremos pues de ella.

#### 6.4.6 PRUEBA A LA COMPRESION SIMPLE:

No existe una convención aceptada universalmente sobre que tipo de espécimen es el mejor para realizar ensayos en compresión. Comúnmente se usan especímenes de tres tipos: cilindros, cubos y prismas.

En nuestro medio, y en numerosos países del mundo, se usan cilindros con una relación de esbeltez igual a dos. En estructuras de concreto reforzado el espécimen usual es el

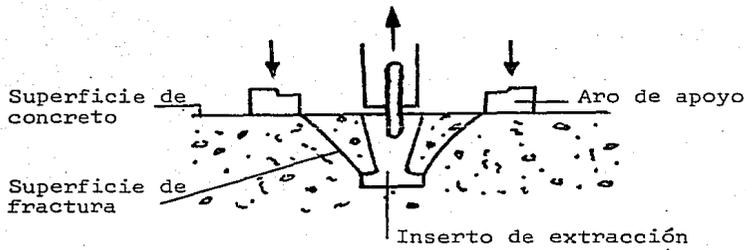


FIG. 6.11 Representación esquemática de la prueba de extracción.

cilindro de 15 x 30 cm. En estructuras construidas con concreto en masa, donde se usan agregados de gran tamaño (10 a 15 cm), se usan cilindros de 30 x 60 cm., y en ocasiones moldes hasta de 60 x 120 cm. para establecer índices de resis--tencia. Siguiendo la notación de la NOM-C-155-84, se acos--tumbra designar con ' la resistencia a la compresión especi--ficada de un cilindro estándar a los 28 días o a la edad en que el concreto vaya a recibir su carga de servicio.

Una vez seleccionado el tipo de espécimen es necesario - fijar con gran detalle las condiciones de muestreo, fabrica--ción, curado y ensaye teniendo entre estas últimas particu--lar importancia la velocidad de carga.

En la Tabla de la figura 6.12, se presentan factores de corrección para obtener la resistencia de un cilindro de 15 a 30 cm. a partir de la obtenida con un espécimen de otra -- forma o dimensiones, para concretos fabricados con cemento - normal y ensayados a los 28 días.

Para lograr una prueba a la compresión aceptable es necesario que las cabezas de la máquina de ensaye estén totalmente en contacto con las superficies del espécimen en ambos extremos, de manera que la presión ejercida sea lo más uniforme - posible. Esto se logra fácilmente si el espécimen es un cubo o un prisma.

En nuestro medio, las normas usuales están basadas, en--tre otras, en las NOM-C84 y C-161 y C-162.

Por otra parte, los cilindros se fabrican generalmente - en moldes de acero apoyados en una placa en su cara inferior y libres en su parte superior, donde es necesario dar un acabado manualmente.

Esta operación, llamada cabeceado, y que consiste en --- aplicar un cierto material generalmente azufre o pasta de cemento, a los extremos del cilindro para producir una superfii

FIG. 6.12 Factores de Equivalencia para ensayos a la --  
Compresión.

Espécimen	Dimensiones cm	Factores por los que se deben - multiplicar las resistencias de un espécimen para obtener las - equivalentes de un cilindro de 15 X 30 cm.	
		Variación normal.	Valor medio aceptable.
Cilindro	15 X 30	-	1.00
	10 X 20	0.94 - 1.00	0.97
	25 X 50	1.00 - 1.10	1.05
Cubo	10	0.70 - 0.90	0.80
	15	0.70 - 0.90	0.80
	20	0.75 - 0.90	0.83
	30	0.30 - 1.00	0.90
Prisma	15 X 15 X 45	0.90 - 1.20	1.05
	20 X 20 X 60	0.90 - 1.20	1.05

cie lisa de apoyo, prolonga el tiempo necesario para la preparación del ensaye, e introduce una variable adicional en los resultados; el material y la forma del cabeceado.

Aún cuando se sigan cuidadosamente las especificaciones y el proceso sea realizado por operadores experimentados, -- los resultados que se obtengan no serán uniformes, siempre -- existirá dispersión en los datos, como en cualquier proceso de medición. Estas dispersiones pueden ser inherentes al tipo de ensaye, debidas a errores accidentales o a la no uniformidad del material ensayado.

Algunos factores, que afectan directamente a los resultados obtenidos en especímenes de ensaye son:

Efecto de las condiciones de curado

Efecto de la esbeltez

Efecto de la velocidad de carga

Efecto de la velocidad de deformación

Efecto de las condiciones de humedad y temperatura durante la prueba.

Efecto del tamaño del espécimen sobre la resistencia

Efecto del tamaño del molde y tamaño del agregado

Efecto de la edad

Algunos de estos factores no solamente afectan a los resultados de pruebas a la compresión, sino también, a los resultados obtenidos en otro tipo de ensayes, como son los de tensión y flexión, aun más, aunque en menor número, a los resultados obtenidos en pruebas no destructivas.

## TEMA VII

### PRUEBAS A LAS TUBERIAS DE CONCRETO PARA ALCANTARILLADO

#### 7.1 INTRODUCCION: (ELECCION DE LOS ESPECIMENES DE PRUEBA).

Se escogerá al azar, un 3% de los tubos para formar un lote representativo; de éste, se tomará la tercera parte para efectuar las pruebas correspondientes, teniendo cuidado de que dichos tubos no presenten fracturas ni grietas que afecten el resultado de las pruebas a que son sometidos.

Se comprobará que los tubos designados se sujeten a las medidas indicadas de la Tabla 7.1.

Tolerancia en las dimensiones. Las variaciones permisibles en las dimensiones indicadas en la Tabla 7.1 no deberán exceder de lo especificado en la Tabla 7.2, con excepción -- del espesor de las paredes del tubo, el cual podrá excederse de la tolerancia en (+), siempre y cuando cumpla con todos -- los otros requisitos de materiales, resistencia, impermeabilidad, absorción, acabado y curado.

Se tomará para cada tubo, el promedio de varias medidas que se obtendrán con aproximación al milímetro.

TABLA 7.1 Dimensiones del Tuvo de Concreto sin Reforzar para Alcantarillados y con Junta de Campana.

Diámetro Interior (D) cm.	Longitud Colocado (L) cm.	Diámetro Interior en boca de campana (Ds) mm.	Profundidad de la Campana (Ls) mm.	Conicidad mínima de la campana H	Espesor de las paredes (T) mm.	Espesor de la campana (t) mm.
10	91	152	38	1:20	14	Sera de 6
15	91	210	51	1:20	16	mm. en el
20	91 o 122	273	57	1:20	19	extremo y
25	91 o 122	330	64	1:20	22	no menor
30	91 o 122	387	64	1:20	25	de 3/4 del
38	91 o 122	476	64	1:20	32	espesor --
45	91 o 122	565	70	1:20	38	del cuerpo
53	91 o 122	660	70	1:20	44	del tubo.

TABLA 7.2 Variaciones Permitidas en las Dimensiones de los Tubos de Concreto Simple para Alcantarillado con Juntas de Campana

LIMITES PERMISIBLES DE VARIACION							
Tamaño nominal	Longitud	Diámetro Tubo	Diámetro Interno de la campana	Profundidad de la campana	Espesor del cañón		
Diámetro Interno cm.	(-) (+) mm.	(-) (+) mm.	(-) (+) mm.	(-) (+) mm.	(-) (+) mm.	(-) (+) mm.	(-) (+) mm.
10	6.4	3.2	3.2	3.2	1.6		3.5
15	6.4	4.7	4.7	6.4	1.6		3.5
20	6.4	6.4	6.4	6.4	1.6		3.5
25	6.4	6.4	6.4	6.4	1.6		3.5
30	6.4	6.4	6.4	6.4	1.6		3.5
38	6.4	6.4	6.4	6.4	2.4		4.5
45	6.4	6.4	6.4	6.4	2.4		4.5
53	6.4	7.9	7.9	6.4	3.2		4.5

## 7.2 PRUEBA DE RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO:

### Método de Apoyo en Tres Aristas.

El método consiste en colocar el tubo por probar, sobre la viga de apoyo inferior, según se muestra en la figura 7,1 a la que previamente se le pone una pasta de yeso entre las dos tiras de madera; esto se hace con el fin de dar un apoyo homogéneo entre las tiras de madera y el tubo.

### Viga de Apoyo Inferior.

El tubo se colocará cuando la pasta de yeso aún esté en estado plástico. El apoyo superior será igualmente una viga de madera de 15 X 15 cm., según se muestra en la siguiente - figura de conjunto (Figura 7;2).

Al igual que la parte inferior, se deberá recibir la tubería con pasta de yeso para que apoye uniformemente contra la viga superior.

En todos los casos de este tipo de pruebas, la campana - deberá quedar fuera del área de compresión, no debiendo recibir ésta, carga alguna.

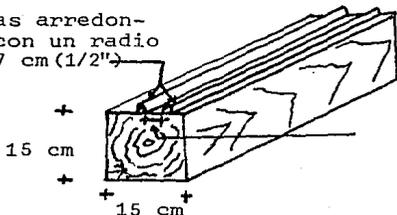
Cuando el yeso haya fraguado, se aplicará la carga al -- apoyo superior en un punto distante del extremo liso del tubo que sea precisamente la mitad de su longitud, con el fin de que la carga se reparta uniformemente.

En tubos de concreto simple se aplicará una carga a razón de 1 000 Kg/ml. y por minuto, aproximadamente; o por incrementos no mayores de 50 Kg., respetando la condición anterior.

Antes de que se efectúe la prueba de resistencia al - -- aplastamiento, siempre deberá verificarse que el manómetro - que indica la carga aplicada se encuentre correctamente cali

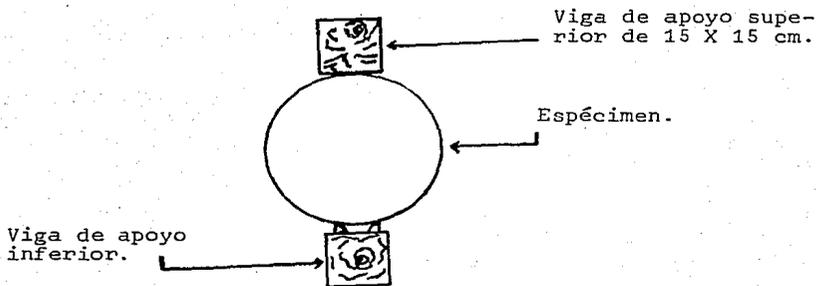
FIG. 7.1. Viga de apoyo inferior.

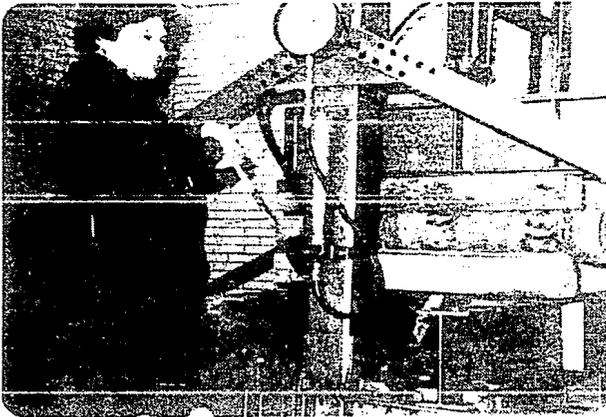
Esquinas arredondadas con un radio de 1.27 cm (1/2")



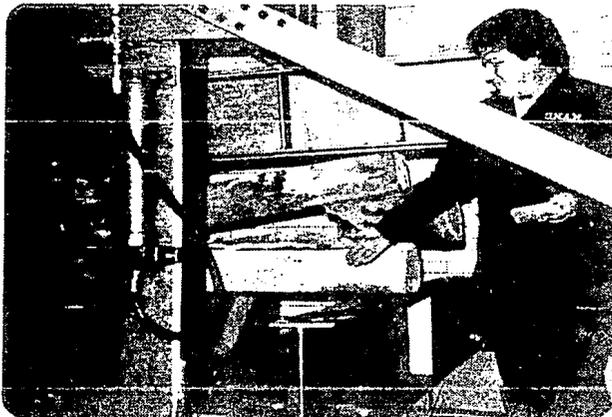
Espaciamiento de 2.5 cm (1") por cada 30 cm. de diám. del tubo

FIG. 7.2. Colocación del tubo de prueba.





Colocación y Preparación del Tubo de Albañal en la -  
Prueba de Resistencia.



Tubo de Albañal fallado después de la Prueba de Resistencia.

brado y que éste contenga su aguja de arrastre.

La resistencia al aplastamiento determinada por el método de apoyo en tres aristas, no deberá ser menor de la indicada en la tabla siguiente:

Diámetro Interior en cm.	Resistencia mínima Kg/ml.
10	1 488
15	1 637
20	1 937
25	2 082
30	2 232
38	2 604
45	2 967
53	3 272

Si al efectuar la prueba a la compresión, alguno de los tubos no cumple con la resistencia mínima de la tabla anterior, deberá realizarse una nueva prueba de acuerdo con la tabla que a continuación se expone:

Por ciento de la resistencia requerida	Número de tubos para la prueba
Entre 91% y 100%	Dos
Entre 81% y 90%	Tres
Entre 71% y 80%	Cuatro
Inferior a un 70%	Se rechazan todos
(Aún cuando sea un solo tubo)	los tubos del lote

Si la totalidad de los tubos en la reprueba, llena los requisitos especificados, el lote será admitido enteramente; si uno sólo fallara nuevamente, se rechazará todo el lote.

### 7.3 PRUEBA DE ABSORCION:

Para la prueba de absorción de agua, las muestras que se usan son fragmentos del tubo probado al aplastamiento y deben tener de 100 a 150 cm<sup>2</sup> de superficie, aproximadamente, de forma cuadrada y estar libres de grietas, raspaduras o bordes astillados. Se señalan con plumón, con la misma marca que tiene el tubo del cual proceden.

La secuela para el cálculo de la absorción, es la siguiente:

1. Las muestras se secan por un período de 24 horas, en horno, a una temperatura de 110°C.
2. Posteriormente se pesan, obteniendo así su peso seco.
3. Después se colocan en un recipiente de alambre apretadas para evitar choques o frotamientos; se cubren con agua destilada o de lluvia y se calientan hasta la ebullición durante cinco horas, después de lo cual se deja enfriar el agua a la temperatura ambiente.
4. Durante un minuto se escurren las muestras, a las cuales se les seca la humedad superficial por medio de una franela o papel secante, y se procede inmediatamente a pesarlas de nuevo (peso del material saturado).

La absorción debe estar calculada como porcentaje del peso inicial seco. Los resultados de cada muestra individual se anotan separadamente con aproximación de 0.5 g. y se toma el promedio de los resultados de las muestras probadas del lote.

$$\% \text{ absorción} = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

$P_h$  = Peso del material saturado,

$P_s$  = Peso del material seco.

La cantidad de agua absorbida no deberá exceder del 9% - del peso inicial de la muestra seca.

#### 7.4 PRUEBA DE PERMEABILIDAD:

Esta prueba se efectúa colocando los especímenes en una superficie plana e impermeable; dichos tubos se colocan con la campana hacia arriba y la parte inferior del tubo, se sella con pasta de yeso.

Una vez fraguado el yeso, se procede a llenar el tubo -- con agua hasta el fondo de la campana.

Haciéndose las observaciones durante diez minutos, el tubo no deberá presentar fugas del líquido.

No se considerará como falla, gotas que permanezcan adheridas a la superficie del tubo.

## TEMA VIII

### PRUEBAS AL CONCRETO LIGERO

#### 8.1 INTRODUCCION. (OBJETIVOS)

Se obtendrá concreto ligero por alguno de los métodos - antes descritos (Tema IV), para el desarrollo de esta práctica se eligió el método de agregados ligeros utilizando tezon<sup>7</sup>tle como ejemplo:

#### 8.2 MATERIALES Y EQUIPO:

- 10 Kg Cemento
- 18 Kg Grava
- 18 Kg Arena
- 9 Kg Tezontle
- 13.5 lts Agua
- Báscula
- Probeta
- Dos Charolas
- Dos Cucharas de Albañil
- Varilla con punta de bala de 16 mm de diámetro o vibrador.
- Cucharón
- 4 Moldes cilíndricos de 15 cm de diámetro por 30 de altura.

#### 8.3 DESARROLLO:

Se elaboran dos mezclas, una para concreto normal y la otra para concreto ligero con las siguientes especificaciones:

#### Concreto Normal

5 Kg Cemento  
18 Kg Grava

#### Concreto Ligero

5 Kg Cemento  
9 Kg Tezontle

9 Kg Arena  
5.5 Lt Agua

9 Kg Arena  
8 Lt Agua.

Nota: Se utilizan 9 kg de tezontle en lugar de 18 kg de grava ya que el volumen de 9 kg. de tezontle es aproximado al volumen de los 18 kg. de grava.

El volumen de agua se aumento un 45% por la gran cantidad de agua que absorbe el Tezontle.

Se colocan los moldes sobre su base previamente engrasado y en un sitio en el que no se produzcan vibraciones y pueda permanecer sin ser movido durante 24 horas.

Ya elaborada la mezcla se procede a llenar los moldes cilíndricos. Tres para la mezcla de concreto normal y tres para el concreto ligero.

#### 8.3.1 COMPACTACION CON VIBRADOR:

Procedimiento:

1. Se vierte el concreto en el molde hasta que llene la mitad de su volumen. Cada cucharada de concreto deberá depositarse en distinta dirección.
2. Se introduce el vibrador en acción cuidando no tope su extremo con el fondo del molde, el período de vibración dependerá del revenimiento que presente el concreto. Tres o cuatro inmersiones del vibrador, de tres o cuatro segundos de tiempo cada una, son generalmente suficientes para cualquier caso. Una condición que puede determinar el tiempo y número de inmersiones del vibrador es la presencia del mortero en la superficie de la capa vibrada.

3. Se llena la otra mitad del molde operando el cucharón en igual forma que la indicada anteriormente y procurando que al vibrar el concreto, la superficie de éste llegue a unos 3 mm, abajo del borde del molde.
4. El número de inmersiones del vibrador será igual al empleado al compactar la primera capa, procurando que el extremo de éste no penetre más de 25 mm. (1") en la capa anteriormente compactada.
5. Después de vibrar o compactar la segunda capa, se adiciona una pequeña cantidad de concreto con la cuchara y se enrasa al borde del molde, alisando la superficie.

#### 8.3.2 COMPACTACION CON VARILLA:

##### Procedimiento:

1. En este caso, el molde se llenará en tres capas, operándose con la primera de ellas (1/3 del cupo del molde) tomando las mismas precauciones marcadas en Compactación con vibrador (1.).
2. Cada capa se golpeará con la varilla 35 veces consecutivas en toda la superficie del concreto, cuidando -- que al golpear la segunda y tercera capas no penetre la varilla más de 25 mm. en la anteriormente compactada.
3. Se enrasa en la forma que se indica en Compactación con vibrador (5.).
4. El molde con su contenido deberá en ambos casos permanecer inmóvil durante 24 horas, y se protegerá la superficie expuesta con un lienzo o papel húmedo, cuan-

do haya desaparecido el agua superficial del concreto.

#### 8.4 CURADO Y ALMACENAMIENTO DE LOS CILINDROS DE PRUEBA.

1. A todos los especímenes se les quitará el molde a las 24 horas después de su colado; para ello y cualquiera que sea el tipo de molde, se tendrá el cuidado suficiente para no lastimar el espécimen, evitando golpearlo en la operación.
2. Una vez quitado el molde del espécimen, se marcará -- tanto en una de sus bases como en la superficie cilíndrica, con la identificación que le corresponda (número de serie y fecha de colado); al mismo tiempo se -- anotarán estos datos en los registros adicionales de que se disponga, completándolos con la edad de prueba y fecha de ejecución.
3. Acto continuo el espécimen se protegerá de la pérdida de humedad colocándolo en el cuarto de curado a una temperatura comprendida entre 21° y 25°C, humedad -- relativa de 100%, inmersión en agua, o enterrándolo -- en arena, la cual estará perfectamente húmeda. En -- los dos últimos casos deberá llevarse un registro de las temperaturas.
4. El espécimen deberá permanecer en cualquiera de las condiciones señaladas en el párrafo anterior, hasta -- el momento de su prueba.

#### 8.5 PREPARACION DE LAS BASES DE LOS CILINDROS DE PRUEBA.

Las bases de los especímenes, en lo general, no presentan superficies verdaderamente planas, por lo que siempre -- hay la necesidad de emparejarlas con algún material lo sufi-

cientemente resistente y capaz de transmitir antes de deteriorarse, las cargas que se aplican durante la prueba. La mezcla más satisfactoria en uso es la del azufre con algún material inerte finamente molido; este último material puede ser arcilla cribada.

#### 8.5.1 EQUIPO:

Placa maquinada provista de guías normales a la base con depresión circular en el centro, de un diámetro suficiente o mayor para alojar la base del cilindro.

- Martillo de Cabeza de Hule
- Espátulas o Cuchillas de Albañil.
- Cintas de Papel Impermeable o Banda de Hule y Ligas.
- Crisol o Recipiente Metálico para Fundir Azufre.
- Parrilla Eléctrica.
- Azufre y Arcilla fina Cribada
- Cincel
- Nivel
- Cepillo de Alambre

Preparación de la mezcla para emparejar las bases. Tres partes en peso de azufre en flor para una parte de arcilla - que pasa por la malla número 48 (0.297 mm) constituyen los - elementos para la elaboración de la mezcla. Esta es calenta da entre 175 y 200°C, para fundirla, la cual después de lo-- grarlo tendrá una apariencia viscosa y espumosa; para el em pareje deberá dejarse enfriar un poco hasta que disminuya su viscosidad quedando más fluida, y desaparezca la espuma. El punto correcto de consistencia debe determinarlo la experien cia propia. El calentamiento y enfriamiento alternados de - la mezcla después de una serie de ciclos proveen a ésta de - cierta clasticidad que la hace impropia para usarse, por lo tanto, aun cuando la mezcla pueda ser aprovechada repetidas veces, esto tiene un límite.

### 8.5.2 PROCEDIMIENTO:

1. Al ser tomados los cilindros del sitio que ocupaban - durante su curado, deberán secarse superficialmente.
2. A las bases se les quitará la costra natural de concreto, mediante piquetes con el cincel a una profundidad no mayor de 1.5 mm., con el objeto de hacer una superficie rugosa que permita una mejor unión con la mezcla fundida.
3. Después de picarse las superficies de las bases, se cepillan con un cepillo de alambre para eliminar todo el polvo y partículas sueltas.
4. Una vez limpio el cilindro se miden varios diámetros y alturas, se promedian y registran. También se pasará el cilindro.
5. La superficie de la base superior así preparada será normal al eje del cilindro, la cual servirá de base inferior al girar el cilindro para preparar la base opuesta siguiendo los mismos pasos marcados en (6.) a (8.).
6. Se coloca el cilindro sobre la placa maquinada a nivel, manteniéndolo apoyado en toda su longitud sobre las guías para hacer coincidir su eje con la vertical.

Ambas bases deberán presentar superficies planas; como - ésto no se consigue con la operación anterior, hay la necesidad de dar, mediante otra operación más, el acabado deseado en la forma que a continuación se indica:

7. Se dispone la placa maquinada con depresión en el centro, debidamente engrasada sobre una superficie a nivel.

8. Se vierte sobre ella la mezcla fundida hasta llenar la depresión central.
9. Inmediatamente y antes de que cristalice la mezcla, se coloca el cilindro presionándolo contra la placa y se deja enfriar la mezcla.
10. Se golpea ligeramente con el martillo la placa para despegar de ella la mezcla de azufre.
11. Las operaciones para el emparejo de la base opuesta se harán en la forma señalada en (8.) a (12.). Las bases así preparadas estarán terminadas para servir de apoyo a la carga que se aplique. Hay que cerciorarse si la lámina de la mezcla es compacta y está íntimamente ligada a la base del cilindro; para ello basta con golpear ligeramente con los nudillos de los dedos la superficie de la mezcla y apreciar su sonido. Si hay algún punto hueco o fallo en liga, se quitará la lámina de mezcla colocando una nueva.
12. Si los cilindros se van a probar después de algunas horas de preparadas sus bases, deberán ser protegidos de la pérdida de humedad.

## 8.6 RUPTURA DE CILINDROS:

Los especímenes de concreto deberán romperse o probarse a compresión tan pronto como sea posible después de haberlos retirado del cuarto de curado.

### 8.6.1 EQUIPO:

Máquina de compresión; la cabeza de carga deberá presentar un casquete esférico que le permita tomar la posición exacta de la superficie de apoyo del cilindro, para lograr -

una carga axial. Esta deberá tener un diámetro mínimo -- igual al de la superficie del espécimen que se va a probar y su funcionamiento deberá comprobarse al iniciar cada prueba, engrasándola y limpiándola.

#### 8.6.2 PROCEDIMIENTO:

1. El espécimen se deberá colocar en la mesa de la máquina, la cual presenta una serie de círculos concéntricos de distintos diámetros (generalmente los que son más usuales en los cilindros de prueba), con objeto de que el espécimen quede bien centrado.
2. En la máquina de compresión hay que cerciorarse de -- que la aguja marque cero sobre la carátula
3. Se hace funcionar la máquina de modo que el cilindro de prueba se aproxime lentamente a la cabeza de carga hasta que encuentre apoyo completo, sin ocasionar choque.
4. Se va aplicando la carga uniformemente a razón de -- 141 Kg/cm<sup>2</sup>/min. hasta la falla del espécimen.
5. La carga total necesaria para ocasionar la falla del espécimen debe ser registrada y expresarse como resistencia unitaria en Kg/cm<sup>2</sup>.

#### 8.6.3 CALCULO:

$$\text{Resistencia Unitaria "f'c" Kg/cm}^2 = \frac{P}{S}$$

P: Carga total registrada en Kg

S: Sección del espécimen de prueba en cm<sup>2</sup>.

#### 8.6.4 RESULTADOS:

Se observó que los cilindros de concreto normal y ligero fallan al aplicarse una carga próxima a las 23 Ton. y que -- los cilindros de concreto normal pesan 10.40 Kg y los cilindros de concreto ligero pesan 7.30 Kg en promedio. Lo que -- significa:

$$f_c = \frac{23 \text{ Ton.} \times 1000 \text{ Kg/Ton.}}{176.71 \text{ cm}^2} = 130 \text{ Kg/cm}^2$$

<u>Concreto</u>	<u>Fc</u>	<u>Peso/Cilindro</u>	<u>Peso/m<sup>3</sup></u>
Normal	130 Kg/cm <sup>2</sup>	0.40	1952.83 Kg/m <sup>3</sup>
Ligero	130 Kg/cm <sup>2</sup>	7.30	1377.35 Kg/m <sup>3</sup>

Se observá que entre el concreto normal y ligero existe una diferencia de peso del 30%.

NOTA: Los resultados anteriores pueden verse afectados por -- los siguientes conceptos:

- La Cantidad de agua absorbida por el tezontle.
- La Humedad de la grava y la arena.

#### 8.6.5 CONCLUSIONES:

En este ejemplo en particular la resistencia del concreto normal y ligero es muy parecida; pero cuando se manejan -- otros agregados ligeros encontramos que la resistencia de dichos concretos es muy baja por lo que será necesario elaborar diferentes concretos, en los cuales se sustituirá par-- cialmente la grava por el agregado ligero, hasta lograr un -- concreto que cumpla con los requisitos del proyecto.

En otros casos será el factor económico el que nos obligue a no sustituir totalmente la grava por el agregado lige-

ro. Otro factor que nos obligará a elaborar una mezcla óptima de concreto será la trabajabilidad del mismo, ya que el uso de los agregados ligeros disminuye la trabajabilidad del concreto.

## TEMA IX

### PRUEBAS AL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

#### 9.1 INTRODUCCION. (OBJETIVOS).

Se obtendrá concreto de Alta Resistencia por el método - del ACI descrito en el Tema V del cual se toma el ejemplo para el desarrollo de esta práctica.

#### 9.2 DATOS:

Cantidad de Cemento Kg/m <sup>3</sup>	526
Relación Agua/Cemento	0.35
Relación Agregado/Cemento	3.2
Lo que significa:	
Agua = $0.35 \times 526 = 184$ lts.	
Agregados = $3.2 \times 526 = 1683.2$ Kg	

En el Laboratorio se han obtenido los resultados siguientes:

Grava: Peso volumétrico Variado	1750 Kg/m <sup>3</sup>
Peso Específico	2.54
Absorción	2.3 %
Humedad Total	3.1 %
Arena: Módulo de Finura	
Peso Específico	2.62
Absorción	2.5 %
Humedad Total	4.7 %

#### 9.3 MATERIALES Y EQUIPO:

- Equipo necesario para realizar las pruebas índice.
- Cemento, grava, arena y agua suficientes.

- Pala y Cubeta (o bote)
- Báscula

### 9.3.1 ESTIMACION DEL CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO:

Se obtiene de la tabla 9.1 para arena con módulo de Finura de 2.8 y grava con TMN de 19 mm, la tabla indica  $0.62\text{m}^3$  - de volumen de grava seca y varillada, por lo tanto el peso - requerido de agregado grueso es:

$$0.62 \times 1750 = 1085 \text{ Kg}$$

### 9.3.2 ESTIMACION DEL CONTENIDO DE AGREGADO FINO:

Si las cantidades de agua, cemento y grava establecidos, el material restante que forma el metro cúbico de concreto - debe consistir de arena y del aire atrapado. La arena requerida puede determinarse en base al peso o al volumen absoluto. Los resultados obtenidos en base al peso, son más con- fiables que los obtenidos por volumen absoluto, ya que este último puede variar considerablemente con el contenido de hu- medad y forma del agregado. No obstante, ambos métodos se - desarrollan en seguida:

#### 1. Por Peso.

Con los datos:

Agregados (Grueso y Fino)	=	1683.2 Kg y
Agregado Grueso	=	1085 Kg,
Encontramos el contenido de agregado ligero		
1683.2 Kg - 1085 Kg	=	598.2 Kg de Arena.

#### 2. Por Volumen Absoluto.

Con las cantidades de cemento, agua y grava establecidos, y la cantidad aproximada de aire de 2% que se determina en -

TABLA 9.1 Volumen de Agregado Grueso por Volumen Unitario de Concreto.

Tamaño máximo del agregado (TMN) en mm.	Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla* por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de la arena.			
	2.40	2.60	2.80	3.00
10	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.76	0.74	0.72	0.70
50	0.78	0.76	0.74	0.72
70	0.81	0.79	0.77	0.75
150	0.87	0.85	0.83	0.81

\*Los volúmenes están basados en agregados secos y compactados con varilla. Estos volúmenes se han seleccionado de relaciones empíricas para producir un concreto con un grado de trabajabilidad apropiado para la construcción reforzada usual. Para obtener un concreto con menos trabajabilidad, como el que se utiliza en la construcción de pavimentos de concreto, estos valores se pueden aumentar en un 10%. Para un concreto con más trabajabilidad como el que algunas veces se requiere cuando la colocación se efectúa por bombeo, estos valores se pueden reducir hasta en un 10 por ciento.

la tabla 9.2, el contenido de arena se calcula a continuación; sabiendo que el volumen es igual al peso entre el peso específico:

- Volumen de agua 180/1000	=	0.180 m <sup>3</sup>
- Volumen de los sólidos del cemento = 526/(3.15X1000)	=	0.167 m <sup>3</sup>
- Volumen de los sólidos de la grava = 1085/(2.54X1000)	=	0.427 m <sup>3</sup>
- Volumen de aire atrapado = 0.02 x 1000	=	<u>0.020 m<sup>3</sup></u>
Volumen total de sólidos excepto de arena	=	0.794 m <sup>3</sup>

El volumen requerido de arena es:  $1.0 - 0.782 = 0.206 \text{ m}^3$   
 por lo tanto, el peso requerido de arena seca es:  
 $0.206 \times 2.62 \times 1000 = 539.72 \text{ Kg.}$

La variación existente entre ambos métodos es de  $598.2 - 539.72 = 58.48 \text{ Kg.}$  Por los motivos anteriormente expuestos, se concluirá el ejemplo en base al peso, por lo tanto se considerará el valor correspondiente de 667 Kg de arena.

#### Ajustes por Humedad y Absorción de los Agregados.

Al usarse las proporciones de la prueba de mezcla en base al peso, los ajustes necesarios, al peso de los agregados son:

grava (mojada)	=	1085 (1.031)	=	1118.6 Kg
arena (mojada)	=	598.2 (1.041)	=	626,3 Kg

El agua de absorción no forma parte del agua de mezclado, por lo cual debe excluirse. Por lo tanto, el agua que sí forma parte del contenido de agua de mezclado es la Humedad Superficial, la cual se obtiene de la diferencia entre la Hume

TABLA 9.2 Requerimientos aproximados de Agua de mezcla y Contenido de Aire para Diferentes Revenimientos y Tamaños Máximos del Agregado.\*\*

Revenimiento (cm)	Agua en Kg/m <sup>3</sup> de concreto según el tamaño máximo del agregado (en mm).							
	10	12.5	20	25	40	50*	70*	150*
	Sin aire incluido.							
3 a 5	205	200	185	180	160	155	140	125
8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	-
Cantidad aprox. de aire incluido en %	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
	Con aire incluido							
3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	-
Promedio recomendable de contenido total de aire en %	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

\*Los valores de revenimiento para un concreto que contenga un agregado mayor de 40 mm, están basados en pruebas de revenimiento efectuadas después de remover las partículas.

dad Total y la Absorción. Para la grava, la Humedad Superficial es:  $3.1 - 2.3 = 0.8\%$ ; para la arena, tal valor es:  $4.7 - 2.5 = 2.2\%$ .

Los porcentajes de Humedad Superficial anteriormente citados que contribuyen al mezclado, se restan al contenido total de agua de mezclado. Con esto, se mantienen estables -- los 180 Kg de agua  $180 - 1085 (0.008) - 598.2 (0.027) = 158.16$  Kg.

Los pesos estimados	agua agregada	158.16 Kg.
para un metro cúbico	cemento	526 Kg.
de concreto son:	grava mojada	1118.6 Kg.
	arena mojada	626.3 Kg.
		<hr/>
	T O T A L :	2429.06 Kg.

### 9.3.3 AJUSTES A LAS PRUEBAS DE MEZCLA:

Para las pruebas de mezcla en el laboratorio, se considera conveniente reducir a escala los pasos para producir 24 - lts. de concreto ( $0.024 \text{ m}^3$ ) para:

agua agregada	=	158.16 (0.024)	=	3.805 Kg.
cemento	=	526 (0.024)	=	12.624 Kg.
grava mojada	=	1118.6 (0.024)	=	26.846 Kg.
arena mojada	=	623.3 (0.024)	=	14.9592 Kg.
				<hr/>

T O T A L : =

En seguida se aprecia que la mezcla es de muy baja trabajabilidad con un rendimiento menor de 25 mm. Que era lo que se pretendía.

Se utilizan los mismos procedimientos que en el Tema - - VIII.

- a) Elaboración de especímenes cilíndricos (4) compactación con vibrador.
- b) Curado y almacenado de los cilindros de prueba.
- c) Preparación de las bases de los cilindros de prueba.
- d) Ruptura de cilindros.

Los cilindros se sometieron a la prueba de resistencia -- (ruptura de cilindros) a los 7 y 28 días de edad (dos cilindros en cada caso).

#### 9.4 RESULTADOS:

El promedio de resistencia de los cilindros fue.

<u>Edad</u>	<u>Resistencia</u>	<u>Resistencia</u>
Días	Ton.	Kg/cm <sup>2</sup>
7	70.33	398
28	105.67	598

#### 9.5 CONCLUSIONES:

Se pueden alcanzar altas resistencias en el concreto mediante las dosificaciones adecuadas sin necesidad de utilizar aditivos ni equipos especiales.

Los resultados obtenidos anteriormente pueden ser afectados por los siguientes conceptos:

- Resistencia Máxima de los Agregados.
- Forma de los Agregados.
- Deficiente Compactación.
- Deficiente Control de la Relación Agua/Cemento.
- Calidad del Cemento Almacenado en el Laboratorio.
- Curado Inadecuado.

## TEMA X

### FERROCEMENTO

#### 10.1 INTRODUCCION:

El ferrocemento es un tipo de material compuesto donde los materiales que lo integran, generalmente de consistencia frágil, llamada matriz, se refuerzan con fibras dispersas a través del compuesto, dando como resultado mejores comportamientos estructurales que el comportamiento individual. El uso de fibras para reforzar una matriz frágil realmente no es una idea nueva. El antiguo uso de la paja en los tabiques y el pelo en el mortero puede decirse que antecede al uso convencional del concreto de cemento Portland, pero el mismo nombre de ferrocemento implica la combinación de un producto ferroso con cemento.

En general, el ferrocemento se considera como una forma altamente versátil de un material compuesto hecho de mortero de cemento y capas de malla de alambre, o de un emperillado de acero de diámetro pequeño similar, ligados íntimamente para crear una estructura rígida.

Este material, que es una forma especial de concreto reforzado común en cuanto a su funcionamiento efectivo, resistencia y aplicaciones potenciales, que debe ser clasificado como un material separado. En estructuras de ferrocemento racionalmente diseñadas, el refuerzo consiste en una malla de alambre de diámetro pequeño en las cuales se hacen uniformes la proporción y distribución del refuerzo al extender las mallas de alambre a través del espesor del elemento.

La dispersión de las fibras en la matriz frágil ofrece no solamente posibilidades convenientes y prácticas de lograr mejoras en muchas de las propiedades físicas del material, tales como fracturas, resistencias a la tensión y a la flexión, flexibilidad, resistencia a los esfuerzos de traba-

jo y al impacto, sino también ventajas en términos de fabricación en productos y elementos. Estas ventajas y lo novedoso del concepto han estimulado lo que ahora está considerado como de interés mundial en el uso del ferrocemento.

Recientemente, el Comité 549 del American Concrete Institute (ACI) sobre ferrocemento llegó a la conclusión de que no puede limitarse la definición del ferrocemento como refuerzo. Por consiguiente, el Comité lo define de la siguiente manera: "Ferrocemento es un tipo de construcción de concreto reforzado con espesores delgados, en el cual, generalmente, el cemento hidráulico está reforzado con capas de malla continua de diámetro relativamente pequeño. La malla puede ser de material metálico o de otros materiales adecuados".

La idea básica en apoyo a este material, es que el concreto puede sufrir deformaciones importantes en la cercanía del refuerzo y la magnitud de las deformaciones depende de la distribución y subdivisión del refuerzo a través de la malla del concreto.

Las mallas de alambre generalmente tienen diámetros de 0.05 a 0.1 cm y separaciones que varían de 0.5 a 2.5 cm, el volumen de la malla varía del 1 al 8% del volumen total del elemento estructural. El espesor de las secciones de ferrocemento varía de 1 a 4 cm, y el recubrimiento de la capa más alejada del alambre es usualmente de 0.15 a 0.2 cm. El mortero de concreto consistente en cemento Portland ordinario, agua y agregado finamente granulado (arena natural), que rara vez excede de 0.5 a 0.7 cm casi siempre es de 0.2 cm aproximadamente, lo que permite el uso de una malla con separaciones menores.

Es muy conveniente emplear el ferrocemento en estructuras espaciales, tiene mejores propiedades mecánicas y mayor durabilidad que el tradicional concreto reforzado. Dentro de ciertos límites de carga se comporta como un material --

elástico homogéneo y estos límites son más amplios que los del concreto normal. La distribución uniforme y la elevada relación del área de superficie con el volumen (superficie - específica) del refuerzo, da como resultado un mejor mecanismo de restricción de grietas, esto es, la propagación de grietas se detiene, originando una alta resistencia a la tensión del material. En estudios recientes se ha demostrado que al incluir fibras cortadas de acero en el ferrocemento, aumenta aún más la resistencia inicial del elemento a agrietarse. La resistencia última depende casi totalmente de la fracción de volumen de la malla de alambre.

El ferrocemento se usa en estructuras de espesores delgados en donde la resistencia y la rigidez se desarrollan mediante la forma del elemento. Tiene la gran ventaja de ser moldeable y de poder construirse de una sola pieza. Otra de sus ventajas principales son su bajo costo, y sus características de incombustibilidad y su alta resistencia a la corrosión.

Durante los últimos años se han publicado numerosos estudios y ha aumentado la confianza en este material, con el resultado de gran aplicación en medios marinos y terrestres, - por ejemplo, techumbres, muros, tanques de agua, silos, barcos de pesca, barcasas y otras embarcaciones de trabajo, especialmente en los países en desarrollo, donde se puede hacer uso más completo de materiales locales y mano de obra barata.

A continuación aparece una lista de aplicaciones individuales en las que se ha visto que vale la pena utilizar el ferrocemento.

Barcos de pesca y de carga

Sampanes\*, barcasas y barcas (\*N del E. Embarcaciones -- Orientales).

Remolcadores y pangas

Diques, incluyendo diques secos flotantes

Estructuras submarinas  
Depósitos de almacenaje permanente de alimentos  
Almacenaje de alimentos y legumbres  
Almacenaje de almidones, harinas, azúcar  
Silos de almacenaje  
Almacenaje de aceites comestibles como: olivo, cacahuete  
algodón, palma, coco, etc.  
Almacenaje de granos como: arroz, trigo, maíz, sorgo, mi  
jo, etc.  
Tanques de remojo de yuca  
Tanques de fermentación para cocos, café, vino, cerveza,  
salsas de pescado, etc.  
Tanques de enriamiento de henequén, yute, cañamo, etc.  
Tanques para gas líquido, natural y artificial  
Torres de enfriamiento, túneles para pruebas aerodinámicas  
Canales de drenaje, charcas, fosas sépticas y otros me--  
dios de tratamiento de aguas.  
Canales  
Dispositivos para procesamiento de pieles  
Secadores para granos, copra  
Tanques de secado  
Plataformas de secado de té, café, cacao, coco, otras se  
millas oleoginosas, pimientos, especias, etc.  
Comederos y bebederos para ganado  
Baños para ganado  
Almacenaje de agua potable y de riego  
Tuberías y conductos de irrigación  
Hornos y chimeneas  
Losas y tejas para techo  
Tableros y losas decorativas  
Tableros de muros, pisos  
Postes de teléfono y de luz  
Recubrimiento de túneles, minas, canales de irrigación,  
etc.  
Reparación de baches  
Tapas de alcantarilla  
Recintos para tratamiento de maderas

Moldes y cimbras para usarse en construcciones estándar  
de concreto

Elementos de plantas de energía solar, etc.

## 10.2 ANTECEDENTES HISTORICOS:

La historia del ferrocemento es muy interesante y se remonta hasta 1948, fecha considerada por muchos como la del primer uso del concreto reforzado.

Joseph Louis Lambot construyó varios botes de remos, maceteros, asientos y otros artículos con un material llamado "Ferciment" en una patente que obtuvo en 1852. La patente dice, en parte, lo siguiente:

Mi invención es un producto nuevo que puede reemplazar la madera (en pisos, recipientes para agua, maceteros etc), la cual está sujeta a daños por el agua y la humedad. La base del nuevo material es una malla metálica de alambre o de varillas interconectadas para formar un emparrillado flexible. Moldeo esta malla en forma similar al artículo que quiero crear, después utilizo cemento hidráulico o una brea bituminosa o una mezcla para rollenar las juntas.

Los botes de remos de Lambot se encuentran actualmente en el museo Brignoles, en Francia. Estos barcos se construyeron de 3.66 m de largo y 1.22 m de ancho con espesores delgados de 2.5 a 3.8 cm, reforzados con emparrillado y malla de alambre. Muchos constructores de botes siguieron las técnicas de Lambot durante la segunda mitad del siglo diecinueve, destacando entre ellos Gabellini y Boon, quienes en 1887 construyeron la ahora famosa balandra Zeemeeuw.

Durante su período inicial de desarrollo, los holandeses también construyeron barcazas de mortero reforzado de 50 a 60 toneladas de capacidad para el transporte de cenizas y desperdicios por los canales.

A principios de 1900 se construyeron algunos pequeños botes de motor y barcos de río, incluyendo la primera embarcación de concreto que utilizaría el gobierno de Estados Uni-

dos, a la que se dio el nombre de "concreto". La embarcación tenía 5.5 m de largo y un casco de 1.9cm de espesor y lo usó la U.S. Naval Reserves en los Grandes Lagos. Tenía una velocidad de crucero de 10 nudos.

Durante la Primera y Segunda Guerra Mundial se prestó especial atención al uso del concreto en la construcción de barcos, y ésto se debió únicamente a la escasez de materiales tradicionales.

A principios de los años cuarenta, un notable ingeniero arquitecto italiano. Pier Luigi Nervi, resucitó la idea original de Lambot al observar que reforzando el concreto con capas de malla de alambre se obtenía un material que presentaba las características mecánicas de un material homogéneo equivalente y que demostraba tener gran resistencia al impacto.

A través de una serie de pruebas el profesor Nervi estableció las características preliminares del ferrocemento. Procedió a diseñar y construir diversas techumbres que se conservan hasta nuestros días como modelos racionales y estéticos del diseño estructural. Después de la Segunda Guerra Mundial, Nervi utilizó este material para construir barcos de poco tonelaje, siendo el mayor de ellos el velero de motor "Irene" de 165 toneladas con un casco de 3.6 cm de espesor y con peso 5% menor que el de un casco similar de madera, con un costo 40% inferior en esa época.

El ferrocemento fue aceptado por el Registro Naval Italiano y por la Armada Italiana, por lo que durante la Segunda Guerra Mundial se construyó cierto número de navíos.

Recientemente se ha tenido conocimiento de que los chinos habían estado construyendo barcos de ferrocemento mucho antes de la Segunda Guerra Mundial. Desde esa época han construido miles de barcos de ferrocemento en sustitución de barcos de madera y sampanes en distintas comunidades, entre

las cuales la más conocida es la de la Comuna Popular de Horse Bridge en la provincia de Shanghai.

Se calcula que a la fecha se han construido unos 2 000 - barcos que se usan principalmente para el transporte de mercancías dentro y fuera de la comuna. Los tamaños más comunes son los de 12 a 15 m con capacidad de carga de 6 a 10 toneladas. La mayor parte de los barcos de este tamaño son operados por medios manuales. No obstante, la Comuna Popular de Horse Bridge ha construido un barco de ferrocemento de 60 toneladas de capacidad propulsado por un motor diesel.

Nervi también fue el primero en emplear el ferrocemento arquitectónico en edificios. En 1947 construyó con ferrocemento una pequeña bodega. Posteriormente techó la alberca de la Academia Naval Italiana con una cubierta de 15 m y después la famosa Sala de Exhibición de Turín; sistema de techado con un claro de 91 m. En ambas estructuras se usó ferrocemento como uno de los elementos estructurales; las nervaduras y superficies exteriores son de concreto reforzado.

A pesar de la evidencia de que el ferrocemento era un material de construcción adecuado y económico, no logró una aceptación general sino hasta principios de la década de los sesenta, en el Reino Unido, Nueva Zelanda y Australia. Desde entonces, dueños de yates en muchos países han construido miles de embarcaciones de ferrocemento y principalmente - obras aisladas de autoconstrucción.

En 1958 se construyó en la Unión Soviética la primera estructura de ferrocemento con techo de bóveda sobre un centro comercial en la calle Reshetnikov en Leningrado. Desde entonces, en diferentes partes de la URSS se han construido con ferrocemento alrededor de 108 millones de pies cuadrados (10 millones de metros cuadrados) de techos. La mayor parte de estas estructuras tienen claros libres desde 24 a 30 m -- con techos de ferrocemento de aproximadamente 1 cm de espe--

las cuales la más conocida es la de la Comuna Popular de Horse Bridge en la provincia de Shanghai.

Se calcula que a la fecha se han construido unos 2 000 - barcos que se usan principalmente para el transporte de mercancías dentro y fuera de la comuna. Los tamaños más comunes son los de 12 a 15 m con capacidad de carga de 6 a 10 toneladas. La mayor parte de los barcos de este tamaño son operados por medios manuales. No obstante, la Comuna Popular de Horse Bridge ha construido un barco de ferrocemento de 60 toneladas de capacidad propulsado por un motor diesel.

Nervi también fue el primero en emplear el ferrocemento arquitectónico en edificios. En 1947 construyó con ferrocemento una pequeña bodega. Posteriormente techó la alberca de la Academia Naval Italiana con una cubierta de 15 m y -- después la famosa Sala de Exhibición de Turín; sistema de techado con un claro de 91 m. En ambas estructuras se usó ferrocemento como uno de los elementos estructurales; las nervaduras y superficies exteriores son de concreto reforzado.

A pesar de la evidencia de que el ferrocemento era un material de construcción adecuado y económico, no logró una -- aceptación general sino hasta principios de la década de los sesenta, en el Reino Unido, Nueva Zelanda y Australia. Desde entonces, dueños de yates en muchos países han construido miles de embarcaciones de ferrocemento y principalmente -- obras aisladas de autoconstrucción.

En 1958 se construyó en la Unión Soviética la primera estructura de ferrocemento con techo de bóveda sobre un centro comercial en la calle Reshetnikov en Leningrado. Desde entonces, en diferentes partes de la URSS se han construido con ferrocemento alrededor de 108 millones de pies cuadrados (10 millones de metros cuadrados) de techos. La mayor parte de estas estructuras tienen claros libres desde 24 a 30 m -- con techos de ferrocemento de aproximadamente 1 cm de espe--

sor. Estas gigantescas estructuras se usan en auditorios, - salas de exhibición, centros comerciales, restaurantes y bodegas para productos y maquinaria agrícola.

En 1965 el yate estadounidense "Awahnee" de ferrocemento de 16 m construido en Nueva Zelanda, navegó alrededor de la tierra sin contratiempos serios, aunque se encontró con fuertes vientos de 70 nudos, chocó con un témpano de hielo y fue embestido por un yate de casco de acero. Otros barcos de ferrocemento han demostrado ser igualmente prácticos, y su número continúa aumentando considerablemente. En 1971 la Ferrocement Marine Construction Ltd. construyó en Hong Kong un barco pesquero de ferrocemento llamado "Rosalyn I", con un largo total de 26 m y desplazamiento de 250 toneladas, considerado como el mayor barco pesquero de ferrocemento del mundo. Básicamente es el mismo diseño del barco de pasajeros Pak Tak de 16.5 m de largo, pero con dimensiones más grandes construido en los mismos astilleros a principios de 1970.

En 1973 el "Hesal", embarcación de ferrocemento presforzado de 22 m, ganó el clásico oceánico de veleros Sydney-Hobart en Australia. Asimismo, en septiembre de 1974 un constructor aficionado de barcos botó el "New Freedom", yate de ferrocemento de 25.6 m de largo; se cree que es el mayor yate de carreras oceánicas construido en Inglaterra desde la época de la guerra.

En 1978 se construyó en Leningrado una estación de superficie del metro de 43.4 x 160 m con una cubierta continua de ferrocemento. La Fibersteel Company de West Sacramento, en Estados Unidos, construiría "Chrysopolis", un casco de barco de ferrocemento de 75 m de largo y 23 m de ancho que, de tener éxito, sería el mayor casco de barco de ferrocemento.

El señor Morley W. Sutherland, conocido como el pionero de la construcción moderna de barcos de ferrocemento, ha desempeñado un papel importante en el desarrollo de la indus-

tria de construcción de barcos de Nueva Zelanda. Sus actividades en la construcción de cascos de ferrocemento comenzaron en 1959 cuando convirtió dos sacos de cemento y cierta cantidad de malla de alambre hexagonal en un barco de recreo para su familia en Whangarui, North Beach, Nueva Zelanda.

Formó una compañía llamada Ferrocement (N.Z.) Ltd., que construye barcos pesqueros de ferrocemento. Durante sus 15 años de experiencia práctica en este campo, Sutherland participó en la construcción de aproximadamente 50 barcos. El barco de ferrocemento del señor Sutherland llamó la atención de muchos neozelandeses y, en muy poco tiempo, más y más personas comenzaron a construir sus barcos de recreo en sus patios. El interés por el ferrocemento fue tan grande que en 1968 Richard Hartley formó la New Zealand Ferro Cement Marine Association (NZFCMA) con el apoyo de las personas de Auckland, quienes tenían interés en el sostenido desarrollo del ferrocemento. El propósito principal de la Asociación era mejorar, fomentar y alentar la construcción marina a base de ferrocemento. La Asociación publicó una cartilla de información que posteriormente se convirtió en el Journal of Ferrocement.

Mientras tanto, el Departamento de Pesca de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) mostró interés en el uso del ferrocemento para la construcción de barcos pesqueros en los países en desarrollo. El proyecto de construcción de barcos de ferrocemento se inició en Asia, Africa, El Pacífico y América Latina. Desde que se empezaron a construir embarcaciones de ferrocemento en 1968, la FAO ha proporcionado dirección técnica a muchos países en desarrollo para la construcción de embarcaciones de ferrocemento. En 1972 la FAO patrocinó un Seminario Internacional sobre Diseño y Construcción de Barcos Pesqueros de Ferrocemento, en Wellington, Nueva Zelanda. Este seminario reunió a reconocidas autoridades en el campo del ferrocemento de todo el mundo. El propósito del seminario era recabar datos actualizados sobre el ferrocemento en cuan

to a experiencia, métodos de construcción, costos, dimensiones, experiencias de servicio y revisión del estado actual de la tecnología de construcción de barcos, y del mismo material en sí. Se presentaron artículos técnicos de autoridades seleccionadas sobre varios temas y se estableció la base para un excelente intercambio de conocimientos y experiencias sobre el diseño y construcción de barcos de ferrocemento.

En 1972 la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos llevó a cabo una reunión de expertos para discutir respecto al uso del ferrocemento en países en desarrollo, bajo la dirección del profesor James P. Romualdi, de la Universidad Carnegie-Mellon, en Estados Unidos. En esta reunión participaron personas experimentadas en investigación y aplicaciones de ferrocemento y otras que estaban familiarizadas con la necesidad de construcción en los países en desarrollo. Esta reunión se concentró en tres tareas específicas:

1. Evaluación del estado actual de la tecnología del ferrocemento como material de ingeniería, para poder identificar y conocer sus propiedades y características.
2. Evaluación de las principales áreas de aplicación tanto en tierra como en agua.
3. Desarrollo de recomendaciones específicas para fomentar el uso del ferrocemento de manera lógica y efectiva.

El informe de la reunión publicado por primera vez a principios de 1973, ha tenido un impacto tremendo sobre las aplicaciones del ferrocemento. Identificó al ferrocemento como un material de tecnología apropiada inadvertida, con amplio potencial de aplicaciones especialmente en los países en desarrollo. Como resultado de este informe, muchas personas para quienes era desconocido se han dedicado a utilizar

lo con éxito considerable.

Un "Workshop on Introduction of Technologies in Asia - - Ferrocement, a Case Study" (Taller de introducción a las tec nologías en Asia) patrocinado por el Asian Institute of Tech nology (AIT) y la U.S. National Academy of Sciences (NAS) tu vo lugar en Bangkok, Tailandia, en noviembre de 1974. Se - analizó la utilidad de la tecnología del ferrocemento espe- cialmente para los países en desarrollo. Este Taller tam- bién reunió a ingenieros, científicos, administradores y hom bres de negocios y les dio la oportunidad de intercambiar -- puntos de vista sobre sus experiencias con el ferrocemento. El taller recomendó que la proposición original del NAS<sup>1.7</sup> - de establecer un Servicio Internacional de Información sobre Ferrocemento, se aplicara mundialmente para recabar, procesar y difundir información sobre ferrocemento. Más tarde, - en octubre de 1976, se estableció el International Ferroce- ment Information Center, IFIC (Centro Internacional de Infor mación sobre Ferrocemento) en el Asian Institute of Techno logy en Bangkok, Tailandia, con el apoyo del International De- velopment Research Center, IDRC (Centro Internacional para - el Desarrollo de Investigaciones) de Canadá y de la United - States Agency for International Development, USAID (Oficina de Desarrollo Internacional de Estados Unidos) a través de - su Misión Regional de Desarrollo Económico del Sudeste de -- Asia, en Bangkok y del gobierno de Nueva Zelanda.

El Journal of Ferrocement, revista que originalmente fue publicada en Nueva Zelanda por la New Zealand Ferro Cement - Marine Association (NZFCMA) se cedió al Centro Internacional de Información sobre Ferrocemento. Actualmente esta revista es el principal medio de difusión de dicho centro, en lo que respecta a información sobre ferrocemento.

A principios de 1977, el American Concrete Institute - - (ACI) estableció El Comité 549 sobre ferrocemento, para re- visar el estado actual de la tecnología y posiblemente para formular un Reglamento de práctica para este material.

Actualmente es obvio que el ferrocemento, versátil material de construcción, tiene brillantes perspectivas y definitivamente encontrara mayores aplicaciones en un futuro cercano.

### 10.3. MATERIALES QUE LO CONSTITUYEN:

#### 10.3.1 MALLA DE REFUERZO:

Uno de los componentes esenciales del ferrocemento es la malla de alambre. Casi en cualquier parte se dispone de diferentes tipos de malla de alambre. La malla generalmente consiste en alambres delgados, ya sean entretrejidos o soldados para formar la malla, pero el requisito principal es que sea fácil de manejar y, si fuera necesario, lo suficientemente flexible para poderla doblar en las esquinas agudas. La función de la malla de alambre y de la varilla de refuerzo es, en primer lugar, actuar con marco para dar forma y para sostener el mortero en estado fresco. Cuando endurece el mortero, la función de la varilla es absorber los esfuerzos de tensión sobre la estructura, que el mortero por sí solo no podría soportar.

Durante su vida, una estructura está sujeta a muchos golpes, torceduras y dobleces que dan como resultado grietas y fracturas, a no ser que se introduzca suficiente acero de refuerzo para absorber estos esfuerzos. El grado a que se reduzca esta fracturación de la estructura depende de la concentración y dimensiones del refuerzo ahogado. El comportamiento mecánico del ferrocemento depende en gran parte del tipo, cantidad, orientación y propiedades de la resistencia de la malla y de la varilla de refuerzo. Los principales tipos de alambre que se utilizan actualmente se describen más adelante en esta sección, y sus características generales se muestran en la tabla 10.1.

#### 10.3.2 MALLA DE ALAMBRE HEXAGONAL:

Esta es la malla más popular y más comúnmente usada y está disponible en la mayor parte de los países. Es la más económica y la de manejo más fácil. Se le conoce comúnmente como malla de alambre de gallinero y se fabrica con alam-

TABLA 10.1 Características generales de los distintos tipos de mallas

Tipo de Malla	Peso de una capa por área de unidad		Espesor de la malla		Contenido de acero		Superficie de acero estimada por volumen de unidad	
	Kg/m <sup>2</sup>	lb/pie <sup>2</sup>	mm	pulgada	Kg/m <sup>3</sup>	lb pie <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup>	pulgada <sup>2</sup> /pulgada <sup>3</sup>
Malla de alambre hexagonal Calibre 1/2" X 22	0.58	0.12	1.4	0.05	410	26	0.275	6.99
Malla Cuadrada Soldada, Calibre 1/2" X 1/2" X 19	1.08	0.22	2.0	0.08	540	34	0.248	6.30
Metal expandido								
Expanet TCG 263	1.22	0.25	2.5	0.10	490	31	0.245	6.22
Malla Watson	3.53	0.72	5.5	0.22	605	38	0.236	5.99

bre estirado en frío, que generalmente se entreteje en patrones hexagonales.

La malla de alambre utilizada en el ferrocemento por lo general tiene un diámetro de 0.05 a 0.01 cm, y las aberturas de la malla varían de 1 a 2.5 cm. La malla de alambre puede entretejarse en la obra con rollos de alambre, lo que le da al usuario mayor oportunidad de escoger el tamaño de la malla y el diámetro de alambre más apropiado para el tipo de trabajo. En la mayor parte de los casos no es necesario que la malla sea de alambre soldado. Las mallas galvanizadas es tándar, galvanizadas después de tejidas, son adecuadas. Es excelente la combinación de alambre no galvanizado con varilla de acero no galvanizada, pero el problema de la oxidación por intemperismo limita su uso.

### 10.3.3 MALLA DE ALAMBRE SOLDADO:

En esta malla generalmente se utiliza alambre de calibre dieciocho o diecinueve. Este alambre está hecho de acero -- con resistencia a la tensión baja o mediana, y es mucho más rígido que el que se utiliza en las mallas hexagonales. Algunos constructores prefieren este tipo de malla ya que puede moldearse más fácilmente, conformándose a las curvas de la estructura, produciendo líneas más suaves. Desafortunadamente, la malla de alambre soldado tiene la posibilidad de presentar puntos débiles en las intersecciones -- que resultan de una soldadura inadecuada durante la fabricación de la malla. Esta deficiencia puede imponer serias limitaciones aun cuando se emplee un alambre de acero de alta resistencia para lograr una mejor malla. Las pruebas han demostrado que, en muchos casos las mallas hechas de alambre de mejor calidad tienen mayor tendencia a fallar que otros tipos de mallas, cuando las intersecciones están sujetas a carga. Por lo general la malla de alambre soldado, al igual que otros tipos de malla, se galvanizan después de soldada.

#### 10.3.4 MALLA ENTRETEJIDA:

En este tipo de malla, los alambres están simplemente en tretejidos al tamaño de la cuadrícula deseada y no están sol- dados en las intersecciones. Los alambres de la malla no es tán perfectamente derechos y existe cierto grado de ondula- ción. No obstante, las pruebas indican que esta malla se -- comporta tan bien o mejor que las mallas soldadas o las hexa gonales. Uno de los problemas con esta malla es que es di- fícil mantenerla en una posición, pero al estirarla fácilmen- te se somete a las curvas deseadas.

#### 10.3.5 MALLA DE METAL DESPLEGADO:

Existe otro tipo de malla que algunas veces se usa en - la construcción con ferrocemento, conocida como de metal des plegado o como marco metálico de yesero. Se forma cortando una hoja delgada de metal desplegado para hacer aberturas en forma de diamante.

El proceso de fabricación es menos laborioso que el mé- todo usado para fabricar la malla hexagonal de alambre o la malla de alambre soldado. Es bien sabido que el metal des- plegado, por su peso, no es tan resistente como la malla en- tretejida, pero en cuanto a la relación que existe entre el costo y la resistencia, el metal desplegado tiene mayor ven- taja, Byrne y Wright han efectuado investigaciones respecto a la posibilidad de emplear como refuerzo metal desplegado - como una alternativa de la malla de alambre. No parece ha- ber desventajas importantes en el uso del metal desplegado, y de hecho existen ventajas inherentes tales como una buena adherencia mecánica y facilidad de colocación. Una pequeña desventaja del metal desplegado es que tiende a abrirse debi- do a la acción de "tijera" de la malla en forma de diamante. Obviamente existe un límite en cuanto al tamaño y al peso -- del metal desplegado que puede usarse para evitar esta ac- - ción de "tijera". Pruebas recientes con un material más li-

gero con aberturas de 0.19 y 2.54 cm mostraron resultados -- más satisfactorios.

#### 10.6 MALLA WATSON:

Un nuevo tipo de malla, fue diseñado por Mesh Industries Ltd., en Nueva Zelanda. La malla consiste en alambres rectos de alta resistencia y en un alambre ondulado transversal que mantiene en posición estos alambres. Los alambres de alta resistencia están colocados en dos niveles paralelos uno al otro, y están separados de los primeros por alambre de -- acero dulce transversal. Solamente el alambre ondulado de -- unión excede su límite de elasticidad y sólo en la proximi--dad del ondulado. Esto significa que una vasta proporción -- del alambre está recto, sin ondulaciones, presiones, golpes o soldaduras. El resultado es una malla muy resistente que no está sujeta a ruptura durante el manejo o por esfuerzos en el mortero fraguado. Esta malla permite una completa flexibilidad y libertad de forma. Una de las características -- más atractivas de la malla Watson, es la posibilidad de ahor--rar de manera significativa en la mano de obra, que es esencial por tres razones.

1. Debido a su forma geométrica y a sus alambres de alta resistencia, se reduce la necesidad de amarrar, remover, enlazar o sacudir, así como el golpeteo del ta--blero necesario para el acabado final del concreto -- aparente.
2. Se reduce el tiempo de aplicación de la malla ya que una capa es equivalente a varias capas de otras ma--llas.
3. Frecuentemente puede eliminarse la colocación de vari--llas de acero del armazón debido a la alta resisten--cia de la malla. Tomando en cuenta el costo por uni--dad/peso, la malla Watson es la más económica, al me

nos en Nueva Zelanda.

En el sobrio edificio West Plaza de Auckland se utilizó esta malla para construir sus gigantescos pabellones. En un proyecto habitacional de bajo costo en Nueva Guinea, se utilizó malla Watson para colocar tableros lisos para sus muros estructurales y techos.

### 10.3.7 ACERO DEL ARMAZÓN:

El acero del armazón, como su nombre lo indica, se emplea generalmente para hacer el armazón de la estructura sobre la cual se colocan las capas de malla. Tanto las varillas longitudinales como las transversales se distribuyen -- uniformemente y se amoldan a la forma deseada. Las varillas se separan lo más posible hasta una distancia de 30 cm, donde no son tratadas como refuerzo estructural, sino que frecuentemente se les considera como varillas de separación para los refuerzos de la malla. En algunos casos el acero de armazón se separa a una distancia de 7.5 cm de centro a centro, actuando así como un elemento principal de refuerzo con malla de alambre en estructuras altamente esforzadas, por -- ejemplo, barcos, barcasas, secciones tubulares, etc.

En la construcción con ferrocemento se usan varillas de acero de varias clases. Su resistencia, acabado superficial recubrimiento de protección y tamaño, afectan su comportamiento como elemento de refuerzo del compuesto. Por lo general, tanto para la dirección longitudinal como para la transversal, se usan varillas de acero dulce.

En algunos casos se usan varillas de alta resistencia y alambre retorcido pretensado. El tamaño de la varilla varía de 0.42 a 0.95 cm (0.165 a 3/8 de pulgada), siendo el más común el de 0.63 cm (1/4 de pulgada). Los tableros de ferrocemento con varillas longitudinales transversales de estas -- medidas tienen 2.54 cm de espesor aproximadamente. Puede usarse una combinación de varillas de diferentes medidas con varillas de diámetro menor en dirección transversal.

### 10.3.8 CEMENTO:

En un sentido más amplio, el cemento puede describirse -- como un material con propiedades de adherencia y cohesión -- que lo hacen capaz de aglutinar fragmentos minerales en una masa compacta. Desde la antigüedad se ha empleado alguna -- forma de mortero para aglutinar piedra, grava y algún otro -- material para propósitos estructurales. A través de los -- años se ha escrito mucho sobre el tema del concreto y del ce -- mento en sus diversas formas.

El material adhesivo o matriz en el ferrocemento lleva -- el nombre de mortero. Normalmente está hecho de cemento Por -- tland y arena común de sílice. En presencia del agua, el ce -- mento reacciona para formar un gel cementante que con el -- tiempo produce una masa firme y dura, es decir, la pasta de cemento endurecido. Esta pasta, en su estado fresco, agluti -- na las partículas del agregado que da como resultado un mate -- rial denso, quebradizo. Las propiedades del mortero se ri -- gen por el tipo de calidad de los materiales que lo constitu -- yen, la proporción en que están combinados, sus condiciones de preparación y factores ambientales.

Son muchas las variables que pueden afectar las propieda -- des del producto final. Los requisitos generales para ele -- mentos de ferrocemento son: que tengan resistencia a la com -- presión, impermeabilidad, dureza y resistencia al ataque quí -- mico, lo más elevadas posibles y, tal vez el factor más im -- portante de todos, que su consistencia se mantenga uniforme, compacta, sin huecos, detrás de las concentraciones del re -- fuerzo y de las mallas. La resistencia del mortero es inver -- samente proporcional a su relación agua/cemento, en tanto -- que su trabajabilidad es directamente proporcional a la can -- tidad de agua utilizada. Como por lo general diversas pro -- piedades del mortero están relacionadas con su resistencia a la compresión, es obvio que el uso excesivo de agua en la -- mezcla, para facilitar el colado del mortero, afecta adversa -- mente a la mayor parte de otras propiedades esenciales. En

esta situación debe llegarse a un entendimiento adecuado para obtener un producto final satisfactorio.

Muchos de los cementos se han elaborado para asegurar la buena durabilidad del concreto en diversas condiciones ambientales. Sin embargo, no ha sido posible encontrar en la constitución del cemento una respuesta total al problema de la durabilidad de concreto; las principales propiedades mecánicas del concreto endurecido, tales como resistencia, contracción, permeabilidad, resistencia a fenómenos climáticos y a la fluencia, se ven afectadas también por otros factores además de la constitución del cemento, aunque esto determina en gran parte la velocidad de desarrollo de resistencia.

Existen diversos tipos de cemento disponibles comercialmente, de los cuales el cemento Portland es el más conocido y de más fácil adquisición. Los elementos de la variedad -- Portland, producidos actualmente, son muy adecuados para satisfacer los propósitos de la construcción con ferrocemento. Más adelante, en esta sección, se describen otros tipos de cemento que se han encontrado útiles en la construcción con ferrocemento. En la tabla 10.2 se detalla la composición de los diferentes tipos de cemento Portland.

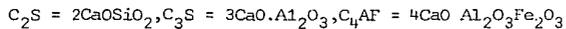
#### Tipos de Cemento Portland Adecuados para la Construcción de Ferrocemento.

El cemento Portland ordinario Tipo I y Tipo II es adecuado para aplicarse cuando no se presentan condiciones especiales, o no se requiera de propiedades especiales.

Portland Tipo I: No se recomienda el cemento Portland Tipo I para estructuras que pueden estar sujetas a fuertes ataques de sulfatos en el terreno, agua dulce o agua de mar, -- así como a elevaciones excesivas de temperatura debido a hidratación. Frecuentemente el Tipo I se utiliza en la construcción de barcos de ferrocemento en climas calientes, ya -

TABLA 10.2 Valores típicos de la composición del compuesto de cementos Portland de diferentes tipos.

Cemento	Valor	Composición del compuesto, por ciento							Número de muestras	
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaSO <sub>4</sub>	CaO libre	Mg <sub>1</sub>		Pérdida por ignición
Tipo I	Máx.	67	31	14	12	3.4	1.5	3.8	2.3	21
	Mín.	42	8	5	6	2.6	0.0	0.7	0.6	
	Medio	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4	1.2	
Tipo II	Máx.	55	39	8	16	3.4	1.8	4.4	2.0	28
	Mín.	37	19	4	6	2.1	0.1	1.5	0.5	
	Medio	46	29	6	12	2.8	0.6	3.0	1.0	
Tipo III	Máx.	70	38	17	10	4.6	4.2	4.8	2.7	
	Mín.	34	0	7	6	2.2	0.1	1.0	1.1	
	Medio	56	15	12	8	3.9	1.3	2.6	1.9	
Tipo V	Máx.	54	49	5	15	3.9	0.6	2.3	1.2	22
	Mín.	35	24	1	6	2.4	0.1	0.7	0.8	
	Medio	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6	1.0	



que no genera tanto calor como otros tipos de cemento durante la hidratación. Hasta ahora, los cementos Portland ordinarios formulados para condiciones bajas de sulfato, han tenido un comportamiento satisfactorio en embarcaciones de ferrocemento. Sin embargo, es posible que esto se deba al uso de pinturas epóxicas protectoras.

Portland Tipo II: A este tipo de cemento también se le conoce como cemento modificado. El uso de este cemento proporciona resistencias iniciales bajas y resistencias últimas más altas, dando una estructura de gel más denso.

Cemento Portland de endurecimiento rápido (Tipo III): -- El cemento Portland de endurecimiento rápido (Tipo III) como lo implica su nombre, adquiere su resistencia más rápidamente y se elige especialmente cuando se requiere de una resistencia inicial alta. La resistencia adquirida al cabo de -- tres días es del mismo orden que la resistencia de 7 días -- del cemento Portland ordinario, con la misma relación agua/cemento. De los cementos de bajo costo de que se dispone actualmente, el cemento Portland de endurecimiento rápido, y -- con granulometría más fina, ofrece características considerablemente mejores que la variedad ordinaria. Es obvio que el cemento de endurecimiento rápido que muestra un alto nivel -- de desarrollo de calor durante la hidratación en construcciones masivas, no debe tener un efecto perjudicial cuando se -- utiliza en secciones delgadas de ferrocemento. Por otra parte, en las construcciones a bajas temperaturas el uso de cemento con un alto nivel de liberación de calor, puede ser -- una salvaguarda satisfactoria para el daño producido por las heladas.

El uso de un cemento de endurecimiento rápido puede -- crear problemas en un clima caliente debido a una acelerada velocidad de fraguado inducida por la temperatura del aire.

Cemento Portland resistente a los sulfatos (Tipo V): El cemento Portland resistente a los sulfatos (Tipo V), se reco

mienda principalmente para la construcción con ferrocemento en ambientes marinos y en estructuras susceptibles al ataque por sulfatos. Tiene un tiempo de fraguado promedio y, por lo tanto, no presionará al constructor para apresurar la obra durante el aplanado, lo que tendría como resultado una sección pobremente compactada. Sin embargo, debido a los requisitos especiales para la composición de las materias primarias usadas en su fabricación, este tipo de cemento resistente a los sulfatos por lo general no puede producirse a bajo costo.

#### 10.3.9 CEMENTO PORTLAND DE ESCORIA DE ALTO HORNO:

Frecuentemente se recomienda el cemento Portland de escoria de alto horno para las construcciones marinas de ferrocemento, pero su empleo no es muy frecuente ya que no está -- disponible en abundancia. Este tipo de cemento se hace molliendo juntos clinker de cemento Portland y escoria granulada de alto horno, no excediendo la proporción de este último en 65% del peso de la mezcla, como lo prescribe la norma -- B.S. 146:1958. Las propiedades resultantes del cemento dependen, en gran parte, de las características de la escoria de alto horno. Esta presenta grandes diferencias en su composición y estructura física, dependiendo del proceso utilizado y del método de enfriamiento de la escoria. La velocidad de fraguado del cemento Portland de escoria de alto horno es menor que la del cemento Portland, aun cuando la finura del primer tipo tiende a ser mayor que la del último, por lo que un curado adecuado es de gran importancia. Sin embargo, en años recientes ha habido poca diferencia entre la resistencia de los cementos Portland de escoria de alto horno y el Portland ordinario. El bajo calor de hidratación del cemento Portland de escoria de alto horno, junto con un nivel moderadamente bajo de desarrollo de resistencia, puede dar lugar a daños por heladas, por lo que su uso no se recomienda en climas fríos. Tiene ventajas especiales para los constructores con ferrocemento; su baja velocidad de fragua-

do da un mayor margen para trabajar el mortero con el acero de refuerzo y efectuar el acabado. Asimismo, debido a su -- alta resistencia a los sulfatos, el cemento Portland de esco- rria de alto horno se recomienda para usarse en ferrocemento que vaya a estar sujeto al ataque de sulfatos.

#### 10.3.10 CEMENTO PORTLAND PUZOLANICO:

El cemento Portland puzolánico se obtiene al moler jun-- tas o combinar mezclas de cemento Portland y puzolana. La - puzolana es un material natural o artificial que contiene - sílice en una forma reactiva y puede representar hasta el 40% de la cantidad total de material del cemento. Sin embar- go, por regla general los cementos Portland puzolánicos ad-- quieren su resistencia muy lentamente y requieren curarse du- rante un tiempo comparativamente largo, pero su resistencia última es aproximadamente la misma que la del cemento Por- - tland ordinario aislado. Sin embargo, este nivel de desarro- llo de resistencia depende de la calidad de la puzolana des- de el punto de vista de su reactividad y de la proporción de cemento Portland. El cemento Portland puzolánico muestra -- buena resistencia al ataque de sulfatos y a otros agentes -- destructivos, y es frecuentemente recomendado por expertos - en ferrocemento. Otras ventajas en el empleo de este tipo - de cemento son su precio competitivo en comparación con el - del cemento Portland y su bajo nivel de calor de hidrata- - ción. Por ejemplo, las cenizas de la cáscara de arroz satis- hacen todos los requisitos de la puzolana ASTM clase N y -- pueden mezclarse (hasta 20% del peso) con cemento Portland - sin efectos perjudiciales en las propiedades del mortero.

### 10.3.11 AGREGADOS:

Agregado es el término dado al material inerte disperso dentro de la pasta de cemento. Este material inerte ocupa del 60 al 70% del volumen del mortero. Por lo tanto, los -- agregados utilizados para la producción de mortero de alta -- calidad, para e estructuras de ferrocemento, deben ser fuer-- tes, impermeables y capaces de producir una mezcla suficien-- temente trabajable con una relación agua/cemento mínima para lograr la penetración apropiada en la malla. El agregado -- normalmente empleado es arena natural, que puede ser una mez-- cla de muchos tipos de material tales como sílice, roca ba-- sáltica, piedra caliza o aun el coral blando. Se puede obte-- ner una mezcla suficientemente fuerte basada en ciertos ti-- pos de arena de coral, empleando cantidades adicionales de -- cemento. Debe tenerse mucha precaución en la selección de -- dichas arenas, ya que las arenas blandas pueden verse seria-- mente afectadas por la abrasión y reacciones químicas. Un -- material poroso permitirá la entrada de humedad dentro de -- secciones muy delgadas afectando la durabilidad y el compor-- tamiento estructural del mortero.

La granulometría de las partículas de arena es importan-- te y debe cumplir, en lo posible, con la especificación C33-- 74a de la norma ASTM para los agregados del concreto. En la tabla 10.3 y en la figura 10.1 muestran los límites de granu-- lometría del agregado fino, de la especificación C33-74a de la norma ASTM. Shah y Key han demostrado que no hay efectos sobre la resistencia a la tensión del ferrocemento debidos a variaciones en la granulometría de la arena, o en el volumen y tipos de arena. Por otra parte, la resistencia a la com-- presión, que depende principalmente de las características -- del mortero, sí es sensible a la variación de los tipos de -- arena. Es especialmente interesante observar que el uso de arena ligera, arcilla esquistosa expandida o vermiculita, no tuvieron influencia sobre la resistencia a la tensión, aun -- cuando la densidad se redujo hasta un 33% cuando se utilizó arena de vermiculita. La resistencia a la compresión con --

arena de vermiculita fue de menos de la mitad que la de las muestras hechas con arena natural.

TABLA 10.3 Especificación C33-74a de la ASTM para agregado fino (arena)

Tamiz	Porcentaje que pasa
3/8" (9.50 mm)	100
Núm. 4 (4.75 mm)	95 a 100
Núm. 8 (2.36 mm)	80 a 100
Núm. 16 (1.18 mm)	50 a 85
Núm. 30 (600 m)	25 a 60
Núm. 50 (300 m)	10 a 30
Núm. 100 (150 m)	2 a 10

La experiencia actual nos demuestra que la arena que con tiene sílice dura angulosa, partículas de roca, arena volcánica y arena de mar, es adecuada, pero no debe tener un exceso de partículas finas. Los desperdicios orgánicos, el barrero, el limo y polvos finos que no se adhieren al mortero, - reducen la resistencia del ferrocemento y deben descartarse. Desayi y Prasanna Kumar investigaron elementos de muros de - ferrocemento ligero, utilizando espuma de escoria de alto -- horno pasándola a través de un tamiz (0.48 cm), en lugar de arena, en un mortero de cemento. Los resultados de las pruebas demostraron que este agregado parece ser de gran valor, pero que se necesitan investigaciones adicionales para llegar a métodos adecuados de diseño.

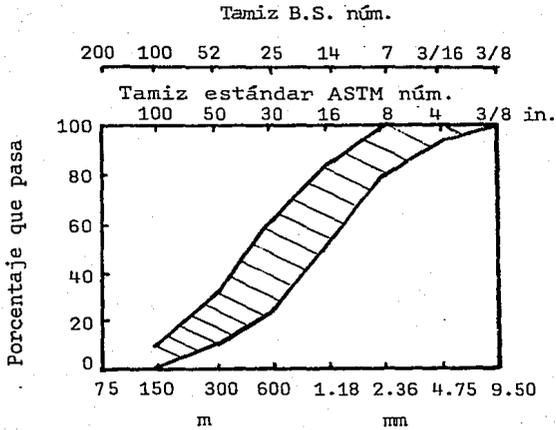


FIG. 10.1 Límites deseables del tamaño del agregado (arena)

### 10.3.12 CALIDAD DEL AGUA DE LA MEZCLA

La calidad del agua para mezclar el mortero es de vital importancia para el ferrocemento endurecido resultante. Las impurezas del agua pueden interferir en el fraguado del cemento y afectar adversamente la resistencia o provocar manchado en la superficie, y asimismo provocar la corrosión del refuerzo.

El agua puede contener impurezas tales como barro, lama, ácidos, sales solubles, materiales vegetales en descomposición y muchas otras sustancias orgánicas que probablemente se encuentren en agua potable de buena calidad.

Deben tomarse las precauciones necesarias antes de usar agua de mar para mezclar el mortero, ya que aumentará el riesgo de corrosión de la malla y del refuerzo. Generalmente el agua de los servicios públicos está considerada como satisfactoria y no requiere ningún tratamiento adicional.

### 10.3.13 ADITIVOS:

Generalmente se usan aditivos para alterar o mejorar una o más de sus propiedades. La mayor parte de los aditivos - se usan para mejorar la trabajabilidad, para reducir la exigencia de agua y para prolongar el fraguado del mortero. -- Los aditivos pueden ser clasificados en grupos según el efecto que deben producir. Los aditivos más comúnmente utilizados en ferrocemento son:

1. Aditivos reductores de agua: Tipo A: ASTM C494-71
2. Aditivos retardantes: Tipo B: ASTM C494-71
3. Aditivos reductores de agua y retardantes: Tipo D: -- ASTM C494-71
4. Aditivos reductores de agua y acelerantes: Tipo E: -- ASTM C494-71

En la tabla 10.4 se muestran los requisitos físicos de - la norma ASTM para estas distintas clases de aditivos. Puesto que los efectos específicos producidos por los diversos - tipos de aditivos pueden variar con las propiedades de los - otros ingredientes del mortero, es necesario hacer pruebas - previas con diferentes tipos de aditivos antes de intentar - recubrir las estructuras de ferrocemento. La cantidad de -- aditivos representa, generalmente, sólo una fracción de 1% - del peso del cemento en la mezcla, por lo cual es indispensable el empleo de equipo confiable de medición.

TABLA 10.4 Requisitos físicos<sup>a</sup> ASTM (C494074) de aditivos utilizados comúnmente. (1).

	Tipo B reductor de agua	Tipo B, retardante	Tipo D, reductor de retardante	Tipo E, reductor de agua y acelerante
Contenido de agua, máximo porcentaje de control	95	-	95	95
Tiempo de fraguado, desviación permisible del control, horas, mín.				
Inicial: al menos no más de	ni 1:00 antes	1:00 después	1:00 después	1:00 antes
Final: al menos no más de	ni 1:30 después	3:30 después	3:30 después	3:30 después
	-	-	-	1:00 antes
	ni 1:00 antes	3:30 después	3:30 después	-
	ni 1:30 después			
Resistencia a la compresión, <sup>b</sup> mín. por ciento del control				
3 días	110	90	110	125
7 días	110	90	110	110
28 días	110	90	110	110
6 meses	100	90	100	100
1 año	100	90	100	100

Resistencia a la flexión,  
mín. por ciento del  
control<sup>b</sup>

3 días	100	90	100	110
7 días	100	90	100	100
28 días	100	90	100	100

Cambio en longitud,  
contracción máxima  
(requisitos alternativos),<sup>c</sup>

Porcentaje del control	135	135	135	135
Aumento sobre el control	0.010	0.010	0.010	0.010
Factor de durabilidad relativa, mín. <sup>d</sup>	80	80	80	80

- a) Los valores en la tabla incluyen el margen para variaciones normales en los resultados de las pruebas. El propósito del requisito del 90% de resistencia a la compresión para el aditivo Tipo B, es exigir un nivel de comportamiento comprobable al del concreto de referencia.
- b) La resistencia a la compresión y a la flexión del concreto que contiene el aditivo bajo prueba, a cualquier edad de la prueba, no debe ser menor del 90% del obtenido a cualquier edad previa de la prueba. El propósito de fijar este límite es exigir que la resistencia a la compresión o a la flexión del concreto que contiene el aditivo bajo prueba, no se reduzca con la edad.
- c) Requisitos alternativos, se aplica el límite de porcentaje del control cuando el cambio de longitud del control es de 0.30% mayor; se aplica el límite de aumento sobre el control cuando el cambio de longitud del control es de menos de 0.030%.
- d) Este requisito se aplica únicamente cuando el aditivo va a usarse en concreto con inclusión de aire que pueda quedar expuesto a congelación o descongelación estando húmedo.

#### 10.3.14 RECUBRIMIENTO:

Por lo general, las estructuras de ferrocemento no necesitan protección alguna, a no ser que se sometan a fuertes ataques químicos que dañen la integridad estructural de sus elementos. Una superficie ya aplanada puede admitir una buena capa de pintura. En estructuras terrestres, se aplica a la superficie pintura ordinaria para mejorar su apariencia - Las estructuras marinas necesitan protección contra la corrosión y se ha encontrado que los recubrimientos de vinilo y - epóxico son los mejores recubrimientos orgánicos.

#### 10.4 PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCION:

La construcción con ferrocemento, a diferencia de otras construcciones complejas, requiere un mínimo de trabajo especializado y utiliza materiales fácilmente disponibles.

Debe ponerse especial atención al control de calidad de la construcción, ya que de otra manera se alterarán los propósitos de la construcción con ferrocemento de espesor delgado. La habilidad en las técnicas de construcción con ferrocemento se adquiere rápidamente, y el requisito de control de calidad de la fabricación se logra bajo la supervisión de una persona experimentada, aunque la mano de obra no sea calificada. Entre otras ventajas, la más importante es que -- puede fabricarse cualquier forma deseada que se ajuste a las necesidades del usuario.

Los cuatro pasos principales en la construcción de ferrocemento son: la colocación de la malla de alambre en posición adecuada, la mezcla del mortero, su aplicación y el curado. A continuación se hace una descripción general de estos puntos, aplicables a la mayoría de las construcciones.

#### 10.4.1 REFUERZO:

En estructuras sujetas a grandes esfuerzos, como barcos, barcazas, etc., la varilla de acero, al igual que la malla de alambre, están consideradas como los elementos del refuerzo que proporcionan resistencia y rigidez estructural en tanto que, en la mayor parte de las estructuras terrestres, se considera a la malla de alambre como el refuerzo principal.

Las varillas, tubos (en la construcción de barcos y barcazas) y malla de alambre de refuerzo, deben distribuirse -- uniformemente y moldearse a la forma deseada. El contenido de acero en el ferrocemento varía casi desde 1 hasta 8% del volumen. En estructuras altamente reforzadas la distribución de la varilla de acero y de la malla debe hacerse de -- tal manera que permita la adecuada penetración del mortero, dando como resultado un material denso, libre de huecos. La malla de refuerzo debe estar firmemente soldada o sujeta de alguna otra manera, para que se mantenga en su posición original durante la aplicación del mortero y el vibrado.

Por lo general se recomienda el uso de varillas de acero dulce, pero para estructuras sujetas a grandes esfuerzos, tales como barcos, barcazas, etc., es preferible la varilla de alta resistencia. En la práctica actual, la varilla más comúnmente usada, tanto para el acero longitudinal como para la transversal, varía en un diámetro entre 0.5 a 0.625 cm. Generalmente la abertura de las varillas de acero varía desde 7.6 cm hasta 30 cm, dependiendo del tipo de estructura. -- Los constructores de barcos generalmente recomiendan una -- abertura de 7.6 cm, en tanto que en estructuras tales como tanques para agua, silos, etc., en las cuales las varillas de acero no se consideran como refuerzo estructural, pueden tener una mayor abertura para sostener la malla de alambre en la forma deseada. En la mayoría de las estructuras, la -- longitud de traslape varía de 23 a 30 cm. Las varillas en -- las uniones generalmente se amarran con alambre de acero, -- pero en algunas se hacen uniones soldadas si se cuenta con --

el equipo necesario.

La malla de alambre, generalmente galvanizado (aunque es preferible no galvanizado), se coloca tanto al lado interior como al exterior de las varillas de acero. El número de capas varía desde dos hasta ocho dependiendo del diseño. Las mallas de alambre se amarran a las varillas de acero, con alambre galvanizado, en intervalos de 15 a 30 cm. Las mallas de alambre hexagonal y las de metal desplegado resisten mayores cargas en dirección longitudinal que en dirección transversal, lo que indica la dirección conveniente de colocación de la malla de alambre, es decir, paralela a la dirección del esfuerzo mayor. Sin embargo si se coloca la malla de alambre, alternativamente, en dos direcciones, proporciona más o menos material isotrópico y constituye una práctica común en nuestros días.

Es importante dejar que la malla se acomode por sí misma en cuanto sea posible, aunque esto signifique un traslape mayor en algunas partes. Si los traslapes ocasionaran dificultades para el trabajador, entonces se podrá cortar el exceso de traslape. Sin embargo, en todos los casos debe mantenerse una longitud mínima de traslape de 5 cm.

#### 10.4.2 PREPARACION DEL MORTERO:

El mezclado del mortero debe hacerse en proporciones adecuadas para lograr firmemente la resistencia requerida de diseño. Las proporciones de la mezcla están en relación con el peso; la proporción de cemento-arena generalmente varía de 1 parte de cemento por 1.5 a 2 partes de arena. La relación agua/cemento debe mantenerse lo más baja posible para darle al material calidad y trabajabilidad consistentes. En toda construcción debe mantenerse, en lo posible, una relación agua/cemento cercana al 0.40 por peso. Si fuera necesario, pueden usarse puzolana u otros aditivos al momento de hacer la mezcla, de acuerdo con la cantidad prescrita. Se dispone de un gran número de productos patentados; sus efectos los describen los fabricantes, pero los detalles completos de la acción de muchos de estos aditivos están aún por determinarse, y el comportamiento de cualquiera de éstos debe verificarse cuidadosamente antes de usarlo.

La experiencia demuestra que en la mayor parte de los casos el mezclado manual es satisfactorio cuando se hace apropiadamente. Pero para estructuras grandes y elementos fabricados en planta se recomienda el uso de una revolvedora horizontal de aspas de paleta, para obtener una mezcla de alta calidad. La revolvedora de aspas de paleta requiere comparativamente menos agua que la revolvedora de tambor. En la práctica, la arena y el cemento se mezclan apropiadamente y después les agrega la cantidad necesaria de agua. Cada carga debe mezclarse hasta que se forme una mezcla uniforme. El tiempo mínimo de mezclado es de tres minutos.

### 10.4.3 APLICACION DEL MORTERO:

Con frecuencia se considera que la aplicación del mortero es la fase más crítica de toda la técnica de construcción de ferrocemento. Antes de comenzar a aplicar el mortero a una estructura, debe verificarse que todas las varillas de acero y las mallas de alambre están en posición apropiada. Los refuerzos que se utilicen deben estar libres de rebaba de laminado, grasa y otros contaminantes. Deben cepillarse antes de comenzar el trabajo de aplicación del mortero.

La aplicación del mortero a mano ha demostrado ser el método más satisfactorio. Se utilizan los dedos y llanas para aplicar el mortero sobre la estructura formada por la malla de alambre. Debido a lo compacto de la mezcla, el mortero permanece en su posición después de colocado. No se necesita cimbrado, sin embargo, en algunos casos puede usarse una tabla de madera o una placa de acero como apoyo temporal del mortero y puede quitarse inmediatamente después de colocar y vibrar el mortero.

Se han elaborado diferentes métodos de técnicas de aplicación de mortero, especialmente en la industria de construcción de barcos, por ejemplo, métodos en una y en dos etapas. El método en una etapa se refiere a una sola aplicación monolítica del mortero para rellenar la malla de acero, dando el acabado tanto interior como exterior al mismo tiempo, antes de que se inicie el fraguado del mortero de cemento.

El método en dos etapas se refiere al procedimiento de aplicar el mortero primero en un lado, presionándolo hasta que pase hasta las superficies internas del alambre central, se da el acabado al lado externo y se cura; los huecos que quedan se llenan después desde el otro lado, y posteriormente se les da el acabado y el curado.

#### 10.4.3.1 TECNICA EN UNA ETAPA:

La práctica recomendada es forzar el mortero de afuera - hacia adentro de la malla y posteriormente darle un acabado liso. Pero esta técnica es muy difícil y requiere de una - considerable habilidad para que el mortero penetre totalmen- te en las capas de malla de alambre y las varillas de acero sin dejar hueco alguno en el interior.

En ninguna circunstancia debe aplicarse el mortero de - un lado, hasta que el del otro haya penetrado totalmente. - Nunca debe aplicarse el mortero simultáneamente en los dos - lados, puesto que esto invariablemente da como resultado que quede aire atrapado entre las capas, produciendo laminación en la superficie del casco.

Al usar la técnica en una etapa, tal vez la mejor manera sea aplicar el mortero en el lado, poniendo en el otro, como cimbra temporal, hojas de triplay y tiras similares de mader- a, contra las cuales pueden trabajar los vibradores. Es la mayor parte de los casos un vibrador manual con un pedazo de madera y un mango integrado es suficiente para lograr la pe- netración total del mortero en la malla y para asegurar una buena compactación. Por experiencia se ha encontrado que la lijadora orbital común (una sencilla herramienta mecánica utilizada mucho en la industria de la carpintería) con una - placa de metal en sustitución de la lija, proporciona la in- tensidad correcta de vibración. La vibración se efectúa - cuando el mortero ya está colocado para evitar que éste sea arrojado fuera de la malla. No obstante, debe vigilarse cui dadosamente el uso de vibradores para asegurar que el morte- ro ya colocado no sea alterado subsecuentemente.

Al aplicar el mortero también es importante asegurar que el recubrimiento final, o capa de acabado, que conforma la - estructura, se coloque antes de que ocurra el fraguado final de la aplicación del mortero principal.

#### 10.4.3.2 TECNICA EN DOS ETAPAS:

Debido a las diferentes dificultades experimentadas con la aplicación del mortero en una sola etapa, en la mayoría de los casos se prefiere la técnica de aplicación de mortero en dos etapas, especialmente en la industria de construcción de barcos. La ventaja principal en este proceso es que al aplicar el mortero en el lado contrario puede forzarse el mortero en la superficie sólida ocasionando menos huecos. Sin embargo, la vibración es esencial cuando se está aplicando la segunda capa de mortero. El no hacerlo daría como resultado que quedarán aire y huecos entre las dos capas.

El uso del vibrador elimina el aire y asegura una compactación total. Después de terminar la primera aplicación del mortero en la operación en dos etapas y de haber aplanado la superficie de la manera acostumbrada, debe dejarse curar la estructura con humedad, al menos durante 10 a 14 días. Antes de aplicar la segunda capa, es esencial limpiar bien la superficie y quitar todo el material suelto. Después puede extenderse o aplicarse a manera de pintura, sobre la superficie, una lechada de cemento con consistencia gruesa, antes de la aplicación del mortero. Esta técnica evita el riesgo de separación entre las dos capas, pero aún quedan dudas respecto a la calidad absoluta de la unión entre las dos capas.

Las ventajas de adoptar este método, especialmente en la industria de construcción de barcos, es que nadie está dentro del barco por lo que no hay probabilidades de que se fracture el mortero colado antes de que frague apropiadamente. Otra ventaja es que puede dedicarse más tiempo al acabado de la parte exterior.

#### 10.4.3.3 APLICACION DEL MORTERO POR SECCIONES:

Al efectuar la operación de aplicación de mortero de estructuras grandes de ferrocemento, puede ser preferible ha-

cerlo por secciones, utilizando el proceso en una sola etapa. En este caso es deseable mantener las juntas de construcción lo más limpias posibles y, si es necesario, sopletear el -- mortero excedente de los bordes con aire comprimido antes de que ocurra el fraguado. Antes de iniciar la siguiente aplicación de mortero, las juntas deben cubrirse con lechada o, si se prefiere, con una resina epóxica que asegura una unión más perfecta. En muchos casos, la aplicación del mortero -- por secciones ha demostrado ser extremadamente satisfacto- - ria.

Las desventajas del método es la dificultad de lograr una unión regular y uniforme entre las secciones, y esto también se debe a la diferencia en la contracción de las capas de -- mortero que, por supuesto, tienen edades distintas.

#### 10.4.4 ACABADO

En el curso de la operación normal de aplicación del mor- tero debe llevarse a cabo el acabado de la superficie antes de que ocurra el fraguado final. El recubrimiento libre del refuerzo en el ferrocemento no debe ser de más de 1.25 cm, -- aunque uno de 0.15 cm se considera conveniente en muchos casos. Durante todo el tiempo del proceso de aplicación del -- mortero deben usarse tablas grandes de madera para asegurar que la superficie esté pareja, y para evitar la formación de protuberancias o huecos entre las varillas de acero y el armazón, si éstas se usan. Esto ayuda a quienes aplican el -- mortero a darse cuenta de dónde se requiere más mortero para llenar los huecos o dónde debe quitarse el exceso de morte-- ro. Después de terminar esta operación deberá aplanarse la superficie con llanas de madera. Al finalizar la operación anterior se da un aplanado a la superficie para obtener un -- acabado liso. Si se requiere de una superficie áspera que proporcione una buena adherencia para la pintura, debe utili- zarse una esponja.

#### 10.4.5 CURADO:

Para poder obtener un mortero endurecido de buena calidad, la aplicación y compactación deberá estar seguida por un curado en ambiente adecuado durante las etapas tempranas de endurecimiento.

Cuando es el nombre que se le da a los procedimientos -- utilizados para estimular la hidratación del cemento, y consiste en una temperatura controlada y en el movimiento de humedad causado por ésta dentro del mortero.

De manera más específica, el propósito del curado es conservar saturado el mortero hasta que el espacio originalmente lleno de agua en la pasta de cemento fresco, se haya llenado al grado deseado por los productos de hidratación del cemento. La hidratación no puede ocurrir sin agua y si se permite que el agua de la mezcla se seque en el mortero, se afectará severamente la hidratación y, por ende, el desarrollo de resistencia y de la durabilidad. Existen diversos métodos de curado empleados hasta la fecha, y más adelante daremos una breve descripción de los utilizados normalmente en ferrocemento. Los procedimientos actuales varían mucho dependiendo de las condiciones en la obra y del tamaño, forma y posición de la estructura.

##### 10.4.5.1 CURADO POR HUMEDAD:

Una vez que ha fraguado el mortero, el curado por humedad puede proporcionarse manteniendo el mortero en contacto con alguna fuente de suministro de agua al menos durante -- aproximadamente 10 a 14 días. Esto se logra mediante aspersión o anegamiento o cubriendo la superficie con arena o tierra, aserrín o paja, mojados. Un método especialmente útil y posiblemente el más popular de curado por humedad, es cubrir la superficie con mantas de algodón o estopa manteniéndolas constantemente mojadas utilizando aspersores de agua.

Vale la pena emplear un sistema aspersor de alta presión, una manguera fija o algún otro dispositivo que pueda emplearse dos o tres veces al día en grandes proyectos de construcción como en el caso de construcción de barcos.

#### 10.4.5.2 CURADO CON MEMBRANA IMPERMEABLE:

En este tipo de curado se utiliza una membrana impermeable o papel a prueba de agua para cubrir la superficie terminada. Si la cubierta no está perforada o dañada, evitará eficazmente la evaporación del agua del mortero. La membrana está formada por elementos selladores que pueden ser transparentes, blancos o negros. Los elementos opacos tienen el efecto de sombrear el concreto y un color claro propicia la absorción del calor del sol.

Si la estructura está directamente bajo la luz del sol, la temperatura bajo la cubierta plástica aumentará considerablemente, acelerando de este modo el desarrollo de resistencia en el mortero. Existen muchas formas patentadas de membranas de curado. Generalmente se pueden aplicar materiales que contengan cera para extenderlos sobre la superficie del mortero. Sin embargo, aunque estos materiales evitan que se evapore algo de la humedad, también reducen la adherencia de la superficie de los siguientes materiales de recubrimiento, tales como las pinturas. Deben, por lo tanto, utilizarse con precaución.

En los casos mencionados, el curado debe continuarse al menos durante siete días, de lo contrario pueden ocurrir efectos perjudiciales tales como contracción, agrietamiento o menor desarrollo de resistencia debido a un secado prematuro.

#### 10.4.5.3 CURADO CON VAPOR:

Cuando sea posible terminar la operación de aplicación de concreto de una estructura de ferrocemento en una sola etapa y en un solo día, es conveniente usar vapor para el curado. Este tipo de curado es especialmente adecuado en climas fríos y cuando es necesario el desarrollo temprano de resistencia, en climas calientes no constituye una necesidad urgente. El curado con vapor se ha empleado exitosamente en diferentes tipos de cemento Portland, pero nunca debe utilizarse con cemento aluminoso debido a los efectos adversos de las condiciones húmedo-calientes sobre la resistencia de dicho cemento. El mortero con baja relación agua/cemento respone mucho mejor al curado con vapor que el mortero con relación más alta.

Sin embargo, al emplear este proceso es conveniente esperar unas cuatro o cinco horas después de haber aplicado el mortero, antes de aplicar el vapor, para dar tiempo al fraguado final. El vapor puede obtenerse de cualquier fuente de suministro a baja presión, por ejemplo a temperaturas inferiores a 100°C (212°F). La temperatura máxima de curado con vapor no debe exceder de 71°C (160°F). La experiencia ha demostrado que el curado con vapor reduce la contracción, mejora la resistencia a la compresión y alarga la vida del concreto.

Durante el proceso de curado, toda la estructura debe estar cubierta con láminas de plástico adecuadas, y las juntas deben estar selladas para evitar la pérdida de vapor. Deben aplicarse de tal manera que no exista contacto con el mortero fresco en ningún punto. Es necesario aumentar lentamente la temperatura durante unas dos horas, hasta llegar a los 71°C (160°F), y luego mantener la misma temperatura durante un período de seis horas, después de lo cual puede dejarse enfriar durante un período que no sea menor de cuatro horas.

Siempre que sea posible es preferible aumentar el periodo de enfriamiento, pero en ninguna circunstancia debe permitirse un enfriamiento brusco, ya que esto tendría un efecto perjudicial en la estructura.

## 10.5 PINTURA Y RECUBRIMIENTO:

La experiencia demuestra que las estructuras de ferrocemento, recubiertas adecuadamente, no necesitan una protección especial, a no ser que vayan a estar expuestas a condiciones ambientales severas.

El trabajo de pintura en la mayor parte de los casos es únicamente por razones estéticas. Sin embargo, el recubrimiento protector es necesario cuando la estructura se somete a intensos ataques químicos que puedan dañar la integridad estructural de sus elementos. Generalmente, existe la necesidad de evitar el ataque químico en el ferrocemento en lugares como pisos de laboratorios, plantas de alimentos, plantas de procesos químicos, tanques de almacenaje de productos químicos, plantas de tratamiento de aguas negras y en casi todos los tipos de estructuras marinas.

### 10.5.1 TIPO DE RECUBRIMIENTO:

La pintura utilizada normalmente para propósitos estéticos pueden emplearse en estructuras donde no es esencial un recubrimiento protector adicional desde el punto de vista estructural. La protección externa de estructuras susceptibles al ataque químico se ha logrado eficazmente hasta ahora con recubrimientos orgánicos, de los cuales los tipos vinílicos y epóxicos son los más conocidos. Existen en el mercado muchas variedades patentadas y es esencial tener cuidado al seleccionar el tipo de material de recubrimiento. Cualquier tipo de recubrimiento debe tener algunas características - - ideales que pueden enumerarse a continuación:

1. La preparación debe tener buena adherencia al mortero.
2. Debe tener tolerancia a la alcalinidad en el ferrocemento.
3. Debe tener buena resistencia química y a la abrasión.

4. Capacidad de aislar corrientes eléctricas.
5. Impermeabilidad al agua y a las sustancias químicas.
6. Los materiales no deben ser tóxicos sino adecuados para usarse con mano de obra no calificada.
7. De técnica de aplicación sencilla, preferentemente -- brocha.
8. Un producto de empaque sencillo es deseable de principio a fin.
- 9 Sin intervalo crítico de tiempo entre las capas de recubrimiento.
10. Todos los productos deben ser de rápido secado.
11. La exposición fuera del agua no deberá afectar los recubrimientos lavables.
12. El mantenimiento debe ser fácil.

Para barcos pequeños se recomienda el recubrimiento epóxico. Se trata de productos en dos envases que requieren de una proporción cuidadosa y que tienen una duración corta una vez mezclados, y por lo general se desperdician de manera -- considerable. Los recubrimientos vinílicos parecen poseer -- todas las propiedades enumeradas anteriormente, y son muy populares entre los constructores de barcos de ferrocemento. Pero la adherencia de un recubrimiento vinílico aplicado directamente sobre el mortero no es muy alta y se requiere -- una primera aplicación especial con propiedades adhesivas e inhibitoras. Esta primera aplicación debe ser del recubrimiento tipo laca, generalmente del tipo vinílico, pero un poco modificado mediante la adición de diversas resinas muy adherentes y de pigmentos inhibidores.

#### 10.5.2 METODOS DE APLICACION:

Para el éxito de un sistema de recubrimiento de protección, es importante la preparación apropiada de la superficie. Cualquier superficie que se va a recubrir debe estar -- seca y completamente limpia. La mugre, el polvo y el recubrimiento anterior, si lo hubo, deben quitarse con sopletea-

do con chorro de arena o con cepillo de alambre. Las capas de lechada que pudieran estar débilmente adheridas a la matriz, deben quitarse primero. Existen dos corrientes de ideas respecto a la eliminación de las lechadas. Una, usar nada más el cepillado mecánico con alambre y la otra, el tratamiento ácido. El aguafuerte de ácido clorhídrico normalmente utilizado en estructuras masivas de concreto no debe usarse en ferrocemento. El recubrimiento libre de la malla de alambre en el ferrocemento debe ser de 0.15 a 0.2 cm y puede ser atacada y corroída por restos de cloruro de calcio que hayan quedado aun después de un lavado cuidadoso. El aguafuerte de ácido fosfórico parece ser seguro y cualquier residuo de fosfato de calcio, al ser virtualmente insoluble, tendería a hacer más densa la superficie, de lo que sería de otro modo.

El recubrimiento debe aplicarse generalmente a temperaturas no inferiores a 10°C (50°F), y para la aplicación de adhesivos de resinas epóxicas al mortero se sugiere una temperatura mínima de 15°C (60°F). Al aplicar el recubrimiento epóxico o algún otro recubrimiento de dos componentes en el concreto, por lo general es conveniente que la temperatura del recubrimiento esté entre los 21 y 32°C (70 y 90°F) para asegurar un curado apropiado.

El espesor que se requiere para el recubrimiento de protección depende del tipo de recubrimiento, de su formulación y de la aspereza de la superficie. Generalmente se requiere de un mínimo de tres capas y es aconsejable alternar el color de cada aplicación para asegurar un recubrimiento completo sobre toda la superficie.

#### 10.5.2.1 PRIMERA CAPA DE RECUBRIMIENTO:

La primera capa de recubrimiento es un sellador inhibidor de vinilo o de base epóxica. Esta capa debe ser capaz de sellar la superficie agrietada mediante absorción y tam-

bién de prevenir la corrosión del armazón de acero y de la malla expuestos.

#### 10.5.2.2 RELLENO Y APLANADO:

Después de haber aplicado la primera capa vinílica o de base epóxica y permitido su curado, es muy importante examinar cuidadosamente la superficie. En esta etapa puede mejorarse la apariencia de la estructura mediante la aplicación de un relleno de mastique vinílico de mucho cuerpo. Los recubrimientos de mastique vinílico generalmente se aplican -- con escoba de goma o con espátula, al espesor deseado. Secan dentro de las 24 horas siguientes y puede dársele el aca bado deseado.

#### 10.5.2.3 SEGUNDA CAPA DE RECUBRIMIENTO:

La segunda capa de recubrimiento se aplica para asegurar que cualquier parte del concreto o del refuerzo, expuesto o descubierto durante el aplanado, quede apropiadamente cubierto por la capa final, y es del mismo tipo que la prime ra capa de recubrimiento.

#### 10.5.2.4 RECUBRIMIENTO FINAL:

En todas las partes de la estructura se aplican de dos a cuatro capas de recubrimiento vinílico. Las diferentes mar cas de recubrimiento en el mercado tienen tiempos diferentes de curado y en cada caso deben seguirse las recomendaciones del fabricante. De cualquier manera, nunca debe aplicarse una capa de recubrimiento hasta que la capa anterior haya sido apropiadamente curada. El tiempo de curado puede va riar desde 30 minutos hasta 48 horas (recubrimientos derivados del petróleo).

## VOCABULARIO TECNICO

ABRASION: Acción y Efecto de raer o desgastar por fricción.

ABSORCION: Acto de absorber.

ADHERENCIA: Acción y efecto de adherir o pegarse una cosa -- con otra.

AGRIETAMIENTO: Acción y efecto de agrietar o agrietarse.

ALABEO: Superficie alabeada o combada.

ALCALINO: Adj. Químico de alcali o que lo contiene metales - alcalinos, metales muy oxidables.

COLOIDAL: Sustancia no diolizable que tiene la apariencia de la cola de gelatina.

ENLUCIDO: Blanqueado con yeso.

ESCORIA: Sustancia vítrea que sobrenada en el crisol de los hornos de fundición.

ESQUISTO: Roca de estructura hojosa, pizarra.

GEL: Sustancia viscosa formada por la mezcla de una materia coloidal y un líquido.

MORTERO: Algamasa de yeso arena y agua.

POROS: Espacio hueco en las moléculas de los cuerpos.

SEDIMENTO: Materia suspensa en un líquido espeso en el fondo.

TENSION: Estado de un cuerpo estirado. Diferencia de Potencial.

YESO: Roca sedimentaria formada de sulfato de cal hidratado.

$\text{Na}_2\text{SO}_4$  : Sulfato de Sodio.

$\text{CaSO}_4$  : Sulfato de Calcio

$\text{MgSO}_4$  : Sulfato de Magnesio

$\text{Mg}(\text{OH})$  : Hidroxido de Magnesio

$\text{Ca}(\text{OH})_2$  : Hidroxido de Calcio.

$\text{H}_2\text{O}$  : Hidruro de Oxigeno = Agua.

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  : Hidrato de Aluminato de Calcio.

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$  : Sulfoaliminato de Calcio.

$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$  : Hidrato de Silicato de Calcio.

## BIBLIOGRAFIA

TITULO: TECNOLOGIA DEL CONCRETO  
AUTOR: A. M. NEVILLE  
EDITADO: INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO,  
A.C.  
TOMOS: I, II, y III.

TITULO: FERROCEMENTO  
AUTORES: B.K. PAUL y R.P. PAMA  
EDITADO: INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO,  
A.C.

TITULO: EXPERIENCIAS SOBRE EL CONTROL DE CALIDAD EN LA  
FABRICACION DE TUBERIA DE CONCRETO  
EDITADO: SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS.

TITULO: ELABORACION Y CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO.  
EDITADO: SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS.

BIBLIOGRAFIA

TITULO: TECNOLOGIA DEL CONCRETO  
AUTOR: A. M. NEVILLE  
EDITADO: INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO,  
A.C.  
TOMOS: I, II, y III.

TITULO: FERROCEMENTO  
AUTORES: B.K. PAUL y R.P. PAMA  
EDITADO: INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO,  
A.C.

TITULO: EXPERIENCIAS SOBRE EL CONTROL DE CALIDAD EN LA  
FABRICACION DE TUBERIA DE CONCRETO  
EDITADO: SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS.

TITULO: ELABORACION Y CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO.  
EDITADO: SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS.