

CAPITULO II
DISEÑO DE MEZCLAS

2.1 Introducción

El concreto como lo conocemos actualmente es un material de construcción relativamente nuevo, propio del siglo XX vital para la construcción de edificaciones, grandes obras de ingeniería, e infraestructura urbana, sin embargo así como ha ido evolucionando el hombre el concreto también lo ha hecho, desde la época de los romanos hasta nuestros días.

Durante la época de los romanos se crearon concretos livianos utilizados por casi 800 años, los cuales estaban constituidos por rocas volcánicas porosas, para construir algunas estructuras, como el panteón o la iglesia de Santa María de los Mártires, que actualmente subsisten, más sin embargo este concreto aun era muy primitivo. Después de la caída del imperio romano, durante la edad media se olvida el uso de este material.

Es hasta el siglo XVIII que el concreto es redescubierto por los ingleses, cuando John Smeaton lo utilizó para la construcción del Faro de Adystone, en la costa sur de Inglaterra, pues observo que el mortero de cal ordinaria no se endurecería bajo el agua, por lo que no sería lo suficientemente durable para resistir las olas y descubrió que el mejor mortero provenía de las calizas con el más alto porcentaje de arcilla. Smeaton tuvo así la primera noción de los tiempos modernos acerca de los elementos que incrementan la resistencia de los morteros de cal y le permiten endurecerse bajo el agua.

Pero es hasta el siglo XVIII que el desarrollo del concreto como material de construcción empezó, poco después de la obtención de la patente del cemento Portland por parte de Joseph Aspin. Posteriormente el jardinero Joseph Monier francés inventó el concreto, quien construyo macetas y baldes de concreto y los reforzó con una malla de alambre de hierro. Ya para el siglo XX el uso de la relación agua-cemento y el aumento de la durabilidad con la inclusión de aire, fueron dos elementos que marcaron significativamente la tecnología del concreto, en base a estos elementos se inicio la investigación del concreto.

El concreto es un material artificial integrado por componentes, cemento, agua, aire y agregado. El agregado es el componente que predomina ya que constituye, más de las $\frac{3}{4}$ partes de su peso. El concreto es un material con la particularidad de ser, inicialmente y transitoriamente un mezcla plástica y cuya forma final es la de un sólido resistente.



Fig. 10. Aplicación de concreto convencional.

El concreto convencional, es un material resistente a la compresión, se considera que no soporta esfuerzos a tensión para efectos de cálculos. La resistencia del concreto se mide en kg/cm^2 y se representa por medio de $f'c$, generalmente variándose de 50 en 50 unidades, en construcciones comúnmente se llega a construir hasta con una resistencia $f'c$ 350 y 400 kg/cm^2 .

Por otra parte el concreto permeable es un concreto especial, el cual no deja de tener características similares al concreto convencional, con la única diferencia que se elimina parcialmente o completamente el agregado fino.

2.2 Materiales

El concreto permeable o poroso es un concreto hidráulico, sus características son similares al concreto simple, es un material artificial integrado por componentes, cemento o cementante, agua, aire y agregado grueso, despreciando al agregado fino. Esta combinación forma una aglomeración de agregado grueso rodeados por una delgada capa de pasta cemento endurecida en sus puntos de contacto.

Esta estructura permite la existencia de grandes huecos entre el agregado grueso, que permite el paso del agua por medio de él. El concreto permeable se considera un tipo especial de concreto poroso. Se clasifica en dos tipos:

- Concreto de agregado ligero, donde la porosidad se presenta en el componente del agregado de la mezcla.
- Concreto permeable, la porosidad en la mezcla no es debida a los agregados.

El primer tipo de concreto puede ser elaborado utilizando agregados naturales o sintéticos extremadamente porosos. Mientras que el concreto permeable tiene poco o nada de agregado fino en la mezcla.

Otra diferencia de estos dos tipos de concreto poroso se basa principalmente en la estructura de huecos que presenta, el concreto de agregado ligero contiene grandes porcentajes de huecos relativamente no conectados, sin embargo el concreto permeable,

contiene grandes porcentajes de huecos conectados entre sí, lo que permite el paso rápido del agua a través de la masa de concreto.

El concreto permeable se fabrica en las mismas plantas que el concreto convencional, además de no generar un costo adicional.

2.2.1 Cementante

El material cementante utilizado para la elaboración del concreto permeable, es el cemento Portland el cual debe satisfacer las normas ASTM C 150, ASTM C 595, ó ASTM C 1157, y tiene como función principal aglomerar las partículas gruesas. El cemento Portland puede ser sustituido por ceniza volante, cemento de escoria granulada y humo de sílice.

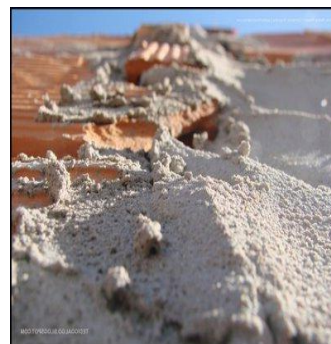


Fig. 11. Cemento portland el cual satisface las normas ASTM

“La ceniza volante es un conglomerado hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker portland, escoria de alto horno y usualmente sulfato de calcio. Por su parte el cemento de escoria regulado, es un conglomerado hidráulico de la molienda conjunta de clinker portland humo de sílice y usualmente sulfato de calcio. Finalmente el humo de sílice, es un conglomerado hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland y mayoritariamente escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio”¹, los cuales deben satisfacer los requisitos de las normas ASTM C 618, ASTM C 989, y ASTM C 1240, respectivamente, dando como resultado diferentes propiedades al concreto permeable y respondiendo a diferentes necesidades.

Es importante controlar la cantidad de material cementante agregado a la mezcla, debido a que una mayor dosis de cementante generará un concreto más resistente, pero ocasionará una disminución en el porcentaje de vacíos interconectado dentro del concreto, perdiendo su capacidad de infiltración. Para la correcta dosificación de material cementante es recomendable utilizar una cantidad que oscile entre los 270 a 415 kg/m^3 , según los requisitos de resistencia y permeabilidad.

¹ García Rivero, José Luis. *Manual técnico de construcción, Op. cit.*, pág. 77.

2.2.2 Agua

Dentro de la fabricación del concreto permeable, el agua es líquido que está presente de manera importante en la elaboración de la mezcla, en el lavado de agregados, curado y riego del concreto, por lo que debe ser un insumo limpio, libre de aceite, ácidos, álcalis, sales y en general de cualquier material que pueda ser perjudicial, según su utilidad. Por lo que la calidad del agua debe cumplir con la norma ACI 301.



Fig. 12. El agua utilizada para la elaboración del concreto permeable debe ser potable y libre de contaminantes

En cuanto a la dosificación, el concreto permeable debe ser proporcionado con una relación agua-cemento relativamente baja, ya que una cantidad excesiva de agua conducirá a drenar pasta y al atascamiento del sistema de poros. Por lo que la cantidad de agua agregada debe ser controlada y supervisada cuidadosamente.

2.2.3 Agregados

“Los agregados son elementos minerales que provienen de la naturaleza, procesados o artificiales, que se mezclan con un cementante o aglutinante hidráulico para fabricar morteros o concretos”².

Estos se clasifican en agregados gruesos y agregados finos, cabe mencionar que para la elaboración del concreto permeable el agregado fino es despreciable, por lo que se utiliza agregado grueso conocido comúnmente como grava, el cual puede ser natural o el obtenido de la trituración de roca o una combinación de ambas.

La granulometría del agregado utilizado debe de ser de tamaño uniforme, comúnmente estas deben cumplir con la norma ASTM C 33, en la cual se especifica que sólo pueden ser utilizados agregados de $\frac{3}{4}$ ” a $\frac{3}{8}$ ”.

En caso de utilizar “agregados redondeados y triturados deben de satisfacer los requisitos de la norma ASTM D 448 y ASTM C 33. Típicamente, los agregados finos

² *Ibidem*, pág. 83.

no deben ser usados en mezclas de concreto permeable, ya que estos tienden a comprometer la capacidad de conexión del sistema poroso”³.



Fig. 13



Fig. 14



Fig. 15



Fig. 16

Diferentes tipos de agregado grueso

2.2.4 Aditivos

Los aditivos son materiales diferentes al agua, de los agregados y del cemento, estos son agregados en menores cantidades y forman parte de los componentes del concreto, los cuales pueden ser agregados inmediatamente antes o durante el mezclado, interactuando con el sistema hidratante-cementante, mediante la acción física-química, que modifican una o más de las propiedades del concreto en sus etapas: fresco, fraguado, endurecimiento y endurecido. Los aditivos deben satisfacer los requisitos de la norma ASTM C 494.

Los aditivos se utilizan en el concreto permeable para los siguientes fines:

- Reductores de agua: reducir la cantidad de agua en el concreto modificando la velocidad de fraguado, así como su consistencia. Al utilizar estos aditivos se podrá reducir el contenido de cemento en proporción a la reducción del obtenido de agua, conservando así la misma relación agua/cemento, además de incrementar la resistencia debido a la eficiencia de hidratación de la reacción entre cemento y agua. Es recomendable utilizar este aditivo, por que el concreto permeable está en contacto constante con el agua.
- Aditivos retardantes: como su nombre lo indica retardan el fraguado del concreto, evitando agrietamiento por contracciones térmicas o por planeación en ciudades cuando se prevé tránsito pesado.
- Aditivos colorantes: dan color al concreto sin modificar las propiedades de la mezcla.

³ *Concreto permeable, Op. cit.*, pág. 9

- Aditivos inclusores de aire: originar aire en el concreto en forma de pequeñas burbujas, mejorando la manejabilidad y resistencia al congelamiento. Siempre se debe incluir en la mezcla cuando se conozca que la estructura recién colada, se deberá resistir muchos ciclos de congelación y deshielo, principalmente cuando se sabe que existirán agentes descongelantes.

Los aditivos retardadores se usan para estabilizar y controlar la hidratación del cemento, sobre todo en mezclas rígidas, como son las del concreto permeable especialmente, en clima cálido. Además actúan como lubricantes durante la descarga del concreto de la mezcladora, mejoran el manejo y desempeño en el lugar.

Los aditivos aceleradores pueden ser usados cuando se está colocando concreto permeable en climas fríos. Por otro lado los aditivos inclusores de aire no son utilizados comúnmente en concretos permeables, pero pueden ser usados en ambientes susceptibles a congelación y deshielo. Su uso no es muy recomendado debido a la poca experiencia y cuantificación de aire para agregar.

2.3 Diseño de un pavimento permeable

El concreto permeable es un material utilizado actualmente como pavimento, sus propiedades físicas son similares al pavimento rígido, por lo que es necesario considerar tres aspectos principales a utilizar:

- Tránsito vehicular
- Resistencia del concreto
- Características del terreno de apoyo

Cuando un pavimento se diseña se pretende siempre simular las condiciones de apoyo más especulativo, debiendo tomar en cuenta que el pavimento permeable será apoyado en el terreno natural del sitio ya preparado e incluso compactado, y la capa sub-base. De esta manera este conjunto quedará representado por un módulo de reacción combinado.

La resistencia de diseño se establecerá de acuerdo a la importancia de la obra, el volumen por producir, el equipo disponible, la capacidad técnica del contratista y la calidad de agregados y cemento.

El tránsito vehicular es determinado por estudios de aforos para así conocer la distribución de cargas y estimar de una manera más exacta el número de vehículos que circularán por la vialidad en la vida útil del proyecto. “Parámetro obligado en este tipo de estructuras y se refiere básicamente a la noción del servicio que la superficie de rodamiento debe prestar al paso de vehículos en un período determinado; durante este lapso, la estructura debe ofrecer una superficie segura y cómoda. Por otro lado, como las vialidades urbanas deben ser relativamente estables, dadas las características de las áreas a las cuales sirven, las vidas útiles que se deben contemplar son de 20 años como mínimo, aunque en el caso de pavimentos de concreto se recomienda sean en periodos más prolongados.”⁴.

Los factores que determinan el diseño del concreto permeable, son las características hidráulicas y mecánicas que se deseen en el sitio de instalación. Se deben seleccionar los materiales apropiados, el ancho del pavimento, entre otras características para cumplir los requisitos hidrológicos y de distribución de cargas generadas por el tráfico simultáneamente. Los análisis por separado tanto hidráulico, como estructural dan como resultado dos valores para el grueso de carpeta y el más grande de los dos valores será el grueso final del diseño.

2.4 Proporcionamiento de mezclas

Para el concreto permeable, la relación agregado-cemento y agua-cemento son las variables que afectan principalmente las características mecánicas. Por medio de investigaciones y pruebas en laboratorios se ha encontrado como aceptable un amplio rango de factores de cemento, dependiendo de la aplicación específica. Los aditivos afectan directamente la relación agua-cemento, ocupados para intervenir en la trabajabilidad y los tiempos de fraguado, con el fin de mejorar las características del concreto permeable y mejorar su durabilidad a largo plazo. La siguiente tabla muestra los rangos permisibles de proporcionamiento de materiales en el concreto permeable.

⁴ Salazar Rodríguez, Aurelio. Guía para el diseño de pavimentos rígidos, Instituto mexicano del cemento y del concreto, 2008, pág. 49.

Material	Rango
Materiales cementantes, kg/cm^3	270 a 415
Agregado, kg/cm^3	1190 a 1480
Relación agua-cemento, en peso	0.26 a 0.45
Relación agregado grueso-cemento, en peso	4 a 4.5:1
Relación agregado fino-agregado grueso, en peso	0 a 1:1

Tabla 1. Rangos recomendables de proporcionamiento de materiales en el concreto permeable ⁵

2.4.1 Relación agua-cemento

La relación agua-cemento determina la porosidad de la pasta de cemento endurecido en cualquier etapa de hidratación. Esta relación constituye un parámetro importante de la composición del concreto. Tiene influencia directa sobre la resistencia, durabilidad y retracción. Esta relación agua-cemento es el valor más importante de la tecnología del concreto, determinando la estructura interna de la pasta de cemento endurecida.

La relación agua-cemento es el cociente entre las cantidades de agua y de cemento existentes en el concreto fresco, es decir se calcula dividiendo la masa de agua por la del cemento contenidas en un volumen dado de concreto.

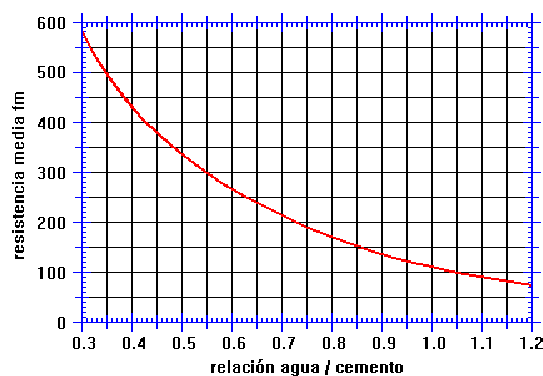
$$R = \frac{a}{c}$$

Donde:

R : Relación agua-cemento

a : Masa del agua del concreto fresco

c : Masa del cemento del concreto



Gráfica 2.1. Relación agua-cemento

⁵ <http://www.perviouspavement.org/mixture%20proportioning.htm>

La relación aumenta al incrementar la cantidad de agua y decrece al aumentar el contenido de cemento. En todos los casos, cuanto más baja es la relación agua-cemento son más favorables las propiedades de la pasta de cemento endurecida.

En el caso del concreto permeable el contenido óptimo de agua produce una pasta de cemento muy húmeda con una alta viscosidad. Esta mezcla tendrá la apariencia de brillo de un metal mojado o brillante. Utilizando una cantidad insuficiente de agua dará como resultado una mezcla sin consistencia y con baja resistencia. Una cantidad excesiva de agua, generará una pasta que sellará los vacíos de la mezcla, además de desplazar el cemento dejando expuesto al agregado. Produciendo una baja resistencia al desgaste superficial.

La relación agua-cemento depende principalmente de las características de granulometría y físicas de los agregados gruesos y del contenido de materiales cementantes de la mezcla. Para el concreto permeable, la relación agua-cemento debe variar en el rango de 0.26 a 0.45.

2.4.2 Relación agregado-cemento

La relación agregado-cemento comúnmente varía entre 4:1 a 4.5:1, pero ésta depende fundamentalmente del tipo de agregado. Tanto la relación agua-cemento y la relación agregado-cemento deben satisfacer las características de permeabilidad, capacidad de carga y durabilidad.

2.4.3 Contenido de agregado grueso

Las pruebas de peso unitario seco-compactado de agregado grueso (b/b_0) hecho por la National Aggregates Association – National Ready Mixed Concrete Association, muestra que el peso unitario seco-compactado del agregado grueso determinado de acuerdo con la norma ASTM C 29 puede usarse en el proporcionamiento del concreto permeable.

Donde:

$$\frac{b}{b_0} = \text{volumen seco compactado de agregado grueso por unidad de volumen de concreto}$$

b : volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

b_0 : volumen de agregado grueso por unidad de volumen de agregado grueso.

El valor b/b_0 automáticamente se compensa por los efectos de las diferentes formas de las partículas de los agregados, la graduación o tamaño, y el peso específico. Además, para un rango de agregados de tamaño máximo nominal normalmente usados para concreto permeable (3/8" a 3/4") los valores b/b_0 son muy similares. La tabla muestra los valores de b/b_0 para agregado grueso de tamaños No. 8 (3/8") y No. 67 (3/4") para un contenido de agregado fino de 0%, 10% y 20% del total de agregado.

Porcentaje de agregado fino (%)	b/b_0	
	No. 8 (3/8")	No. 67 (3/4")
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

Tabla 2. Valores efectivos b/b_0 (ACI 211.3R, 1998)

2.3.4 Procedimiento de proporcionamiento

El procedimiento para el proporcionamiento de mezclas para concreto permeable se basa en el volumen de pasta necesario para mantener unida las partículas de agregado, mientras se mantiene la estructura de vacíos necesaria. La proporción de agregado depende del peso unitario seco compactado y de los valores de b/b_0 de la tabla 2. Ya determinado el volumen de pasta con ayuda de la gráfica 1, se selecciona la relación agua-cemento, determinando los pesos del agua y del cemento por metro cúbico de acuerdo con las siguientes relaciones⁶:

$$\text{Volumen de pasta} = \text{volumen de cemento} + \text{volumen de agua}$$

O bien:

$$\text{Volumen de pasta} = \left(\frac{c}{\text{peso específico del cemento}} \right) + \left(\frac{a}{\text{peso específico del agua}} \right)$$

Considerando que el peso específico del cemento y agua es 3.15 y 1, respectivamente se tiene:

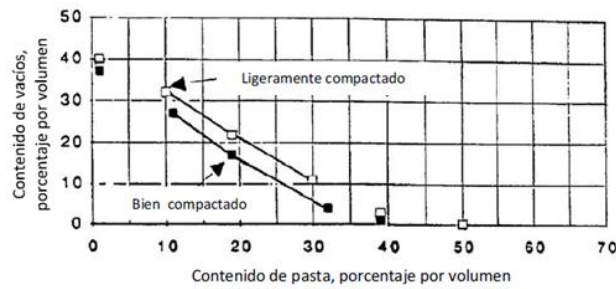
$$\text{Volumen de pasta} = \left(\frac{c}{3.15 * 1000} \right) + \left(\frac{a}{1000} \right)$$

⁶ Pérez Ramos, Daniel, "Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos", tesis de maestro en Ingeniería Civil-Construcción, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2009, p. 26.

Donde, **c** es el peso del cemento y **a** es el peso del agua, si la relación agua-cemento es (a/c) entonces:

$$a = \left(\frac{a}{c}\right) c, \text{ y}$$

$$\text{Volumen de pasta} = \left(\frac{c}{3.15 * 1000}\right) + \left(\frac{\left(\frac{a}{c}\right) c}{1000}\right)$$



Gráfica 2.1. Relación entre el contenido de vacíos y contenido de pasta para agregado de 3/8"⁷

2.3.5 Ejemplo

Se requiere determinar el proporcionamiento para una mezcla de concreto permeable bien compactada, con agregado de 3/8" que tiene un peso volumétrico seco-compactado de 1741.21 kg/m^3 y una absorción de 1.2%. La mezcla debe tener un porcentaje de vacíos de 20% y una resistencia a la compresión de 150 kg/cm^2 a los 28 días. El concreto permeable debe ser proporcionado para una relación agua-cemento (a/c) de 0.40. La mezcla no contendrá agregado fino. El peso específico (SSS) del agregado grueso No. 8 es de 2.70.

Datos:

Relación agua-cemento = 0.40

Porcentaje de vacíos = 20%

Resistencia a la compresión = 150 kg/cm^2

Peso específico del cemento = 3.15

Peso volumétrico seco-compactado de la grava 3/8" = 1741.21 kg/m^3

Peso específico de la grava = 2.70

Absorción de la grava = 1.2%

⁷ Norma ACI 211.3R 1998

Solución:

Con ayuda de la gráfica 2. Se determina el volumen de pasta para un 20% de vacíos para la mezcla de concreto permeable bien compactada, dando como resultado 16.5%.

Por lo tanto,

$$\text{Volumen de pasta (Vp)} = 0.165$$

$$\text{Volumen de vacíos (Vv)} = 0.2$$

$$0.165 + 0.2 = 0.365$$

$$\text{Volumen de grava (Vg)} = 1 - 0.365 = 0.635 \text{ m}^3$$

$$0.635 = \frac{g}{2.75 * 100}$$

$$g = \text{peso del agregado, en kg; } g = 1746.25 \text{ kg}$$

$$\text{Por otro lado: } Vp = Vc + Va$$

Por lo tanto,

$$0.165 = \frac{c}{3.15 * 1000} + \frac{(a/c)c}{1000}$$

Donde:

c = peso del cemento, en kg

a/c = relación agua-cemento

Por lo tanto,

$$0.165 = \frac{c}{3.15 * 1000} + \frac{0.40c}{1000}$$

$$c = 229.97 \text{ kg}$$

Para determinar el volumen de cemento (Vc), se tiene que:

$$Vc = \frac{c}{3.15 * 1000} = \frac{229.97}{3.15 * 1000} = 0.073 \text{ m}^3$$

Para determinar el contenido de agua,

$$a = (a/c) c$$

$$a = 0.40 c$$

$$a = 0.40 (229.97)$$

$$a = 91.98 \text{ kg}$$

Para determinar el volumen de agua (Va),

$$Va = \frac{a}{1000} = \frac{91.98}{1000} = 0.092 \text{ m}^3$$

En la siguiente tabla se muestran los pesos y volúmenes por m^3

Material	Pesos en kg	Volúmenes en m³
Cemento	229.97	0.073
Grava	1746.25	0.635
Agua	91.98	0.090
Total	2068.2	0.798

Para confirmar el porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ de vacíos} = (1 - 0.798) \times 100 = 20\%$$

Las proporciones de la mezcla anteriormente calculada deben ser verificadas por medio de pruebas de laboratorio, para realizar los ajustes necesarios hasta encontrar las propiedades requeridas del concreto.