

164
L. Guzmán



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**CONCRETO PARA LA CONSTRUCCION
DE LA LINEA III DEL METRO**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
JOSE LUIS REYNOSO DELMOTTE



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.

INDICE

INTRODUCCION	1
I. MATERIALES.	
Cemento	4
Agregados	16
Agua	36
Aditivos	38
II. ELABORACION.	
Proporcionamiento	46
Dosificación	54
Mezclado	57
III. COLOCACION.	
Preparativos	63
Colado	66
Vibrado	75
Curado	80
Descimbrado	89
IV. CONTROL DE CALIDAD.	
Muestreo	90
Pruebas en concreto fresco	96
Pruebas en concreto endurecido	101
Criterios de calidad	112
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
BIBLIOGRAFIA	120
FUENTES DE INFORMACION	121

INTRODUCCION

Debido al crecimiento de la población en el Distrito Federal y al aumento de vehículos que circulan en él, los problemas de transportación de pasajeros y circulación de vehículos automotores se han agudizado en forma considerable.

El Departamento del Distrito Federal, a través de la Comisión de Vialidad y Transporte Urbano, estableció el Plan de Desarrollo Urbano del Distrito Federal. Esta Comisión es un organismo creado para llevar a cabo todas las labores inherentes, entre otras, a la ejecución de los trabajos de ampliación del Sistema de Transporte Colectivo. Para realizar estas funciones la comisión contrata los servicios de planeación, proyecto, construcción y supervisión a empresas especializadas.

Dentro del Plan de Desarrollo Urbano, se contempla el establecimiento y ampliación de un medio de transporte que ayude a resolver entre otros, los siguientes problemas: transporte de pasajeros en gran número, seguridad en el traslado, menores tiempos de recorrido y menor contaminación por gases y ruidos. El sistema idóneo para ayudar a resolver estos problemas es el Sistema de transporte Colectivo Metro.

Entre las líneas en ampliación del Metro se encuentra la línea III. Esta se ha construido en tres etapas y tiene una longitud total de 22.96 kilómetros.

El Tramo Hospital General a Tlatelolco fué inaugurado en noviembre de 1970 y tiene una longitud de 5.71 kilómetros, el Tramo Tlatelolco a Indios Verdes se inauguró en diciembre de 1979 con una longitud de 5.45 kilómetros, el Tramo Hospital General a -

Estación Zapata tiene una longitud de 5.20 kilómetros.

Esta línea con un total de 16.4 kilómetros construidos de la Estación Indios Verdes a la Estación Zapata transportaba un promedio de 950 000 pasajeros al día; con la segunda ampliación hacia el sur, recientemente concluida, y con una longitud de 6.60 kilómetros, será posible transportar un total aproximado de 1 350 000 pasajeros diarios, los cuales utilizan aproximadamente 40 minutos para recorrer la Línea III en su totalidad.

La segunda ampliación de la Línea III hacia el sur de la Ciudad de México, se realizó desde la Estación Zapata hasta Ciudad Universitaria, continuando por Avenida Universidad en vía subterránea y dando vuelta hacia la izquierda en Avenida Copilco hasta -- llegar a terrenos de Ciudad Universitaria en su parte oriente, lugar donde se localiza la estación terminal.

Dadas las características del subsuelo en esta zona se empleó el sistema de construcción en túnel, el cual consta de un revestimiento primario de concreto lanzado y un revestimiento definitivo de concreto reforzado. El concreto que se utilizó para la construcción de los túneles y cajones subterráneos debe satisfacer ciertas normas de calidad en lo que se refiere a materiales que lo componen, elaboración y colocación. Conocer tales características del -- concreto y normas que debe satisfacer es el objetivo básico del desarrollo de este tema.

En el Capítulo I se describen los diferentes materiales que constituyen el concreto, así como sus principales especificaciones físicas y químicas. Dentro de estos materiales se incluyen -- cemento, agregados, agua y aditivos.

El Capítulo II trata de la elaboración del concreto, la cual debe de estar de acuerdo con las especificaciones de diseño, para lo cual se verá cada uno de los elementos que la integran, tales como proporcionamiento, dosificación y mezclado.

El Capítulo III trata de la colocación del concreto, incluyendo preparativos, colado, vibrado, curado y descimbrado.

Finalmente el Capítulo IV describe las principales -- pruebas que deberán realizarse con el fin de comprobar que el concreto cumple con la calidad requerida.

CAPITULO I

MATERIALES

Los materiales que se utilizan para la elaboración - del concreto son: cemento, agregados, agua y aditivos.

CEMENTO

El cemento que se emplea en la elaboración del concreto para la construcción del cajón subterráneo de la Línea III del Metro, es cemento Portland Tipo I ó III, excepto cuando en los planos se indique lo contrario.

El cemento Portland está formado por materiales calcáreos como la caliza, sílice y alúmina, utilizándose también marga.

Todos estos elementos forman un material aglutinante con propiedades cohesivas y adhesivas que tiene la característica de fraguar y endurecer cuando se le agrega agua.

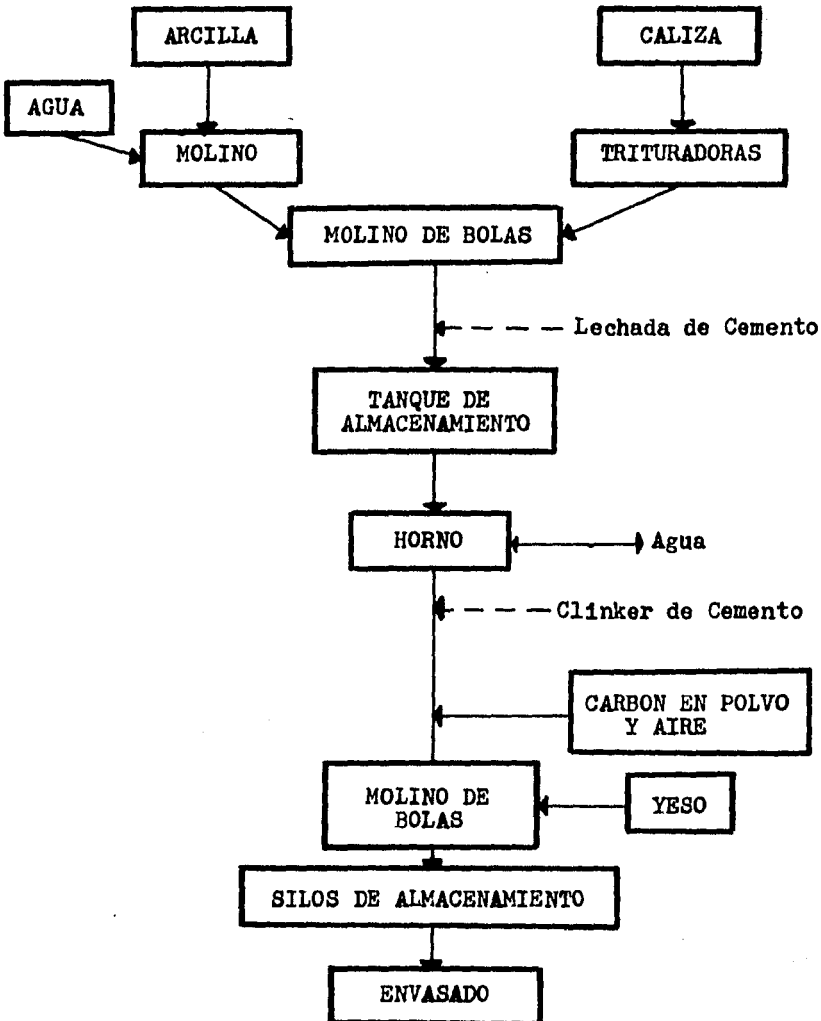
En el proceso de fabricación del cemento existen dos métodos denominados seco y húmedo, estos nombres resultan de la mezcla y trituración de las materias primas que lo constituyen. Básicamente la fabricación se inicia triturando la materia prima, mezclándola y calcinándola para, posteriormente, añadirle yeso.

Cuando en el proceso húmedo de fabricación se utiliza caliza, ésta debe ser extraída de la cantera por medio de cargas explosivas en barrenos para después ser procesada en trituradoras primarias y secundarias. Al mismo tiempo la arcilla debe ser mezclada con agua en un molino. Con objeto de obtener una lechada de cemento, se mezclan la caliza con el agua y la arcilla y se introducen a un - molino de bolas. Cuando se utiliza marga como materia prima, después de ser extraída de los bancos, se tritura finamente con agua en un -

molino. Al igual que en el caso en el que se utiliza caliza, se prepara una mezcla de agua y arcilla la cual se incorpora a la marga para formar una lechada, la cual debe pasar a través de un tamiz, obteniéndose en esta forma una lechada de cemento. A partir de este punto, el proceso subsecuente es el mismo para los dos casos. La lechada de cemento se deposita en grandes tanques de almacenamiento donde debe estar en agitación continua para después pasar al horno donde se calienta y evapora toda el agua. El proceso de calentamiento continúa con el material ya seco, hasta que la marga ó caliza se descomponga cediendo dióxido de carbono y hasta que el material produzca una reacción química y se forme el clinker de cemento. Al clinker se le añade carbón en polvo y aire, y al enfriarse se le agrega yeso para evitar un fraguado inmediato. El clinker y el yeso se mezclan y muelen en un molino de bolas hasta formar un polvo muy fino conocido como cemento Portland el cual queda listo para ser empacado.

En el caso del proceso seco, las materias primas se trituran y mezclan, en la debida proporción, en un molino donde se reduce su tamaño al de polvo fino. Este polvo seco se envía a una mezcladora para realizar una nueva dosificación de los materiales requeridos. Esta mezcla se realiza por medio de la inyección de aire a presión la cual dura aproximadamente una hora con objeto de obtener una mezcla lo más uniforme posible, posteriormente se deposita en un granulador, que no es otra cosa que una cuba rotatoria, agregándosele el 12 % del peso del grano molido en agua. Esto provoca la formación de tabletas las cuales se hornean hasta que endurezcan; a partir de aquí los procesos húmedo y seco son los mismos.

PROCESO PARA LA FABRICACION DEL CEMENTO.



En cualquier proceso de fabricación de cemento la mezcla de materias primas es muy importante y debe realizarse en forma muy cuidadosa, debido a que las reacciones que ocurren en el horno se producen al fundirse materiales sólidos, por lo cual una mezcla adecuada del material siempre producirá un producto final de calidad uniforme.

Dentro de la construcción de las obras del metro el tipo de cemento que normalmente se utiliza, salvo casos especiales, es el Portland Tipo I ó Tipo III. Sabemos que, al cambiar los elementos químicos y características físicas del cemento, cambian las propiedades de éste cuando se hidrata. Por esta razón es importante conocer las principales características tanto físicas como químicas de estos dos tipos de cemento.

La composición química básica del cemento Portland -- esta integrada por los siguientes elementos: silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y aluminoferrito tetracálcico. Estos elementos reaccionan en el horno hasta lograr un equilibrio químico, excepto una pequeña cantidad de cal; durante el enfriamiento el equilibrio no se mantiene, y la velocidad de éste afecta el grado de cristalización.

El cemento Portland tipo I se conoce como cemento ordinario y es el de uso más generalizado. Es ideal para cualquier tipo de construcción que no este expuesta a sulfatos ó aguas freáticas.

Una de las principales restricciones para el uso de este tipo de cemento se refiere a su contenido de cal libre. Cuando una pasta de cemento ha fraguado no debe sufrir grandes cambios en su volumen, pues podría producirse, bajo condiciones de esfuerzo, un rompimiento en la pasta.

Tal rompimiento ocurre cuando en el cemento endurecido se presenta una reacción en alguno de sus compuestos, como la cal libre. Dicha reacción se produce cuando las materias primas adicionadas al horno contienen más cal de la que puede combinarse; tal exceso permanecerá en estado libre y al ser calcinada se hidratará en forma muy lenta, con lo cual ocupará un volumen mayor que el óxido de calcio lo cual provocará la expansión. En la misma forma el volumen de cemento puede variar debido a la presencia de óxido de magnesio y sulfato de calcio. Cuando el yeso que se adiciona al clinker de cemento, para prevenir un fraguado inmediato, sobrepasa la cantidad que puede reaccionar con el aluminato tricálcico durante el fraguado, se presenta una variación de volumen en forma de expansión -- lenta. Razón por la cual las especificaciones generales de concreto para la construcción del metro limitan en forma determinante la cantidad de estos compuestos. Estas limitaciones se describen en la siguiente tabla.

E S P E C I F I C A C I O N E S		
Q U I M I C A S		
COMPUESTOS	CEMENTO	T I P O
	I	III
Oxido de magnesio	5.0 *	5.0
Anhidrido sulfúrico, cuando:		
- aluminato tricálcico es 8% ó menor	3.0	3.5
- aluminato tricálcico es mayor de 8%	3.5	4.5
Pérdida de calcinación	3.0	3.0
Residuo insoluble	0.75	0.75
Aluminato tricálcico	----	15

* Porcentajes máximos

Las normas de la "British Standards Institution" indican, que en el cemento Portland, el contenido de magnesio no debe exceder de un 4%, los residuos insolubles no deben ser mayores del 1.5% y la pérdida de calcinación un máximo de 3%. Sin embargo las "Especificaciones Generales del Concreto para la Construcción de Cajones y Túneles del Sistema de Transporte Colectivo Metro", que en adelante denominaremos simplemente "Especificaciones Oficiales", establecen el contenido de magnesio como máximo de 5%, los residuos insolubles máximos de 0.75% y la pérdida de calcinación igual que las Normas BSI, de un 3%.

El cemento Portland Tipo III, conocido como de endurecimiento rápido, es muy semejante al tipo I, solo que éste desarrolla su resistencia más rápido, por lo que se le conoce como cemento de alta resistencia a temprana edad. Su mayor rapidez en adquirir resistencia se debe a que contiene mayor cantidad de silicato tricálcico y a un mayor molido del clinker de cemento. La resistencia del tipo III a los tres días es igual a la resistencia desarrollada por el tipo I a los siete días con la misma relación agua cemento. Los requisitos de composición química y cambio de volumen son prácticamente los mismos que en el tipo ordinario. Este cemento se utiliza cuando se requiere un desarrollo rápido de resistencia a temprana edad, por ejemplo cuando la cimbra debe ser removida muy pronto, como en el caso de la cimbra deslizante para el túnel profundo del metro.

Sin embargo no debe ser usado en secciones estructurales muy grandes, dado que libera una mayor cantidad de calor de hidratación.

Dentro de las principales características físicas que

el cemento debe cumplir para ser utilizado en la construcción del mortero se encuentran las siguientes:

La finura del cemento es una propiedad muy importante y debe estar sometida a un estricto control. Se recordará que una de las últimas etapas en la fabricación del cemento es la adición de yeso al clinker molido; la hidratación se origina en la superficie de las partículas de cemento y el área superficial de estas constituye el material de hidratación. De esta forma la velocidad de hidratación dependerá de la finura de las partículas, lo cual dará lugar a un rápido desarrollo de la resistencia. Para conocer la finura de el cemento se utilizan tamices experimentales del número 170 según las Normas A.S.T.M., donde se limita la fracción de cemento retenida a un 10 por ciento en peso para el tipo ordinario y 5 por ciento para el tipo de endurecimiento rápido. Este tipo de prueba no proporciona información acerca de las partículas de menor tamaño que representan el papel más importante en la hidratación temprana. Por esta razón la superficie específica del cemento se expresa como el área total superficial en centímetros cuadrados por gramo; existen métodos para medir la distribución del tamaño de las partículas por sedimentación, los cuales consideran la relación entre la velocidad de caída libre de la partícula y su diámetro en un medio químicamente inerte respecto al cemento. Uno de estos métodos utiliza el turbidímetro de Wagner.

Por otro lado una mayor finura del cemento representa un costo mayor en su fabricación, así como su deterioro será más rápido cuando se encuentre expuesto a las condiciones atmosféricas y será más susceptible de agrietamiento. Un aumento en la finura re--

quiere mayor cantidad de yeso y agua, lo cual mejora la trabajabilidad de la mezcla.

Otro procedimiento para medir la finura del cemento es el que se conoce como método de permeabilidad al aire. Se basa en la relación entre el flujo de un líquido a través de un estrato granular y el área superficial de las partículas incluídas en el estrato. De esta forma se deduce la permeabilidad del estrato, considerando el área superficial por unidad de peso del material del estrato, a un volumen fijo de poros en el volumen total del estrato.

En las especificaciones oficiales, la finura, según este último método, debe ser de $2\ 800\ \text{cm}^2/\text{g}$ como mínimo.

Una mezcla de cemento una vez fraguada, no debe sufrir expansiones apreciables. Tales expansiones pueden ocurrir por una hidratación retardada o por una reacción de algún compuesto como cal libre, magnesio o sulfato de calcio, en el cemento endurecido; la forma en que estas sustancias provocan expansiones se explicó anteriormente. Como la variación en el volumen de cemento se manifiesta hasta después de meses o años, se han ideado métodos para probar aceleradamente dicha variación. Uno de estos métodos ideado por Le Chatelier consiste en un cilindro de bronce con una hendidura a lo largo y dos indicadores a ambos lados de la hendidura; de esta forma la abertura aumenta por la expansión del cemento y puede ser medida fácilmente. El método que consideran las especificaciones oficiales del metro se conoce como prueba de autoclave y consiste en lo siguiente: esta prueba detecta variaciones de volumen en el cemento debidas al óxido de magnesio y a la cal libre, la prueba de Le Chatelier solo detecta variaciones provocadas por la cal libre; para realizar la - -

prueba de autoclave se utiliza una barra de cemento puro de 2.5 cm. de sección transversal cuadrada y longitud de 25 cm. Esta barra se cura durante 24 horas en aire húmedo para luego colocarse en un hervidor de vapor de alta presión y elevar su temperatura hasta 216 grados centígrados durante una hora, después debe mantenerse ésta temperatura hasta que pasen 3 horas. En esta prueba la presión de vapor acelera la hidratación y al terminar, la expansión de la barra no debe de exceder del 0.5 por ciento. En el caso del cemento para el metro se acepta una expansión máxima de 0.8 por ciento. Los resultados de estas pruebas se ven afectados por el contenido de aluminato tricálcico por lo cual solo proporcionan una indicación posible de la expansión a largo plazo; además ninguna de las dos pruebas detecta variaciones en el volumen provocadas por exceso de sulfato de calcio.

El tiempo de fraguado es otro punto muy importante que debe considerarse con mucha atención en las obras del metro. El fraguado se puede definir como el cambio de la pasta de cemento fluida a un estado sólido o rígido. Se distinguen dos tiempos de fraguado: inicial y final, éste es debido a la hidratación selectiva de los componentes del cemento. Los primeros en reaccionar con la hidratación son el aluminato tricálcico y el silicato tricálcico, el silicato dicálcico endurece en forma más gradual, provocándose la formación de productos cristalinos. Otro indicador del proceso de fraguado considera la formación de películas alrededor de los granos de cemento y la coagulación de los compuestos. Considerando la temperatura al fraguado inicial le corresponde un rápido aumento en esta, y al fraguado final el máximo de temperatura. El tiempo de fra-

guado se mide por medio del aparato de Vicat. Este consiste en un molde especial el cual se llena con la pasta de cemento que se desea probar, se le introduce una aguja con un área transversal de un milímetro cuadrado, con cierta presión previamente establecida, para determinar el fraguado inicial. Cuando la aguja penetra hasta alrededor de 5 milímetros de la base se determina que se ha producido el fraguado inicial, el cual se mide en minutos y empieza cuando se le agrega al cemento el agua. Las especificaciones oficiales del metro consideran el fraguado inicial mayor o igual a 45 minutos en los tipos I y III de cemento. Para determinar el fraguado final se utiliza otra aguja cuadrada especial la cual está rodeada de una "campana" con borde circular. El fraguado final se determina cuando la aguja se impresiona sobre la pasta de cemento, pero los bordes de la campana no logran hacerlo. El tiempo final de fraguado se mide desde la preparación de la mezcla y, según las especificaciones oficiales, no debe ser mayor a 8 horas. El tiempo de fraguado, inicial o final, puede ser afectado por la temperatura y humedad del ambiente, por lo cual se recomienda una temperatura de 14 a 18 grados centígrados y humedad relativa del aire no menor de 90 por ciento.

La propiedad física más importante del cemento cuando endurece es su resistencia mecánica. Las pruebas de resistencia nunca se realizan en mezclas de cemento puro, se hacen en morteros de cemento-arena y en concretos de proporciones determinadas y bajo condiciones muy estrictas. Existen varias pruebas de resistencia, sin embargo las más importantes son las de compresión. Estas se realizan utilizando mortero y concreto. Las pruebas de mortero utilizándose una relación cemento-arena de 1:2.75 se realizan con arena bien -

graduada estándar, y el peso del agua en la mezcla debe ser del 10 por ciento en peso del material seco, expresado en relación agua cemento las especificaciones oficiales establecen 0.485 ; el mezclado se realiza bajo normas establecidas por la A.S.T.M. para posteriormente obtener cubos de 7.06 cm. de arista. Los cubos son retirados de los moldes después de 24 horas y curados en agua hasta ser probados. En la siguiente tabla se encuentran los principales requisitos físicos que establecen las especificaciones oficiales.

E S P E C I F I C A C I O N E S F I S I C A S		
C A R A C T E R I S T I C A S	C E M E N T O	T I P O
	I	III
- FINURA - Superficie específica, cm ² /g. Método de permeabilidad al aire (minutos)	2 800	---
- SANIDAD - Expansión máxima en %: Prueba de autoclave	0.80	0.80
- TIEMPO DE FRAGUADO - Inicial en minutos, no menos de:	45	45
Final en horas, no más de:	8	8
- RESISTENCIA A LA COMPRESION - Cubos de mortero 1:2.75 en peso Relación agua-cemento cte. 0.485 Valores mínimos kg/cm ²		
A las 24 horas	---	130
A los 3 días	130	250
A los 7 días	200	---

En pruebas de resistencia de cemento se mezclan relaciones fijas agua-cemento de 0.6 y diversas combinaciones de agregados finos y gruesos para los cuales se establecen ciertas restricciones las cuales se verán en el capítulo Control de Calidad.

Las especificaciones oficiales del metro establecen determinadas medidas para el almacenamiento del cemento. Entre las principales podemos mencionar que el cemento debe almacenarse en estructuras protegidas contra la intemperie, adecuadamente ventiladas para evitar la absorción de humedad. En el caso de cemento a granel se debe disponer de adecuados compartimientos separados para cada tipo de cemento, los silos deben tener liso el interior con una inclinación mínima de 50 grados respecto a la horizontal. Cuando los silos no sean circulares deberán estar provistos de cojinetes de deslizamiento para soltar el cemento que haya podido compactarse dentro del silo. Los silos se deberán vaciar una vez al mes para impedir la formación de costras de cemento.

En el caso de cemento envasado en sacos debe ser apilado sobre plataformas, para permitir una adecuada circulación de aire; cuando el período de almacenamiento sea hasta de 60 días se apilarán hasta 14 camas de sacos, en el caso de períodos mayores, el máximo será de 7 camas de sacos de cemento.

El lugar de almacenamiento de cemento deberá reunir condiciones de seguridad para asegurar la inalterabilidad del producto.

El cemento que se utilice en las obras del metro deberá ser de reconocida calidad; no se podrá utilizar cemento de marcas nuevas o sin antecedentes de buena calidad.

AGREGADOS

Los agregados son materiales que se adicionan a la -- pasta de cemento para formar un concreto. Estos materiales ocupan -- aproximadamente tres cuartas partes del volumen del concreto y su ca -- lidad limita la resistencia, durabilidad y comportamiento estructu -- ral del mismo, por esta razón deben someterse a ciertas normas físi -- cas y químicas. Los agregados son más baratos que el cemento por lo -- cual su uso representa ventajas económicas, además de mejorar la du -- rabilidad y estabilidad del cemento.

La forma más común de clasificar los agregados se re -- fiere a su tamaño, éstos pueden ser desde partículas que miden frac -- ciones de milímetro hasta varios centímetros de espesor. La clasifi -- cación más utilizada para los agregados es la que los divide en fi -- nos y gruesos. Para ello se utiliza un tamiz No. 4 el cual tiene -- una abertura libre entre hilos de 4.76 mm., el agregado que pasa a -- través del tamiz se denomina fino y el retenido se conoce como grue -- so.

Generalmente las partículas de los agregados provie -- nen de la fragmentación artificial de masas de mayor tamaño, así co -- mo de procesos naturales de abrasión o intemperismo. La materia pri -- ma para los agregados, conocida como materia en greña, se localiza -- en bancos de roca, yacimientos naturales, depósitos de aluvión y con -- glomerados. El método de más uso para la extracción de rocas utili -- za explosivos, obteniéndose grandes bloques los cuales se envían a -- un proceso de trituración. El equipo para la trituración consiste -- en diferentes trituradoras; entre las más comunes se encuentran las

de quijadas, giratorias, de rodillos y de cono; se utilizan molinos de barras y bolas, cribas vibratorias, alimentadores, gusanos lavadores, bandas transportadoras y una serie de equipo complementario para realizar un proceso de trituración completo.

Desde el punto de vista geológico es posible clasificar los agregados en varios grupos de rocas de características comunes. Las normas A.S.T.M. describen los minerales más importantes -- que se encuentran en los agregados. Una clasificación de este tipo sirve para determinar las propiedades del agregado, pero no establece su comportamiento en el concreto. La clasificación es resumirlos en: minerales de sílice, feldespatos, minerales de mica, de carbonato, de sulfato, de sulfuro de hierro, de ferromagnesio, zeolitas, -- óxidos de hierro y minerales de arcilla.

Cualquiera que sea el agregado que se desea utilizar deberá ser sujeto de una serie de pruebas para conocer sus principales características, para lo cual se deben realizar muestreos del material de tal forma que las muestras obtenidas sean representativas del lote de material en su totalidad. Para ello deberá tenerse en consideración que la muestra debe estar compuesta de varias porciones tomadas de distintas partes del lote, las que se estudiarán en forma independiente. El estudio de las muestras comienza con la revisión de su forma y textura superficial. La redondez describe el filo y angularidad de las aristas de la partícula, éstas a su vez, -- dependen de la dureza y resistencia que presenten a la abrasión, así como del desgaste a que ha sido sometida. En los agregados que se obtienen por trituración, la redondez depende de la trituradora que haya sido utilizada para fragmentarla.

Considerando esta característica se establece la clasificación siguiente: muy redonda, redonda, subredonda, subangular, y angular. Para medir la angularidad de un agregado, se establece un factor definido como la relación del volumen sólido del agregado suelto al volumen sólido de esferas de vidrio de granulometría específica. La utilidad de esta prueba aún esta por verse.

Los agregados que se clasifican por su textura superficial consideran la superficie de la partícula como suave o áspera y pulida o mate. La textura depende del tamaño del grano, de la dureza y de las características de porosidad de la roca original. La textura de los agregados influye determinantemente en la resistencia del concreto, especialmente en concretos de alta resistencia. Se sabe que la textura áspera produce una mayor fuerza de adhesión entre el agregado y el cemento, dado que una mayor área superficial en el agregado representa un incremento en la fuerza de adhesión.

Uno de los factores más importantes en la resistencia del concreto es la adherencia que se desarrolla entre las partículas que constituyen el agregado y la pasta de cemento. La adherencia es mejor cuando el agregado que se usa esta triturado y por lo tanto -- tiene una superficie más áspera, o cuando se utilizan partículas porosas y mineralmente heterogéneas; cabe aclarar que la adherencia -- puede ser afectada por otras propiedades físicas y químicas relacionadas con su composición mineralógica. Conocer la calidad de adherencia de un agregado es bastante complicado; por tal razón se considera que la adherencia es buena cuando al probar un cilindro de concreto y llevarlo a la falla, se observa que algunas partículas del agregado se fracturan dentro de la masa. Este criterio debe conside

rarse con algunas reservas, ya que si existe un exceso de partículas fracturadas puede deberse a que el agregado es demasiado débil. Para determinar si un agregado es débil o no lo es, se han establecido pruebas denominadas de valor de trituración; éstas tratan de determinar si la baja resistencia del agregado se debe a la debilidad de los granos que lo constituyen, o bien, si los granos son fuertes, pero no están bien ligados entre sí. En pruebas de resistencia a la compresión de rocas que se usan como agregados normales, se observa un valor medio de resistencia de 2109 kg/cm^2 , aunque existen agregados de buena calidad con valores no superiores a 843 kg/cm^2 . No siempre el agregado más resistente es el mejor, en ciertas ocasiones un agregado de resistencia normal o baja puede ayudar a reducir los esfuerzos en el concreto debidos a variaciones de volumen ocasionadas por cambios de temperatura. Dicha ayuda se manifiesta cuando la compresibilidad del agregado reduce el esfuerzo en el concreto, mientras que un agregado fuerte puede ocasionar la fractura o agrietamiento del cemento adherido a él. Los resultados en la prueba de valor de trituración son una guía cuando se prueban agregados de características desconocidas y cuando se sospecha baja resistencia en algunos de ellos.

Así como es importante conocer la resistencia de un agregado, lo es también conocer su tenacidad. Esta se define como su resistencia a la falla provocada por impactos; la tenacidad se determina con una prueba que utiliza muestras cilíndricas de roca a las cuales, desde una altura determinada, se les deja caer libremente un peso estándar hasta causar la falla. Se ha visto que la tenacidad está relacionada con el valor de trituración, razón por la

qual ambas pruebas se usan como alternativas.

Un buen agregado debe ser resistente al desgaste. Para conocer este desgaste se han ideado pruebas de abrasión; en una de ellas se labran partículas de agregado entre 12.7 y 9.5 mm. cuyo volumen total es de 33 000 mm³. La muestra se somete a abrasión en una máquina estándar que contiene un disco abrasivo que gira a -- 500 revoluciones por minuto, el resultado será el valor de abrasión del agregado definido como el porcentaje de la pérdida de peso causada por la abrasión. Para agregados de diferentes tamaños se usa la prueba de Los Angeles, la cual examina el rozamiento y la abrasión -- dando resultados de una correlación extremadamente buena. En un tanque cilíndrico horizontal se deposita un agregado de granulometría -- específica al cual se le agregan bolas de acero para hacerlo girar -- un número determinado de revoluciones. Dentro del cilindro ocurren choques y golpeteos entre el agregado y el acero, lo cual provoca la abrasión y el rozamiento. Esta prueba relaciona el desgaste real -- del agregado con la resistencia bajo compresión y flexión del concreto producido con tal agregado.

La densidad de los agregados es un concepto que debe definirse cuidadosamente. Al hablar de densidad de un agregado debemos tomar en consideración los poros, ya que el agua contenida en éstos no toma parte en las reacciones químicas con el cemento, por lo que se considera como una parte de éstos. La densidad aparente se define como la relación del peso del agregado secado en un horno a -- 115° C. durante 24 horas y el peso del agua que ocupa el mismo volumen con todos los poros impermeables. Esta densidad se usa para -- calcular el rendimiento y la cantidad de agregado requerido para --

cierto volumen de concreto. Casi todos los agregados naturales tienen una densidad entre 2.7 y 2.6, ésta depende de la densidad del mineral de que se compone el agregado y de la cantidad de huecos que tenga; debe aclararse que el valor de la densidad no indica la calidad del agregado.

Para la fabricación del concreto se debe conocer el volumen que ocupa el agregado. Para ello se establece el peso volumétrico, el cual se utiliza para convertir pesos a volúmenes o viceversa; cuando un volumen determinado se llena con agregado, el peso dependerá del tamaño, forma y distribución de las partículas, y del grado de compactación del material. Por tal motivo se especifica el grado de compactación como suelto o apisonado. En la prueba de peso volumétrico suelto, el agregado se coloca con suavidad en un cilindro metálico de diámetro y altura determinados, después se nivela -- por medio de una varilla; cuando el peso por determinar es el compactado, el agregado se coloca en tres capas y cada una se compacta con una varilla de 1.6 cm. de diámetro y punta redondeada. El peso neto del agregado dividido entre el volumen del recipiente dará el peso volumétrico.

La adherencia entre el agregado y el cemento, la resistencia del concreto al congelamiento y deshielo, la resistencia a la abrasión y la estabilidad química, dependen de la permeabilidad, porosidad y absorción del agregado. Los poros del agregado presentan una gran variedad de tamaños, de los cuales los más pequeños revisten un mayor interés ya que afectan la durabilidad. La pasta de cemento penetra solo en los poros de mayor tamaño y el agua en los más pequeños, por tal razón la cantidad de agua y su proporción de -

penetración dependen del tamaño y volumen de los poros.

Dependiendo de la humedad del agregado se establecen cuatro estados: húmedo, cuando todos los poros están llenos de agua y alrededor del agregado existe una fina película de agua; saturado y superficialmente seco, cuando todos los poros están llenos y no existe la película de agua; secado al aire, cuando parte del agua contenida en los poros se evapora; y seco totalmente, cuando se introduce en un horno hasta lograr un estado sin contenido de agua. Para determinar la absorción de agua, se mide el aumento de peso de una muestra secada en horno, al sumergirse en agua durante 24 horas, debiéndose remover la película de agua superficial; esta relación expresada como porcentaje se conoce como absorción. Cuando se prepara una mezcla de concreto con agregado seco, éste absorberá agua de la mezcla para saturarse, por lo cual dicha cantidad deberá incluirse en el volumen neto calculado para la mezcla. El agua absorbida por el agregado provoca una menor trabajabilidad de la mezcla, sin embargo, esta pérdida a los 15 minutos se vuelve casi insignificante; entonces se debe determinar la cantidad de agua absorbida entre 10 y 30 minutos y no la absorción total, pues nunca se logra en la práctica. El estado básico del agregado debe ser saturado y superficialmente seco; ya que si los poros están vacíos, absorberán agua de la mezcla, y si en la superficie del agregado existe agua, ésta contribuirá al agua de la mezcla. Cuando un agregado se expone al agua, recoge una considerable cantidad de humedad y la retiene durante largo tiempo, esto ocurre sobretodo en los agregados finos; por tal motivo se define la humedad superficial libre, como el excedente de agua que tendría un agregado en la condición de saturación y superf

cialmente seco. Esta humedad superficial se expresa como porcentaje del peso del agregado saturado y superficialmente seco y se denomina contenido de humedad. Para entender mejor las cosas, se establece - que el agua total contenida en un agregado húmedo es igual a la suma de la absorción, que representa el agua contenida en el agregado saturado y superficialmente seco, más el contenido de humedad, que representa la cantidad en exceso de agua con respecto al estado saturado y superficialmente seco.

Para determinar el contenido de humedad de los agregados, las especificaciones oficiales del metro han establecido la - - prueba del medidor de flotación. En ésta se determina el contenido de humedad conociendo la densidad del agregado y sumergiéndolo en agua para medir la pérdida aparente de peso. Se han ideado muchas -- pruebas, pero los resultados obtenidos solo serán buenos, si se usan muestras realmente representativas de los agregados. Razón para lo cual se deben reducir al mínimo las variaciones en humedad, almacenando el agregado horizontalmente y permitiendo el drenado antes de usarse. El agregado grueso, por su tamaño, retiene mucho menos agua que el fino, y por lo tanto causa menos problemas. Todo lo anterior nos hace concluir, que la presencia de humedad en los agregados, establece la necesidad de corregir las proporciones de agua para mezclas; de esta forma, el agua para la mezcla, se debe reducir en la - proporción del peso de la humedad libre del agregado.

La presencia de agua en la arena, provoca la forma- - ción de una película de agua alrededor de los granos, y la presión - de esta película hace que las partículas se separen ocupando un volumen mayor al que tenían; este fenómeno se conoce como abultamiento y en el caso de mezclas realizadas por volumen, al reducirse el peso -

de la arena que ocupa un volumen fijo, puede alterar el proporcionamiento de la mezcla, haciéndola deficiente en arena. Cuando ésto ocurre, el concreto se predispone a la segregación o formación de cavidades. El abultamiento de la arena depende de su finura, cuando ésta es mayor se abulta considerablemente más y llega al máximo con más contenido de agua que la arena gruesa; por ejemplo, la arena muy fina se abulta hasta un 40 por ciento para un contenido de humedad del 10 por ciento, lógicamente este tipo nunca se usa para elaborar un concreto. En contraste el abultamiento de un agregado grueso es despreciable debido al tamaño de las partículas. Para calcular el factor de abultamiento se utilizan los pesos volumétricos de arenas seca y húmeda y el contenido de humedad por unidad de volumen.

Un agregado puede no ser apto para elaborar un concreto debido a: ciertas reacciones químicas con el cemento; impurezas, que afectan el proceso de hidratación; partículas inestables y recubrimientos, que impiden una buena adherencia.

Cuando cierto agregado contiene impurezas, que pueden deberse a la descomposición de materia orgánica, debe verificarse si la cantidad que contiene es perjudicial o no a la mezcla. Para ello se utiliza la prueba colorimétrica, en la cual cierta cantidad de agregado se sumerge en una solución química dejándola reposar durante 24 horas; posteriormente, juzgando el color de la solución, y comparándolo con el tono amarillo estándar de las normas, se puede establecer el contenido de materia orgánica. Este contenido puede ser nocivo o puede no serlo; para determinar su influencia se realizan otras pruebas con cubos de concreto, que contienen el agregado en cuestión, y se comparan los resultados de resistencia con los de cu-

dos hechos con el mismo proporcionamiento y agregados de reconocida calidad.

Los agregados algunas veces pueden tener recubrimientos superficiales de arcilla y polvo de trituración; la presencia de estos elementos puede modificar las propiedades de adherencia entre los agregados y la pasta de cemento, por ello deben ser removidos antes de usar el agregado. El limo es un material muy fino producto de procesos naturales de intemperización, por lo cual se le encuentra en agregados extraídos de depósitos naturales, el polvo de trituración es el que se forma en el proceso de fracturación de las rocas en agregados. Ambos materiales deben ser retirados por medio de lavados y no deben exceder de cierta proporción, ya que aumentan la cantidad de agua necesaria para humedecer las partículas de la mezcla. Las especificaciones oficiales del metro limitan la cantidad de material fino que pasa por la malla número 200 a: 5 por ciento como máximo del peso total de la muestra en agregado fino, y 1 por ciento máximo en el caso de agregado grueso.

Cuando se utiliza arena de playas como agregado, debe lavarse en agua dulce con objeto de disminuir su contenido de sal, el cual llega a veces hasta 6 por ciento en peso; si se usa sin ser lavado, puede provocar eflorescencias: depósitos blancos en la superficie del concreto. En estructuras masivas de concreto de buena calidad, la sal puede provocar ligera corrosión en el acero de refuerzo, la cual generalmente no llega a ser peligrosa. Al utilizar arena debe verificarse su granulometría, ya que puede llegar a ser extremadamente fina. Todos los agregados tienen en mayor o menor grado partículas inestables, y por ser los efectos que provocan muy

variados, deben limitarse a ciertas normas específicas.

Una partícula de este tipo es el carbón; su presencia puede provocar que el concreto se hinche y fracture, llegando al caso extremo de alterar el proceso de endurecimiento cuando se le encuentra en grandes cantidades y finamente dividido. Sin embargo en cantidades menores al uno por ciento no provoca efectos nocivos en el concreto según las especificaciones oficiales del metro. La presencia de carbón se detecta por flotación en un líquido de densidad adecuada, según la prueba A.S.T.M. C-123.

Otras impurezas que deben evitarse son la mica y las piritas de hierro y marcasita. La primera afecta los requisitos de agua y la resistencia del concreto y puede llegar a provocar la formación de bultos y manchas superficiales; las piritas ocasionan manchas y problemas cuando su tamaño varía entre 0.5 y 1.0 cm. Casi todas las partículas inestables se encuentran en depósitos naturales de agregados, lo que origina que deba verificarse su presencia y establecer límites permisibles. El contenido máximo de partículas desagregables en agregados finos es de 3.0 en por ciento del peso y 5.0 en agregados gruesos; las partículas suaves se limitan a 5.0 - máximo en por ciento del peso en agregados gruesos.

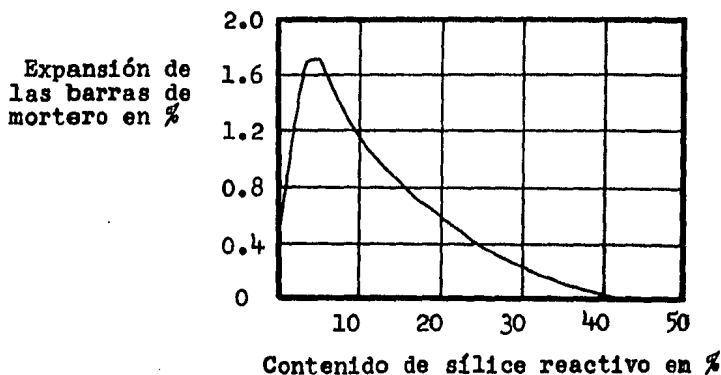
Los cambios de volumen en el concreto son provocados por condiciones físicas, como congelamiento y deshielo, y por reacciones químicas entre los agregados y los álcalis del cemento. La capacidad de un agregado para resistir cambios excesivos en su volumen, como consecuencia de cambios en las condiciones físicas, se denomina sanidad. Estos cambios de volumen provocan daños que pueden variar desde muy ligeros hasta estructuralmente peligrosos. Para de

terminar la inestabilidad del volumen, se describen pruebas diversas que van, desde sumergir el agregado en una solución de sulfatos de sodio o magnesio, hasta someterlo a ciclos continuos de congelamiento y deshielo; de estas pruebas se concluye que los agregados más -- susceptibles de provocar inestabilidad son: pizarras, calizas laminadas, caledonias porosas y algunas areniscas. Los daños por congelación los provocan los poros menores de 3 μ m., ya que éstos permiten la entrada de agua en ellos, pero no presentan un drenaje fácil bajo presión de hielo; esta presión provoca la ruptura de la pasta de cemento alrededor de la partícula de agregado, lo que a su vez afecta la resistencia del concreto. La durabilidad del agregado solo se determina completamente, cuando se encuentra dentro de la pasta de cemento, y debe mostrar que tiene la suficiente capacidad para resistir la presión del hielo y, al mismo tiempo, expanderse sin ocasionar la ruptura del cemento que la rodea.

Algunas veces ocurren reacciones químicas nocivas entre los agregados y la pasta de cemento; estas reacciones se dan entre los álcalis de cemento y la sílice del agregado, formándose un gel que requiere agua, con la consecuente tendencia a aumentar de volumen. Como el gel que se formó se encuentra confinado, aparecen -- presiones que finalmente producen grietas y ruptura. El problema de estas reacciones se incrementa y se vuelve más complejo, debido a -- los diversos factores que intervienen en ella, como la existencia de agua no evaporable en la pasta y la permeabilidad de ésta. Debido a esta complejidad, no existe ningún procedimiento sencillo para determinar si un agregado causa expansión excesiva. Existe una prueba en la cual solo se determina la reactividad potencial del agregado, sin

establecer si se producirá la reacción, obteniéndose resultados no claros al respecto.

Para determinar si la reactividad del agregado es nociva, se realiza la prueba de la barra de mortero: se forman barras especiales de mortero de cemento y arena, las cuales se sumergen en agua a 38° C., ya que a esta temperatura la expansión es más rápida; si la barra se expande más de 0.05 por ciento después de tres meses, o más de 0.1 por ciento después de seis meses, se concluye -- que el agregado utilizado es peligroso. Las investigaciones han demostrado que si se le añade a la mezcla sílice reactiva en forma de polvo fino, se reduce la expansión producida por la reacción entre álcalis y el agregado. Esta aparente contradicción se explica de la siguiente manera: si se tiene poco contenido de sílice, y se aumenta esta cantidad, teniéndose una cantidad fija de álcalis, se aumenta la expansión; pero con valores más altos de contenido de sílice, la situación se invierte: al aumentar el área superficial del agregado reactivo, disminuye la cantidad de álcalis que puede actuar por unidad de área, por lo cual se forma menos gel de álcalis y sílice. Esto se puede observar en la siguiente figura.



Por las razones anteriormente descritas, se puede concluir que, al aumentar la cantidad de material silicoso finamente molido, a las partículas gruesas reactivas presentes, se reduce la expansión aún cuando la reacción tenga lugar. Esta adición puzolánica, que puede ser de cenizas volantes o vidrio pyrex triturado, se debe añadir siguiendo las normas establecidas al respecto, ya que si el aumento es insuficiente, se puede agravar la situación y aumentar la expansión; generalmente se recomienda añadir 20 gramos de sílice reactivo por cada gramo de álcali en exceso del 0.5 por ciento del peso del cemento.

Dentro de las propiedades térmicas del agregado, la más importante es el coeficiente de expansión térmica; ya que éste influye directamente en la calidad del concreto: al elevarse el coeficiente del agregado, aumenta el coeficiente del concreto. Para preparar una mezcla de concreto, se deben utilizar agregados y cemento cuyos coeficientes de expansión no difieran demasiado entre sí, ya que un gran cambio de temperatura puede inducir movimientos diferenciales y romper la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento. Este coeficiente se determina por medio de un dilatómetro, el cual puede ser usado para agregados finos y gruesos indistintamente. Cuando el concreto va a estar expuesto a condiciones extremas, como congelamiento, deshielo, y altas temperaturas, es preciso conocer detalladamente las propiedades del agregado; como en el caso del concreto resistente al fuego, donde nunca se debe utilizar cuarzo como agregado.

El análisis granulométrico es uno de los más importantes para la elaboración de un concreto de buena calidad. Consiste en

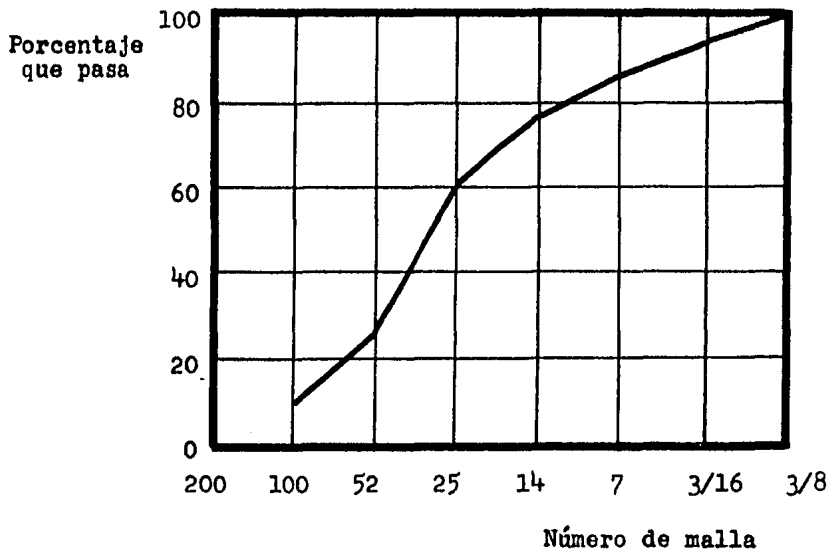
dividir una muestra de agregado en fracciones compuestas por partículas del mismo tamaño, donde cada fracción tiene límites específicos.

Para ello se utilizan mallas o tamices con aberturas cuadradas, las que se designan por la abertura nominal que presentan en milímetros o micras. Las mallas para agregados de concreto forman una serie, en la cual la abertura de cualquier tamiz es aproximadamente la mitad de la abertura del mayor inmediato. Las normas - - A.S.T.M. establecen como el tamiz de mayor tamaño al de 5 pulgadas; para dividir agregados finos y gruesos seleccionan al No. 4 con abertura de 4.76 mm.; y el más fino, como el No. 400 de abertura de 38 micras, existiendo en total, entre el más grueso y el más fino, 46 mallas de diferentes aberturas.

Para realizar un estudio granulométrico, lo primero - consiste en secar al aire la muestra de agregado, ya que la humedad podría formar terrones con partículas de menor tamaño; los tamices - se montan en marcos para empotrarlos unos en otros formando una pila vertical, en orden según su tamaño, con el más grande en la parte superior, que es donde se coloca la muestra de agregado. La pila se - coloca en un sacudidor equipado con interruptor de tiempo para asegurar la uniformidad del proceso. Los resultados se presentan en forma de tablas donde aparece el peso retenido en cada malla como porcentaje del peso total de la muestra y calculándose el porcentaje acumulativo empezando desde el más fino hacia arriba, se pueden trazar curvas granulométricas. En una curva de este tipo las ordenadas representan el porcentaje acumulado que pasa por la malla, y las abscisas las aberturas de las mallas. El valor de estas curvas radica en que, de un solo vistazo, es posible conocer si la granulometría - de una muestra se apega a las especificaciones, si es demasiado fina

o demasiado gruesa, o si es deficiente en cierto tamaño particular.

En la siguiente figura se muestra una curva granulométrica típica.



Antes de pasar a las especificaciones oficiales del metro, debemos conocer el módulo de finura del agregado. Se define como la suma de los porcentajes acumulados retenidos en los tamices de la serie estándar números: 100, 52, 25, 14, 7, 3/16 pulgada, y -- hasta el máximo tamaño presente. Con algunas limitaciones, el módulo de finura es un indicador del comportamiento probable de una mezcla elaborada con agregados de determinada granulometría y puede representar un número infinito de distribuciones de tamaño diferentes o curvas de granulometrías totalmente distintas.

Las especificaciones oficiales establecen los siguientes requisitos de granulometría para el agregado fino.

TABLA DE REQUISITOS PARA LA GRANULOMETRIA DEL AGREGADO FINO.

M A L L A	AGREGADO FINO QUE PASA, EN PORCENTAJE
9.51 mm. (3/8 pulg.)	100
4.76 mm. (No. 4)	95 a 100
2.38 mm. (No. 8)	80 a 100
1.19 mm. (No. 16)	50 a 85
595 (No. 30)	25 a 60
297 (No. 50)	10 a 30
149 (No. 100)	2 a 10

Los porcentajes señalados se deberán obtener en la dosificadora; dado que la graduación en el banco puede variar, se agregarán las partículas necesarias para obtener los porcentajes indicados. El módulo de finura de la arena estará comprendido entre 2.3 y 3.1; se deberán hacer ajustes en la planta dosificadora para mantener el módulo de finura dentro de variaciones de 0.2 del valor considerado en el diseño de la mezcla. La arena no tendrá más de 45 por ciento retenido entre dos mallas consecutivas, de las indicadas anteriormente.

El peso específico de la arena para muestra seca, deberá ser mayor ó igual a 2.3 y tendrá una absorción máxima de 6.0 por ciento.

La supervisión técnica de la obra podrá efectuar análisis para verificar la calidad del agregado fino. Otros requisitos de calidad del agregado fino se encuentran en la siguiente tabla.

M A T E R I A L	Máximo, en porcentaje del peso total de la muestra
- Partículas desmenuzables -	1.0
- Material que pasa la malla No. 200 -	5.0
- Carbón y lignito -	1.0
- Pérdida por sanidad al sulfato de sodio -	10.0

La grava deberá cumplir con los siguientes requisitos de granulometría.

T A M A Ñ O N O M I N A L	MATERIAL QUE PASA, PESO EN PORCENTAJE							
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	#.4	# 8
40 a 5 mm.	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-
25 a 5 mm.	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5
20 a 5 mm.	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5
13 a 5 mm.	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5

El peso específico de la grava para muestra seca, deberá ser mayor ó igual a 2.3, permitiéndose una absorción máxima de 6 por ciento. La cantidad de sustancias deletéreas en agregados gruesos, no debe exceder los siguientes límites.

M A T E R I A L	Porcentaje máximo del peso total de la muestra
- Partículas desmenuzables -	0.25
- Partículas suaves -	5.0
- Material que pasa la malla No. 200 -	1.0
- Carbón y lignito -	1.0

Además, debe cumplir con los siguientes requisitos de sanidad y abrasión.

C O N C E P T O	Grava natural, triturada o piedra triturada
- Sanidad, pérdida máxima en cinco ciclos, peso en porcentaje:	
Sulfato de sodio	12
Sulfato de magnesio	18
- Abrasión, pérdida máxima, peso en porcentaje -	50

El almacenamiento de agregados, debe seguir los lineamientos generales siguientes:

- 1.- No se almacenarán los agregados directamente sobre el terreno natural, porque se producen contaminaciones al recogerlos. Es - recomendable preparar una plantilla de asfalto, suelo-cemento o concreto pobre, o bien colocar una capa de grava apisonada antes de almacenar. Así mismo conviene disponer de una ligera pendien

te en el terreno para facilitar el drenaje del agua que escurra a través de los agregados y propiciar la uniformidad en su contenido de humedad.

- 2.- Impedir que los almacenamientos de agregados diferentes se mezclen entre sí, por quedar demasiado próximos. Si el espacio disponible para almacenar es reducido, conviene colocar muros o mamparas divisorias entre almacenamientos contiguos.
- 3.- Evitar que el viento disperse la arena en el punto de descarga, ésto se logra colocando un tubo o pantalla de protección.
- 4.- Cuando los agregados se almacenen en montones, deberán construirse éstos en capas horizontales ó suavemente inclinadas y en ningún caso por volteo. Sobre los montones no deberán operarse camiones, u otros vehículos, puesto que, además de quebrar el agregado, a menudo dejan tierra sobre los depósitos.

AGUA

El agua que se utilice para la fabricación del concreto debe cumplir con los requisitos establecidos en la cláusula 100-9 de las Especificaciones Generales de Construcción de la SAHOP.

El agua deberá ser limpia y estar libre de cantidades perjudiciales de ácidos, álcalis, sales, materia orgánica y demás -- sustancias que puedan ser nocivas, debe cumplir también con los límites indicados en la siguiente tabla.

LÍMITES RECOMENDABLES DE IMPUREZAS EN AGUA PARA CONCRETO.	
- Sólidos totales en solución, máximo -	1500 p.p.m.
- Carbonatos, máximo -	500 p.p.m.
- Bicarbonatos, máximo -	500 p.p.m.
- Cloruros, máximo -	300 p.p.m.
- Sulfatos, máximo -	300 p.p.m.
- Magnesio, máximo -	150 p.p.m.
- Materia orgánica, oxígeno consumido en medio ácido, máximo -	10 p.p.m.
- pH no menor de -	7

Excepcionalmente y cuando no se tengan facilidades para efectuar el análisis químico del agua o habiéndose efectuado el mismo, los resultados obtenidos no cumplan los requisitos anteriores y por motivos económicos, sea incosteable emplear agua de otra fuente, se deberán efectuar pruebas con cilindros de concreto.

En dichas pruebas se elaborarán dos mezclas comparativas con los mismos agregados, cemento, proporciones, mezclado, curado y con el agua que se desea emplear y otra agua que sí se tenga la certeza que reúne las condiciones de pureza requeridas, pudiéndose emplear para este fin agua destilada.

Se considerará que el agua estudiada es aceptable -- cuando sus especímenes produzcan a 7 y 28 días, resistencia a compresión, mayores del 90 por ciento de las correspondientes a especímenes elaborados con la mezcla testigo, y los tiempos de fraguado inicial y final no difieran en ± 60 minutos.

ADITIVOS

Cuando tratamos las características químicas de los agregados, mencionamos los cambios en el volumen; de éstos, el más importante es la reducción en el volumen del sistema de cemento más agua. Cuando la pasta de cemento es plástica experimenta una contracción volumétrica, cuya magnitud es del orden del 1 por ciento del volumen total del cemento seco, llamada contracción plástica. La --pérdida de agua por evaporación de la superficie de concreto, incrementa dicha contracción y puede provocar un agritamiento superficial en climas cálidos; esta contracción es mayor al elevarse el contenido de cemento y mientras más rápido sea el endurecimiento del concreto.

El uso de aditivos puede influir en la ttendencia al agritamiento y la contracción. Los aditivos retardadores producen - una mayor contracción que puede ser absorbida en forma de contracción plástica, y aumentar la extensibilidad del concreto, reduciendo el - agritamiento. Por otro lado, si el concreto se endurece rápidamente no puede absorber la posible contracción plástica y, como tiene poca resistencia, se agrieta; además, la temperatura en el medio ambiente durante la colocación, determina las dimensiones en el concreto cuando deja de deformarse, por lo cual, la colocación a elevadas temperaturas implica una alta ttendencia al agritamiento.

Por éstas, y algunas otras razones, las especificaciones oficiales del metro permiten el uso de aditivos retardantes y estabilizadores de volumen.

La inclusión de aditivos retardantes en la mezcla de

cemento, demora el endurecimiento de la pasta, lo cual resulta útil para la colocación de cemento en climas cálidos, donde el tiempo normal de fraguado se ve acortado por las altas temperaturas. El uso de estos aditivos se aprovecha, algunas veces, con fines arquitectónicos: el aditivo retardante se aplica en la superficie interior de la cimbra, a fin de detener el endurecimiento del cemento adyacente; una vez retirada la cimbra, es posible cepillar o dar la apariencia deseada a la superficie con el agregado expuesto. El uso de estos retardantes debe realizarse con sumo cuidado, ya que una adición excesiva puede inhibir totalmente el fraguado y endurecimiento del concreto. Entre las sustancias que provocan este retardo se encuentran el azúcar, los derivados de carbohidratos y las sales solubles de zinc. Los efectos que provoca el azúcar, dependen de la cantidad que se use y de la composición química del cemento: una pequeña cantidad de 0.05 por ciento del peso del cemento, actúa como retardante aceptable y el retraso que provoca en el fraguado de concreto será de alrededor de 4 horas; si la cantidad aumenta hasta el rango de 0.2 a 1.0 por ciento, puede detenerse virtualmente el fraguado del cemento. De cualquier forma el uso deberá determinarse mediante mezclas de prueba que contengan el aditivo propuesto, en la proporción indicada para lograr el efecto especificado, comparándose los resultados obtenidos con los correspondientes a una mezcla de referencia.

Los aditivos más utilizados en la elaboración del concreto para la construcción del metro, son los que se denominan incluysores de aire. El concreto con aire incluido ofrece algunas ventajas desde el punto de vista de la trabajabilidad y durabilidad; el -

aire incluido en el concreto se define como aire intencionalmente incorporado por medio de los agentes adecuados. Debe distinguirse del aire atrapado por accidente, ya que el tamaño de las burbujas de aire incorporado no debe exceder de 0.5 mm.; este tipo de burbujas -- produce pequeñas cavidades en la pasta de cemento que evitan la formación de conductos por donde pase agua, limitándose así, la formación de productos de la hidratación de cemento como el gel. Los principales agentes inclusores de aire, que se utilizan para aumentar la resistencia del concreto a la congelación son: las grasas y aceites de origen animal; las resinas naturales de madera, que reaccionan con la cal del cemento para formar resinatos solubles; y los agentes humectantes de compuestos orgánicos sulfatados. Los agentes inclusores de aire deben producir rápidamente un sistema de espuma estable y bien distribuida, cuyas burbujas no deben provocar efectos químicos nocivos sobre el cemento.

El agente inclusor de aire se puede añadir a la mezcla junto con los demás elementos en la mezcladora al mismo tiempo, o se puede moler junto con el cemento en proporciones fijas; esto último no es muy recomendable, ya que modificar el contenido de aire en relaciones agua-cemento muy variables, resulta menos flexible. El empleo de aditivos complica la dosificación de materiales para concreto, razón por la cual se acostumbra hacer una solución del aditivo en agua para lograr su distribución uniforme en la pasta de cemento, representando, el agente inclusor, entre el 0.005 y 0.05 por ciento del peso del cemento. En un volumen dado de concreto, el volumen total de huecos, siempre afecta las condiciones de resistencia del concreto; de ahí que las burbujas de aire deban ser tan pequeñas como sea posible y, logrando una separación entre huecos de 0.25 mm., se

producirá una completa protección contra los daños por congelamiento.

Dado que es muy complicado medir el tamaño de los huecos, se expresa su dimensión en términos de su superficie específica, de esta forma la superficie específica representa un valor promedio de todos los huecos de aire sean accidentales o inducidos. Un valor entre 16 y 24 mm^{-1} de superficie específica de los huecos, indica un concreto con aire incluido de calidad satisfactoria; en cambio la superficie específica del aire accidental es menor a 12 mm^{-1} .

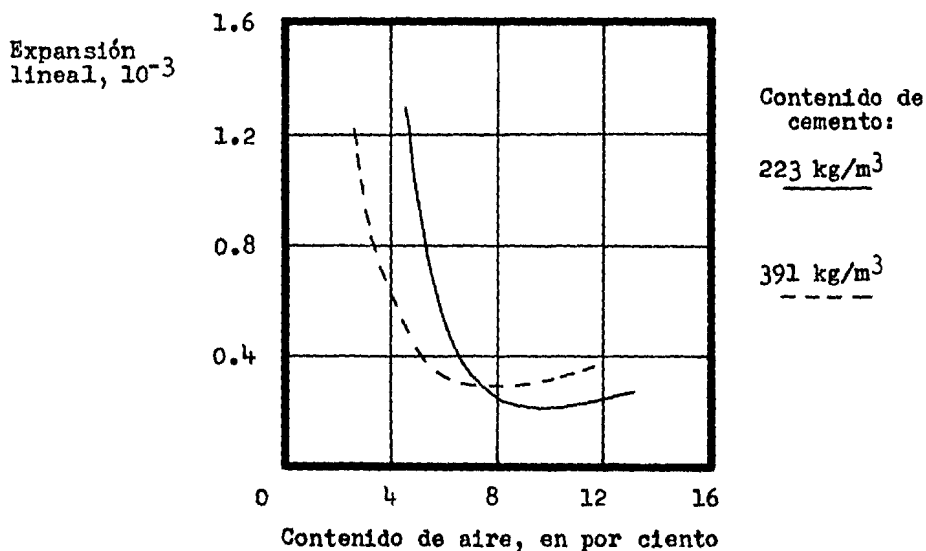
Generalmente se especifica el contenido de aire como un porcentaje del volumen de concreto, la determinación de este valor no da la proporción de huecos, ya que el aire se encuentra presente solo en la pasta de cemento. Se ha visto que las mezclas ricas requieren mayor volumen de aire incluido que las pobres; ésto se logra aumentando la cantidad de aditivo inclusor de aire, pero se debe tener presente que existe un límite para el cual el volumen de los huecos ya no aumenta.

El contenido de aire depende, entre otras cosas, de: la trabajabilidad de la mezcla, una mezcla de mejor trabajabilidad retendrá más aire que una mezcla seca; la granulometría del agregado, cuando existe un exceso de partículas muy finas de arena el volumen de los huecos decrece; la finura de el cemento, la finura reduce la eficacia del inclusor de aire; la operación de mezclado, si el tiempo de mezclado es muy corto, el aditivo no alcanza a distribuirse uniformemente en toda la pasta, y si es demasiado largo, se expulsará gradualmente una parte del aire; la temperatura, un aumento de 10 a 32° C . reducirá el contenido de aire a la mitad; el vibrado, una vibración prolongada provocará una pérdida considerable de aire, des--

pués de 3 minutos solo permanece la mitad de la cantidad original y después de 9 minutos no quedará más del 20 por ciento.

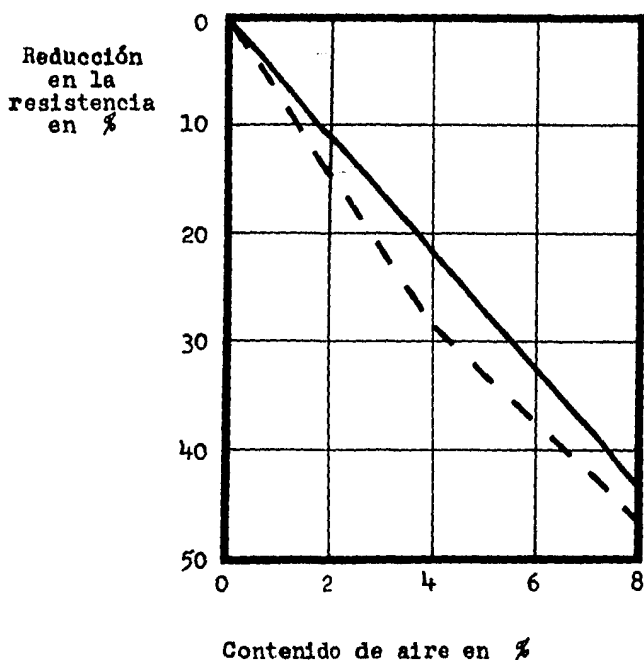
Para conocer el contenido de aire se utilizan las normas A.S.T.M. C-457, éstas dan por resultado un factor que indica la distancia máxima de cualquier punto de la pasta de cemento desde la periferia del hueco de aire más cercano. Este factor se expresa en milímetros y un valor no mayor a 0.2 es el máximo requerido para una protección satisfactoria contra la congelación.

El principal motivo para usar aditivos inclusores de aire, como ya se dijo, es el de dotar al concreto de protección contra el congelamiento y deshielo, y para disminuir la expansión lineal del mismo como se aprecia en la siguiente figura.



Sin embargo, su aplicación presenta desventajas de las cuales la más importante es la influencia de los huecos en la resistencia del concreto. Como se sabe la resistencia del concreto se ve

afectada por la relación de pesos específicos, y los huecos de aire afectan la resistencia al igual que lo hacen otros factores. Cuando se incluye aire a una mezcla sin modificar, se establece una relación directa entre el porcentaje de aire incluido y la pérdida de resistencia del concreto; esta relación indica que la pérdida es proporcional al volumen de aire incluido, siempre que no se modifique el proporcionamiento de la mezcla. Las variaciones consideradas son hasta del 8 por ciento y no tiene importancia el origen del aire, sea accidental o incluido. En la siguiente gráfica se aprecia la relación entre la reducción de resistencia y el contenido de aire; la línea continua representa aire incluido y la discontinua la relación debida a huecos provocados por una inadecuada compactación del cemento.



De las pruebas efectuadas se deduce que la pérdida de resistencia es independiente de las proporciones de la mezcla y llega a ser de 5.5 por ciento por cada punto de porcentaje de aire -- presente. Para evitar esta pérdida, y mantener la trabajabilidad -- del concreto, la adición de aire incluido debe ir acompañada de una reducción en la relación agua-cemento, con respecto a una mezcla i-- gual sin aire incluido. Por ejemplo, en una mezcla pobre con rela-- ción agregado-cemento de 8, el aire incluido produce una mejoría en trabajabilidad que una disminución en la relación agua-cemento justifi-- ca la pérdida de resistencia; en el caso de mezclas ricas, el efec-- to sobre la trabajabilidad es mínimo, ya que la relación agua-cemen-- to casi no puede disminuirse y se presenta una pérdida neta de resis-- tencia. El aire incluido en una mezcla la hace comportarse como si - tuviera más arena, por lo cual la adición de aire debe ser paralela a una disminución en el contenido de arena; aunado a ésto, es posible reducir aún más el contenido de agua, lo cual representaría una com-- pensación adicional a la pérdida de resistencia debida a los huecos.

Otras ventajas que presenta el uso de este tipo de a-- ditivos son las de ofrecer un concreto más fácil de colocar y compac-- tar, además de reducir el sangrado, disminuyendo la sedimentación de las partículas sólidas y el peso específico del concreto, elevando - el rendimiento del cemento y agregados.

El método de presión, descrito por las normas A.S.T.M. C-231, es el más efectivo y el que más se usa para medir el conteni-- do de aire del concreto fresco; debe considerarse que este método mi-- de el contenido total de aire, razón por la cual el aire atrapado ac-- cidentalmente debe ser totalmente removido antes de iniciar la prue--

ba por medio de una adecuada compactación. Básicamente consiste en medir la disminución del volumen de una muestra de concreto fresco, cuando se somete a una presión determinada, la cual provoca que el volumen de aire en el concreto disminuya siendo muy fácil interpretar dicha disminución. Cuando se mide el contenido de aire en un concreto endurecido, se hace sobre secciones pulidas del mismo, las cuales se observan en el microscopio mediante una técnica de retículas.

Existen otras clases y tipos de aditivos, que se usan para modificar las características del concreto; sin embargo, las especificaciones oficiales del metro, solo permiten el uso de los que ya hemos mencionado aquí. El empleo de aditivos en la construcción del metro requiere la aprobación de la dirección de la obra, la cual solo se obtiene si los aditivos cumplen con los requisitos que se especifican para cada uno de ellos, en las normas correspondientes. La Dirección de la Obra puede ordenar a la Supervisión Técnica se efectúen pruebas de verificación extra de calidad de los aditivos autorizados, y en base a los resultados, rechazar aquellos que no cumplan con las especificaciones.

CAPITULO II

ELABORACION

El diseño de una mezcla de concreto se define como el proceso de selección de los materiales adecuados, en cantidades determinadas, para producir un concreto que sea resistente y durable, aunado a un costo mínimo. En el diseño de una mezcla de concreto, - el costo del cemento supera por mucho el costo de los agregados, por lo cual se debe tratar de reducir al mínimo la proporción de cemento; ésto trae consigo ventajas, a parte de las económicas, como una menor contracción y agrietamiento. Al estimar el costo de una mezcla de - concreto se debe considerar también la variabilidad en la resistencia; ya que al diseñar cualquier obra, se establece un valor mínimo de resistencia, el cual funciona como base para aceptar o rechazar - determinado concreto. Los criterios más comunes para aceptar o rechazar un concreto, se basan en los siguientes valores:

- Mínima resistencia a la compresión.
- Relación máxima agua-cemento o contenido mínimo de cemento para una buena durabilidad.
- Máximo contenido de cemento para evitar agrietamientos.
- Peso volumétrico mínimo para presas de gravedad o estructuras similares.

Estos requisitos se deben satisfacer y establecen las bases para seleccionar y proporcionar los ingredientes en el diseño de la mezcla.

PROPORCIONAMIENTO

El concreto utilizado en las diversas obras de la construcción del metro, además de cumplir con los requisitos de calidad

ya establecidos para cada uno de sus elementos, debe cumplir con las siguientes especificaciones:

Los ingredientes se deben mezclar en forma adecuada - para obtener un concreto homogéneo y tratable, que permita una colocación adecuada y cumpla con los acabados del proyecto.

Con objeto de conocer la homogeneidad de la mezcla se ideó la prueba de revenimiento; esta prueba se realiza con un molde en forma de cono truncado de 30 cm. de altura, el cual se coloca - en una superficie lisa con la abertura más pequeña hacia arriba. Se llena con concreto en cuatro capas, cada una de ellas compactada con una varilla de acero estándar y 25 golpes, una vez lleno, la superficie superior se aplana con una cuchara y se levanta lentamente el molde. Cuando el molde se retira totalmente, el concreto se abate; esta altura de abatimiento en la parte superior se conoce como revenimiento y se mide con aproximación de 5 mm. Al retirar el molde, puede ocurrir que el revenimiento no sea uniforme en toda la superficie y que la mitad del cono se deslice en un plano inclinado, este - caso se considera como revenimiento por corte, y como no proporciona ninguna información, se deshecha y deberá repetirse la prueba. En - el caso de que el revenimiento por corte persista, puede deberse a - falta de cohesión en la mezcla. En esta prueba un revenimiento de - cero indica una mezcla de consistencia rígida, las mezclas ricas se comportan favorablemente y su revenimiento indica su grado de trabajabilidad. Un revenimiento entre 0 y 2.5 cm. se considera muy - pequeño; entre 2.5 y 5 cm., pequeño; entre 5 y 10 cm., medio y mayor de 16 cm., se considera alto.

Las especificaciones oficiales del metro exigen se repiten los revenimientos de la siguiente tabla con tolerancia de ± 2 cm.

RESISTENCIA (kg/cm ²)	EDAD (días)	REVENIMIENTO (cm.)	E M P L E O
150 N.*	28	16 - 18	Tablestaca concreto
150 R.R.**	14	16 - 18	" "
200 N.	28	16 - 18	" "
200 R.R.	14	16 - 18	" "
150 N.	28	8 - 10	Losas de cajón
150 R.R.	14	8 - 10	" "
200 N.	28	8 - 10	" "
200 R.R.	14	8 - 10	Trabes, losas y columnas
250 N.	28	8 - 10	" "
250 R.R.	14	8 - 10	" "
175 N.	28	8 - 10	" "
175 R.R.	14	8 - 10	" "

NOTA: * Cemento Tipo I
** Cemento Tipo III

Estos revenimientos pueden variar, con autorización - de la Dirección de Obra, en concretos colados con bomba o bajo condiciones especiales.

Los resultados de esta prueba pueden indicar el mismo revenimiento con distintos agregados para distintas trabajabilidades; por ello pueden obtenerse valores distintos en diferentes muestras - de la misma mezcla, ya que el revenimiento no está en relación única con el concepto de trabajabilidad. Sin embargo esta prueba se usa -

mucho y se utiliza principalmente para verificar variaciones entre un lote de mezcla y otro. Por ejemplo, un aumento en revenimiento puede indicar que el contenido de humedad del agregado ha aumentado repentinamente, lo cual permite corregir a tiempo el proporcionamiento de la mezcla antes de ser utilizada.

Otro factor muy importante en el proporcionamiento de cualquier mezcla de concreto, lo constituye el tamaño máximo del agregado. Anteriormente se mencionó que a medida que aumenta el tamaño del agregado, se reduce su área superficial que es preciso humedecer antes de realizar la mezcla; ésto trae como consecuencia que al utilizarse un agregado de tamaño máximo, se reducen las necesidades de agua de la mezcla, de forma que para una trabajabilidad establecida, se puede reducir la relación agua-cemento, lo cual traerá en consecuencia un aumento en la resistencia. Este comportamiento se verifica con agregados hasta de 40 mm.; a partir de ese tamaño, el aumento en resistencia provocado por la reducción de agua, se ve compensado por los efectos nocivos que provoca una menor superficie específica de adherencia entre el agregado y la pasta de cemento. Por esta razón las especificaciones oficiales del metro limitan el tamaño del agregado, el cual en ningún caso puede ser mayor a 40 mm.

Paralelo a ésto el tamaño nominal máximo del agregado se deberá escoger basándose en limitaciones estructurales propias de la obra, como los espesores de las secciones o el espaciamiento entre refuerzos. Las especificaciones oficiales del metro establecen que el tamaño nominal máximo del agregado, será menor que un quinto de la menor distancia horizontal entre caras de los moldes, un tercio del espesor de las losas, dos tercios de la separación horizontal libre mínima entre barras, paquetes de barras o tensores de preesfuer-

zo. Estas restricciones demuestran claramente la importancia de la trabajabilidad de la mezcla y consideran adecuadamente el tamaño de la sección por colar y la cantidad y espaciamiento del acero de refuerzo. Concluyéndose que cuando la sección por colar es estrecha y limitada, el concreto debe tener una alta trabajabilidad para lograr una compactación completa; este factor estructural se calcula durante el diseño de la obra, de forma que el diseño de la mezcla puede ser calculado con anticipación. En el caso de que este factor limitante no exista, se puede escoger la trabajabilidad de la mezcla dentro de amplios límites.

El tercer factor que establecen las especificaciones oficiales del metro, para lograr un proporcionamiento adecuado, es la consistencia. Este término se usa para describir el estado del concreto fresco y se refiere a la firmeza de la mezcla o a su facilidad para fluir, dependiendo de su contenido de agua; de esta forma se establece que los concretos húmedos son más trabajables que los secos, aunque los concretos con igual consistencia pueden variar en trabajabilidad.

El factor que afecta de una manera prominente la consistencia del concreto es el contenido de agua, el cual se expresa en litros por metro cúbico. En relación a esto conviene suponer que para determinado agregado con cierta granulometría y determinada trabajabilidad de concreto, el contenido de agua y la relación agua-cemento son independientes una de otra; esta suposición sirve para estimar el proporcionamiento de mezclas con diferente riqueza.

La tabla que sigue muestra valores típicos para proporcionar mezclas con diferentes tamaños máximos de agregados y revencimientos.

CONTENIDO DE AGUA EN EL CONCRETO (lt/m ³)		
TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO (mm.)	REVENIMIENTO DE 2.5 A 5.0 CM.	
	A G R E G A D O REDONDO	ANGULOSO
9.5	190	210
19.0	170	195
38.1	160	170
50.8	150	165
	REVENIMIENTO DE 7.5 A 10.0 CM.	
9.5	200	225
19.0	190	210
38.1	170	190
50.8	165	180
	REVENIMIENTO DE 15.0 A 17.5 CM.	
9.5	230	255
19.0	210	225
38.1	190	210
50.8	180	195

Cuando el contenido de agua y otras proporciones son fijas, la trabajabilidad dependerá de las características del agre-

gado, como su granulometría, textura y forma; de cualquier manera, la relación agua-cemento y granulometría deberán tomarse en consideración juntas, ya que cuando aumenta la relación agua-cemento, se requiere una granulometría más fina para obtener la máxima trabajabilidad. Del mismo modo, la trabajabilidad de la mezcla, dependerá de las proporciones de agregados de distintas densidades que se usen y del volumen absoluto de cada fracción de tamaño. Cuando aumenta la relación agua-cemento hasta 2 o 2.5, la influencia de los agregados en la trabajabilidad disminuye hasta casi desaparecer; de cualquier forma, la suposición de la influencia de los agregados en la trabajabilidad debe realizarse con precaución, ya que de los factores agregado-cemento, agua-cemento y contenido de agua, solo dos son independientes y pueden afectar en mucho la trabajabilidad de la mezcla. Es importante aclarar que el agua en el concreto se considera como la suma del agua añadida a la mezcla y el agua contenida en los agregados; de esta agua en los agregados, una parte es absorbida y otra se encuentra libre en la superficie. Esto debe tomarse en consideración al proporcionar el agua para la mezcla, ya que si ocurriera lo contrario, que el agregado no estuviera saturado, entonces al realizarse la mezcla parte del agua añadida podría ser absorbida por el agregado, lo cual modificaría la trabajabilidad del concreto fresco. Las especificaciones oficiales del metro establecen que la cantidad de agua empleada en la producción del concreto, se regulará para obtener la consistencia adecuada, debiéndose ajustar por cualquier variación en el contenido de humedad o graduación de los agregados, al penetrar en la mezcladora. Del mismo modo, no se permite la adición de agua para compensar el endurecimiento del concreto antes de ser colado y se requerirá uniformidad en la consistencia del concre-

to de revoltura a revoltura. El contratista puede equipar cada mezcladora con un medidor de consistencia; la sensibilidad de estos medidores será tal que el efecto de un cambio de revenimiento de 1.5 cm. sea fácilmente detectado por el operador.

Tomando en consideración el peso volumétrico, los concretos se clasifican en tres tipos: concreto ligero, ordinario y pesado. El rango en que se encuentra el concreto ligero varía entre - 300 y 1850 kg/m³, ésto se logra utilizando agregado poroso de bajo peso específico en lugar de agregados ordinarios, omitiendo el agregado fino en la mezcla o introduciendo grandes huecos en la pasta de concreto. El concreto se considera pesado cuando su peso volumétrico es superior a 3000 kg/m³; ésto ocurre cuando se sustituye el agregado ordinario por un material de peso específico mucho más alto, como la barita con peso específico de 4.1 o con algún material de peso similar.

Las características, ventajas, usos o aplicaciones de estos tipos de concreto, no forman parte de este tema y solo se mencionan para establecer el rango del peso específico del concreto utilizado en la construcción del metro. Este debe estar comprendido entre 2.1 y 2.4 ton/m³, en estado húmedo. La Dirección de la Obra, - puede a su juicio, realizar las pruebas necesarias para verificar el peso y los volúmenes entregados. El peso de cada revoltura se determina sumando el peso de cada material que interviene en la mezcla, - incluyendo agua, agregados y cemento; el peso volumétrico real se obtendrá por medio del método A.S.T.M. C-138. En el concreto hecho en obra y premezclado, la base para medir el concreto será el metro cúbico al descargar la revolvedora.

DOSIFICACION

Las especificaciones oficiales establecen requisitos de dosificación que debe cumplir el concreto, sea premezclado o hecho en obra, para poder ser utilizado en las obras del metro; en esta sección veremos tales requisitos.

El concreto hecho en obra se empleará únicamente cuando se requieran pequeños volúmenes y bajo aprobación de la Dirección de Obra. El equipo de mezclado debe ser mecánico y la medición de los agregados, podrá ser volumétrica, siempre que se dosifique en recipientes de geometría y rigidez adecuadas; en el caso del cemento, la dosificación será por sacos completos y la de agua en recipientes graduados.

Cuando se requiera un suministro de concreto en grandes cantidades se utilizará concreto premezclado elaborado en planta; la principal ventaja que presenta el concreto premezclado es su fabricación bajo mejores condiciones de control de las que son posibles en la obra. En las plantas modernas de dosificación y mezclado, existen dispositivos que evitan una dosificación incorrecta, además de contar con un registro impreso de los pesos de los ingredientes para cada mezcla. Todo esto asegura una buena calidad y uniformidad en el concreto, ya que la incertidumbre y variabilidad asociada con la fabricación se elimina casi totalmente.

Existen dos tipos de concreto premezclado; en el primero la mezcla se realiza en la planta central, y en el camión para su transporte, se mezcla lentamente para evitar un indebido endurecimiento; en el segundo tipo, la dosificación de materiales se realiza

en la planta central y la mezcla en el camión, ya sea en tránsito a la obra o inmediatamente antes de ser descargado. Este segundo tipo permite realizar viajes más largos y compensar retrasos durante el colado.

En el concreto premezclado utilizado en las obras del metro, las cantidades de cemento, agregados y aditivos que intervengan en su fabricación, serán determinadas por peso, en forma independiente para cada revoltura de concreto; la cantidad de agua podrá -- ser determinada por volumen o peso.

Se deben usar tolvas independientes para pesar el cemento, las que deberán estar equipadas con los aditamentos necesarios para que la descarga del cemento por revoltura sea completa; cuando el cemento sea suministrado por sacos, la dosificación deberá realizarse para cada revoltura, por sacos completos de cemento. En la -- misma forma, el equipo para manejar el cemento, debe estar construido y ser operado de manera que se eviten mermas durante la medición, transporte y descarga.

El equipo pesador y medidor debe satisfacer los requisitos siguientes: cada unidad pesadora deberá incluir una carátula visible con indicador, sin resortes, que marque la carga de la báscu la en cualquier etapa de la operación de pesado, desde cero hasta la capacidad total de la báscula, e incluir un dispositivo que indique si falta carga, si sobra o si la báscula está en equilibrio, tanto -descargada como cuando está cargada por el peso marcado en la barra.

La carrera de la aguja indicadora en la carátula, deberá tener una amplitud suficiente para marcar sobrecarga de cuando menos $1/3$ de la carrera que indica falta de carga. Las barras de las básculas

deberán estar interconectadas de tal modo, que no pueda iniciarse la operación de pesado de una nueva revoltura, hasta que la tolva de pesado esté completamente descargada de la pesada anterior y la báscula esté en equilibrio. Las tolvas de pesado deberán estar construídas de tal manera, que permitan eliminar de ellas, el material sobrante de una pesada que esté en exceso de las tolerancias prescritas.

Asimismo, el equipo se debe poder ajustar más fácilmente para poder compensar la variación de peso motivada por el contenido de humedad de los agregados y por cambios en las proporciones de la mezcla. El equipo debe controlar la entrada de materiales, de manera que las imprecisiones combinadas en alimentación y medición, durante la operación normal, no excedan del 1 por ciento para agua; del 1.5 por ciento para cemento; del 3 por ciento para aditivos; y del 2 por ciento para arena, grava de 20 y 40 mm.

Se obtendrán muestras representativas de cemento, aditivos, arena y cada tamaño de agregado grueso, de los flujos de descarga entre los silos y tolvas dosificadoras ó entre las tolvas dosificadoras y las revolvedoras. Se instalará un mecanismo medidor de agua el cual no debe presentar escurrimientos de agua, cuando las -- válvulas estén cerradas, y se construirá de manera que el agua sea -- descargada rápida y libremente al interior de la revolvedora. Además de este aparato deben existir aditamentos complementarios para la medición e introducción de pequeñas cantidades de agua al interior de la revolvedora, cuando se requiera para un ajuste final de la mezcla.

El equipo que no llene los requisitos anteriores deberá ser reparado o reemplazado satisfactoriamente, a juicio de la Dirección de Obra.

MEZCLADO

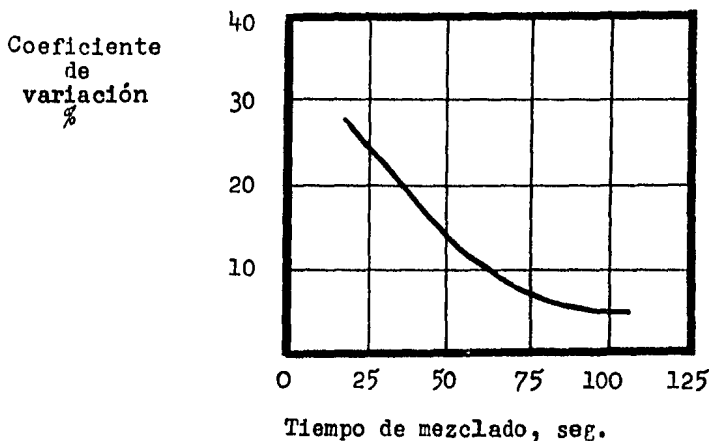
El mezclado consiste en formar con todos los ingredientes del concreto una masa uniforme. El mezclado a mano es caro y no ofrece la uniformidad requerida; sin embargo a veces se requiere hacerlo en esta forma. Para ello se debe extender el agregado en una capa uniforme sobre una superficie plana, limpia y no porosa; el cemento se esparce sobre los agregados, y los materiales secos se mezclan con una pala hasta lograr una revoltura uniforme. Se añade agua gradualmente de manera que no escurra fuera del aglomerado de materiales, y se traspalea varias veces hasta lograr un color y consistencia uniformes.

Existen mezcladoras de varios tipos que producen un mezclado de buena calidad, entre las más comunes se encuentran las de tambor y las basculantes. Las mezcladoras de tambor generalmente son fijas y se utilizan en plantas centrales de mezclado de gran capacidad; constan de un tambor circular que gira alrededor de su eje, y dentro del mismo tambor, otro eje con aspas gira describiendo una trayectoria circular, esto permite el mezclado a fondo de todo el concreto. El tambor cuenta con láminas recogedoras que evitan que el concreto se pegue a las paredes interiores, y variando su altura evitan la formación de costras en el fondo; este tipo de mezcladoras se cargan por medio de tolvas, en las cuales no debe quedar ningún material adherido para asegurar que toda la carga cae dentro, de esta forma no se modificará el proporcionamiento de la mezcla. Esta mezcladora es particularmente útil cuando se preparan mezclas duras y cohesivas, por lo que se usan para manufacturar concreto prefabricado.

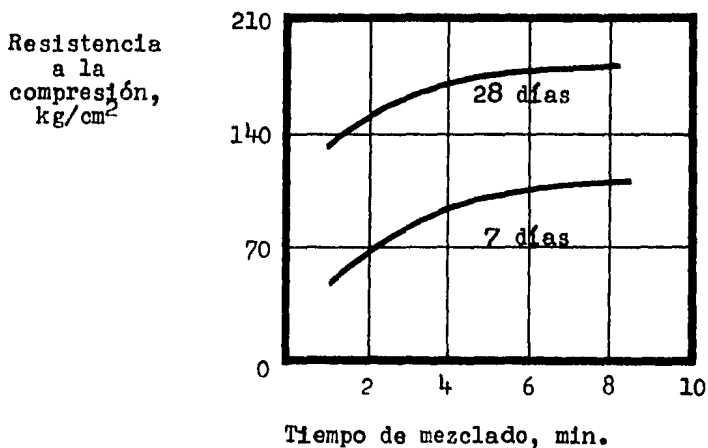
Las mezcladoras basculantes tienen una cámara de mezclado en forma de olla cónica que se inclina para descargarla; la -- principal ventaja que presentan es la de descargar de una manera eficiente sin provocar la segregación de la mezcla, por ello son muy utilizadas para mezclas de baja trabajabilidad o con agregados de gran tamaño. Su principal desventaja consiste en que, dentro de la olla, las aspas existentes no raspan las paredes y cierta cantidad de concreto se adhiere a ellas. Esta capa se forma con concreto de la primera mezcla y la descarga estará compuesta por partículas gruesas de agregado solo ligeramente recubiertas de mortero, lógicamente esta -- primera mezcla debe rechazarse; para eliminar este problema se debe introducir algo de mortero en la mezcladora, antes de fabricar el -- concreto definitivo. La eficiencia de una mezcladora se mide por la uniformidad de la mezcla que produce, y la uniformidad se determina tomando muestras en receptáculos adecuados, durante toda la descarga para compararlas en términos de homogeneidad. Al respecto las especificaciones oficiales del metro establecen que en la revoltura de -- materiales que se coloque en la revolvedora, debe incluirse suficiente exceso de cemento, agua y arena para formar una capa en el interior del tambor sin reducir la cantidad de mortero de la revoltura.

El tiempo que dura el mezclado reviste vital importancia para elaborar un concreto de buena calidad. En general el tiempo depende del tipo de mezcladora que se use y debe encontrarse la -- relación óptima entre el número de revoluciones y el tiempo de mezclado, ya que ambos factores son interdependientes. De las pruebas efectuadas para relacionar el tiempo de mezclado con la uniformidad de la mezcla, se concluye que tiempos menores de 80 segundos producen un

concreto más variable en resistencia a la compresión. Esto se muestra claramente en la siguiente figura.



Cuando el tiempo de mezclado aumenta, se presenta también un aumento en la resistencia promedio del concreto.



Este aumento en la resistencia aparece después de un minuto y casi no es representativo después de dos. Estas razones - hacen que el tiempo de mezclado adquiera gran importancia, y debe - cuantificarse desde el momento en que los materiales sólidos entran en la mezcladora; también se especifica que toda el agua debe ser a ñadida, a más tardar, cuando ha transcurrido la cuarta parte del -- tiempo total de mezclado. Las especificaciones oficiales del metro establecen el tiempo de mezclado en función de la capacidad de la - revolvedora.

CAPACIDAD DE LA REVOLVEDORA	TIEMPO DE MEZCLADO
1.5 m ³ ó menos	1.5 minutos, mínimo
2.3 m ³	2.0 minutos, mínimo
3.0 m ³	2.5 minutos, mínimo

Cuando en una mezcla se utiliza agregado ligero, el - tiempo de mezclado debe prolongarse hasta los cinco minutos, dividién dose en dos minutos de mezclado del agregado y agua solamente y tres minutos más, después de añadir el cemento. En lo que se refiere al - orden de carga de los agregados y los restantes ingredientes en la -- mezcladora, no existen reglas fijas, pero se recomienda colocar una - pequeña cantidad de agua al principio seguida por todos los materia-- les sólidos que deben colocarse simultáneamente y de manera uniforme; si es posible la mayor parte del agua debe añadirse al mismo tiempo, dejando la cantidad que reste para después de mezclar los materiales

sólidos. En el caso de que el tiempo de mezclado fuera excesivamente largo, se podría producir una gran evaporación de agua que provocaría una menor trabajabilidad de la mezcla, o es posible que el agregado suave se triture aumentando el contenido de material fino. Como la fricción que el mezclado origina puede provocar un aumento en la temperatura, las especificaciones oficiales recomiendan que el agua tenga una temperatura igual o menor a 20° C. al momento de añadirse a la mezcla, y los agregados menor a 30° C.

Cuando se trata de concreto con aire incluido, no debe prolongarse demasiado el tiempo de mezclado, ya que el contenido de aire se reducirá en $1/6$ por hora; un retraso en la colocación del concreto, sin ser éste mezclado continuamente, representará una pérdida de $1/10$ por hora de aire incluido.

En la construcción del metro se establece que en ningún caso se podrá usar revoltura que llegue a su destino después de los 60 minutos siguientes a la iniciación de su mezclado, tampoco se permiten alteraciones en las propiedades de la mezcla por falta de limpieza o por condiciones inadecuadas de los medios de transporte. Cuando se utilicen camiones revolventes deberá contarse con un número suficiente de ellos para el mezclado, transporte y colocación del concreto, a efectos de evitar lo más posible, las juntas frías; el tiempo de mezclado, cuando se utilicen camiones revolventes, se medirá por el número de revoluciones del tambor, y estará comprendido entre un mínimo de 60 y un máximo de 100 revoluciones por minuto, girando el tambor a una velocidad de 8 a 12 veces por minuto. Una vez completado el ciclo de mezclado, el tambor debe girar a una velocidad menor a 6 revoluciones por minuto.

No se podrá añadir agua a la revoltura una vez concluido el ciclo de mezclado, y cualquier camión que requiera agua adicional para una colocación satisfactoria será rechazado.

Cuando en una mezcla de concreto ocurre la separación de las partículas constituyentes del agregado, de modo que la mezcla deje de ser uniforme, se dice que la mezcla se ha segregado. Se reconocen dos tipos de segregación: la primera ocurre cuando las partículas gruesas del agregado se asientan más que las finas, y la segunda cuando ocurre la separación de la lechada de cemento y agua de la mezcla.

Entre los factores que pueden fomentar la segregación se encuentran: el manejo y colocación inadecuado del concreto, por ello debe evitarse arrojarlo desde alturas considerables o descargarlo contra obstáculos; el uso impropio de vibradores, ya que no debe prolongarse demasiado el tiempo de vibrado; y finalmente, las diferencias apreciables en la densidad de los agregados finos y gruesos. El riesgo de segregación por un vibrado demasiado largo, se puede anticipar realizando pruebas en cubos, donde cada cubo, se vibra durante 10 minutos para después estudiar la distribución del agregado grueso.

Las especificaciones oficiales del metro establecen que al descargar el camión revolver se debe evitar la segregación del agregado grueso, por medio de bandas o deflectores, de manera que el concreto caiga con cierta inclinación en el recipiente que lo reciba. Cualquier mezcla que presente segregación será rechazada.

CAPITULO III

COLOCACION

Este capítulo abarca las principales medidas que deben tomarse antes, durante, y después, del colado de concreto, para obtener un elemento estructural con la calidad requerida para desarrollar de una manera eficiente las funciones para las cuales fué creado.

PREPARATIVOS

Las medidas más importantes que recomiendan las especificaciones oficiales del metro que deben ser tomadas antes del colado de cualquier elemento estructural son las siguientes.

No deberá colarse ninguna porción de concreto hasta que todos los trabajos referentes a cimbras, armados de refuerzo, instalaciones ahogadas, preparación de superficies de colado; así como el equipo para el manejo y colocación de la mezcla, bandas transportadoras, deflectores, embudos, tolvas y artesas, estén debidamente instalados y listos para su operación. Esta medida intuye, obviamente, que antes de efectuar el colado, todas las superficies sobre o contra las cuales se cuele la mezcla de concreto, deberán estar libres de lodo, escombros y agua encharcada; además deberán estar limpias de aceite, grasa o cualquier material que pudiera contaminar la mezcla, solo en la parte inferior de los moldes se podrá aplicar una capa de aceite vegetal. En el caso de materiales o instalaciones -- que deben quedar ahogadas y sobre las cuales existan costras de mortero seco o lechada de cemento, se deberán remover dichas costras antes de colar el concreto circundante o adyacente. Respecto a las --

cimbras, los moldes serán construídos de acuerdo a las especificaciones del proyecto. La cimbra podrá ser metálica, de madera, o cualquier otro material autorizado, siempre y cuando tengan la rigidez suficiente para evitar deformaciones debidas a la presión de la mezcla, efectos correlativos a los vibradores, cargas y operaciones de vaciado que pudieran presentarse durante y después del colado. En el caso de que existan uniones entre cimbras, deberán estar hechas de tal forma que eviten la fuga de lechada y de los agregados más finos durante el vaciado y compactación de la mezcla de concreto; del mismo modo todas las superficies estarán exentas de rugosidades, oquedades y bordes de cualquier tipo y presentarán el acabado superficial indicado en el proyecto. Cuando una cimbra se use varias veces se deberá limpiar completamente antes de realizar un nuevo colado y se construirán moldes de manera que puedan retirarse sin martillar o palanquear sobre el concreto.

El acabado superficial del concreto reviste especial interés cuando se desea dar un terminado aparente conocido como acabado espejo. Este acabado se da al concreto cuando se ofrece directamente a la vista sin tener que recurrir a aplanados, resanes o modificaciones posteriores del elemento de concreto. Cuando se utilice cimbra de madera para obtener este acabado, la cara de contacto debe estar recubierta con una capa de fibra de vidrio para dar un acabado perfectamente liso; de igual forma para el cálculo de marcos, polines, cuñas, tornillos y tensores, se deberán considerar valores triples de los factores de seguridad utilizados para el concreto común. Otras características del concreto para este tipo de acabado se darán en su oportunidad.

Dentro del proyecto de construcción del metro, y especialmente en la sección de túnel profundo, se presenta determinado número de juntas de construcción. Estas juntas se originan en sitios - claramente fijados por el proyecto y se deben a que no es posible colar de una sola vez secciones demasiado largas a causa de la reducida longitud de la cimbra deslizante para el túnel; una junta de este tipo presenta una superficie de concreto endurecido, contra la cual se hará un nuevo colado. Para lograr una buena unión entre el concreto ya endurecido y el concreto fresco del nuevo colado, se deben seguir ciertas normas; de ellas las más importantes son las que mencionamos a continuación. Antes del nuevo colado, la superficie endurecida de la junta debe estar limpia; para lograrlo se debe remover cualquier material extraño y el concreto defectuoso o suelto por medio de un chiflón de arena, teniendo cuidado de no cortar excesivamente los agregados del concreto. Después la superficie se debe mojar con agua a presión 3 horas antes del colado del concreto adyacente y mantenerse húmeda continuamente hasta antes del nuevo colado.

COLADO

Dentro de los distintos métodos para el colado de concreto, destacan tres por la gran utilización que tienen en las obras del metro, especialmente en la sección de túnel profundo, que en la Línea III Sur, abarca desde la Estación Viveros hasta la Estación Terminal Ciudad Universitaria. Estos tres métodos son el bombeo de concreto, el concreto lanzado y el concreto de agregado precolado.

El bombeo de concreto, como su nombre lo indica, consiste en enviar el concreto por medio de tuberías de diferentes diámetros a lugares difícilmente accesibles, donde la planta de mezclado generalmente se encuentra fuera de la obra. Este sistema resulta de gran valor en obras muy congestionadas y normalmente se utiliza para el revestimiento de túneles. El sistema consta de una tolva -- donde se coloca el concreto fresco, una bomba de acción directa y -- una serie de tuberías que pueden acortarse o ampliarse según los requerimientos particulares de la obra. Existen varios tipos de bombas, las más comunes son las de acción directa con válvulas semirrotatorias: en ellas el concreto se alimenta por gravedad y un émbolo, en combinación con las válvulas, produce un empuje directo sobre el concreto, de modo que el movimiento es a base de una serie de impulsos con la tubería siempre totalmente llena. Existen también las bombas de retacado que se utilizan con tuberías de menor diámetro: en esta bomba el concreto de la tolva de alimentación es impulsado por una serie de aspas rotatorias dentro de una tubería flexible, esta tubería se presiona por medio de rodillos giratorios los que aseguran un flujo continuo de concreto. La capacidad de este sistema depende

del tamaño de la bomba y de la longitud y diámetro de la tubería; una bomba de retacado puede descargar 20 m³. de concreto por hora a una distancia de 90 m. horizontales o 30 m. verticales, y las de émbolo, con tubería de 22 cm. de diámetro, pueden entregar hasta 55 m³ por hora a distancias horizontales hasta de 450 m. o verticales de 40 m.

Entre las principales ventajas que presenta el bombeo de concreto está la de descargar el concreto en forma directa de la mezcladora a la cimbra, eliminándose los problemas relativos al transporte y al equipo de colocación; además el concreto bombeado no presenta segregación, de esta forma el concreto colocado por este medio siempre presenta propiedades satisfactorias en estado fresco.

Paralelo a ésto también existen desventajas: al iniciarse el período de bombeo, debe bombearse durante un lapso razonable de tiempo ya que de otra manera resulta antieconómico, se debe lubricar la tubería con una mezcla de mortero y al final de la operación, todas las tuberías deben limpiarse para evitar la formación de costras en el interior; la mezcla que alimenta la bomba no debe ser demasiado húmeda o seca y deberá tener un revenimiento entre 5 y 10 cm., deben tomarse en consideración los problemas de fricción y las pérdidas de carga en codos al calcular las distancias de descarga; otro problema es el taponamiento y se puede presentar en dos formas: primero, cuando la presión hace que el agua escape a través de la mezcla y no actúa sobre las partículas sólidas deteniéndose el movimiento, ésto ocurre cuando la fricción interna de la mezcla no basta para vencer la resistencia de la tubería, puede remediarse con una cantidad adecuada de agregado fino que permita que el agua transmita la

presión sin escapar de la mezcla; segundo, cuando la cantidad de partículas finas es excesiva, la fricción de la mezcla aumenta a tal grado que la presión que ejerce el pistón sobre el agua no es suficiente para inducir el movimiento de la mezcla de concreto. Cuando se bombea concreto con un alto contenido de aire incluido, la fricción y la presión aumentan, lo que provoca que el aire se comprima demasiado disminuyendo la trabajabilidad de la mezcla; cuando los tubos de descarga son demasiado largos, la presión que ejerce el émbolo puede ser absorbida por la reducción en volumen del aire, lo que puede provocar que el concreto no fluya, por ello el bombeo de concreto con aire incluido debe hacerse solo en distancias menores a 45 metros.

El segundo método que reviste especial interés es el concreto lanzado. Consiste en transportar la mezcla de concreto a través de una manguera y lanzarlo neumáticamente sobre la superficie por colar. El concreto utilizado por este método es igual en propiedades al concreto colocado en forma convencional, lo que difiere es la forma de colocación y ésto le proporciona algunas ventajas. La fuerza con la cual el chorro llega a la superficie por colar logra que se compacte, de esta forma el concreto lanzado puede soportarse asimismo, sin resbalar o caerse, ésto significa que solo se requiere un lado de la cimbra. Por estas características el concreto lanzado se usa para estabilizar taludes de excavaciones y para recubrimientos de túneles en la Línea III. Para aplicarlo se pueden seguir dos procesos: el primero se conoce como mezcla seca, y consiste en hacer una revoltura de cemento y agregados húmedos, la cual, bajo la acción de un alimentador mecánico y una corriente de aire, se impulsa hacia la boquilla de salida donde por medio de un dispositivo adecuado se le -

introduce agua a presión para formar la mezcla definitiva, esta mezcla resultante es la que se proyecta a alta velocidad sobre la superficie; el segundo método de aplicación se conoce como mezcla húmeda, en él todos los ingredientes se mezclan al empezar, incluyendo el agua, y se envían a la cámara de alimentación desde donde, por medio de bombeo y aire comprimido, se inyectan hacia la boquilla proyectándose la mezcla sobre la superficie que se desea cubrir. Ya que la velocidad con que la mezcla choca contra la superficie es muy alta, parte del concreto no logra adherirse y rebota, esto ocurre especialmente con las partículas más gruesas del agregado; este rebote es mayor al inicio del lanzado y va disminuyendo conforme aumenta el espesor de la capa de concreto, el cual en ningún caso debe ser mayor a 15 centímetros. Cualquiera de los dos procesos mencionados proporciona un concreto de muy buena calidad; sin embargo se debe mencionar que el equipo de colocación es muy costoso, y el personal que lo opera debe ser altamente calificado. Además la mezcla debe ser lo bastante húmeda para compactarse sin presentar un excesivo rebote, y al mismo tiempo, lo suficientemente seca para sostenerse asimismo en cualquier posición en que sea colocada; el tamaño máximo del agregado que se puede usar es de 2.5 centímetros, y debe tenerse mucho cuidado durante el curado, ya que la relación entre el volumen de concreto y la superficie expuesta es muy grande y pueden presentarse problemas relacionados con un secado muy rápido.

El tercer método se conoce como concreto de agregado precolado y se coloca en dos etapas. Primero el agregado grueso se deposita dentro de la cimbra y se compacta, quedando vacío entre el

30 y 35 por ciento del volumen total de concreto que se va a colar, el agregado grueso debe estar totalmente mojado antes de añadir el mortero, el cual en la segunda etapa se coloca bajo presión a través de tubos ranurados comenzando por el fondo, para ir removiéndolos gradualmente conforme se llenan los vacíos entre los agregados.

Este tipo de concreto se puede colocar en lugares difícilmente accesibles para las técnicas ordinarias y en sitios que contengan un gran número de instalaciones que deban ir ahogadas. Debido a que casi no presenta segregación se utiliza para construir bajo agua, ya que su baja permeabilidad produce alta resistencia a la congelación y al deshielo; su utilización representa ventajas en colados masivos, donde la temperatura puede controlarse haciendo circular agua fría entre los agregados, o en el caso de colados en clima frío se puede hacer circular vapor para prevenir daños por congelamiento. En la construcción del metro este concreto se usa cuando se desea obtener un acabado de agregado expuesto, esto se logra por medio de un chorro de arena o de un lavado con ácido que posteriormente se le dá a la superficie del elemento. Si se desean buenos resultados con este tipo de concreto, el agregado grueso debe estar completamente limpio, y debe contarse con personal que tenga habilidad y experiencia en su colocación.

Independientemente del método que se utilice para el colado de concreto existen ciertos factores que, sino se toman las medidas adecuadas, pueden provocar serios problemas. Uno de ellos es la temperatura, las especificaciones oficiales del metro establecen que debe estar comprendida entre 5 y 27 grados centígrados en el momento del colado, veamos el porqué de esta medida.

Cuando el colado se realiza en un clima caluroso, surgen problemas por la alta temperatura del concreto y por la rápida evaporación de agua de la mezcla fresca. Se sabe que cuando la temperatura del concreto fresco es alta, aumenta la velocidad de hidratación, lo cual a su vez produce un fraguado acelerado y una resistencia menor en el concreto cuando endurece. Cuando la evaporación de agua es muy rápida puede dar lugar a una contracción plástica, la cual provoca un agrietamiento superficial como consecuencia de una disminución en la humedad relativa del ambiente; de cualquier forma se recomienda que secciones delgadas, no se cuelen bajo condiciones calientes y secas.

Se deben tomar algunas precauciones para evitar los problemas descritos; como mantener la cantidad de cemento en la mezcla tan baja como sea posible, para evitar que el calor producido por la hidratación agrave el problema; o enfriar algunos de los ingredientes antes de realizar la mezcla, al agua puede agregársele hielo, pero debe verificarse que se derrita completamente antes de que termine el proceso de mezclado.

Del mismo modo la congelación puede provocar efectos nocivos sobre el concreto fresco, para evitarlos se debe mantener la temperatura de fraguado superior a 5° C., y durante los tres días siguientes, arriba de 10° C. Esto puede lograrse de varias formas: calentando algunos ingredientes de la mezcla, el agua puede calentarse hasta un máximo de 60° C., ya que si la temperatura es superior puede provocar un fraguado instantáneo del cemento; la temperatura de los agregados puede incrementarse introduciendo serpentines a través de los cuales se hace circular vapor de agua, no se recomienda -

utilizar vapor directamente sobre los agregados, ya que podría alterarse su contenido de humedad; y utilizando mezclas ricas con baja relación agua-cemento preparadas con cemento de alta velocidad de desarrollo de calor. Cuando el colado de concreto se ha concluido, la temperatura se puede mantener alta por medio de alguna fuente de calor. Estas fuentes se instalan de tal forma que no aceleren el secado, ni produzcan en algunas zonas excesivo calor; entre las fuentes de calor que mejores resultados han dado se encuentran las chimbras metálicas que contienen una tubería exterior por la cual se hace circular agua caliente, también es posible utilizar el acero de refuerzo como electrodos para hacer pasar una corriente eléctrica dentro del concreto. Cuanto más delgado es el elemento estructural que se ha colado, más le afectará la congelación, ya que los efectos que ésta produce varían según los cambios en la temperatura y pueden agravarse si la disminución de temperatura va acompañada de viento.

Cuando el clima es demasiado frío se puede emplear agregado ligero en el concreto, ya que la conductividad térmica del concreto elaborado con este tipo de agregado, es menor que la del concreto ordinario; recientemente se ideó el agregar carbonato de potasio a la mezcla con objeto de abatir el punto de congelación de el agua, lo cual ha dado buenos resultados, ya que no se afecta la adherencia con el acero de refuerzo ni se fomenta la corrosión, pero su utilización debe ir acompañada de un retardante para compensar la aceleración que se origina en el fraguado.

De cualquier forma la temperatura siempre influirá en la resistencia posterior del concreto, y siempre que se realice

un colado bajo condiciones extremas de temperatura, deberá considerar se detalladamente tal influencia.

Para realizar el colado de muros estructurales, losas, trabes y columnas, las especificaciones oficiales del metro recomiendan que el concreto se deposite en todos los casos, tan cerca como - sea posible de su posición final; no debe obligársele a fluir de manera que el movimiento lateral pueda causar segregación del agregado - grueso, mortero o agua de la mezcla de concreto. Independientemente del método y equipo empleados para depositar el concreto en los moldes, se deben prevenir amontonamientos del agregado grueso separados de la masa de concreto, si ésto llega a ocurrir se deberán esparcir antes del proceso de vibrado.

Dentro de los 90 minutos posteriores a la incorporación del agua y cemento a la mezcladora, las operaciones de dosificación, mezclado, transporte y colocación, deberán quedar concluidas, de manera que el concreto llene totalmente los moldes, sin dejar huecos dentro de su masa.

En el caso de estar lloviendo, se podrá colar siempre y cuando la zona de trabajo se proteja adecuadamente de la lluvia, - si durante el colado se presenta lluvia con la intensidad suficiente para provocar deslaves o defectos en el acabado, deberán protegerse convenientemente todas las superficies de concreto fresco.

Las juntas de construcción afectan la durabilidad de las estructuras cuando se presenta una separación en la continuidad del colado de concreto, ésto proporciona una abertura donde puede - entrar agua para convertirse en un punto de partida para el desconchamiento de la sección en el caso de congelamiento. El espaciamiento

to entre juntas y su procedimiento de construcción, están perfectamente especificados en los planos de diseño; por tal motivo, en el dado caso de que el colado deba suspenderse por alguna razón, fuera de una junta de construcción, será necesario demoler el concreto hasta llegar a la junta anterior, para posteriormente, y después de las operaciones necesarias de limpieza, reanudar el colado de concreto.

Para obtener el concreto aparente acabado espejo, la colocación deberá hacerse de manera uniforme dentro de la cimbra, en una operación continua, sin caída mayor a 60 centímetros y en capas horizontales sucesivas no mayores de 45 centímetros de espesor.

En situaciones especiales de colado, se permiten pequeñas demoras no mayores a 15 minutos, pero en ningún caso se demorará tanto tiempo que la unidad vibradora no penetre fácilmente por su propio peso en el concreto previamente depositado. Al reanudarse el colado, el vibrador deberá penetrar en la capa anterior, revibrando el concreto depositado antes de la demora.

VIBRADO

La finalidad de compactar el concreto fresco que se ha depositado en una cimbra, es la eliminación de aire atrapado hasta lograr una configuración tan estrecha como sea posible. Los procesos de compactación varían desde apisonar la superficie del concreto, con objeto de forzar al aire para que salga, hasta el uso de vibradores que separan momentáneamente las partículas para acomodarlas en una masa compacta. El trabajo que el vibrado desarrolla se utiliza para vencer la fricción interna que existe entre todos los componentes y la fricción que se origina entre la mezcla de concreto y la cimbra, este trabajo se considera útil. Aunado a ésto, parte del trabajo vibra el concreto que se ha consolidado así como la cimbra, y se le considera no útil; ya que la fricción interna es -- una característica intrínseca de la mezcla, se puede definir el vibrado como la cantidad necesaria de trabajo útil para lograr una -- compactación completa.

Cualquiera de los dos métodos de compactación puede producir un excelente concreto, o un concreto pobre. El uso del vibrado como medio de compactación es muy efectivo para mezclas duras y secas, con ellas se puede alcanzar una resistencia determinada utilizando una menor cantidad de cemento. Esto representa una economía que debe compararse con el costo del equipo de vibrado para tomar una decisión atinada al respecto. Una inadecuada compactación, por medio de vibración, puede provocar que partes no queden bien -- compactadas y otras sean sobrevibradas, lo que puede provocar en una mezcla muy húmeda la segregación del agregado grueso.

Debe recalcar que el vibrado es un método sumamente valioso para alcanzar una adecuada compactación, pero debido a la -- cantidad tan grande de trabajo que ejerce sobre el concreto, el riesgo de segregación se ve incrementado por el uso indebido del vibrador. Esto ocurre cuando el tiempo de vibrado se alarga demasiado y provoca la separación de los agregados, haciendo que el agregado -- grueso se deposite en el fondo de la cimbra y la mezcla de concreto en la parte superior; ésto dará como resultado la aparición de agrietamiento superficial y una inadecuada distribución de agregados.

La compactación por medio de apisonamiento da buenos resultados cuando se trabaja con mezclas húmedas, y malos cuando la mezcla es muy seca o tiene poca trabajabilidad. Estas consideraciones nos llevan a establecer que los métodos de compactación requieren, para una operación eficiente, de distintos grados de trabajabilidad en el concreto. En el caso del concreto bombeado, por ejemplo, la trabajabilidad que presenta la mezcla puede no ser adecuada para compactarse por medio de vibración, ya que mantiene una consistencia demasiado húmeda; ésto nos lleva a considerar el equipo y método de compactación acordes con la trabajabilidad de la mezcla.

Dentro del equipo de vibrado existen varios tipos, -- siendo los internos y externos los más comunes. Los vibradores internos o de inmersión trabajan directamente sumergidos en el concreto: están constituidos por un motor el cual por medio de un chicote flexible, provoca que una flecha excéntrica gire dentro de un vástago o cabezal, el cual se introduce en el concreto y produce fuerzas ondulatorias para obligar la salida de aire atrapado en el interior de la mezcla. Su frecuencia de vibración es variable, pero se reco

mienda entre 3500 y 5000 ciclos por minuto; su tiempo de aplicación depende de la consistencia de la mezcla, en algunos casos puede llegar a 2 minutos, pero normalmente es de 45 segundos. El vibrador debe sumergirse hasta el fondo del concreto aplicándolo por secciones de 80 centímetros durante el tiempo requerido, al ser retirado se deben evitar movimientos bruscos para que el hueco dejado por el cabezal logre cerrarse y no queden bolsas de aire atrapado.

El diámetro del vástago o cabezal es muy variable y los hay desde 2 centímetros, lo que permite su utilización en secciones muy congestionadas por acero de refuerzo; al finalizar el trabajo del vibrador se debe expeler el aire atrapado en las fronteras de la cimbra por medio de una espátula o algún artefacto similar, ya que el vibrador no logra desalojar el aire en esa zona.

Los vibradores externos no trabajan directamente sobre la mezcla de concreto, su principio de funcionamiento es el mismo solo que éstos se sujetan firmemente a la cimbra y hacen vibrar tanto a la cimbra como al concreto. Esto acarrea problemas relativos a la rigidez de la cimbra y a las fugas de lechada, por ello se utilizan solo en secciones muy delgadas y en elementos prefabricados. Otra desventaja de los vibradores externos, radica en que el concreto se debe depositar en capas con cierto espesor determinado, ya que el aire no puede salir si el espesor es demasiado, y además la posición del vibrador debe variar conforme avanza el colado.

Teóricamente, hay muchas ventajas en reducir la amplitud y aumentar la frecuencia de los ciclos conforme progresa la compactación. Al inicio del proceso las partículas están muy separadas y el movimiento inducido en magnitud por el vibrador debe ser

correspondiente; conforme la compactación se va logrando, usar una mayor frecuencia permite realizar mayores ajustes entre las partículas, y una menor amplitud, significa que los movimientos disminuyen conforme se reduce el espacio disponible para ellos. Lógicamente en la construcción es muy difícil aprovechar esta cualidad, ya que siempre se compacta sin variar la frecuencia.

Cuando el colado de concreto se realiza en capas sobrepuestas y se desea lograr una buena unión entre ellas, la parte superior de la capa colada anteriormente debe ser revibrada, siempre que aún se encuentre en estado plástico. Se han realizado experimentos donde el concreto se somete a un revibrado 1 ó 2 horas después de ser colado, dando por resultado incrementos en resistencia a la compresión a los 28 días. Estos incrementos llegan a ser hasta de 14 por ciento, pero su valor real depende de la trabajabilidad de la mezcla; el revibrado en concretos propensos al sangrado ayuda a expeler el agua y mejora la adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo. El revibrado generalmente no se usa, ya que representa un costo adicional y su aplicación inadecuada o demasiado tarde, puede provocar daños en el concreto.

Las especificaciones oficiales del metro recomiendan seguir normas establecidas con objeto de lograr un adecuado proceso de vibrado; de entre ellas las más importantes son las siguientes.

El concreto se debe consolidar hasta la densidad máxima que sea posible alcanzar, de manera que expulse el aire atrapado y cierre adecuadamente contra todas las superficies de la cimbra y materiales ahogados. La consolidación del concreto en cual-

quier estructura, se hará con vibradores de inmersión, de acción eléctrica o neumática. Los vibradores se deben operar en posición vertical y no se aceptará introducir el cabezal en posición horizontal; - cuando el concreto se coloque en diferentes capas, la cabeza vibradora debe penetrar 5 centímetros en la capa inferior la cual no debe haber alcanzado su fraguado inicial. En las áreas en las cuales se - deposite concreto fresco sobre concreto previamente colocado, se hará una vibración mayor a la usual, especialmente cuando se trate de concreto en masa, penetrando hasta donde se indicó anteriormente. Cuando se vibre concreto en masa, el tiempo de vibrado será aquel, que - sin producir segregación o sangrado, dé al concreto su máxima densidad. No debe colarse más concreto en capas superiores hasta que el - concreto previamente colado haya sido completamente vibrado y debe evitarse el contacto de la cabeza vibradora con la superficie de la - cimbra.

En las obras del metro se emplearán únicamente vibradores de inmersión según los elementos estructurales por colar y en número suficiente para asegurar el correcto acomodo de la mezcla, de acuerdo con el volumen correspondiente a la etapa que debe colarse; - también se debe contar con vibradores de repuesto, cuyo número estará sujeto al volumen de la estructura que se este colando.

En el caso del vibrado del concreto aparente acabado - espejo, el vibrador deberá introducirse rápidamente y retirarse con - lentitud, con velocidades de introducción y de retiro en relación de 3 : 1 , para evitar burbujas de aire. La vibración será transmitida directamente al concreto y no a través del refuerzo o de la cimbra.

CURADO

Se conoce como curado al proceso de controlar la temperatura y humedad del concreto para fomentar la hidratación total del cemento. El curado debe realizarse en un ambiente adecuado durante el endurecimiento temprano del concreto, manteniéndose tan saturado como sea posible hasta que los productos de la hidratación llenen los espacios huecos en la pasta fresca de cemento, que originalmente estaban llenos de agua. Como la hidratación total del cemento ocurre solo cuando los capilares están llenos de agua, se debe evitar la pérdida de ésta por evaporación y la pérdida interna por desecación, reemplazándose con agua del exterior. En la práctica casi nunca se logra que el cemento se hidrate totalmente; aunque esto no impide un desarrollo satisfactorio de la resistencia, se debe tomar en consideración que si el espacio lleno de agua dentro del concreto es mayor que el volumen de los productos de la hidratación, se logrará una mayor resistencia y menor permeabilidad en el concreto, aumentando la hidratación.

La pérdida real de agua en el concreto después de su colocación, se debe a la evaporación, la cual se ve influenciada por la temperatura y humedad del medio y por la velocidad del viento; la influencia de estos factores y la relación área expuesta-volumen del elemento estructural, deben ser considerados para elegir el proceso de curado.

El método más común de curado, se conoce como húmedo ordinario; consiste en aceitar y humedecer las cimbras antes del colado, continuar mojando la cimbra durante el endurecimiento, y después del descimbrado, rociar el concreto y protegerlo con algún ma-

terial adecuado. Es obvio que este método puede variar ampliamente dependiendo de las condiciones de la obra, y del tamaño, posición y forma del elemento por curar.

El tiempo que dura el curado se ve influenciado por - diversos factores, pero normalmente se especifica como mínimo de 7 días para concreto fabricado con cemento Portland ordinario, y de - 3 días para cemento Portland de endurecimiento rápido. Estos períodos de curado coinciden con los establecidos por las especificaciones oficiales del metro, respecto a que el curado se debe mantener - el tiempo que requiera el concreto para lograr la resistencia de proyecto, conservándose la humedad superficial mediante alguno de los - siguientes procedimientos:

- Manteniendo húmedas las superficies expuestas al aire en los moldes, mediante riegos adecuados de agua limpia, - los que se deben aplicar a partir del momento en que éstos no marquen huellas en dichas superficies.
- Aplicando a las superficies expuestas una membrana impermeable que impida la evaporación del agua contenida en la masa de concreto.
- Cubriendo la superficie expuesta con arena, costales o mantas, que se mantendrán húmedas mediante riegos aplicados a partir de las 12 horas de terminado el colado.

Debe recordarse, que es más eficiente mojar las superficies expuestas continuamente que hacerlo en forma intermitente; además, el usar una membrana impermeable impide efectivamente la evaporación de agua, pero no permite el ingreso de agua para reponer la que se pierde por otras causas.

De diversas pruebas efectuadas en laboratorios se ha llegado a la conclusión de que una elevación en la temperatura del curado, provoca que las reacciones de la hidratación se aceleren, beneficiando al concreto sin provocarle efectos nocivos posteriores; esta mejoría en el grado de desarrollo de la resistencia, se logra mediante el curado con vapor. Un proceso de curado a vapor típico consta de lo siguiente: un período de retraso inicial de 2 a 5 horas, un incremento en temperatura que varía entre 20 y 33° C. por hora hasta llegar a una temperatura máxima de 65 a 85° C., mantenimiento a temperatura máxima, después un período durante el cual el concreto adquiere calor residual y para finalizar un lapso de enfriamiento con velocidad moderada. Este proceso de curado con vapor a presión atmosférica, es decir, cuando la temperatura se mantiene debajo de 100° C., se ha utilizado satisfactoriamente para obtener una resistencia temprana suficientemente alta para poder remover las cimbras, antes del tiempo requerido por el curado húmedo ordinario. Debido a la forma en que la temperatura afecta las etapas tempranas de endurecimiento, se debe realizar una combinación de temperaturas de curado, de forma que se obtengan altas resistencias en edades tempranas o tardías. Paralelo a esto se presenta el problema de la velocidad de incremento de temperatura, al principiar el curado con vapor. Cuando los incrementos son mayores a 25° C. por hora, la ganancia en resistencia se verá adversamente afectada, ya que un calentamiento excesivamente rápido puede provocar una pérdida en resistencia a edades tardías de alrededor del 30 por ciento.

Este efecto nocivo provocado por la temperatura es más pronunciado en mezclas que presentan una relación agua-cemento

mayor y en cementos Portland de endurecimiento rápido. Por ello las especificaciones oficiales del metro establecen, que en el curado a vapor de cualquier elemento estructural de concreto reforzado, el ascenso de temperatura no será en ningún caso mayor de 23° C. por hora, manteniéndose un ascenso promedio entre 15 y 21° C. por hora.

Debe considerarse que estas temperaturas son las de el vapor, y por tanto, no representan la temperatura real que mantiene la masa de concreto que se está curando. Durante las 2 primeras horas desde que se inicia el fraguado, la temperatura tiene una gran influencia en la resistencia a edades tardías, por ello un retraso en la aplicación del curado siempre es ventajoso, ya que el incremento en temperatura provocado no presentará efectos adversos.

Se debe tomar en cuenta que la temperatura del concreto, durante las primeras horas de curado, es menor que la del aire, y después, sumando el calor provocado por la hidratación, la temperatura del concreto será mayor que la del aire que lo rodea; por ello el curado a vapor debe iniciarse hasta que haya ocurrido el período inicial de fraguado del concreto, el cual se considerará de 2 horas como mínimo después del colado, según las especificaciones oficiales. Del mismo modo, como la temperatura en el interior de la masa de concreto no es la misma que la de la superficie, la elevación de la temperatura al centro será menor, así como también su velocidad de enfriamiento. Esta diferencia se ve incrementada en proporción directa con el espesor del elemento por curar; por esta peculiaridad, el espesor máximo de los elementos que se curen con vapor en las obras de construcción del metro, será de 1.5 metros. La temperatura máxima del concreto no debe exceder de 77° C. y no deberá -

alcanzarse antes de 4 horas a partir de cuando se inicie el proceso de curado; la temperatura mínima durante el proceso será de 66° C. y debe medirse directamente en el elemento curado cuando menos en tres puntos. Cuando la temperatura máxima se logre, ésta no deberá mantenerse por tiempo alguno, sino que de inmediato se debe iniciar el descenso de temperatura; este descenso no debe ser mayor a 33° C. por hora y deberá promediar entre 14 y 21° C. por hora. La resistencia mínima que se logre al término del proceso, que debe durar entre 12 y 18 horas, no será menor a: 60 por ciento de la resistencia f'c especificada para concreto normal, y 70 por ciento de la resistencia f'c especificada para concreto de resistencia rápida.

Estas recomendaciones anteriores de las especificaciones oficiales, son aplicables al curado de elementos estructurales en obra; en el caso de elementos prefabricados, el proceso será el mismo en la planta de fabricación que el aquí mencionado, siempre y cuando al final del proceso de curado se requiera alcanzar solo el 60 por ciento de la resistencia f'c especificada a los 28 días de edad. En el caso contrario, cuando se requiera una resistencia superior a 0.6 f'c al final del proceso de curado, éste deberá ser realizado siguiendo las especificaciones que a continuación se mencionan, siendo éstas muy similares a las anteriores, con lo cual se logrará una resistencia hasta del 90 por ciento de la resistencia f'c especificada a los 28 días de edad:

- El espesor máximo del elemento por curar será de 1.5 m.
- El proceso de curado se debe iniciar después del período de fraguado inicial, el cual será de 3 horas mínimo.

- El ascenso de temperatura será de 12 a 18° C. por hora.
- La temperatura máxima no excederá de 77° C. y la mínima no será inferior a 60° C.
- Al lograrse la temperatura máxima, ésta se debe mantener durante 6 horas.
- El descenso de temperatura debe promediar entre 14 y 22° C. por hora.

La resistencia al final del proceso no debe ser menor del 75 por ciento, de la resistencia f'c especificada y a los 28 días deberá ser no menor al 90 por ciento. Estos dos procesos son muy similares, y la única diferencia importante estriba en el tiempo de mantenimiento de la temperatura máxima, el cual en un caso es nulo, y en el otro, debe ser de 6 horas.

Cuando se requiere lograr una muy rápida resistencia del concreto a edades tempranas, tal que la resistencia que se alcanza a los 28 días de edad en un elemento curado con el proceso normal, se logre tan solo en 24 horas, se debe utilizar el proceso de curado a vapor a alta presión. Este proceso a alta presión es muy distinto del proceso a presión atmosférica, ya que requiere de una cámara de curado con abastecimiento de vapor húmedo y no permite que el vapor sobrecalentado entre en contacto directamente con el concreto. Entre las ventajas que este método proporciona se cuentan una alta durabilidad, rápido desarrollo de resistencia y reducción en las contracciones por secado. Esta mejoría en durabilidad se manifiesta como una mejor resistencia al ataque de sulfatos y otros agen

tes químicos. Esto se debe a la formación de aluminatos más estables en presencia de sulfatos, que la de los que se forman a menores temperaturas; este mejoramiento en la resistencia a los sulfatos es mayor cuando el cemento tiene más contenido de aluminato tricálcico, que en cementos relativamente resistentes a los sulfatos. Además el curado a alta presión impide la permanencia de cal libre que puede ser arrastrada por el agua que se filtra, disminuyendo así la eflorescencia.

El rápido desarrollo de resistencia se debe a que la alta temperatura provoca una baja superficie específica de aproximadamente $700 \text{ cm}^2/\text{g}$, alrededor de $1/20$ de aquella del cemento curado a temperatura normal, lo que afecta positivamente las reacciones de la hidratación, haciendo que los productos sean gruesos y menos del 5 por ciento de la pasta curada pueda clasificarse como gel. En el curado con vapor a alta presión, la contracción por secado se reduce de alrededor de $1/3$ a $1/6$; la explicación de este efecto es sumamente compleja, pero se sabe que ocurre debido a la formación de microcristales en la mezcla de cemento. Cuando se trata de mezclas puras de cemento hidratado, será menor el volumen de granos no hidratados que restringen la contracción; entonces el curado hará que la pasta se vuelva más fuerte con el tiempo y resultará capaz de resistir la tendencia a contraerse sin presentar dicho agrietamiento. En el curado con vapor a alta presión, los productos de la hidratación son muy estables y no existe retroceso alguno en la resistencia. La diferencia en resistencia, entre un concreto curado normalmente y otro curado con vapor a alta presión, en edades tempranas es muy alta; pero a partir de la edad de un año, son muy semejantes en concretos fabricados con el mismo procedimiento.

El curado a vapor con alta presión consiste en un incremento gradual en presión y temperatura, hasta lograr 0.98 kg/cm^2 de presión y temperatura máxima de 182° C. , ya que si la temperatura es más alta puede interferir con el endurecimiento y el fraguado, durante un lapso de 3 horas; se mantiene esta temperatura durante un período de 5 a 8 horas, seguido de un descenso en presión y temperatura. Los detalles y ciclos de aplicación del proceso dependen de la planta de curado que se utilice, de la rigidez y tipo de mezcla, y del tamaño de los miembros que se curen; lógicamente estarán sujetos a condiciones muy particulares que deben determinarse experimentalmente y en función de los materiales utilizados para formar la mezcla.

Del mismo modo, el uso de este proceso de curado, acarrea desventajas que deben ser tomadas en consideración. Por ejemplo, reduce la adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo, por lo cual no se aconseja su aplicación en elementos de concreto presforzados; también debe evitarse su aplicación en concretos fabricados con cemento aluminoso o supersulfatados, pues podrían ser afectados adversamente por las altas temperaturas.

Existen otros métodos de curado que aplican altas temperaturas al concreto. Uno de ellos utiliza el acero de refuerzo como medio de calentamiento, haciendo pasar una corriente alterna a través de ellos; otro sistema se basa en radiación infrarroja aplicada a los elementos dentro de un túnel que contiene generadores infrarrojos. Debe recordarse que independientemente del método de curado que se utilice, es muy importante evitar el secado excesivo del concreto.

De los procesos de curado mencionados, en las obras de construcción del metro, solo está autorizado el uso de los procesos húmedo ordinario y con vapor a presión atmosférica.

Después del curado de un elemento estructural, se debe verificar el resultado del mismo para comprobar su eficacia. Esto debe hacerse mediante pruebas a compresión simple del concreto curado, por medio de muestras representativas del concreto utilizado en el elemento y sometidas al mismo proceso de curado. Los detalles y características de estas pruebas se estudiarán en el capítulo denominado Control de Calidad.

DESCIMBRADO

El proceso de descimbrado consiste en la remoción de moldes y cimbras de los elementos estructurales colados. Es una operación básicamente sencilla y solo deben tomarse algunas recomendaciones para realizarla en forma adecuada.

El descimbrado se debe realizar de tal forma, que se logre la completa seguridad de la estructura y cuando ésta se encuentre soportada en puntales. La remoción se hará de forma que en el concreto no se palanquee o martille.

Con previa autorización de la Dirección de Obra, el descimbrado de los pisos, los lados de las vigas y trabes, las cimbras de columnas y las cimbras verticales similares podrán quitarse después de 24 horas, siempre y cuando el concreto sea lo suficientemente resistente para no recibir daño alguno. En otros elementos estructurales será necesario obtener el 60 por ciento de su resistencia para poder descimbrarlos.

En el caso del concreto aparente acabado espejo, la cimbra no podrá ser retirada antes del séptimo día, para evitar fisuras por contracción en el concreto.

Todos los tiempos de remoción de cimbras y moldes podrán variar si la Dirección de Obra lo cree conveniente.

CAPITULO IV

CONTROL DE CALIDAD

A lo largo de los capítulos anteriores se han descrito algunas pruebas a que deben someterse los materiales que integrarán una mezcla de concreto, así como también pruebas que deben realizarse durante la preparación y colocación del concreto. El resultado de esas pruebas sirve para verificar la calidad de la mezcla, estableciéndose así un criterio de aceptación o rechazo.

La primera parte de este capítulo, muestreo, trata de la forma y frecuencia con que se deben obtener muestras, para que sean realmente representativas del lote al que pertenecen; en la segunda parte se describen las principales pruebas a que debe someterse el concreto, dividiéndolas en pruebas en estado fresco y pruebas en concreto endurecido, estableciéndose también los criterios de calidad mínima que exigen las especificaciones oficiales del metro.

MUESTREO

El objetivo principal del control de calidad en las obras de la Línea III del Metro, consiste en vigilar que se cumplan las especificaciones citadas a lo largo de éste y los anteriores capítulos y ordenar las medidas preventivas y correctivas que se juzguen necesarias. Para ello el Control de Calidad tendrá las siguientes funciones:

- A.- Someter a inspección todas las construcciones e instalaciones que se estén ejecutando y aquellas que estén terminadas.
- B.- Inspeccionar el almacenamiento de todos los materiales

de construcción y exigir los medios adecuados para su protección.

- C.- Verificar la calidad de todos los materiales cada vez que lo juzgue conveniente.
- D.- Aceptar, rechazar o decidir la forma en que se debe disponer de los materiales que no cumplan con las normas de calidad requeridas.
- E.- Ordenar demoler y reponer o rechazar el material defectuoso.
- F.- Ordenar la suspensión de las obras que no cumplan con las especificaciones.
- G.- Ejecutar pruebas adicionales de control, cuando lo juzgue conveniente.

Para lograr un adecuado control de calidad durante la construcción de la obra, es necesario instalar un Laboratorio de Campo durante el tiempo que dure su construcción y en el lugar mismo de la ejecución de los trabajos. El laboratorio deberá contar con personal calificado para llevar un control eficaz y con el equipo necesario para efectuar las pruebas que se juzguen convenientes de las mencionadas en éste y anteriores capítulos.

Cabe mencionar aquí que las normas descritas están -- comprendidas en las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y los métodos de ensaye -- están aprobados por la Dirección General de Normas y la American Society for Testing and Materials.

La operación de muestreo adquiere particular importancia al estar referida a los agregados. Debe tenerse presente que al realizar pruebas para verificar la calidad de los diferentes tipos de agregados, los resultados, en un estricto sentido, solo deberían aplicarse al material de la muestra en cuestión; sin embargo como se desea conocer las propiedades de todo el lote, la muestra debe dar resultados representativos del promedio de propiedades del agregado.

Para ello es necesario recabar muestras representativas bajo ciertas medidas y precauciones. La muestra principal de agregado se forma de pequeñas porciones tomadas de distintos lugares del lote, normalmente el peso combinado de estas porciones no debe ser menor a los especificados en la siguiente tabla.

TAMAÑO MAXIMO PRESENTE EN PROPORCION IMPORTANTE (mm)	PESO MINIMO DE LA MUESTRA (kg)
50.8	35
38.1 o 31.8	15
25.4	5
19.0	2
12.7	1
9.5	0.5
6.3 o 4.8	0.2
Material que pasa la malla No. 7	0.1

Estas medidas pueden incrementarse cuando la muestra es muy variable o presenta segregación. Según la tabla anterior, -

cuando el agregado es de tamaño bastante grande, la muestra principal lo es también, lo cual hace necesario reducirla sin modificar o alterar su representatividad del lote en su totalidad.

La reducción del tamaño de la muestra se realiza en dos formas:

- Se mezcla bien la muestra y se apila en forma de cono sobre una superficie limpia, por medio de una pala se revuelve para formar otro cono repitiéndose la operación dos veces, y depositando siempre el material en la parte superior para forzar el que su caída sea uniforme alrededor de la base del cono; después la cúspide del cono se aplana y divide en cuatro partes iguales. Los dos cuartos diagonalmente opuestos se descartan y el resto integrará la muestra para la prueba; si aún la muestra es demasiado grande, se repite todo el proceso cuidando incluir todo el material fino correspondiente.
- Utilizando un separador típico, el cual tiene divisiones verticales paralelas y descargando el material en la parte superior, alternándose a izquierda y derecha, y recogiendo el material en recipientes separados en la parte inferior; este proceso divide el material de la muestra en mitades de las cuales se descarta una y puede repetirse hasta lograr el tamaño que se desea.

Una vez que se obtiene la muestra de agregado, debe someterse a los siguientes métodos de prueba:

P R U E B A	A. S. T. M.
- Peso volumétrico compacto	C - 29
- Colorimetría (materia orgánica)	C - 40
- Sanidad en sulfato de sodio	C - 88
- Partículas menores de la malla No. 200	C - 117
- Partículas livianas	C - 123
- Peso específico y absorción en grava	C - 127
- Peso específico y absorción en arena	C - 128
- Granulometría	C - 136
- Partículas desmenuzables	C - 142
- Reacción álcali-agregado	C - 227
- Partículas suaves	C - 235
- Abrasión (máquina Los Angeles)	C - 535
- Contenido de humedad	C - 566

Para determinar las propiedades del cemento se realizarán las pruebas siguientes.

PROPIEDAD	METODO A.S.T.M.
- Resistencia a compresión	C - 109
- Sanidad	C - 151
- Finura	C - 204
- Tiempo de fraguado	C - 266
- Fraguado falso	C - 451

Del mismo modo, los aditivos que se empleen en la elaboración del concreto, deberán cumplir con los requisitos de calidad especificados en las siguientes pruebas.

A D I T I V O	M E T O D O
- Includor de aire	C - 233 A.S.T.M.
- Retardante	C - 494 A.S.T.M.
- Estabilizador de volumen	MANUAL C. F. E.

Cuando exista alguna incertidumbre respecto a la calidad de los aditivos que se pretenden utilizar, se deben realizar -- pruebas en especímenes de concreto y mortero. Tales pruebas se realizarán en elementos de concreto obtenidos de una mezcla de prueba - que contenga el aditivo en cuestión, y los resultados se compararán con los obtenidos de una mezcla testigo de referencia. Para ello -- las dos mezclas deberán fabricarse exactamente en la misma forma y - con los mismos materiales excepto el aditivo, de modo que se obtenga el mismo revenimiento con tolerancia de ± 1 cm.; el mismo contenido total de aire, con tolerancia de ± 0.5 por ciento; y el mismo consumo de cemento, con tolerancia de ± 3 kg/m³; el agua en la mezcla que contenga el aditivo, será como máximo el 94 por ciento del agua de mezclado de la mezcla testigo. En base a los resultados de esta comparación de mezclas de concreto y mortero, la Dirección de Obra podrá autorizar o rechazar el uso del aditivo propuesto.

PRUEBAS EN CONCRETO FRESCO

Para comprobar si el concreto cumple con los requisitos de calidad que se han establecido, es necesaria la recolección - de muestras representativas de concreto fresco tal y como se entrega en la obra. La obtención de estas muestras se basa en los procedimientos de la Norma D.G.N. C - 160 y 161 y de ellas conviene resaltar las siguientes recomendaciones:

- A.- El tiempo que transcurra entre la obtención de la primera y última muestras, cuando éstas sean compuestas, en ningún caso podrá ser mayor a 15 minutos.

Esto es especialmente importante cuando se trabaja en climas calurosos, ya que las altas temperaturas del medio incrementan la velocidad de evaporación del agua, lo cual puede alterar la medición de la trabajabilidad o consistencia de las muestras dando resultados alterados.

- B.- Cuando se obtengan muestras de mezclas individuales - se transportarán de inmediato al sitio donde se realizarán las pruebas, para remezclarse lo necesario para lograr su uniformidad.

- C.- Cuando se termine el muestreo, se dispondrá de 5 minutos como máximo para ejecutar las pruebas de revenimiento y contenido de aire; en el caso de que se requiera moldear especímenes para la prueba de resistencia, - deberán realizarse durante los primeros 15 minutos - después de fabricada la mezcla, y el tiempo que transcurra entre la obtención y el empleo de la muestra deberá ser el mínimo posible.

Estas recomendaciones establecidas por las especificaciones del metro, se basan en el efecto que provoca el tiempo en la trabajabilidad de las mezclas. A partir del momento en que se termina de fabricar una mezcla, se inicia el endurecimiento de ésta con el tiempo; dicho endurecimiento, que no debe ser considerado como el fraguado del cemento, se debe a que parte del agua de la mezcla se pierde por evaporación y otra la absorben los agregados. Esta pérdida se manifiesta como una disminución en la trabajabilidad, que depende también del tipo de cemento y de la riqueza de la mezcla. Como lo que interesa es conocer la consistencia y trabajabilidad al momento del colado, conviene ejecutar esta prueba 15 minutos después de efectuada la mezcla.

El tamaño de las muestras de concreto fresco deberá ser cuando menos de 28 litros para pruebas de resistencia; en el caso de las muestras para pruebas de revenimiento y contenido de aire, podrán ser menores.

Cuando se requiera tomar muestras de revolvedoras estacionarias, se tomarán a intervalos espaciados regularmente y solo mientras se descarge la porción intermedia de la mezcla; las muestras así obtenidas se combinarán para formar una sola. El muestreo se realizará colocando un receptáculo adecuado directamente bajo el chorro de descarga; pero si ésta es demasiado rápida se vaciará en un recipiente de tamaño suficiente para la carga completa, se debe tener cuidado de no restringir el flujo de la mezcla de la revolvedora, ya que ello podría provocar la segregación del concreto.

En el caso de revolvedoras montadas en camiones, se muestreará en forma similar al caso de revolvedoras estacionarias, to

mándose en consideración que las muestras se tomarán únicamente a - partir del momento en que toda el agua de mezclado haya sido agregada a la revoladora, siendo la velocidad de descarga regulada por la velocidad de rotación del tambor y no por el tamaño de la abertura - de la compuerta.

Cuando la mezcla sea colocada por bombeo, será necesario prever una salida en la tubería de descarga para obtener la muestra requerida para elaborar las pruebas de control o para la fabricación de cilindros.

La determinación de la calidad en el concreto, en lo que a consistencia se refiere, se hará por medio de la prueba de revenimiento por lo menos cada 5 m^3 . de concreto descargado. Las - pruebas de peso volumétrico, contenido de aire, tiempo de fraguado y sangrado de concreto, se realizarán según la frecuencia que la Dirección de Obra juzgue conveniente.

Debido a que el concreto empleado en la construcción del metro presenta diferentes procedencias respecto a su fabricación, se deberá determinar la calidad del mismo mediante los ensayos correspondientes a las siguientes pruebas.

P R U E B A	M E T O D O	A.S.T.M.
- Peso volumétrico, rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) del concreto	C -	138
- Revenimiento de concreto hecho con cemento Portland	C -	143
- Contenido de aire en concreto fresco, por el método de presión	C 4	231
- Sangrado de concreto	C -	232

Los métodos de prueba mencionados en esta sección, ponen de manifiesto la importancia de determinar la composición del concreto en estado fresco; de los factores que intervienen en la elaboración, los que cobran mayor interés son la relación agua-cemento y el contenido de cemento. Conocer estos dos factores no es posible mediante una sola prueba rápida y sencilla. La prueba BS - 1881 - 2 describe un procedimiento para conocer el proporcionamiento de una mezcla; éste consiste en analizar el concreto inmediatamente después de ser descargado de la mezcladora, el análisis debe proceder a otras pruebas complementarias de las fracciones de agregados como son granulometría, densidad y absorción. Con esta información se podrá realizar el cálculo del contenido de partículas sólidas en la mezcla; el peso de los agregados fino y grueso se determina sumergiéndolos en agua y pesándolos, la diferencia entre los pesos en agua del concreto y de los agregados determinará el peso del cemento. El contenido de agua de la mezcla se calcula independientemente, secando una muestra en un horno y calculando su diferencia en peso.

Como el método anterior no es muy preciso dada su complejidad, existe otro que consiste en medir la conductividad eléctrica de una suspensión acuosa del material. Esta prueba se basa en la existencia de una relación proporcionalmente directa entre la cantidad de cemento y la conductividad eléctrica, ya que cuando ocurre la hidratación del cemento se forman sales que se concentran en forma proporcional a la cantidad de cemento presente. Esta prueba presenta ciertas limitaciones que impiden su ejecución en la obra; pero puede iniciarse en menos de una hora a partir de terminarse el mezclado.

Posterior a la ejecución de pruebas en concreto fresco, se debe realizar una correcta valorización e interpretación de los resultados, sin tratar de comparar las pruebas entre sí, ya que cada una de ellas registra el comportamiento de la mezcla bajo condiciones distintas.

Los resultados de estas pruebas deben considerarse -- únicamente como un indicador aproximado del comportamiento futuro -- del concreto y en ningún caso se podrá emitir un juicio definitivo -- basándose únicamente en ellas. En el caso de que existan dudas respecto a los resultados, siendo los procesos de ejecución los correctos, deberán realizarse otras pruebas como la del factor de compactación, la prueba de fluidez, la prueba de remoldeo, prueba Vebe y -- prueba de la esfera de Kelly.

De cualquier forma estas pruebas en concreto fresco -- deben ir acompañadas de otras pruebas denominadas en concreto endurecido, cuyo principal objetivo consiste en determinar la resistencia del concreto a la compresión, ya que muchas otras de sus características más importantes se relacionan cualitativamente con su resistencia.

PRUEBAS EN CONCRETO ENDURECIDO

Las pruebas para controlar la calidad en el concreto endurecido, aunadas a las pruebas de materiales y de concreto fresco, forman en su totalidad un criterio general para juzgar y calificar - el proceso completo de elaboración de un elemento estructural.

Esta tarea encomendada al Laboratorio de Control de - Calidad durante la construcción de la Línea III del Metro, se basa - también en los resultados de las siguientes pruebas denominadas prue - bas en concreto endurecido.

P R U E B A	M E T O D O	A . S . T . M .
- Resistencia a compresión de cilindros moldeados de concreto	C -	39
- Resistencia a la flexión del concreto	C -	78
- Cambio de longitud de concreto	C -	157
- Resistencia a la penetración en concreto	C -	403
- Módulo de elasticidad estático y relación de Poisson, en compresión de especímenes cilíndricos de concreto	C -	469
- Resistencia de especímenes cilíndricos de concreto a tensión indirecta	C -	496

Dada la gran importancia que la resistencia a la compresión del concreto representa para cualquier obra, se pone de manifiesto el interés que las pruebas de resistencia tienen para el con-

trol de calidad y el cumplimiento de las especificaciones.

Para la realización de estas pruebas es necesaria la toma de muestras y ello deberá ejecutarse con una frecuencia no menor a la siguiente:

PRUEBA RESISTENCIA A LA COMPRESION	FRECUENCIA, CADA
- Los primeros 5 000 m ³ para cada tipo y fuente de abastecimiento:	
Una muestra de 2 cilindros ó	20 m ³ ó fracción
una muestra de 4 cilindros	40 m ³ ó fracción
- Después de 5 000 m ³ para cada tipo y fuente de abastecimiento:	
Una muestra de 2 cilindros ó	40 m ³ ó fracción
una muestra de 4 cilindros	80 m ³ ó fracción

Con las muestras se elaborarán especímenes de dos tipos: cúbicos y cilíndricos. Las características y procedimientos de estas pruebas se describen en las normas:

- C - 39 " Prueba para determinar la resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto "
- C - 192 " Fabricación y curado de muestras de prueba de concreto en laboratorio "

En la prueba de cubos se forman los especímenes en -- moldes de acero o hierro colado en forma cúbica con 15 cm. de arista y superficie plana en el interior. El molde se sujeta por medio de prensas a una base rígida para evitar fugas de mortero, ésto es muy importante cuando se utilice vibración para compactarlo. Las paredes interiores se cubren con una capa delgada de aceite mineral pa

ra evitar que la mezcla y el molde se adhieran. El molde se llenará en tres capas, cada una se compactará con un mínimo de 35 golpes - con una barra cuadrada estándar de acero, cuando el molde esté totalmente lleno, el exceso de mortero se remueve con una regla de acero para darle un acabado liso; después el cubo se deja 24 horas en reposo a una temperatura de 20° C. y con humedad relativa del 90 - por ciento. Pasadas las 24 horas se desprende el molde y el espécimen se sujeta al método estándar de curado en agua a temperatura de 20° C.

Como durante la construcción de la obra, el concreto se ve sometido a diferentes condiciones, el proceso anterior puede ser modificado para hacerlo más representativo de las condiciones reales de la obra. Por ejemplo en el caso de la compactación, ésta debe ser similar en la elaboración del espécimen y en la fabricación del elemento estructural; relativo al curado ocurre la misma situación: el curado de la muestra debe ser lo más parecido posible al método de curado que se esté realizando en la obra, solo así se podrá tener la certeza de que el espécimen fabricado integra una muestra representativa realmente.

Los cubos obtenidos se prueban, según las condiciones estándar, a la edad de 7 y 28 días; esta edad puede variar según las condiciones particulares de la obra y el tipo de información que se desea obtener. Para realizar el ensaye, el cubo se coloca en la máquina de prueba en posición perpendicular a la que tenía durante su fabricación y se le aplica una carga con una rapidez de 155 kg/cm²/min., hasta llevarlo a la falla para registrar la carga que la provocó en múltiplos de 5 kg/cm².

En la prueba de cilindros las muestras se fabrican en forma semejante a los cubos, los cilindros estándar tienen 15 cm. de diámetro y 30 cm. de altura, y los moldes pueden ser de hierro colado o acero. La colocación de la mezcla en el molde puede hacerse en tres capas, compactando cada una de ellas con una varilla de 16 mm. de diámetro y punta de bala, o en dos capas si se utiliza un vibrador de inmersión. El principal problema en esta prueba es el lograr el que las superficies de los extremos del cilindro sean planas y perpendiculares al eje longitudinal del mismo. Cuando los extremos del cilindro son ásperos o rugosos, durante la realización de la prueba aparecen esfuerzos concentrados, lo cual reduce en mucho la resistencia real del concreto sobre todo cuando éste es de alta resistencia. Para evitar este problema, en la norma C - 617 de la A.S.T.M. se estipula el procedimiento para lograr que las bases sean planas y con variaciones máximas de 0.05 mm.; para ello se utilizan varios métodos. De éstos, el más utilizado es el cabeceado que se realiza con un material que no afecte la resistencia y reduzca su dispersión, esto se logra cuando el material para el cabeceado tiene elasticidad y resistencia similares a las del concreto que contiene el cilindro; con esta similitud el esfuerzo se distribuye en la sección transversal uniformemente y se logra reducir la tendencia a la fractura. El cabeceado se puede hacer con cemento puro poco tiempo después de elaborado el cilindro, dándose a la capa un espesor de aproximadamente 2 mm. y dejándose contraer parcialmente la mezcla antes de colocarla; una vez colocada se presiona con una capa de vidrio para obtener una superficie plana.

Otro método estriba en recubrir el cilindro con cemen

to aluminoso, yeso dental o con una mezcla de azufre poco antes de iniciar la prueba. Cuando se usa cemento aluminoso, la capa debe aplicarse a la muestra húmeda para evitar el agrietamiento de la misma, y debe dejarse endurecer entre 8 y 16 horas bajo un procedimiento de curado húmedo; en el caso del yeso dental, debido a su consistencia de fluido viscoso, es relativamente sencillo lograr la superficie plana, presionando con una hoja de vidrio o acero maquilado, debiendo dejarse secar durante una hora antes de realizar el ensaye.

Otro de los métodos más utilizados es una mezcla de azufre y algún material granular que se aplica fundida y se deja enfriar, asegurando una superficie plana por medio de un adecuado montaje. Existen otros métodos como el pulido por abrasión de la superficie de la muestra hasta dejarla plana totalmente; este proceso da buenos resultados, pero su costo es muy elevado. Otro método consiste en empacar la cabeza del cilindro por medio de madera blanda o cartón; sin embargo se usa muy poco ya que produce una disminución en la resistencia promedio del concreto.

La prueba de compresión se realiza en una máquina especialmente diseñada para ello, cuyas características no se encuentran dentro del alcance de este tema; baste decir que el espécimen se coloca en posición vertical, en el caso de los cilindros, entre dos platinas de prueba, de las cuales la superior consta de un asiento esférico. Este asiento tiene la propiedad de lograr que el esfuerzo aplicado sea igual sobre toda la superficie de la muestra, de esta forma el espécimen fallará cuando el esfuerzo alcance la resistencia de la parte más débil de la muestra. Esta prueba presenta un sistema de esfuerzos muy complejo provocado por fuerzas axiales y tangen-

ciales desarrolladas entre las platinas de acero y las superficies - extremas del espécimen. Cuando se aplica la compresión vertical ocurre una expansión lateral debida a la relación de Poisson en la muestra y en la platina de acero; el valor de la expansión, que dependerá también del módulo de elasticidad, es característico para cada material, ello provoca que la deformación lateral en la platina de prueba sea muy inferior si se compara con la expansión lateral del concreto. Esta expansión lateral en el concreto no tiene libertad para desarrollarse debido a la restricción provocada por las platinas en sitios localizados cerca de los extremos de la muestra; cuando esto ocurre la muestra se ve sometida también a esfuerzos cortantes, además de los de compresión, los cuales provocan la falla de la muestra, quedando relativamente intacta una parte de la muestra en forma de cono, cuya altura será función de su dimensión lateral. Esta relación que se establece, parece inducir que el esfuerzo de compresión no es el que provoca la falla, sino la deformación unitaria de tensión lateral cuando llega al límite de 0.002 a 0.004; tomando en consideración el valor de la relación de Poisson en el concreto, se puede deducir que antes de lograrse la deformación unitaria límite de compresión, se produce la falla provocada por la tensión circunferencial desarrollada dentro de la muestra. Estas consideraciones son necesarias no para restar valor a los resultados de las pruebas de compresión, sino como una advertencia al considerar la resistencia verdadera a la compresión del concreto.

El tratar de hacer una comparación entre los resultados de las pruebas de cubos y cilindros, se presenta como una ardua tarea dada la complejidad de situaciones y factores que en ellas in-

tervienen, ya que parece no existir una relación única entre las resistencias de las dos formas de muestras. La tendencia generalizada se inclina a utilizar cilindros en lugar de cubos, porque se considera que éstos producen resultados más homogéneos en muestras semejantes, ya que la distribución de esfuerzos en planos horizontales se realiza en forma más uniforme en secciones circulares que en secciones cuadradas.

Dentro de cualquier elemento estructural construido con concreto reforzado, la aparición de grietas interrumpe la continuidad de la estructura y puede provocar que el acero de refuerzo se corroa a través de ellas. Con objeto de conocer el desarrollo de estas grietas en el concreto, se realizan pruebas de resistencia a la tensión, aún cuando el concreto no se diseñe para resistir tensión alguna; estas pruebas provocan en las muestras grietas al inducir una tensión diagonal provocada por esfuerzos cortantes, lo cual ayuda para conocer el comportamiento del concreto reforzado.

Las pruebas de resistencia a la flexión del concreto, se ven en la dificultad de poder aplicar directamente, una fuerza de tensión sin inducir excentricidades u otros efectos provocados por los medios para sujetar la muestra; por estas complicaciones, no existen pruebas que apliquen tensión directa al concreto, sino que se realizan sometiendo a flexión vigas de concreto simple o reforzado para medir su resistencia a la tensión. Entre las pruebas más comúnmente utilizadas se encuentran dos que destacan por la importancia que representan:

- " Prueba para determinar la resistencia a la flexión del concreto ". Método A.S.T.M. C - 78.
- " Prueba para determinar la resistencia a la tensión de muestras

cilíndricas de concreto ". Método A.S.T.M. C - 496.

En la primera de ellas se determina el esfuerzo máximo de tensión que ocurre en la última fibra del fondo de la viga que se prueba, denominándose tal esfuerzo como módulo de ruptura; el valor del módulo depende básicamente de la disposición de cargas en la viga y de las dimensiones que ésta tenga. Debe recordarse que el módulo de ruptura arroja un valor de resistencia a la tensión mayor - que el real, ya que para calcularlo se supone una distribución de esfuerzo proporcional a la distancia que exista hasta el eje neutro de la viga, siendo que en realidad la distribución del esfuerzo no es lineal sino parabólica.

En la prueba, la viga de concreto se somete a la aplicación de dos cargas concentradas, cada una de ellas situada en los dos tercios del claro, con esta disposición se logra que la parte central esté sometida a un esfuerzo máximo, el cual provoca el agrietamiento en cualquier sección que no tenga la resistencia necesaria - para soportarlo. El tamaño de las vigas puede variar, pero normalmente se utilizan de 15 x 15 x 75 y de 10 x 10 x 50 cm. de sección; - a partir del momento en que aparecen las grietas o fracturas se calcula el módulo de ruptura en base a la teoría elástica, estableciéndose una relación directa entre la resistencia a la tensión y el módulo de ruptura.

En la segunda prueba se usa un método indirecto para aplicar la tensión de modo que provoque una separación longitudinal en la muestra. Se utilizan muestras de forma cilíndrica como las usadas en la prueba de compresión, solo que en este caso, la muestra se coloca con su eje longitudinal en posición horizontal entre las -

platinas de la máquina; conforme se aumenta la carga aplicada de compresión, ocurre la falla por separación de la muestra siendo el plano de falla vertical a lo largo del diámetro del cilindro. Esta prueba es bastante sencilla y arroja resultados más uniformes que otras, lo cual quiere decir que los valores de resistencia a la tensión, son más reales que los que ofrece el módulo de ruptura.

Ocurre algunas veces que al realizar pruebas de compresión, los resultados obtenidos son inferiores a los valores mínimos establecidos por las especificaciones; ello puede deberse a que el concreto probado es relativamente débil, o a que la muestra probada no es representativa del lote de concreto. Cuando se presenta un caso como éste, y exista incertidumbre en la capacidad de carga del concreto, puede recurrirse a una prueba que utiliza una muestra de concreto tomada directamente del elemento estructural en cuestión.

Las muestras se toman por medio de una broca giratoria, la cual extrae un corazón cilíndrico de concreto de acuerdo con la norma C - 42 " Método de obtención y prueba de corazones de concreto extraídos con broca y de vigas aserradas de concreto ", y se prueban normalmente bajo flexión. Al juzgar los resultados de esta prueba, deben considerarse ciertos factores como son el tipo de curado en la obra, la ubicación del corazón en el elemento y el elemento mismo, ya que pueden influir alterando los resultados de la prueba.

Existe otra prueba de resistencia considerada semi-destructiva, y aunque básicamente mide la dureza del concreto, sus resultados producen valores absolutos de resistencia relativa que se usan para realizar comparaciones. La prueba se denomina de resisten

cia a la penetración y se basa en la profundidad a que penetra una varilla de acero, la cual es impulsada por un cartucho de pólvora, siendo todo realizado bajo condiciones estándar; se considera que la profundidad de penetración es inversamente proporcional a la resistencia en compresión del concreto, aunado a ésto, y considerando la dureza del agregado, el resultado puede relacionarse con los de pruebas estándar. Se dice que la prueba es semi-destructiva porque provoca daños locales pequeños, ya que los sondeos se realizan en grupos de tres en una vecindad cercanos entre sí; el uso de esta prueba no es muy amplio, pero su aplicación se generaliza cada vez más, ya que parece ser que esta prueba es superior a la prueba del martillo de rebote.

La prueba del martillo de rebote, conocida también como del esclerómetro, se usa directamente en la obra y sobre el elemento que se desea probar, al igual que la prueba anterior; para llevarla a cabo se utiliza un aparato denominado martillo de rebote, el cual en su interior contiene básicamente un émbolo, una masa que puede desplazarse y un resorte. El émbolo se presiona sobre la superficie de concreto que se desea probar y ocurre que el resorte se comprime al ser presionado por la masa, ésto provoca que el émbolo rebote sin dejar de hacer contacto con la superficie. El aparato mide la distancia recorrida por la masa y por medio de un indicador, puede leerse el número de rebote. Esta prueba presenta varias desventajas, entre ellas la principal es que debe usarse solo en superficies lisas o en superficies pulidas; la segunda consiste en que los resultados se ven influenciados por variaciones locales en el concreto, -

como lo son pequeños huecos de aire o la presencia de una partícula de agregado grande exactamente bajo el sitio donde se apoya el martillo. La posición del martillo al hacer la prueba debe ser perpendicular a la superficie que se prueba, ya que la fuerza de gravedad afecta el recorrido de la masa, pueden obtenerse distintos números de rebote en un piso o en un techo, aún cuando ambos estén contruidos exactamente igual; todos estos factores influyen en los resultados y éstos tienen únicamente valor comparativo respecto a los valores de resistencia a la compresión del concreto.

Existen muchas más pruebas en materiales, concreto fresco y en concreto endurecido, y el no mencionarlas aquí, no representa restarles crédito o menospreciar su valor. Las pruebas descritas son las que consideramos más importantes para el caso que nos ocupa; sin embargo, cada obra en particular debe definir que pruebas realizar en base a los requisitos propios de cada una de ellas.

CRITERIOS DE CALIDAD

Posterior a la ejecución de las pruebas mencionadas y contándose con los resultados de ellas, las especificaciones oficiales del metro establecen normas o criterios de calidad para evaluar los resultados de las pruebas, y basándose en ellos, emitir un juicio de aceptación o rechazo.

Cuando se mide la calidad del concreto por medio de pruebas de compresión simple y fundamentándose en criterios estadísticos, se deberán satisfacer los siguientes incisos:

- A.- Se aceptará que hasta un 20 por ciento de los ensayos de resistencia; considerando como resultado de un ensaye la resistencia promedio de dos especímenes compañeros ensayados a la edad de control; resulte con valores inferiores a la resistencia de proyecto, según se indica en el siguiente inciso.
- B.- Se establece como límite inferior de resistencia de un ensaye individual, entendiéndose como ensaye individual el resultado promedio de dos especímenes compañeros, el 79 por ciento de la resistencia de proyecto.
- C.- El promedio de 5 ensayos consecutivos, o sea 10 especímenes de concreto, no deberá ser inferior al 98 por ciento de la resistencia de proyecto.
- D.- La resistencia promedio de un grupo de 30 ensayos, deberá ser igual o superior a la calculada por la siguiente expresión:

$$f_{cr} = \frac{f'c}{1 - 0.842 V}$$

Donde V es el coeficiente de variación de cada grupo expresado en por ciento.

Entre los criterios referentes a la resistencia a la compresión, destaca el que admite las características de resistencia del concreto correspondiente a un día de colado, si ninguna pareja de cilindros da una resistencia media inferior a: $f'c - 50 \text{ kg/cm}^2$ y además, si los promedios de resistencia de todos los conjuntos de 3 parejas consecutivas de ese día no son inferiores a: $f'c - 17 \text{ kg/cm}^2$.

En lo que se refiere al proporcionamiento de materiales para elaborar el concreto, se realizará de modo que se obtenga una resistencia f_{cr} mayor que la $f'c$ especificada en los planos; para ello se debe considerar la desviación estándar del fabricante - al elaborar su concreto, para incrementar la resistencia de proyecto $f'c$ de acuerdo a la siguiente expresión:

$$f_{cr} = f'c + 0.85 \sigma$$

donde: f_{cr} es la resistencia promedio que debe utilizarse como base para elegir las proporciones del concreto, en kg/cm^2

$f'c$ es la resistencia especificada en los planos

σ es la desviación estándar de las pruebas de resistencia a compresión del concreto, en kg/cm^2

El valor de la desviación estándar se determina a partir de antecedentes de no menos de 30 parejas de cilindros que representen un concreto cuya resistencia no difiera en más de 70 kg/cm^2 de la especificada para el trabajo propuesto, y fabricado con mate-

riales, procedimientos y control similares a las del trabajo en cuestión. Si no se cuenta con dichos antecedentes, la desviación estándar podrá tomarse de la siguiente tabla.

**DESVIACION ESTANDAR DE LA RESISTENCIA
DEL CONCRETO EN KG/CM²**

PROCEDIMIENTO DE FABRICACION:	$f'c \leq 200 \text{ kg/cm}^2$	$f'c \leq 300 \text{ kg/cm}^2$
Mezclado mecánico, proporcionamiento por peso, corrección por humedad y absorción de los agregados, agregados de una misma fuente y calidad controlada	30	35
Mezclado mecánico, proporcionamiento por peso	35	45
Mezclado mecánico, proporcionamiento por volumen; volúmenes cuidadosamente controlados	60	70

Cuando se tenga duda sobre la calidad del curado en la obra, se pueden solicitar pruebas extra de resistencia en muestras curadas en condiciones de campo, a fin de comprobar si el procedimiento de curado y protección del concreto han sido efectivos. Para ello se fabricarán dos juegos de muestras: un juego se curará en el laboratorio siguiendo los procedimientos autorizados, y el otro se curará en el campo con el mismo procedimiento que se utilice en la obra para el curado de elementos estructurales.

La prueba se realizará a la edad que corresponda, y si la resistencia de los cilindros curados en el campo es menor al 85 por ciento de la de los cilindros curados en el laboratorio, el proceso de curado y protección del concreto deberá modificarse con el fin

de mejorarlo. Cuando la resistencia de los cilindros curados en el laboratorio sea mayor a $f'c$, las resistencias de los cilindros curados en el campo no necesitan exceder en más de 35 kg/cm^2 de $f'c$.

Si llega a ocurrir que las pruebas individuales de muestras curadas en el laboratorio indican resistencias inferiores en más de 50 kg/cm^2 a $f'c$, ó si las pruebas en cilindros curados en el campo indican deficiencias en los procesos de curado y protección del concreto, se tomarán medidas adecuadas para no comprometer la capacidad de carga de la estructura. Si se comprueba la baja resistencia y una disminución en la capacidad de carga de los distintos elementos, se deberán realizar pruebas en corazones extraídos de la zona en duda. En dicha prueba, que se mencionó anteriormente, se tomarán 3 corazones por cada resultado de prueba en cilindros que esté por debajo de $f'c$ en más de 50 kg/cm^2 . Ahora bien, si durante las condiciones de servicio de la estructura el elemento va a estar seco, los corazones se secarán al aire durante 7 días antes de la prueba bajo temperatura de 15 a 20° C . y humedad relativa menor al 60 por ciento; si el concreto en la estructura va a estar más que superficialmente húmedo, los corazones se sumergirán en agua durante 48 horas antes de la prueba para probarse húmedos.

Analizando los resultados se considerará que el concreto de la zona dudosa es aceptable si el promedio de los 3 corazones es por lo menos igual al 80 por ciento de la resistencia $f'c$ y si ningún corazón tiene una resistencia menor al 70 por ciento de $f'c$.

Cuando este criterio de aceptación no se cumpla y las condiciones de carga de la estructura sigan en duda, la Dirección de Obra puede ordenar pruebas de carga, que deberán realizarse según -

procedimientos del Artículo 360 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, en la zona dudosa, o tomar alguna decisión adecuada a la situación.

Aún cuando la instrumentación del recubrimiento de concreto de los túneles de la Línea III, no es propiamente una prueba de control de calidad, cabe mencionarla por la importancia que representa para conocer algo acerca del comportamiento del concreto.

El objetivo principal de la instrumentación del revestimiento provisional de concreto lanzado y del revestimiento definitivo de concreto reforzado en los túneles del metro, es conocer los esfuerzos y cargas, así como su variación y magnitud, que actúan en tales recubrimientos. El lugar donde se ubican las secciones de instrumentación varía a lo largo de toda la línea y se sitúan en lugares que sean representativos de los diferentes tipos de estratigrafía de los terrenos por los cuales atraviesa la excavación de los túneles.

Los instrumentos que se colocan son celdas de presión y deformímetros eléctricos, y ambos van embebidos en el concreto; las celdas de presión se colocan en el contacto entre los dos recubrimientos, para medir la presión que aparece entre ellos, y dentro del revestimiento definitivo de concreto reforzado, para conocer los esfuerzos que en él se generan. Los deformímetros miden la deformación unitaria de los dos recubrimientos de concreto, provocada por las presiones del subsuelo que actúan sobre éstos, y registran la deformación para determinar en forma indirecta el esfuerzo que actúa en la sección en que se encuentran situados. La interpretación de los re-

sultados, tarea bastante compleja, sirve para establecer una comparación entre las magnitudes previstas en el diseño y las registradas por las mediciones, ayudando en esta forma a conocer y predecir el comportamiento del concreto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A lo largo de los capítulos anteriores se puso de manifiesto la importancia de los diversos factores que intervienen para lograr un concreto de calidad para ser utilizado en la construcción de la Línea III del Metro.

Dichos factores influyen directamente sobre el concreto, y éste a su vez, determinará ciertas características de comportamiento en los diferentes elementos estructurales, los cuales forman entre sí la totalidad de la estructura. Esto significa que cuando alguna característica que interviene directamente en la elaboración o fabricación de un elemento de concreto, como podría ser la dureza del agregado por citar alguna, se modifica sin control, puede provocar alteraciones en el comportamiento de la estructura cuando se encuentre en condiciones de servicio.

Ello resalta la importancia de mantener bajo control todos los factores o especificaciones que, en grado menor o mayor, pueden inducir un comportamiento diferente al deseado.

Esto no significa que el concreto deba tener siempre las mismas cualidades o características, ya que su función, que básicamente siempre será la misma, puede requerir de ciertas cualidades específicas determinadas por las condiciones a que va a estar expuesto. Por ejemplo, las cualidades que se desean del concreto pueden variar si éste forma parte del recubrimiento definitivo del túnel, o si pertenece a algún elemento que va a estar expuesto a condiciones atmosféricas; lógicamente en los dos casos se desean características de comportamiento adecuado, que no necesariamente deben ser iguales, pe-

ro que deben satisfacer plenamente las cualidades que en las diversas situaciones se exijan del concreto.

Esto último se logra cuando se someten a estudio las principales características que se desea obtener del concreto en esa situación en particular, y cuando se modifican ciertos factores que intervienen en todo el proceso de fabricación, en base al análisis de comportamiento que se quiere obtener. Todo esto nos lleva a considerar el que todas las especificaciones, sean de materiales o procedimientos, pueden ser flexibles y como tales deben tomarse, lógicamente siempre dentro de ciertos rangos que dependerán de la importancia que representen, así como de los métodos que se sigan al determinarlas, y bajo el control de pruebas de laboratorio y experimentación para verificar si la nueva situación realmente mejora el comportamiento o alguna característica en particular del concreto.

Todo lo expuesto anteriormente nos lleva a concluir -- que no es posible expresar en una frase, la calidad del concreto de la Línea III del Metro, sino que debe considerarse cada caso en particular para verificarlo y basándose en el comportamiento que se desea y en el que se presenta, decidir si es o no es el adecuado a la situación, o si debe modificarse para mejorarlo.

BIBLIOGRAFIA

- " Especificaciones Generales del Concreto que se Empleará para la Construcción del Cajón Subterráneo del Sistema de Transporte Colectivo Metro en la Línea III ". 77-E-3.00-III-5-23-e
- " Especificaciones Generales para la Fabricación y Colocación del Concreto para el Cajón Subterráneo de la Línea III del Metro ". 77-E-3.00-III-2-10-e
- " Especificaciones Generales para el Curado de Elementos Estructurales de Concreto Reforzado que formen parte de la Construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México ". 78-E-3.00-III-56-984-e
- " Especificación para el Concreto Acabado Espejo de la Línea III del Metro ". 79-A-0.00-III-193-e
- " Especificaciones Generales de Construcción de la S.A.H.O.P. "
- " Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción para el Distrito Federal "
- " Tecnología del Concreto ". Tomos I y II, por A. M. Neville.
- " Especificación para la Instrumentación del Revestimiento Provisional de Concreto Lanzado y del Revestimiento Definitivo de Concreto Reforzado en los Túneles para el Metro de la Ciudad de México ". 81-EE-90000-III-5-154-e

FUENTES DE INFORMACION

- Comisión de Vialidad y Transporte Urbano, D. D. F.
- Ingeniería de Sistemas de Transporte Metropolitano, S. A.
- Geosistemas, S. A.
- INFOTEC, Innovación, Información y Tecnología.