

**MEMORIAS 2008
CONGRESO NACIONAL
DE ADMINISTRACIÓN Y
TECNOLOGÍA PARA LA
ARQUITECTURA, INGENIERÍA
Y DISEÑO**

1

**APLICACIÓN DE PROGRAMAS
DE CÓMPUTO PARA EL
DISEÑO DE MEZCLAS DE
CONCRETO**

Mtro. Luís Rocha Chiu

APLICACIÓN DE PROGRAMAS DE CÓMPUTO PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO

Mtro. Luís Rocha Chiu

Departamento de Materiales UAM-A

INTRODUCCIÓN

En México se producen alrededor de 30 millones de toneladas de cemento al año, de las cuales cerca del 80% se usan en la construcción de viviendas y en la autoconstrucción, por costumbre en este segmento del sector de la construcción se emplean métodos artesanales para la producción de concreto y cuya dosificación se hace normalmente por volumen, el empleo de diseño de mezclas por peso mediante programas de computo puede ayudar a mejorar las prácticas de construcción. El empleo del programa de cómputo que se presenta en esta ponencia puede ser útil para los estudiantes de ingeniería civil y arquitectura, residentes y supervisores de obra, empresas de control de calidad, compañías constructoras y para todo aquel usuario que requiera dosificar concreto normal por peso.

El programa de cómputo para el diseño de mezclas de concreto normal contempla dos métodos diferentes: peso volumétrico máximo de grava y arena (mínimo contenido de vacíos) y por factores empíricos. El primero, se incluye en el "Manual de Tecnología de Concreto" de la Comisión Federal de Electricidad y, el segundo, forma parte de la publicación "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (ACI 211.1-91) del American Concrete Institute (ACI).

Para facilitar el uso del programa y la comprensión de los conceptos básicos sobre dosificación la publicación que contiene el programa incluye una breve descripción sobre los componentes del concreto y de las características más importantes de los dos métodos de diseño de mezclas de concreto, así como una guía de usuario del programa con ejemplos que ilustran su empleo.

1. DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO NORMAL

1.1. Antecedentes

Generalmente las especificaciones de los materiales a emplear en una estructura las indica el proyectista en los planos y memorias del proyecto; en particular, las propiedades del concreto endurecido son especificadas por el proyectista de la estructura, mientras que las propiedades del concreto en estado fresco están regidas por el tipo de construcción y las condiciones de transportación, colocación y de clima. Estos requerimientos permiten determinar la composición de la mezcla, teniendo en cuenta el grado de control de calidad aplicado en el lugar o en la obra.

Por lo tanto, puede decirse que el diseño de la mezcla es el proceso de selección de los componentes adecuados del concreto, determinando sus cantidades relativas con el propósito de producir un

concreto económico, con ciertas propiedades mínimas, conveniente trabajabilidad, resistencia y durabilidad.

Existen numerosos factores que afectan las propiedades del concreto, ya sea en estado fresco o endurecido, en este trabajo se describen brevemente sólo aquellos que se relacionan con el diseño de las mezclas de concreto normal, donde el empleo de grava, arena, cemento y agua es lo convencional y no se considera el uso de aditivos.

Los métodos actuales de diseño de mezclas contemplan valores límite respecto a un rango de propiedades que deben cumplirse. Éstas son usualmente: la relación agua/cemento, el contenido mínimo de cemento, la resistencia mínima a la compresión, el tamaño máximo del agregado, la trabajabilidad mínima, el módulo de finura de la arena, la granulometría de los agregados y el contenido de aire.

Debido a la gran variabilidad de las propiedades de los materiales que componen el concreto muchos autores consideran al diseño de mezclas como un arte, esto es particularmente cierto cuando se trata de evaluar real y cuantitativamente las propiedades de la grava y la arena, por ejemplo. No debe de sorprender entonces que conviene verificar las proporciones calculadas haciendo mezclas de prueba y, si es necesario, efectuar ajustes hasta obtener la mezcla de concreto con las características deseadas.

Es indudable que en nuestro país las dos propiedades más significativas al diseñar mezclas de concreto normal son la resistencia a la compresión y su trabajabilidad, aunque debe reconocerse que en los últimos años se ha prestado cada vez mayor atención a la durabilidad.

Los métodos empleados en México para dosificar concreto invariablemente buscan producir concreto al menor costo. Además, está demostrado que el cemento representa alrededor de las tres cuartas partes del costo de los materiales para fabricar un metro cúbico de concreto normal sin aditivos químicos y minerales. Por supuesto que las empresas productoras de concreto emplean los aditivos para disminuir el costo global de la mezcla de concreto, considerando que estos mejoran propiedades como la trabajabilidad y retardo en el fraguado, además de disminuir el consumo del cemento.

En estado fresco, el atributo frecuentemente requerido en las mezclas de concreto es la trabajabilidad, la cual se considera como una propiedad del concreto que determina su capacidad de colocación y compactación apropiada, permitiendo su acabado sin segregación ni sangrado nocivo, así como moldeabilidad y adherencia. La consistencia forma parte de la trabajabilidad y se define a grandes rasgos como la capacidad de colocación de la mezcla de concreto, en la que se involucran propiedades de cohesión y viscosidad, se mide en términos de revenimiento (cuanto más elevado es el revenimiento más fácil de colocar es la mezcla). En el método del ACI el revenimiento es un dato que sirve de base para diseñar las mezclas de concreto, mientras que en el de mínimo contenido de vacíos es una referencia para mejorar la mezcla de prueba en caso de que el revenimiento obtenido haya sido diferente del especificado.

1.2. El concreto y sus componentes

El concreto es una mezcla de cemento, agua, agregados grueso y fino (grava y arena), aditivos y aire. En concretos de características especiales se incluyen en la mezcla agregados minerales como la ceniza volante (fly ash) o los colorantes. En estado fresco, es una mezcla fluida que se puede moldear aún después de algunas horas de haber sido elaborada, hasta que se presenta el fraguado inicial del concreto a partir del cual comienza a endurecer, ganando resistencia conforme avanza el tiempo.

Es evidente que las propiedades del concreto, tanto en estado fresco como en estado endurecido, dependen fundamentalmente de las características de cada uno de sus componentes, pero es indudable que la relación agua/cemento, la calidad y naturaleza de los agregados son aspectos que influyen en la mayor parte de dichas propiedades. A continuación se describen de manera breve los componentes del concreto.

1.3. Cemento

El cemento es un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad. Cuando el cemento es mezclado con agua y arena forma mortero, y cuando es mezclado con arena y piedras pequeñas (grava) forma una piedra artificial llamada concreto.

El cemento hidráulico más empleado en la actualidad en México y en el mundo es el cemento Portland, el cual es un polvo mineral finamente molido, resultante de la trituración, mezcla y calcinación de materiales de origen natural, como: la caliza, la arcilla y pequeñas cantidades de otras materias primas (marga y pizarra).

El proceso de fabricación del cemento se realiza en tres etapas: Obtención, preparación y molienda de materias primas (crudo o harina); cocción del crudo en hornos rotatorios hasta alcanzar una temperatura del material cercana a los 1450° C, para ser enfriado bruscamente, con lo que se obtiene un producto intermedio denominado clínker; y, molienda del clínker con otros componentes, tales como yeso (regulador de fraguado) y adiciones (escorias de alto horno, cenizas volantes, caliza o puzolanas) para dar lugar a los distintos tipos de cemento.

La norma estadounidense de la American Society for Testing Materials ASTM-C-150 establece cinco tipos de cemento para diferentes aplicaciones según la clase de obra y las necesidades de transporte y colocación del concreto en estado fresco (Tabla 1.1). De igual forma la norma Mexicana NOM-C-1 establece la misma clasificación de cementos Portland.

Tipo	Cemento Pórtland	Características
I	Normal	Para uso general
II	Modificado	Para moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación
III	Alta resistencia rápida	Para alcanzar alta resistencia inicial
IV	Bajo calor de hidratación	Para obtener bajo calor de hidratación
V	Resistente a los sulfatos	Para resistir ataque a los sulfatos

Tabla 1.1 Tipos de cementos Portland (ASTM-C-150)

En México, a partir de la declaratoria de vigencia en abril de 1999 de la norma NMX-C-414 “Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos – Especificaciones y Métodos de Prueba”, se dejaron de producir los cementos que establece la norma NOM-C-1 y actualmente sólo se fabrican los cementos de la nueva norma mexicana (Ver Tabla 1.2, Tabla 1.3 y Tabla 1.4), por lo que en el procedimiento de dosificación es conveniente tomar en cuenta la influencia de las características de los nuevos cementos en las propiedades finales del concreto.

Tipo	Denominación	Características
CPO	Cemento Portland Ordinario	Usos en concreto reforzado, pretensado y prefabricado, concreto en masa de pequeño y mediano volumen
CPP	Cemento Portland Puzolánico	Usos en concreto reforzado, concreto en masa de grandes volúmenes, en obras donde se requiere impermeabilidad o existan ataques por aguas puras, carbónicas agresivas o con débil acidez.
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno	De bajo calor de hidratación, resistente a la agresión química, al agua de mar y a los sulfatos.
CPC	Cemento Portland Compuesto	Los mismos usos de los tipos de cemento CPP y CPEG.
CPS	Cemento Portland con humo de Sílice	Usos en concreto reforzado y prefabricado, concreto en masa, pavimentaciones, cimentaciones y en obras donde se requiere impermeabilidad.
CEG	Cemento con Escoria Granulada de alto horno	Obras de concreto en masa en ambientes húmedos o agresivos por salinidad en general o por sulfatos de aguas y terrenos. Obras marítimas.

Tabla 1.2 Tipos de cementos Portland (NMX-C-414)

Tipo	Denominación
RS	Resistente a los sulfatos
BRA	Baja reactividad álcali – agregado

BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

Tabla 1.3 Clasificación por sus características especiales

Resistencia (N/mm ²)	Mínimo a 3 días	Mínimo a 28 días	Máximo a 28 días
20	--	20	40
30	--	30	50
30 R	20	30	50
40	--	40	--
40 R	30	40	--

R = resistencia inicial alta

Tabla 1.4 Clasificación por su clase resistente

La nomenclatura de la norma NMX-C-414, por ejemplo, para un cemento Portland ordinario clase resistente 30, de resistencia inicial alta y características especiales de resistencia a los sulfatos es: **CPO 30 R RS**; mientras que un cemento Portland puzolánico con una resistencia normal de 30, de baja reactividad álcali agregado y de bajo calor de hidratación es: **CPP 30 BRA / BCH**.

La verificación de la calidad del cemento requiere el empleo de diversas pruebas de laboratorio que garanticen el cumplimiento de las especificaciones de acuerdo con la norma NMX-C-414. Las propiedades que generalmente se miden en el cemento de acuerdo a la norma anterior son: resistencia a la compresión, el tiempo de fraguado, estabilidad de volumen, determinación de las características de los componentes principales y del contenido de trióxido de azufre. Cualquiera de los métodos de diseño de mezclas que se utilice requiere solamente el conocimiento del peso específico y, en su caso, el tipo de cemento que cumpla los requisitos del proyecto y del uso del concreto en la obra.

1.4. Agregados

Originalmente, los agregados se consideraban un material inerte, que se repartía en toda la pasta de cemento, más que nada por razones económicas. Sin embargo, es posible asumir un punto de vista opuesto y pensar que los agregados son un material de construcción unido a un todo cohesivo por medio de la pasta de cemento, como sucede en las construcciones de mampostería. De hecho, los agregados no son realmente inertes y sus propiedades físicas, térmicas y, a veces, químicas, influyen en el comportamiento del concreto.

Los agregados son más baratos que el cemento y, por lo tanto, es más económico poner la mayor cantidad posible de aquellos y la menor de éste, en general al menos tres cuartas partes del volumen del concreto están ocupadas por los agregados. No obstante, la economía no es la única razón para utilizar los agregados, éstos proporcionan además al concreto una enorme ventaja técnica, al darle mayor estabilidad volumétrica y más durabilidad que si se empleara solamente pasta de cemento.

Los agregados se dividen, por el tamaño de sus partículas, en agregado fino y agregado grueso. El agregado fino o arena abarca tamaños entre 0.075 y 4.75 mm., en tanto que el intervalo nominal del agregado grueso o grava comprende desde 4.75 mm. hasta la dimensión de los fragmentos más grandes que contiene, cuya magnitud define el tamaño máximo del agregado.

Todas las partículas de agregado natural proceden originalmente de una masa mayor. Es posible que dicha masa se haya fragmentado por procesos naturales, como con el intemperismo o la abrasión, o que la fragmentación haya sido inducida artificialmente, mediante trituración. Por lo tanto, muchas de las propiedades de los agregados dependen de la roca madre que le dio origen, por ejemplo, sus propiedades químicas, la composición mineral, la densidad, la dureza, la resistencia, la estabilidad física y química, la estructura del poro y el color. Por otra parte, hay propiedades que posee el agregado, pero que están ausentes en la roca original, como la forma y el tamaño de la partícula, la textura superficial y la absorción. Todas estas propiedades pueden ejercer una influencia considerable en la calidad del concreto fresco o endurecido.

Desde el punto de vista petrográfico, los agregados, ya sean triturados o reducidos a su tamaño por la naturaleza, se pueden dividir en varios grupos de rocas que tengan características similares. La clasificación por grupos no implica la conveniencia de ningún agregado en especial para la fabricación de concreto; en cualquiera de los grupos se pueden encontrar materiales inadecuados, aunque algunos grupos tienden a ser mejores que otros. Los exámenes geológicos de los agregados son muy útiles para evaluar su calidad y, especialmente, para comparar un agregado nuevo con otro cuyos antecedentes de servicio sean conocidos. En general, los agregados cuyo origen es basalto, caliza o andesita pueden usarse con buenos resultados en la producción de concreto normal.

Por lo general los métodos de dosificación requieren la determinación de algunas características de los agregados, como granulometría, peso específico, pesos volumétricos (suelos y compactos), módulo de finura de la arena, tamaño máximo del agregado grueso, la absorción y la humedad. Dichos valores pueden ser fácilmente obtenidos mediante pruebas de laboratorio estandarizadas.

1.5. Agua

Casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga un olor o sabor pronunciado, puede ser utilizada para producir concreto. Sin embargo, algunas aguas no potables pueden no ser adecuadas para su fabricación.

Algún tipo de agua que pudiera parecer dudosa, puede ser usada si los cubos de mortero producidos con ella alcanzan resistencias a los 7 días igual o mayor al 90% de la resistencia de especímenes testigo fabricados con agua potable o destilada; además, se deberán realizar las pruebas para asegurar que las impurezas en el agua no afecten el tiempo de fraguado del cemento.

Las impurezas excesivas en el agua no sólo pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino que también pueden causar eflorescencia, manchado, corrosión del acero de refuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad. Algunas impurezas pueden tener

un efecto mínimo sobre la resistencia y tiempo de fraguado del concreto, pero pueden afectar de manera adversa la durabilidad y algunas otras propiedades de éste; a continuación se describen algunos compuestos e impurezas y sus efectos en el concreto.

Los carbonatos y bicarbonatos de sodio y potasio tienen diferentes efectos en los tiempos de fraguado de distintos cementos. El carbonato de sodio puede causar fraguados muy rápidos, en tanto que los bicarbonatos pueden acelerar o retardar el fraguado; en concentraciones altas, estas sales pueden reducir de manera significativa la resistencia del concreto. También se deberá considerar la posibilidad de que se presente la reacción álcali-agregado.

Un alto contenido de cloruros en el agua de mezclado ocasiona la corrosión del acero de refuerzo o de los torones de preesfuerzo, los iones del cloruro atacan la capa de óxido protectora formada en el acero por el medio químico altamente alcalino del concreto.

Las posibles reacciones expansivas y el deterioro por sulfatos en el concreto debe cuidarse al emplear agua con estas sustancias, especialmente en aquellos lugares donde el concreto vaya a quedar expuesto a suelos o agua con contenidos elevados de sulfatos, aunque las normas permiten impurezas de 10,000 partes por millón (ppm) de sulfato de sodio.

Los carbonatos de calcio y de magnesio no son muy solubles en el agua y rara vez se encuentran en concentraciones suficientes para afectar la resistencia del concreto. Las sales de magnesio, estaño, zinc, cobre y plomo, presentes en el agua pueden provocar una reducción considerable en la resistencia y también variaciones en el tiempo de fraguado.

La aceptación de agua ácida como agua de mezclado se deberá basar en la concentración de ácido en el agua; su aceptación se basa en el pH, que es una medida de la concentración del ión hidrógeno. Cualquier agua con valores de pH entre 6.0 y 8.0 es útil para fabricar concreto.

Las aguas con concentraciones de hidróxido de sodio menores o iguales al 0.5% del peso del cemento no afectan en gran medida la resistencia del concreto, siempre que no ocasionen un fraguado rápido. La posibilidad de una mayor reactividad álcali-agregado se deberá tomar en cuenta.

El uso del agua empleada en la limpieza de las ollas de concreto premezclado es permisible siempre que las partículas suspendidas no sean excesivas. La mayor parte del agua que lleva desperdicios industriales tiene menos de 4,000 ppm de sólidos totales. Cuando se hace uso de esta agua en las mezclas de concreto, puede esperarse una reducción en la resistencia a la compresión del 10 al 15%.

Las aguas negras típicas pueden contener aproximadamente 400 ppm de materia orgánica. Una vez que esta agua es sometida a un buen sistema de tratamiento, la concentración se reduce a 20 ppm o menos. Esta cantidad es demasiado pequeña para tener cualquier efecto de importancia en el concreto y en su resistencia.

El efecto que las sustancias orgánicas presentes en las aguas residuales pueden llegar a tener algún efecto en el tiempo de fraguado del cemento Portland o en la resistencia última del concreto; es un problema que presenta una complejidad considerable. Las aguas que estén muy coloreadas o con un olor notable o aquellas en que sean visibles algas verdes o cafés deberán ser vistas con desconfianza y, en consecuencia, requieren pruebas de laboratorio.

Se pueden tolerar en el agua aproximadamente 2,000 ppm de arcilla en suspensión o partículas finas de roca. Cantidades mayores podrían no afectar la resistencia, pero sí influir sobre otras propiedades del concreto.

Ocasionalmente se encuentran presentes varios tipos de aceite en el agua. El aceite mineral (petróleo) sin mezclarse con otros aceites animales o vegetales tiene probablemente un efecto menor en el desarrollo de la resistencia que otros aceites; sin embargo, concentraciones de aceite mineral mayores del 2.5% del peso del cemento pueden reducir la resistencia a la compresión del concreto en más del 20%.

Independientemente de que en los párrafos anteriores se han ofrecido una serie de indicaciones sobre los tipos de agua susceptibles de ser usados para el agua de mezclado, ésta deberá cumplir las especificaciones de la norma NMX-C-122 "Industria de la Construcción – Agua para Concreto".

1.6. Aditivos

Actualmente en el ambiente de la industria del concreto premezclado una mezcla que no contiene aditivos es una excepción, esto es porque dichas sustancias y adiciones son capaces de impartir beneficios físicos y económicos al concreto. Los aditivos químicos son sustancias que se agregan a la mezcla de concreto en cantidades que están, normalmente, en función de la cantidad de cemento, durante el proceso de mezclado antes de su colocación, con el propósito de realizar una modificación o modificaciones específicas a las propiedades normales del concreto.

Los aditivos por su composición química pueden ser orgánicos o inorgánicos y se clasifican comúnmente por su función en el concreto, según la norma ASTM-C-494, en:

- Tipo A Reductores de agua: Como su nombre lo indica la función de estos aditivos es reducir el contenido de agua de la mezcla, usualmente del 5 al 10%, con lo que se disminuye la relación agua/cemento mientras se conserva la trabajabilidad deseada.
- Tipo B Retardantes: En general, prolongan el tiempo durante el cual el concreto se puede transportar, colocar y compactar. Se usan para elaborar concreto en clima cálido, cuando el tiempo de fraguado normal se acorta por la alta temperatura y en la prevención de juntas frías.
- Tipo C Acelerantes: Su función es incrementar tempranamente el desarrollo de la resistencia del concreto cuando se va a colar a bajas temperaturas, en concreto prefabricado o cuando se requiere un descimbrado rápido.
- Tipo D Reductores de agua y retardantes: Cuando se necesita disminuir el contenido de agua y, al mismo tiempo retrasar el fraguado del concreto se emplean estos aditivos, cuyas características son una combinación de los tipos A y B.

- Tipo E Reductores de agua y acelerantes: Al igual que los aditivos tipo D, este aditivo es una combinación de dos aditivos, los tipo A y C, de los cuales toman sus propiedades generales.
- Tipo F Reductores de agua de alto rango o superfluidificantes: La acción de dispersión de los aditivos superfluidificantes incrementa la trabajabilidad del concreto por la elevación del revenimiento de 7.5 a 20 cm, permaneciendo la mezcla cohesiva. El concreto resultante se puede colocar con poca o sin ninguna compactación y no está sujeto a exceso de sangrado o de segregación.
- Tipo G Reductores de agua de alto rango y retardantes: Este aditivo combina las propiedades de los aditivos tipo F y B.

Por otro lado existen también otros materiales conocidos como adiciones, dentro de las cuales están las puzolanas y las escorias de alto horno, mismas que funcionan como aglutinantes al reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio. Asimismo se tienen materiales finamente divididos considerados inertes, como lo son polvos de agregados y cal hidratada.

Cabe destacar que en el programa de cómputo para diseño de mezclas no se ha considerado el empleo de ningún tipo de aditivo, por lo que aquellas dosificaciones que contemplen su uso deberán considerar la realización de mezclas de prueba.

2. MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

En el medio de la construcción en México se emplean diversos métodos de diseño de mezclas de concreto normal, incluso las empresas pre-mezcladoras han desarrollado su propia metodología, sobre todo para obtener el máximo ahorro en el consumo de cemento.

La mayoría de los métodos de dosificación se basan en dos procedimientos generales: la determinación del contenido de vacíos de los agregados combinados y mediante el empleo de factores empíricos.

En el primer grupo podemos citar el método de peso volumétrico máximo de grava y arena que describe el Manual de Tecnología del Concreto (Sección 4), el cual consiste en determinar experimentalmente la combinación porcentual de grava y arena que ofrece el máximo peso volumétrico (mínimo contenido de vacíos), obteniendo el volumen de la pasta a través del cálculo de los vacíos y luego el del agua y cemento por la relación agua/cemento de acuerdo con la resistencia requerida. El procedimiento propuesto por el cubano Vitervo O'reilly es muy parecido, también recomienda la combinación grava/arena que proporcione el menor contenido de vacíos, difiere en el cálculo del contenido del cemento y del agua, los cuales se determinan mediante factores que dependen de la relación agua/cemento y de la consistencia deseada en la mezcla. El método del ACI y el método británico usan, en términos generales, factores empíricos para el diseño de mezclas, en los cuales se determinan primero el agua de la mezcla de acuerdo con el revenimiento y el tamaño máximo del agregado y después la cantidad de la grava, para el caso del ACI, o de la arena, para el método británico; el último de los componentes se calcula por diferencia.

En nuestro país, por nuestra cercanía con los Estados Unidos, las normas y métodos del American Concrete Institute ejercen una importante influencia en las prácticas de construcción. Por esta razón el desarrollo del programa de cómputo para diseño de mezclas de concreto normal contempla el método del informe ACI 211.1-91, además del método del mínimo contenido de vacíos del manual de Comisión Federal de Electricidad.

2.1. Método ACI

Este procedimiento incluye siete pasos para el proporcionamiento de mezclas de concreto normal y cuyas cantidades serán suficientes para ocupar un metro cúbico. Posteriormente se harán los ajustes necesarios por humedad y absorción para realizar la mezcla de prueba.

El primer paso contempla la selección del revenimiento. Cuando éste no se especifica, el informe del ACI incluye una tabla en la que se recomiendan diferentes valores de revenimiento de acuerdo con el tipo de construcción que se requiera. Los valores son aplicables cuando se emplea el vibrado para compactar el concreto, en caso contrario dichos valores deben ser incrementados en dos y medio centímetros.

La elección del tamaño máximo del agregado, segundo paso del método, debe considerar la separación de los costados de la cimbra, el espesor de la losa y el espacio libre entre varillas individuales o paquetes de ellas. Por consideraciones económicas es preferible el mayor tamaño disponible, siempre y cuando se utilice una trabajabilidad adecuada y el procedimiento de compactación permita que el concreto sea colado sin cavidades o huecos.

La cantidad de agua que se requiere para producir un determinado revenimiento depende del tamaño máximo, de la forma y granulometría de los agregados, de la temperatura del concreto, de la cantidad de aire incluido y del uso de aditivos químicos. Como tercer paso, el informe presenta una tabla con los contenidos de agua recomendables en función del revenimiento requerido y el tamaño máximo del agregado. Simultáneamente, en este punto se obtiene el contenido de aire en función del tamaño nominal.

Como cuarto paso, el ACI proporciona una tabla con los valores de la relación agua/cemento de acuerdo con la resistencia a la compresión a la edad de 28 días que se requiera; por supuesto, la resistencia promedio (f_{cr}) seleccionada debe exceder la resistencia especificada ($f'c$) con un margen suficiente para mantener dentro de los límites especificados las pruebas con valores bajos. En una segunda tabla aparecen los valores de la relación agua/cemento para casos de exposición severa.

El contenido de cemento se calcula con la cantidad de agua, determinada en el paso tres, y la relación agua/cemento, obtenida en el paso cuatro; cuando se requiera un contenido mínimo de cemento o los requisitos de durabilidad lo especifiquen, la mezcla se deberá basar en un criterio que conduzca a una cantidad mayor de cemento; esta parte constituye el quinto paso del método.

Para el sexto paso del procedimiento, el ACI maneja una tabla con el volumen del agregado grueso por volumen unitario de concreto; los valores dependen del tamaño máximo nominal de la grava y

del módulo de finura de la arena. El volumen de agregado se muestra en metros cúbicos con base en varillado (compactado) en seco para un metro cúbico de concreto; el volumen se convierte a peso seco del agregado grueso requerido en un metro cúbico de concreto, multiplicándolo por el peso volumétrico de varillado en seco.

Con este último paso se tienen estimados todos los componentes del concreto, excepto el agregado fino, cuya cantidad se calcula por diferencia. Para este séptimo paso, es posible emplear cualquiera de los dos procedimientos siguientes: por peso o por volumen absoluto.

Hasta el paso anterior se considera que ya se tiene la dosificación base para un metro cúbico, posteriormente al ajustar las mezclas por humedad de los agregados, el agua que se añade a la mezcla se debe reducir en cantidad igual a la humedad libre contribuida por el agregado, es decir, humedad total menos absorción. Con este paso estamos en condiciones de llevar a cabo nuestra mezcla de prueba.

En el momento de fabricar nuestra mezcla de prueba, se deberá verificar el peso volumétrico del concreto, su contenido de aire, la trabajabilidad apropiada mediante el revenimiento y la ausencia de segregación y sangrado, así como las propiedades de acabado. Lo anterior servirá para hacer las correcciones por diferencias en el revenimiento, en el contenido de aire o en el peso unitario del concreto; precisamente a este respecto, el informe ACI 211.1-91 proporciona una serie de recomendaciones que ajustan la mezcla de prueba hasta lograr las propiedades especificadas en el concreto.

2.2. Método de contenido mínimo de vacíos

Una vez que se han determinado las características granulométricas de los agregados y el tamaño máximo de la grava, el siguiente aspecto por definir es el que se refiere a la adecuada combinación de la grava y la arena. Un procedimiento apropiado es la obtención del mínimo contenido de vacíos en los agregados combinados.

La forma práctica para encontrar el mínimo contenido de vacíos consiste en determinar experimentalmente el cambio del peso volumétrico compactado de los agregados combinados variando la proporción relativa entre grava y arena hasta establecer la proporción relativa que produce el máximo peso volumétrico, esto es, el mínimo contenido de vacíos. Esta determinación se basa en el método de prueba ASTM-C-29, es de ejecución sencilla y se recomienda cuando se emplean agregados con tamaño máximo hasta 40 mm. El presente programa de cómputo ofrece esta posibilidad.

El método produce el mejor acomodo de partículas para dar el mínimo contenido de vacíos en la mezcla seca de agregados compactos y a su favor puede decirse que en su ejecución quedan implícitamente comprendidos los efectos inherentes a la forma y textura superficial de las partículas, además del tamaño máximo y la granulometría de los agregados.

Si partimos de que el peso volumétrico compactado de la combinación seca de grava y arena representa el contenido en peso de ambos agregados en el volumen unitario de concreto, se puede admitir que los espacios vacíos complementarios corresponden al espacio disponible para ser ocupado por la pasta de cemento y el aire incluido naturalmente atrapado.

El método de cálculo consiste en determinar, en primer lugar, la combinación de agregados que produce el peso volumétrico máximo con el procedimiento descrito en los párrafos anteriores, al igual que todas las propiedades de los materiales a emplear, especialmente las de los agregados (peso específico, módulo de finura, granulometría, densidades, etc.).

El siguiente paso consiste en calcular el peso de la grava y el de la arena empleando el peso volumétrico máximo y los porcentajes de cada uno de ellos; después se convierten estos pesos en volúmenes absolutos por metro cúbico de concreto, de tal forma que al sumar dichos volúmenes ahora tendríamos el volumen absoluto de la grava y de la arena y por diferencia se tendría el volumen de la pasta de cemento y del aire incluido.

Para calcular las cantidades de agua y cemento requeridas es conveniente establecer la resistencia a la compresión (f_{cr}) y si el concreto requiere aire incluido o no, de tal forma que con esos datos se obtienen de las tablas del informe ACI 211.1-91 la relación agua/cemento y el porcentaje de aire incluido de acuerdo con las especificaciones del concreto en cuanto a resistencia, tamaño máximo del agregado y condiciones de exposición.

El porcentaje de aire incluido obtenido de las tablas, convertido a volumen unitario, se resta del volumen de la pasta de cemento y aire incluido estimado anteriormente, y con esto obtenemos sólo el volumen de la pasta; este dato se separa en los volúmenes absolutos de cemento y de agua empleando la relación agua/cemento, convertida a volumen, y las densidades de ambos materiales.

Finalmente, las cantidades de los componentes para realizar la mezcla de prueba inicial se tabulan en peso y en volumen absoluto. La elaboración de la mezcla de prueba y el cálculo de correcciones se realizan con el mismo procedimiento descrito en la parte final del método del ACI.

2.3. Evaluación de los métodos

En general las mezclas de concreto diseñadas por el método de contenido mínimo de vacíos suelen manifestar reducida trabajabilidad, porque la obtención de esta característica usualmente demanda un cierto exceso de mortero con respecto al que se obtiene con el mínimo consumo de pasta. Bajo tal consideración, se espera que al elaborar la mezcla de prueba inicial mediante este procedimiento la mezcla resultante exhiba poca trabajabilidad, por lo que deben de efectuarse los ajustes correspondientes hasta obtener las propiedades deseadas en el concreto.

Por el contrario, las mezclas diseñadas por el método ACI tienden a ser más trabajables; esto se debe a que la proporción de grava compactada se determina en función del tamaño máximo del agregado y del módulo de finura de la arena, y no se hace distinción entre agregados naturales o triturados.

Puede afirmarse que con el procedimiento de mínimos vacíos se obtienen mezclas de concreto con arena en defecto, mientras que el método del ACI produce mezclas de concreto con arena en exceso. Esta peculiaridad de los métodos de dosificación es muy importante para aquellos que apenas se inician en el conocimiento sobre diseño de mezclas de concreto o para los productores de concreto en obra que no disponen de métodos apropiados a la mano, ya que pueden decidir sobre el empleo de uno u otro método según los requerimientos de su proyecto.

En general, cuando se busca bajo consumo de cemento y menos trabajabilidad con ajustes a la mezcla de prueba, se recomienda el método de contenido mínimo de vacíos; cuando se desea buena trabajabilidad y pocos ajustes a la mezcla de prueba, pero mayor consumo de cemento, el método a emplear es el de factores empíricos del ACI.

3.0. MANUAL DEL USUARIO

3.1. Requisitos mínimos del sistema:

- Procesador 486 o superior
- 20 MB de espacio libre en disco duro
- 16 MB de memoria RAM
- Sistema Operativo Windows 95 o posterior
- Resolución mínima de 800 X 600 (resolución recomendada)

3.2. Guía de instalación

Simplemente inserte el CD del programa DM 1.0 en la unidad de disco compacto de su computadora. Si su unidad de CD es de auto arranque, espere a que inicie el proceso de instalación y siga las instrucciones en pantalla.

Si su unidad de CD no es de auto arranque, en el menú Inicio de Windows seleccione la opción Ejecutar, y en el cuadro que aparece, seleccione Examinar para que usted mismo pueda localizar el archivo **SETUP.EXE** que se encuentra directamente en el CD de instalación. Haga doble clic en este archivo para que comience el proceso de instalación y siga las instrucciones en pantalla.

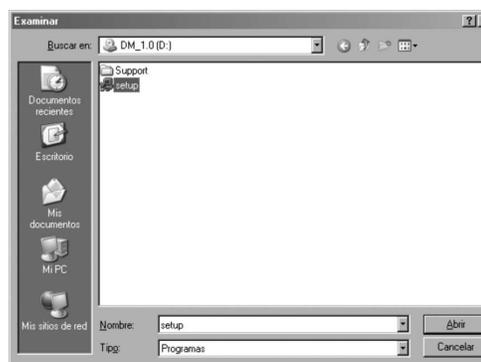


Figura 3.1 Ejecución del archivo Setup.EXE

Dependiendo de la configuración de su sistema operativo, una vez que el proceso de instalación ha iniciado, quizá sea necesario reiniciar el sistema para actualizar algunos archivos útiles para el programa *DM 1.0*; en tal caso, el programa de instalación le solicitará que reinicie el sistema mediante la aparición de un cuadro de texto, y que vuelva a ejecutar nuevamente el proceso de instalación después de reiniciar la computadora.

De no ser necesaria dicha actualización, el proceso se llevará a cabo sin solicitarle que reinicie la computadora, y al final del mismo verá un mensaje en que se confirma que la instalación del programa ha terminado satisfactoriamente. Luego de esto, retire el CD de instalación de su unidad.

El programa aparecerá en la carpeta **Programas** del menú inicio, en una sub carpeta denominada **DM 1.0**, la cual contiene el acceso directo del ejecutable también llamado **DM 1.0**

Figura 3.2 Ubicación del archivo ejecutable



3.3. Uso del programa DM 1.0

El programa realiza básicamente dos tipos de dosificaciones:

- ◆ Método de contenido mínimo de vacíos ó peso volumétrico máximo (PVM)
- ◆ Método del ACI

La pantalla principal del programa muestra una barra de herramientas para que usted seleccione el método deseado; además, en el menú Opción también puede hacer la selección que desee. Como se describe en el soporte teórico, el método PVM tiene la posibilidad de seleccionar valores a usarse en la dosificación base partiendo una gráfica de peso volumétrico contra relación grava – arena, la cual se traza con valores obtenidos experimentalmente; puede acceder a esta opción desde el sub menú *Mínimos vacíos*, seleccionando la opción *Desde gráfico*.

Se brinda la opción de imprimir cualquier cuadrícula de resultados directamente en la impresora o bien guardar los datos y resultados en un archivo de texto; en las secciones 3.4 y 3.5 se da información más detallada al respecto. A continuación se describe de forma general la operación del programa DM 1.0.

3.3.1. Contenido mínimo de vacíos

Seleccionando esta opción, aparecerá una tabla para ingresar los datos requeridos, en las unidades correspondientes; es importante que se introduzcan los datos en las unidades que muestra la tabla. Haga clic en el botón Aceptar para ver los resultados de la dosificación base.

3.3.2. Desde gráfico

Se le pedirá el número de puntos a graficar. Luego, deberá introducir en la tabla correspondiente los valores de porcentaje de grava y porcentaje de arena, así como el peso volumétrico obtenido en laboratorio. Use el botón *Graficar* para ver gráficamente estos puntos; desplace el cursor sobre la gráfica para ver pares de valores de peso volumétrico y relación grava – arena. Haga clic sobre algún punto deseado en el gráfico para poder utilizar esa pareja de valores en la dosificación base. Al pie del gráfico podrán verse los valores seleccionados; en caso de haber más de una pareja de

valores, el programa le dará la opción de seleccionar los valores que usted desee utilizar. Haga clic en el botón *Cerrar* para regresar a la tabla principal de datos.

3.3.3. Método del ACI

En este método, deberá de introducir algunos otros datos, en los campos que el mismo programa le mostrará. Al seleccionar el tamaño *máximo nominal* lo podrá hacer de dos formas: valores estándar desde una lista desplegable, o bien según dimensiones conocidas, en cuyo caso el programa le mostrará otra pantalla para que usted introduzca los datos necesarios, y así calcular el tamaño máximo nominal sobre la base de cuatro criterios diferentes, según se explica en el soporte teórico del programa.

Usted puede introducir el valor deseado para la resistencia a compresión $f'c$ y el programa calculará la relación agua – cemento correspondiente, o bien el caso inverso, dar el valor de la relación agua – cemento y el programa calculará el valor de $f'c$.

Para el valor del revenimiento, puede introducirse directamente el valor numérico, o bien seleccionarse por el *tipo de construcción*, caso en que el programa le mostrará una tabla para que seleccione el valor apropiado.

Completados todos los datos, seleccione el botón *Aceptar* para ver los resultados de la dosificación base.

3.3.4. Mezcla de prueba

Una vez realizada la dosificación base por cualquiera de los métodos descritos, el programa le dará la opción de realizar una mezcla de prueba con sólo hacer clic en el botón del mismo nombre. Deberá introducir entonces los datos necesarios de los materiales, e indicarle al programa la cantidad de concreto a fabricar; pueden ser cilindros de 15 X 30, cilindros de 10 X 20, una combinación de ambos o alguna otra cantidad cualquiera que usted especifique en decímetros cúbicos; puede seleccionar un porcentaje de incremento en el volumen por si a caso usted desea tomar en cuenta una cantidad de desperdicio o simplemente una cantidad adicional. Con el botón *Aceptar* podrá ver los resultados correspondientes. Utilice el botón *Cerrar* para regresar a la pantalla principal del programa.

3.3.5. Cálculo de rendimientos

Después de realizar la mezcla de prueba, usted puede realizar el cálculo correspondiente a los rendimientos de la misma. Seleccione *Rendimientos de la mezcla de prueba* del menú *Opción*, y aparecerá una tabla con los datos cargados correspondientes a la última mezcla de prueba realizada. No obstante, los datos pueden modificarse o bien introducir datos diferentes. Introduzca los datos adicionales necesarios que se solicitan en el cuadro de la derecha. No olvide tomar en cuenta las unidades en que se le solicitan los datos. Con el botón *Aceptar* podrá ver los resultados correspondientes. Utilice el botón *Cerrar* para regresar a la pantalla principal del programa.

3.3.6. Dosificación de campo por peso

Se selecciona desde el sub menú *Por peso*, dentro del menú *Dosificación de campo*, en el menú general *Opción*.

Aparecerán cargados los datos del último cálculo de rendimientos, pero al igual que en el caso anterior, los datos pueden modificarse según sea necesario. Con el botón *Aceptar* podrá ver los resultados correspondientes. Utilice el botón *Cerrar* para regresar a la pantalla principal del programa.

3.3.7. Dosificación de campo por volumen

Se selecciona desde el sub menú **Por volumen**, dentro del menú *Dosificación de campo*, en el menú general *Opción*.

Aparecerán cargados los datos del último cálculo de rendimientos, pero al igual que en el caso anterior, los datos pueden modificarse según sea necesario. Con el botón *Aceptar* podrá ver los resultados correspondientes. Utilice el botón *Cerrar* para regresar a la pantalla principal del programa.

3.4. Guardar archivos

Todas las posibilidades de cálculo que ofrece el programa DM 1.0 puede ser almacenadas en un archivo de texto, el cual podrá usted manipular a su gusto, es decir, editar, dar formato, copiar, abrir en otra aplicación, imprimir, etcétera. Simplemente seleccione la opción *Guardar* del menú *Archivo*, y aparecerá el cuadro de diálogo tradicional de *Windows* para que usted especifique el nombre del archivo y la carpeta en dónde desea guardarlo.

Dependiendo del contenido de cada archivo, el programa le asocia una extensión. En la siguiente tabla se dan las extensiones correspondientes a cada tipo de archivo.

TIPO DE ARCHIVO	EXTENSIÓN ASOCIADA
Resultados de la dosificación base	rdb
Mezcla de prueba	mzp
Cálculo de rendimientos	rnd
Dosificación de campo por peso	dcp
Dosificación de campo por volumen	dcv

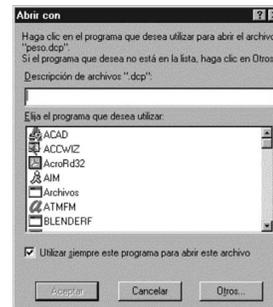
Tabla 3.1 Extensiones asociadas por tipo de archivo de resultados

Para abrir cualquiera de estos archivos, desde el Explorador de Windows seleccione el archivo en cuestión; al hacer clic secundario con el ratón, aparecerá un menú desplegable, en el cual deberá

seleccionar la opción Abrir con para que aparezca una ventana similar a la siguiente, dependiendo de su sistema operativo:

Figura 3.3 Abrir archivos de resultados

Seleccione algún programa de la lista; se recomienda utilizar el Bloc de notas, o algún otro editor de textos de su preferencia. Con este editor de textos se recomienda usar el tipo de letra *Courier New* tamaño 10. Puede activar la opción Utilizar siempre este programa... para que en sesiones posteriores abra el archivo directamente desde el Explorador de Windows haciendo doble clic. Los archivos generados por el programa también pueden ser abiertos en programas como *Word* y *Excel* para posibles modificaciones.



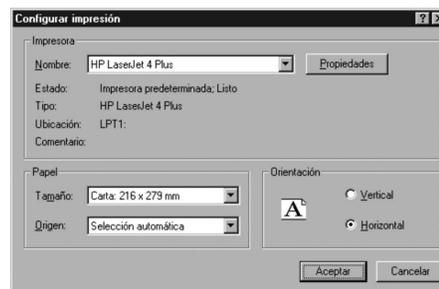
3.5. Impresión de resultados

Si desea mandar a la impresora alguno de los cálculos efectuados con el programa DM 1.0, seleccione la opción Imprimir del menú Archivo, y aparecerá una vista previa de los datos y resultados en pantalla. Antes de realizar esto, usted podrá seleccionar el tipo y tamaño de letra que prefiera para su impresión en papel, seleccionando el menú Fuente en la pantalla que visualiza las cuadrículas de resultados.

Estando en la Vista previa, seleccione Cancelar si desea modificar algún parámetro, o bien la opción Imprimir, con lo que aparecerá el cuadro de impresión correspondiente a la impresora que usted tenga instalada:

Figura 3.4 Cuadro de diálogo Configurar impresora

En este cuadro usted puede configurar las propiedades de impresión definitiva, es decir tamaño y orientación del papel, calidad de impresión, número de copias, etcétera. Se recomienda utilizar papel tamaño carta, con orientación horizontal, y tipo de letra Arial tamaño 8 para la impresión final. Lo anterior por la propia naturaleza y tamaño de las tablas generadas por el programa.



3.6. Uso de la ayuda

El programa sigue todas las convenciones del ambiente *Windows*, es decir, menús, iconos gráficos, teclas de acceso directo, etcétera. Puede disponer de *Ayuda en línea*, ya que al pulsar el botón derecho del ratón sobre cualquier control del programa se desplegará texto de ayuda correspondiente al contexto. También puede consultar el archivo de ayuda presionando la tecla *F1* desde cualquier parte del programa.

3.7. Desinstalación del programa

Para desinstalar *DM 1.0* permanentemente de su computadora, vaya al *Panel de control de Windows*; seleccione *Agregar o quitar programas*, y aparecerá una lista de los programas que tenga instalados en su ordenador. Busque *DM 1.0*, selecciónelo y haga clic en el botón *Agregar o quitar*, y siga las instrucciones en pantalla.

No obstante, podrá volver a instalar el programa en el momento que usted decida hacerlo.

CONCLUSIONES

El diseño de la mezcla es el proceso de selección de los componentes adecuados del concreto, determinando sus cantidades relativas con el propósito de producir un concreto económico, con ciertas propiedades mínimas, conveniente trabajabilidad, resistencia y durabilidad.

En el medio de la construcción en México se emplean diversos métodos de diseño de mezclas de concreto normal, incluso las empresas pre-mezcladoras han desarrollado su propia metodología, sobre todo para obtener el máximo ahorro en el consumo de cemento.

La mayoría de los métodos de dosificación se basan en dos procedimientos generales: la determinación del contenido de vacíos de los agregados combinados y mediante el empleo de factores empíricos. El diseño de mezclas por cualquiera de estos métodos es complicado y tedioso.

El uso de herramientas computacionales facilita el proceso de diseño de mezclas de concreto con grandes ventajas en ahorro de tiempo y en la evaluación de mezclas de concreto con diferentes características y costos de producción.

El programa desarrollado por profesores del Área de Construcción de la Universidad Autónoma Metropolitana tiene el propósito de auxiliar en la dosificación de mezclas de concreto mediante el empleo del Método del American Concrete Institute (ACI) por factores empíricos y el Método de Mínimos Vacíos descrito en el Manual de Tecnología del Concreto de la Comisión Federal de Electricidad.

REFERENCIAS

- Programa para diseño de mezclas de concreto normal DM 1.0, González, F, Cano, J. y Rocha, L., editado por la Universidad Autónoma Metropolitana, México, 2004.
- Proporcionamiento de mezclas - Concreto normal, pesado y masivo ACI 211.1, American Concrete Institute, Editorial Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México, 1993
- Manual de tecnología del concreto, Comisión Federal de Electricidad, Editorial Limusa, México, 1994