

**UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E
INGENIERÍA**

***DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL
CONCRETO PERMEABLE EMPLEANDO
DIFERENTES ADITIVOS***

**ANGEL EDUARDO LÓPEZ FERNÁNDEZ
DAVID FELIPE PAZ CASAS**

DIRECTORES DE TESIS

**DR. FRANCISCO JAVIER OLGUÍN COCA
DRA. LILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA**

PACHUCA DE SOTO HIDALGO A 07 DE AGOSTO DEL 2014

Contenido

Resumen.....	9
Introducción	10
1. CAPITULO I GENERALIDADES.....	11
1.1. Antecedentes	11
1.2. Concreto permeable	13
1.3. Problemática	15
1.4. Justificación	15
1.5. Objetivo general.....	16
1.6. Objetivos particulares	16
1.7. Hipótesis.....	16
1.8. Alcances.....	17
2. CAPITULO II MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. Concreto.....	18
2.1.1. Clasificación según consistencia.....	18
2.1.2. Tipos de concreto según fluidez.....	18
2.1.3. Clasificación según resistencia a la compresión.....	19
2.2. Tipos de curado	20
2.2.1. Inundación o inmersión.....	22
2.2.2. Curado con vapor	22
2.3. Cemento.....	25
2.3.1. Clasificación según su procedencia.....	31
2.3.2. Clasificación según su densidad	32
2.4. Agregado grueso	32
2.5. Agregado Fino	33
2.6. Agua.....	35
2.6.1. Agua de lavado de agregados	35
2.6.2. Agua de mezclado	35
2.6.3. Agua de curado	36
2.6.4. Calidad del agua	37
2.6.5. Efecto de las impurezas en el agua de mezcla	37
2.7. Aditivos.....	39

2.8.	Humo de Sílice.....	40
2.8.1.	Origen	40
2.8.2.	Propiedades químicas	40
2.8.3.	Actividad puzolánica	42
2.8.4.	Propiedades físicas.....	43
2.9.	PET (<i>polyethylene terephthalate</i>),.....	45
2.10.	Escoria metálica	45
2.11.	Principales tipos de pavimentos	46
2.11.1.	Pavimento rígido	46
2.11.2.	Pavimento flexible.....	46
2.11.3.	Ventajas del concreto permeable	46
2.11.4.	Aplicaciones.....	47
3.	CAPITULO III METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	49
3.1.	Análisis mecánico de los agregados	49
3.1.1.	Prueba granulométrica.....	49
3.1.2.	Prueba de peso volumétrico	53
3.1.3.	Prueba de contenido de humedad.....	55
3.1.4.	Relación agua/cemento	56
3.1.5.	Diseño de dosificación.....	58
3.1.6.	Nomenclatura para especímenes	62
3.1.7.	Elaboración de mezclas	64
3.2.	Equipo empleado	69
3.3.	Aditivos.....	73
3.3.1.	PET.....	73
3.3.2.	Escoria metálica	74
3.3.3.	Humo de sílice	75
3.4.	Evaluación del concreto permeable.....	75
3.4.1.	Resistencia a la compresión	75
3.4.2.	Contenido de vacíos	79
3.4.3.	Permeabilidad	80
4.	CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	82
4.1.	Propiedades mecánicas de los agregados.....	82

4.1.1.	Resultado de granulometría.....	82
4.1.2.	Resultados peso volumétrico	84
4.1.3.	Resultados contenido de humedad	84
4.2.	Características de los especímenes.....	84
4.2.1.	Por aditivos.....	90
4.2.1.1.	Sin Aditivo.....	90
4.2.1.2.	PET.....	93
4.2.1.3.	Escoria	96
4.2.1.4.	Humo de Sílice 10%.....	99
4.2.1.5.	Humo de sílice 15%	102
4.2.1.6.	Humo de sílice 20%	105
4.2.2.	Relación de Aditivos	108
4.3.	Discusión	112
5.	CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
5.1.	CONCLUSIONES	115
5.2.	RECOMENDACIONES	116
	Bibliografía	118

Índice de figuras

Fig. 1.1 Disponibilidad de agua en el mundo	11
Fig. 1.2 Grado de presión sobre el recurso hídrico	12
Fig. 1.3 Zonas de veda para la extracción de aguas subterráneas	13
Fig. 2.1 Cemento	25
Fig. 2.2 Agregado grueso	32
Fig. 2.3 Agregado fino	34
Fig. 3.1 Selección del agregado de manera que la muestra sea representativa de la pila	51
Fig. 3.2 Selección de tamices normados por la ASTM E11-09, 2009.....	51
Fig. 3.3 Cribado de los agregados por medio de diferentes tamices	52
Fig. 3.4 Tara con agregado grueso	54
Fig. 3.5 Pesado del material para la determinación del peso volumétrico.....	55
Fig. 3.6 Preparación de los agregados para el diseño de la mezcla	58
Fig. 3.7 Pesaje del material cementante empleado para la elaboración del concreto poroso	64
Fig. 3.8 Aplicación de aceite a probetas.....	65
Fig. 3.9 Elaboración de mezcla utilizando revolvedora de un saco.....	66
Fig. 3.10 Llenado y compactado de cilindros	67
Fig. 3.11 Desmolde de concreto permeable	67
Fig. 3.12 Probetas en la cámara de curado acelerado	68
Fig. 3.13 Probetas de concreto permeable	69
Fig. 3.14 Balanza 20 Kg. utilizada para pesar material.....	70
Fig. 3.15 Pisón usado para compactado de mezcla	70
Fig. 3.16 Tamices para cribar agregado grueso y fino.....	71
Fig. 3.17 Olla para fundir azufre utilizado en el cabeceo de probetas.....	71
Fig. 3.18 Prensa para tronado de cilindros.....	72
Fig. 3.19 Prensa para tronado de vigas	72
Fig. 3.20 Cámara de curado acelerado.....	73
Fig. 3.21 PET en tiras para agregarlo a la mezcla	74
Fig. 3.22 Escoria metálica	74
Fig. 3.23 Humo de sílice	75

Fig. 3.24 Probetas de ensayo con mezclas de concreto poroso normal y modificadas con escoria y PET.....	76
Fig. 3.25 Desmolde de probetas que serán sujetas a curado a 7, 14 y 28 días para su posterior tronado.....	76
Fig. 3.26 Curado de cilindros a 7 días, en cubetas de capacidad de 20 lts	77
Fig. 3.27 Cabeceo de cilindros con azufre	78
Fig. 3.28 Ensayo de probetas en prensa para prueba de resistencia a la compresión	78
Fig. 3.29 Falla a 45° después de aplicarse una carga	79
Fig. 3.30 Determinación del contenido de vacíos	79
Fig. 3.31 Prueba de permeabilidad	80
Fig. 3.32 Permeabilidad en losa	81

Índice de Gráficas.

Gráfica 2.1 Resistencia del concreto de acuerdo al tipo de curado.....	21
Gráfica 2.2 Ciclo de curado a vapor	24
Gráfica 2.3 Relación entre la resistencia a la compresión, la edad del concreto en días y el contenido de humo de sílice (HS)	44
Gráfica 2.4 Relación entre la resistencia a la tensión por flexión, el contenido de humo de sílice (HS) y la relación agua/cemento (A/C).....	44
Gráfica 3.1 Curva de resistencia a la compresión debido a la relación agua/cemento	56
Gráfica 4.1 Granulometría del agregado.....	83
Gráfica 4.3 Porosidad	87
Gráfica 4.4 Permeabilidad	89
Gráfica 4.5 Resistencia y permeabilidad sin aditivo.....	91
Gráfica 4.6 Resistencia vs porosidad sin aditivo	92
Gráfica 4.7 Resistencia vs porosidad sin aditivo	93
Gráfica 4.8 Resistencia vs permeabilidad PET.....	94
Gráfica 4.9 Resistencia vs porosidad PET	95
Gráfica 4.10 Permeabilidad vs porosidad PET.....	96
Gráfica 4.11 Resistencia vs permeabilidad escoria	97
Gráfica 4.12 Resistencia vs porosidad escoria	98
Gráfica 4.13 Permeabilidad vs porosidad escoria	99
Gráfica 4.14 Resistencia vs permeabilidad sílice 10%.....	100
Gráfica 4.15 Resistencia vs porosidad sílice 10%	101
Gráfica 4.16 Permeabilidad vs porosidad 10%.....	102
Gráfica 4.17 Resistencia vs permeabilidad sílice 15%.....	103
Gráfica 4.18 Permeabilidad vs porosidad sílice 15%.....	104
Gráfica 4.19 Permeabilidad vs porosidad sílice 15%.....	105
Gráfica 4.20 Resistencia vs permeabilidad sílice 20%.....	106
Gráfica 4.21 Resistencia vs porosidad 20%	107
Gráfica 4.22 Permeabilidad vs porosidad 20%.....	108
Gráfica 4.23 Resistencia & permeabilidad	110
Gráfica 4.24 Resistencia & porosidad	111

Gráfica 4.25 Permeabilidad & porosidad 112

Índice de tablas

Tabla 2.1 Clasificación del concreto por su consistencia	18
Tabla 2.2 Clasificación de acuerdo a su resistencia	20
Tabla 2.3 Composición química del clinker de cemento Portland	27
Tabla 2.4 Fases mineralógicas que componen el clinker de cemento Portland	27
Tabla 2.5 Clasificación del cemento en México	28
Tabla 2.6 Características especiales del concreto	28
Tabla 2.7 Clasificación del cemento por su resistencia	29
Tabla 2.8 Componentes de los cementos	29
Tabla 2.9 Requisitos de los componentes principales	30
Tabla 2.10 Especificaciones físicas	30
Tabla 2.11 Especificaciones químicas	30
Tabla 2.12 Especificaciones de los cementos con características especiales	31
Tabla 2.13 Límites granulométricos para el agregado grueso	33
Tabla 2.14 Límites granulométricos para el agregado fino	34
Tabla 2.18 Composición química del humo de sílice	42
Tabla 3.1 Procedimiento para la determinación de la granulometría de una muestra	50
Tabla 3.2 Cantidad de agregados gruesos que pasan por la diferentes mallas	53
Tabla 3.3 Porcentaje de material retenido	53
Tabla 3.4 Dosificación y propiedades del concreto poroso	59
Tabla 3.5 Dosificación obtenida por método ACI 211 modificado	60
Tabla 3.6 Primera modificación para mejorar las propiedades el concreto	61
Tabla 3.7 Segunda modificación para mejorar las propiedades el concreto	61
Tabla 3.8 Tercera modificación para mejorar las propiedades el concreto	61
Tabla 3.9 Dosificación final para el concreto permeable	61
Tabla 3.10 Nomenclatura para aditivos adicionados a la mezcla	62
Tabla 3.11 Relación de probetas con descripción	63
Tabla 4.1 Granulometría del agregado grueso	82
Tabla 4.2 % Retenidos del agregado grueso utilizados en la mezcla	83
Tabla 4.3 Identificación por colores según aditivo	108

Resumen

El pavimento permeable es una alternativa de la ingeniería civil diseñada principalmente para favorecer la infiltración del agua de lluvia hacia el subsuelo. El objetivo de este trabajo es caracterizar el concreto permeable empleando distintos tipos de aditivos y comprobar si existe mejora en las propiedades. Se determinaron las características del concreto permeable a partir del análisis de sus componentes para lograr mayor desempeño en cuanto a su resistencia a la compresión según la norma NMX-C-083-ONNCE-2002, 2002, permeabilidad y contenido de vacíos. Se realizaron especímenes sin aditivo, el cual sirvió como punto de comparación contra los especímenes con aditivos utilizados en este trabajo de investigación: PET (polyethylene terephthalate), escoria y humo de sílice.

Se practicaron pruebas de laboratorio en los agregados para conocer la calidad de los materiales tales como peso volumétrico, contenido de humedad, granulometría y absorción, con los cuales se elaboró el diseño de la mezcla. Con los diseños de mezclas obtenidos se realizaron los diferentes especímenes, los cuales fueron evaluados de acuerdo con las características mecánicas del concreto. La mayor resistencia a la compresión se reporta en los especímenes que presentan como aditivo humo de sílice con un valor de 219.56 kg/cm², y una permeabilidad de 23.93 ml/seg pudiendo ser ocupado de forma práctica en vialidades urbanas secundarias tales como calles de fraccionamiento de acuerdo a la normativa aplicable de la AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials.*)

Palabras claves: Concreto permeable, propiedades mecánicas, contenido de humedad, PET, escoria, humo de sílice.

Introducción

Los concretos permeables tienen sus inicios en Europa en el siglo XIX, comenzando en México, su aplicación inicio en 1994, a través de la colocación principalmente cerca de áreas verdes para aprovechar los escurrimientos pluviales. Posteriormente se usaron en áreas de estacionamiento, banquetas, calles con tránsito ligero desde Chiapas hasta Nuevo León; en el DF es usado en andadores y estacionamientos. (Flores Prieto, 2010)

Los concretos permeables están compuestos por cemento, agregado grueso y agua, al no contar con arena esos espacios que eran ocupados por este material se convierten en vacíos que son ocupados por agua y aire, esto hace un concreto más ligero que permite la infiltración de agua hacia el subsuelo. Este tipo de concreto ha sido empleado en lugares de bajo tráfico y lamentablemente sus aplicaciones aún son limitadas, día a día se ha ido avanzando en nuevas investigaciones para poder incrementar el uso de estas mezclas.

Parte de las ventajas que presenta este concreto es su porosidad, la cual permite que las aguas pluviales se filtren al subsuelo produciendo la recarga de mantos acuíferos. Para poder lograr este proceso de permeabilidad debe existir una adecuada relación de espacios vacíos y resistencia.

El objetivo de este estudio consistió en obtener la resistencia máxima a la compresión de un concreto permeable para vialidades secundarias, conservando su capacidad para permitir la infiltración del agua que escurra sobre éste.

1. CAPITULO I GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

El planeta está compuesto por el 75% de agua de la cual el 2.53% es agua dulce apta para consumo humano (UNESCO, 2003). Debido a la poca disponibilidad (Fig. 1.1) que se tiene y a los malos manejos del recurso hídrico, el mundo sufre la escasez de este vital líquido. Entre las causas de la escasez del agua están el aumento de la población mundial, el uso indiscriminado, la contaminación, la degradación del medio ambiente y las reservas hídricas (El Clarín, 2000).

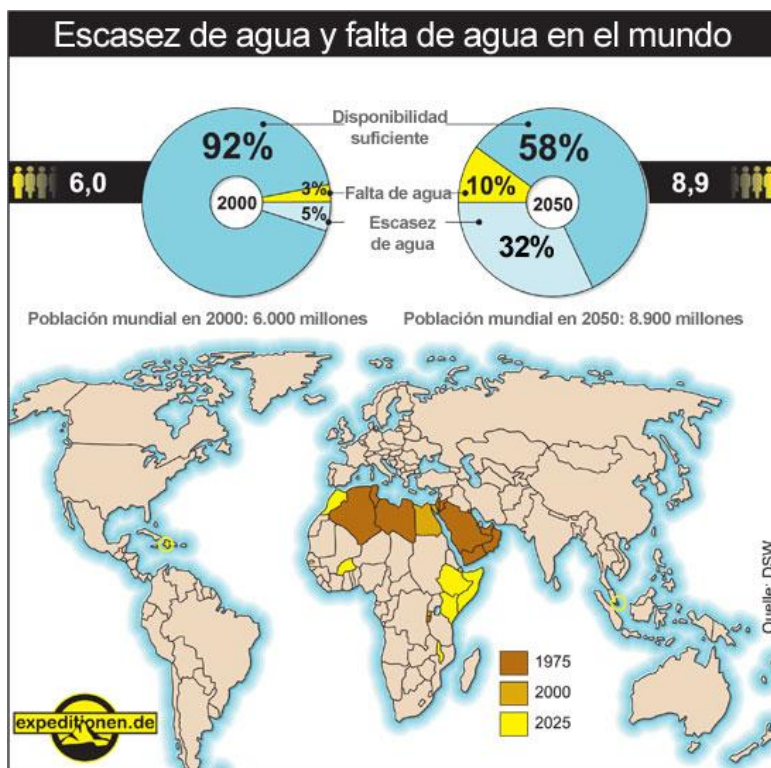


Fig. 1.1 Disponibilidad de agua en el mundo. (Mata, 2008)

Debido al crecimiento de la población en la mayor parte del mundo, requiere ser ocupados espacios de tierra que son destinados para construcciones, esto conlleva cubrir de concreto o asfalto áreas naturales que permiten ser un pulmón para las grandes civilizaciones, a través de la recolección de agua pluvial, donde principalmente se tiene un grado de presión alto en la zona norte y parte centro de la República Mexicana pero destacando la gran presión en la capital del país donde se encuentra el nivel más alto de presión sobre este líquido vital como se muestra en la Fig. 1.2.

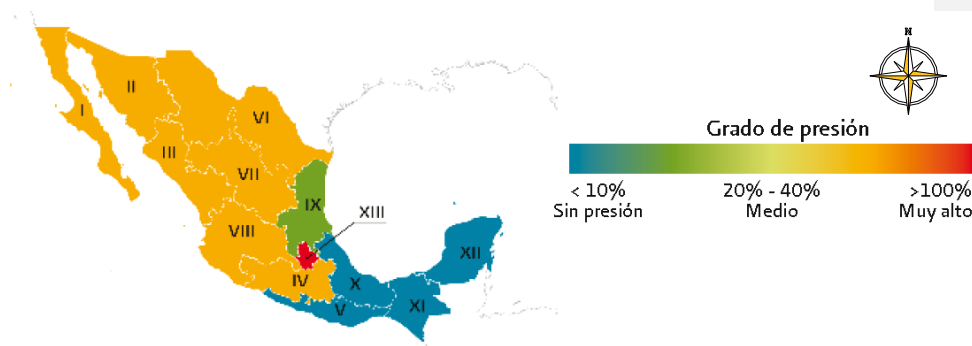


Fig. 1.2 Grado de presión sobre el recurso hídrico (Comisión Nacional del Agua, 2011)

Existen datos de disponibilidad global de agua que indican que en el año de 1970 era de 13 mil metros cúbicos per cápita y para el año 2004 disminuyó a 6 mil ochocientos metros cúbicos; se tiene estimado que para el año 2025 la disponibilidad será de 4 mil ochocientos metros cúbicos per cápita. (Subramania, 2008)

En México, la situación de escasez de agua potable es la misma, en algunas comunidades y colonias tienen restringido este servicio por varias semanas o hasta meses y en otras definitivamente no cuentan con él, pues existen lugares donde se ha decretado zona de veda, imposibilitando la extracción del agua mediante pozos de agua subterránea (Fig. 1.3).

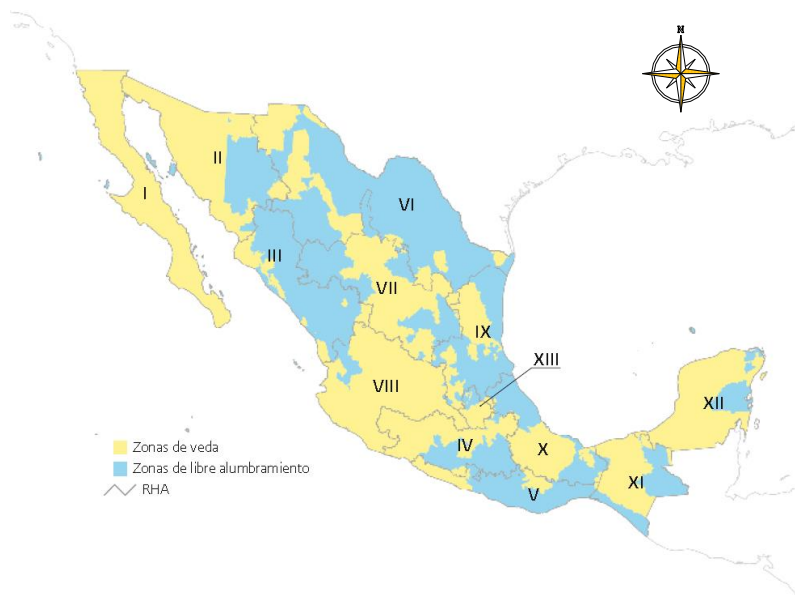


Fig. 1.3 Zonas de veda para la extracción de aguas subterráneas (Comisión Nacional del Agua, 2011)

Además, la principal forma de obtener agua en el país es la extracción del subsuelo y la mayoría de la gente no tiene conciencia que este recurso no es ilimitado. Por tal motivo, se debe hacer conciencia y realizar programas para minimizar el daño causado y previniendo que se agote el líquido vital antes de que sea irreversible.

1.2. Concreto permeable.

La primera aplicación que se conoce del empleo del concreto ecológico, data de 1852 en el Reino Unido, donde se elaboraron dos viviendas utilizando únicamente una mezcla de agregado grueso, cemento y agua (Ghafoori, 1995).

Este tipo de concreto se mantuvo aislado durante 70 años aproximadamente, hasta que volvió a ser empleado en la construcción de más viviendas en el año de 1923 en algunas partes de Europa; pudiendo emplearse hasta finales de 1942. Para los años de 1945 a 1950 se comenzaron a realizar experimentos de este tipo de concreto y poder ser usados como pavimentos en distintas vías de comunicación. (Ghafoori, 1995)

El concepto de concretos permeables o también conocidos como concretos porosos contradicen completamente los principios de características de homogeneidad y de rigidez así como de resistencia que habitualmente presentan los concretos tradicionales. Sin embargo para la década de 1970 se retomó el interés a este tipo de pavimentos, con la finalidad de poder brindar mayor seguridad a los usuarios permitiendo la filtración de las aguas pluviales y reduciendo el índice de accidentes causados por las lluvias (Ghafoori, 1995).

Los primeros antecedentes que se tienen registrados del uso de concretos permeables como una superficie de rodamiento son de zonas de Japón en 1974, posterior a ello tomo importancia y se expandió a algunas partes de Europa particularmente Francia (Ghafoori, 1995).

El empleo de algunos materiales que sirvan como plastificantes han sido empleados principalmente en Europa, este uso de materiales como betunes, polímeros, neumáticos reciclados, aditivos o algunas celulosas tienen como función la de ser ligantes en la mezcla del concreto permeable y evitar deslizamientos, más que para el incremento de la resistencia de este concreto (Ghafoori, 1995).

Esta mezcla se caracteriza principalmente por la ausencia de agregados finos logrando con esta situación una configuración en su estructura que permite algunas ventajas de funcionalidad como lo es el comportamiento de libre circulación de los líquidos. Una de las primeras aplicaciones que se tuvieron empleando este tipo de concreto son las banquetas.

1.3. Problemática

Debido al uso irracional del agua por parte del ser humano principalmente en zonas urbanas, se sobreexplotan los mantos acuíferos para cumplir la demanda de agua de los seres humanos.

1.4. Justificación

En México las vialidades son construidas bajo métodos constructivos tradicionalistas (carpeta asfáltica y losas de concreto rígido), las cuales impiden el paso del agua hacia el subsuelo; dejando así a los mantos acuíferos sin poderse recargar y creando de esta manera el problema de la escasez del agua. Sin embargo, al paso del tiempo se han desarrollado nuevas tecnologías, las cuales no se han explotado adecuadamente. Tal es el caso del concreto permeable. En la actualidad el empleo de este tipo de mezcla se encuentra limitado a solo la fabricación de banquetas, bloques ornamentales para los jardines de las casas, andadores y pasillos peatonales pudiendo ser empleado en gran escala como en vialidades, ya que por ellas escurren grandes cantidades de agua, las cuales son conducidas a los sistemas de alcantarillado, desperdiciando esta agua que podría ayudar a las actividades humanas.

En nuestros días en gran parte del país se carece de agua, por eso se busca abatir el problema del inadecuado aprovechamiento del agua de lluvia antes de que en algunos años el daño sea irreversible. Prueba de esto es en algunos países donde se comercializan bonos de agua como son Colombia y Chile donde el servicio del agua se encuentra capitalizado por un grupo financiero de infraestructura para garantizar el servicio de agua potable a la sociedad, siendo este un panorama de lo que se espera en un futuro de no tomar alguna medida (Urrea & Cárdenas, 2011).

1.5. Objetivo general

Caracterizar el comportamiento de la resistencia y la permeabilidad de un concreto permeable empleando aditivos, para determinar su uso práctico de acuerdo con las características de resistencia y permeabilidad mediante pruebas de tronado de cilindro, a través de las cuales se calculará su resistencia a la compresión y pruebas empíricas de permeabilidad.

1.6. Objetivos particulares

- Determinar las características mecánicas de los materiales empleados en el agregado grueso para determinar si cumplen las especificaciones establecidas en normas oficiales.
- Diseñar la mezcla con agregado grueso para obtener una dosificación que cumpla con la resistencia mínima para su uso en vialidades secundarias.
- Diseñar la mezcla con agregado grueso incluyendo aditivos como el PET (polyethylene terephthalate), escoria metálica y humo de sílice para obtener una dosificación que permita la mejor infiltración.

1.7. Hipótesis

El concreto permeable cumple con la resistencia adecuada para su uso en vialidades secundarias permitiendo la infiltración del agua que escurre sobre éste.

La resistencia a la compresión del concreto permeable es mayor con el uso de humo de sílice utilizando una granulometría fina.

1.8. Alcances

Diseñar una mezcla que cumpla con los requerimientos necesarios para poder ser empleada en la construcción de pavimentos en zonas urbanas con bajo tránsito.

2. CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1. Concreto

El concreto es un material de uso común en la construcción, este se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales en algunas ocasiones se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo. (Torre Carrillo, 2004)

La mezcla de estos componentes produce una masa plástica que puede ser moldeada con facilidad cuando el concreto permanece en estado fresco, gradualmente se pierde esta característica hasta que finalmente adquiere el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido por las reacciones químicas de sus componentes. (Torre Carrillo, 2004)

2.1.1. Clasificación según consistencia

La consistencia de un concreto o un mortero se refiere a su estado de fluidez, es decir, qué tan dura (seca) o blanda (fluida) es la mezcla cuando se encuentra en estado fresco, por lo cual se dice que es el grado de humedad de la mezcla. (Sánchez De Buen, 2001)

2.1.2. Tipos de concreto según fluidez

El método para caracterizar la fluidez del concreto, es la prueba de revenimiento, medido mediante el cono de Abrams. La consistencia de un concreto se determina a partir de ésta prueba, por lo tanto, la clasificación del concreto según su consistencia en estado fresco depende de: el tamaño de la sección que se va a construir y la cantidad y espaciamiento del acero de refuerzo, las condiciones de colocación de la mezcla, y el sistema de compactación (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Clasificación del concreto por su consistencia.(IMCYC, 2011)

Clasificación	Tipo	Usos	Beneficios	Información Técnica
Por su consistencia	Fluido	<ul style="list-style-type: none"> • Rellenos • Estructuras con abundante acero de refuerzo • Bombeo a grandes alturas 	<ul style="list-style-type: none"> • Facilita las operaciones de colocación y acabado • Facilita las operaciones de bombeo • Propicia el ahorro en mano de obra 	<ul style="list-style-type: none"> • Revenimiento superior a 19 cm, es decir tiene una consistencia fluida • Resistencia a la compresión igual a las logradas por los concretos convencionales.
	Normal o convencional	<ul style="list-style-type: none"> • Todo tipo de estructuras de concreto 	<ul style="list-style-type: none"> • Tener una consistencia de mezcla adecuada para cada uso de estructura, en atención a su diseño 	<ul style="list-style-type: none"> • Revenimiento entre 2.5 y 19 cm, lo cual considera las zonas de consistencia semi-fluida /12.5 a 19 cm, plástica / 7.5 a 12.5 cm, semi-plástica 2.5 a 7.5 cm • Resistencia a la compresión igual a las logradas por los concretos convencionales
	Masivo	<ul style="list-style-type: none"> • Colados en elementos de gran dimensión 	<ul style="list-style-type: none"> • Ahorro en materia prima y mano de obra • Bajo desarrollo en el calor de hidratación 	<ul style="list-style-type: none"> • Revenimiento entre 2.5 y 5 cm • Resistencia a la compresión igual a las logradas por los concretos convencionales
	Sin revenimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Concretos que no se colocan bajo los métodos convencionales empleados en la industria de concreto premezclado 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo consumo de cemento. • Facilita las operaciones de colocación 	<ul style="list-style-type: none"> • Revenimiento máximo de 2.5 cm • Resistencia a la compresión máximas de 150 kg/cm²

2.1.3. Clasificación según resistencia a la compresión

Teniendo en cuenta que la resistencia mecánica a la compresión es la principal característica de las mezclas de cemento Portland hidráulico en estado endurecido, existe una clasificación desde este punto de vista (Tabla 2.2).

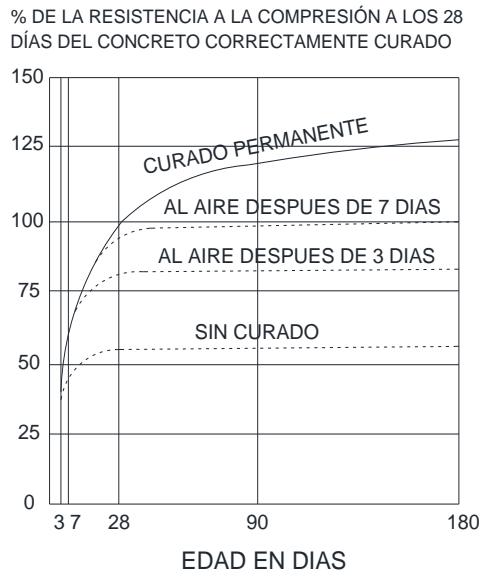
Los concretos que normalmente se utilizan en las construcciones, tienen una resistencia a la compresión a 28 días de edad comprendida entre 7 MPa (70 kg/cm²) y 42 MPa (420 kg/cm²); entre estos valores, el más empleado por las construcciones fundidas “in situ”, es el de 21 MPa (210 kg/cm²). (Sánchez De Buen, 2001)

Tabla 2.2 Clasificación de acuerdo a su resistencia (IMCYC., 2011)

Clasificación	Tipo	Usos	Beneficios	Información Técnica
Por su resistencia	Baja Resistencia	<ul style="list-style-type: none"> • Losas aligeradas o Elementos de concreto sin requisitos estructurales 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Propiedades en estado fresco similares a las obtenidas en concretos convencionales • Resistencia a la compresión < 150kg/cm².
	Resistencia moderada	<ul style="list-style-type: none"> • Edificaciones de tipo habitacional de pequeña altura 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Propiedades en estado fresco similares a las obtenidas en concretos convencionales • Resistencia a la compresión entre 150 y 250 kg/cm²
	Normal	<ul style="list-style-type: none"> • Todo tipo de estructuras de concreto 	<ul style="list-style-type: none"> • Funcionalidad • Disponibilidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Propiedades en estado fresco similares a las obtenidas en concretos convencionales • Resistencia a la compresión entre 250 y 420 kg/cm²
	Muy alta resistencia	<ul style="list-style-type: none"> • Columnas de edificios muy altos • Secciones de puentes con claros muy largos • Elementos presforzados • Disminución en los espesores de los elementos 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor área aprovechable en plantas bajas de edificios altos • Elementos presforzados más ligeros • Elementos más esbeltos 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta cohesividad en estado fresco • Tiempos de fraguado similares a los de los concretos normales • Altos revenimientos • Resistencia a la compresión entre 400 y 800 kg/cm² • Baja permeabilidad • Mayor protección al acero de refuerzo
	Alta resistencia temprana (Costo)	<ul style="list-style-type: none"> • Pisos • Pavimentos • Elementos presforzados • Elementos prefabricados • Construcción en clima frío • Minimizar tiempo de construcción 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistencia temprana • Mayor avance de obra • Optimización del uso de cimbra • Disminución de costos 	<ul style="list-style-type: none"> • Se garantiza lograr el 80% de la resistencia solicitada a 1 o 3 días • Para resistencias superiores a los 300 kg/cm² se requiere analizar el diseño del elemento

2.2. Tipos de curado

Las propiedades del concreto, tales como la durabilidad frente a los ciclos de congelación y deshielo, resistencia mecánica e impermeabilidad, mejoran con la edad mientras existan condiciones favorables para la continuidad del proceso de hidratación del cemento. Este mejoramiento crece rápidamente a edades tempranas y continúa, más lentamente, por un lapso indefinido, como muestra la Gráfica 2.1, para la resistencia a la compresión. Dos condiciones se requieren para que tengan lugar tales mejoras: la presencia de humedad y una temperatura adecuada.



Gráfica 2.1 Resistencia del concreto de acuerdo al tipo de curado (Portland Cement Association, 2013)

Cuando se interrumpe el curado húmedo, el aumento de resistencia continúa por un corto período y luego se detiene, pero si el curado se reinicia la resistencia vuelve a incrementarse. Los mejores resultados se obtienen mediante el curado húmedo continuo del concreto desde el momento en que es colocado hasta que ha adquirido la calidad deseada.

Una evaporación excesiva de agua en el hormigón recién colocado puede retardar apreciablemente el proceso de hidratación del cemento a edad temprana. La pérdida de agua también provoca la retracción del concreto, generando tensiones de tracción en la superficie expuesta. Si estas tensiones se desarrollan antes que el hormigón haya alcanzado suficiente resistencia, pueden aparecer fisuras superficiales. Todas las superficies expuestas, incluyendo las de bordes y juntas, deben ser protegidas contra la evaporación. (Portland Cement Association, 2013)

La hidratación progresa muy lentamente cuando la temperatura del concreto es baja. Por ejemplo las temperaturas por debajo de los 10° C son desfavorables para el desarrollo de resistencias a edad temprana; debajo de los 4.5° C el aumento de resistencia a edades tempranas se retarda considerablemente y en temperaturas similares al punto de congelación hay muy poco o ningún aumento de la resistencia. De aquí se deduce que el concreto debe ser protegido para mantenerlo a una temperatura adecuada para la hidratación del cemento y para evitar pérdidas de humedad durante el período inicial de endurecimiento. (Portland Cement Association, 2013)

2.2.1. Inundación o inmersión

Este es un método eficiente para evitar pérdidas de humedad en el concreto. El curado por inundación es efectivo para mantener una temperatura uniforme. Sin embargo la temperatura del agua de curado no deberá estar más de unos 11° C por debajo de la del concreto para prevenir tensiones de origen térmico, que podrían fisurarlo. Como este método requiere considerable supervisión y mano de obra, frecuentemente no resulta práctico, excepto para pequeñas obras. El método de inundación no es recomendable cuando el concreto fresco está expuesto a temperaturas de congelación.

El método de curado húmedo más efectivo, aunque raramente usado, consiste en la total inmersión en agua del elemento de concreto terminado.

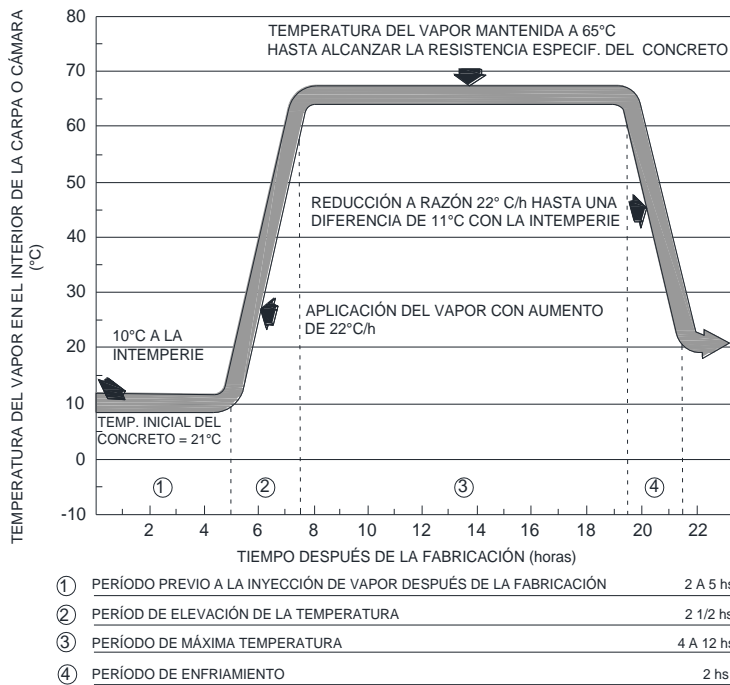
2.2.2. Curado con vapor

El curado con vapor es ventajoso cuando es importante desarrollar una resistencia temprana en el concreto o cuando se requiere calor adicional para completar la hidratación. Dos métodos se usan actualmente para desarrollar mayor resistencia inicial mediante curado por vapor: curado con vapor a la presión atmosférica y curado a alta presión en autoclave.

El ciclo de curado por vapor consiste en (1) un intervalo inicial de espera, previo a la acción del vapor; (2) un período de incremento de temperatura; (3) un período en que se mantiene la temperatura constante, y (4) un período de disminución de temperatura. Un típico ciclo de curado por vapor a la presión atmosférica. En muchos casos el lapso comprendido entre el moldeo y el cierre del vapor es aproximadamente de 18 horas. (Portland Cement Association, 2013)

El curado con vapor a la presión atmosférica se realiza generalmente en una cámara de vapor u otro recinto cerrado, para disminuir al mínimo las pérdidas de calor y humedad. Las lonas impermeables se usan frecuentemente para formar el recinto (carpa). La aplicación de vapor dentro del recinto deberá demorarse como mínimo dos horas después de finalizada la colocación del hormigón, para permitir cierto endurecimiento del colocado recientemente. No obstante, una demora de 4 a 5 horas, previa a la inyección del vapor, permitirá obtener máximas resistencias iniciales, como indica la gráfica 2.2. La resistencia no aumenta significativamente si la temperatura máxima del vapor es llevada de 65 a 80°C. Deberán evitarse temperaturas máximas del vapor por encima de los 82° C, ya que son poco económicas y pueden conducir a una reducción de la resistencia final inaceptable.

Deberán impedirse excesivas velocidades de calentamiento y enfriamiento durante el curado con vapor a la presión atmosférica, para evitar cambios volumétricos que dañen al concreto. Las temperaturas dentro del recinto o cámara, alrededor del hormigón, no deberán aumentar o disminuir en más de 22° C por hora. (Gráfica 2.2) (Portland Cement Association, 2013)



Gráfica 2.2 Ciclo de curado a vapor (Portland Cement Association, 2013)

La temperatura máxima del vapor dentro del recinto deberá ser mantenida hasta que el concreto haya alcanzado la resistencia deseada. El tiempo necesario depende de las características de la mezcla y de la temperatura del vapor. Para el curado con vapor a alta presión en autoclave se emplean temperaturas más elevadas, en el rango de 165 a 190 ° C, y presiones correspondientes de alrededor de 5.5 a 12.0 kg/cm². La hidratación se acelera grandemente y las elevadas temperaturas y presiones pueden producir reacciones químicas adicionales beneficiosas entre los agregados y/o las sustancias, que no ocurren durante el curado con vapor a baja presión (Portland Cement Association, 2013)

2.3. Cemento

Desde hace siete mil años ya se usaba mezclas que contenían agua, arena, grava y cal que era cocida, los Egipcios usaban estas mezclas para unir piedras con este material (Fig. 2.1).



Fig. 2.1 Cemento

Se comenzó a utilizar por los griegos y romanos construyendo estos edificios que se conservan hasta la fecha. Se denominaron cementos hidráulicos ya que la cal combinada con puzolanas al agregarle agua fraguaba esta mezcla. Posteriormente se utilizaron arcillas con calizas que eran más resistentes que las calizas puras utilizando este material cementante en la construcción de un faro. En el siglo XVIII se creó el cemento portland obtenido de piedra caliza de color blanco plateado llamado así por el lugar de extracción de dicha piedra la península de Portland en Inglaterra (Santiago Hurtado, 2010).

El cemento Portland es un conglomerante hidráulico que al tener contacto con el agua se solidifica, el cemento se obtiene de un proceso industrializado donde se tritura de manera muy fina arcillas y calces cocidas. El resultado de este compuesto se denomina clínker, cuando se necesitan otras propiedades en el cemento se les adiciona otros componentes como puzolanas, escoria granulada, humo de sílice o caliza.

Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar la pasta de cemento. Cuando se adiciona la pasta (cemento y agua) a los agregados (arena

y grava, piedra triturada u otro material granular), la pasta actúa como un aglutinante y une los agregados para formar el concreto, el material de construcción más versátil y más usado en el mundo (Santiago Hurtado, 2010).

La hidratación empieza cuando el cemento entra en contacto con el agua. En la superficie de cada partícula de cemento se forma una capa fibrosa que gradualmente se propaga hasta que se enlace con la capa fibrosa de otra partícula de cemento o se adhiera a las sustancias adyacentes. El crecimiento de las fibras resulta en rigidización, endurecimiento y desarrollo progresivo de resistencia. La rigidización del concreto puede reconocerse por la pérdida de trabajabilidad, la cual normalmente ocurre después de 3 horas de mezclado, pero es dependiente de la composición y finura del cemento, de cualquier aditivo usado, de las proporciones de la mezcla y de las condiciones de temperatura, tipo de mezclado, colocación, etc. Consecuentemente, el concreto fragua y se endurece (Kosmatka, 2004).

El cemento Portland se obtiene por pulverización del clínker, mediante molienda conjunta con un regulador de fraguado, generalmente sulfato cálcico dihidrato o yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y adiciones. Los materiales utilizables, que están normalizados como adiciones, son las escorias vítreas de alto horno, los esquistos calcinados, el humo de sílice, las puzolanas naturales, las cenizas volantes y la caliza. Es así como mediante el empleo de adiciones se fabrican los diferentes tipos de cemento portland existentes; las adiciones le otorgan características específicas a cada tipo de cemento. Durante la fabricación, se hace análisis químico frecuente de todos los materiales para garantizarse una calidad alta y uniforme del cemento.

En el proceso de clinkerización, entre 550 y 1,000 °C se produce la deshidratación de las arcillas y posterior disociación en los correspondientes óxidos, así como la descarbonatación de las calizas. Entre 1,000 y 1,250 °C tiene lugar la formación por reacción en estado sólido de los compuestos de silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A), C_2AS , C_{12}A_7 y ferro aluminato tetracálcico (C_4AF). A temperaturas superiores a 1,250 °C se forma, a velocidad lenta, C_3S por reacción en estado sólido entre el C_2S y el CaO . A partir del eutéctico del sistema cuaternario $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$, a 1,338 °C se produce

la fusión parcial de C_3A , C_4AF junto con una porción de C_2S , C_3S y CaO formando una fase líquida que facilita el transporte de iones, incrementando la velocidad de formación de C_3S . De esta manera entre 1,400 y 1,450 °C, una parte del C_2S formado reacciona con la cal restante para producir C_3S con cierta cantidad de iones en disolución sólida. El proceso se considera acabado cuando no queda CaO libre (H.F.W., 1978). La composición química del clinker se muestra en la Tabla 2.3

Tabla 2.3 Composición química del clinker de cemento Portland (Santiago Hurtado, 2010)

Óxidos	Proporción del clinker
CaO	60-69%
SiO₂	18-24%
Al₂O₃	4-8%
Fe₂O₃	1-8%
MgO	1-5%
Otros (Óxidos de Ti, Zn, Na, K, Mn....)	<8.5%

La composición mineralógica del clinker se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Fases mineralógicas que componen el clinker de cemento Portland (Santiago Hurtado, 2010)

Nombre	Composición	Proporción en el Clinker de cemento Portland
Silicato tricálcico o C_3S (alita)	$3CaO \cdot SiO_2$ o (Ca_3SiO_5)	50-70%
Silicato dicálcico o C_2S (belita)	$2CaO \cdot SiO_2$ o (Ca_2SiO_4)	15-25%
Aluminato tricálcico o C_3A	$3CaO \cdot Al_2O_3$ o $(Ca_3Al_2O_6)$	5-15%
Ferroaluminato tetracálcico o C_4AF	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ o $(Ca_4Al_2O_{10}Fe_2)$	5-15%

Algunos de los tipos de cementos comúnmente fabricados en México son los que se muestran en la Tabla 2.5, siendo el cemento más comercial el CPC.

Tabla 2.5 Clasificación del cemento en México (Cooperativa La Cruz Azul, 2011)

Denominación	
CPO	Cemento Portland Ordinario, el cual puede tener hasta 5% de adición de materiales tales como escoria, puzolanas, humo de sílice o caliza.
CPP	Cemento Portland Puzolánico, que posee del 6% al 50% de material puzolánico, con relación a la masa total del cemento.
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno, el cual tiene del 6% al 60% de escoria.
CPC	Cemento Portland Compuesto, se compone de Clínter, yeso y dos o más adiciones. Las adiciones se pueden componer del 6% al 35% de escoria, del 6% al 35% de material puzolánico, del 1% al 10% de humo de sílice y del 6% al 35% de caliza. Independientemente del tipo y cantidad de material adicionado, la cantidad de Clínter e yeso debe ser del 50% al 94%.
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice, que recibe del 1% al 10% de humo de sílice.
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno, el cual tiene una cantidad de escoria que varía del 61% al 80%.

Algunos cementos pueden tener una o más características especiales (Tabla 2.6) como las siguientes:

Tabla 2.6 Características especiales del concreto (Cooperativa La Cruz Azul, 2011)

Denominación	
RS	Resistente a los Sulfatos
BRA	Baja Reactividad Álcali - Agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

El cemento de igual manera se clasifica por la resistencia que alcanza a los 3 y 28 días (Tabla 2.7)

Tabla 2.7 Clasificación del cemento por su resistencia (Cooperativa La Cruz Azul, 2011)

Clase Resistente	Resistencia a la Compresión 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	--

La norma NMX-C-414-ONNCE también menciona los parámetros que cada tipo de cemento debe cumplir, los cuales se pueden observar en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Componentes de los cementos (NMX-C-414-ONNCE, 2004)

Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					Minoritarios
		Principales					
		Clinker Portland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos	Humo de sílice	Caliza	
CPO	Cemento Portland Ordinario	95-100	—	—	—	—	0-5
CPP	Cemento Portland Puzolánico	50-94	—	6-50	—	—	0-5
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	40-94	6-60	—	—	—	0-5
CPC	Cemento Portland Compuesto	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	90-99	—	—	1-10	—	0-5
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	20-39	61-80	—	—	—	0-5

Los principales componentes del cemento deben de respetar los límites de índice de actividad con cemento CPO 30 a 28 días y carbonatos totales, los cuales están establecidos en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Requisitos de los componentes principales

Componente principal	Índice de actividad con CPO 30 a 28 días % (mínimo)	Carbonatos totales % (mínimo)
Escoria granulada de alto horno	75	—
Puzolana	75	—
Humo de sílice	100	—
Caliza	—	75

De acuerdo al tipo de cemento empleado, se debe de verificar las siguientes especificaciones físicas como lo son resistencia a la compresión, tiempo de fraguado y estabilidad de volumen en autoclave como se observa en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Especificaciones físicas

Clase resistente	Resistencia a compresión (N/mm ²)			Tiempo de fraguado (min)		Estabilidad de volumen en autoclave (%)	
	3 días mínimo	28 días mínimo	Máximo	Inicial mínimo	Final máximo	Expansión máximo	Contracción máximo
20	—	20	40	45	600	0.80	0.20
30	—	30	50	45	600	0.80	0.20
30 R	20	30	50	45	600	0.80	0.20
40	—	40	—	45	600	0.80	0.20
40 R	30	40	—	45	600	0.80	0.20

Tabla 2.11 Especificaciones químicas

Propiedades	Tipos de cemento	Especificación (% en masa)
Pérdida por ignición	CPO, CEG	Máximo 5.0%
Residuo insoluble	CPO, CEG	Máximo 5.0%
Sulfato (SO₄)	Todos	Máximo 4.0%

La Tabla 2.11 muestra las especificaciones químicas con las que los cementos deben de cumplir.

Cuando un cemento tiene alguna característica especial debe de cumplir con las especificaciones de la Tabla 2.12.

Tabla 2.12 Especificaciones de los cementos con características especiales

Nomenclatura	Característica especial	Expansión por la reacción álcali agregado (máx. %)	Expansión por la reacción álcali agregado (máx. %)			Calor de hidratación (máximo) kJ/kg (Kcal/kg)		Blancura (mínimo %)
			1 año	14 días	56 días	7 días	28 días	
RS	Resistencia a los Sulfatos	0.10	—	—	—	—	—	—
BRA	Baja Reactividad Álcali Agregado	—	0.020	0.060	—	—	—	—
BCH	Bajo Calor de Hidratación	—	—	—	250 (60)	290 (70)	—	—
B	Blanco	—	—	—	—	—	—	70

2.3.1. Clasificación según su procedencia

De acuerdo con su origen se clasifican en agregados naturales y agregados artificiales. Los agregados naturales provienen de la explotación de fuentes naturales tales como depósitos de arrastre fluviales (arenas y gravas de río) y de canteras de diversas rocas. Los agregados artificiales se obtienen a partir de productos o procesos industriales (Núñez Remolina, 2013).

2.3.2. Clasificación según su densidad

Ésta depende de la cantidad de masa por unidad de volumen. Esta distinción se hace porque afecta la densidad del concreto que se desea producir: Ligerio, normal y pesado. Es la cantidad de agua que requiere el concreto por unidad de volumen para que se hidraten las partículas del cemento y para proporcionar las condiciones de manejabilidad adecuada que permitan la aplicación y el acabado del mismo en el lugar de la colocación en el estado fresco (Núñez Remolina, 2013).

2.4. Agregado grueso

Son gravas naturales obtenidas mediante trituración y cribado (Fig. 2.2) con partículas de tamaño máximo comprendido entre 19 milímetros (3/4") y 75 milímetros (3") y la granulometría óptima de la grava se muestra a continuación (Tabla 2.13).



Fig. 2.2 Agregado grueso (Cantera de Combia, 2013)

Tabla 2.13 Límites granulométricos para el agregado grueso (SCT, 2002)

Malla mm (designación)	Tamaño nominal mm												
	75	150	300	600	1250	2500	5000	10000	15000	20000	25000	30000	37500
101 (4")	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
89 (3 1/2")	0-10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
75 (3")	--	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
63 (2 1/2")	75-40	0-10	0	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--
50 (2")	--	30-65	0-10	0-5	0	0	--	--	--	--	--	--	--
37.5 (1 1/2")	85-100	85-100	30-65	--	0-10	0-5	0	0	0	--	--	--	--
25 (1")	--	--	85-100	30-65	45-80	--	0-10	0-10	0-5	0	0	--	--
19 (3/4")	95-100	95-100	--	--	85-100	30-65	45-60	15-60	--	0-10	0-10	0	--
12.5 (1/2")	--	--	95-100	70-90	--	--	90-100	60-90	40-75	45-60	--	0-10	0
9.5 (3/8")	--	--	--	--	95-100	70-90	95-100	85-100	--	85-100	45-80	30-60	0-15
4.75 (No. 4)	--	--	--	95-100	--	95-100	--	95-100	90-100	95-100	90-100	85-100	70-90
2.36 (No. 8)	--	--	--	--	--	--	--	--	95-100	--	95-100	95-100	90-100
1.18 (No. 16)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	95-100

2.5. Agregado Fino

Tanto el agregado fino (Fig. 2.3) como el agregado grueso, constituyen los elementos inertes del concreto, debido a que no intervienen en las reacciones químicas. El agregado fino debe ser durable, fuerte, limpio, duro y libre de materias impuras como polvo, limo, pizarras, álcalis y materias orgánicas. No debe tener más del 5% de arcillas o limos ni el 1.5% de materias orgánicas. (Harmen, 2005)

Es una arena natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, con partículas de tamaño comprendido entre setenta y cinco micrómetros (malla No. 200) y cuatro punto setenta y cinco milímetros (malla No. 4). (SCT, 2002)

Tabla 2.14 Límites granulométricos para el agregado fino (SCT, 2002)

Abertura (mm)	Malla Designación	Fino		Grueso			
		Tamaño nominal mm					
		5 a 0.15	25 a 13	25 a 5	20 a 5	13 a 15	10 a 2.5
Porcentaje retenido							
37.5	1 1/2"	--	0	0	--	--	--
25	1"	--	0 - 5	0 - 5	0	--	--
19	3/4"	--	--	--	0 - 10	0	--
12.5	1/2"	--	90 - 100	40 - 75	--	0 - 10	0
9.5	3/8"	0	--	--	40 - 80	20 - 60	0 - 20
4.75	No. 4	0 - 15	--	90 - 100	90 - 100	80 - 100	60 - 95
2.36	No. 8	--	--	--	--	90 - 100	80 - 100
1.18	No. 16	20 - 60	--	--	--	--	--
0.3	No. 50	65 - 90	--	--	--	--	--
0.15	No. 100	75 - 95	--	--	--	--	--



Fig. 2.3 Agregado fino (Cantera de Combia, 2013)

2.6. Agua

El agua es un componente que se utiliza para generar las reacciones químicas en los cementantes del concreto hidráulico, puede ser agua potable, aquella que por sus características físicas y químicas es apta para el consumo humano, para que no se pierdan estas características se debe tener especial cuidado en su transporte y almacenamiento.

2.6.1. Agua de lavado de agregados

Es la utilizada durante el proceso de trituración, para retirar impurezas y exceso de finos presentes en los conglomerantes de los que provienen, así como las partículas muy finas formadas durante la trituración. Debe ser lo suficientemente limpia como para no introducir contaminación a los materiales procesados, como puede ser exceso de partículas en suspensión, especialmente materia orgánica o sales, que posteriormente afectan la calidad del concreto producido con estos.

2.6.2. Agua de mezclado

Se adiciona junto con los agregados y el cemento. Se necesita éste último para producir una pasta hidratada con fluidez tal, que permita la lubricación adecuada de la mezcla de concreto cuando se encuentre en estado plástico.

Dependiendo de la cantidad de agua adicionada la fluidez de la pasta será mayor o menor y al endurecerse una cantidad del agua quedará fija como parte de la estructura y otra permanecerá como agua libre. Si la medida de agua de mezclado aumenta, la parte fija es la misma y por consiguiente el agua libre aumenta, con lo cual se aumenta la porosidad, debido a que con el tiempo, esta agua libre se evapora dejando unos pequeños conductos en el interior del concreto endurecido. Con este aumento se disminuye la resistencia y el concreto se hace más permeable. De ahí la importancia del control de la cantidad de agua utilizada en la mezcla.

2.6.3. Agua de curado

Una vez el concreto ha fraguado, es necesario el suministro de agua para garantizar la completa hidratación del grano de cemento, esta agua adicionada depende de la temperatura y humedad del ambiente donde se encuentre el concreto, ya que a menor humedad relativa, la evaporación es mayor. El objeto del curado es mantener el concreto saturado, o lo más próximo posible a la saturación, hasta que los espacios que inicialmente estaban saturados de agua se llenen hasta un nivel deseado con los productos de la hidratación del cemento.

El agua que se utiliza en la mezcla, generalmente, es apta para el curado, sin embargo, la causa más común de las manchas en las superficies del concreto, es por la presencia de una alta concentración relativa de hierro o materias orgánicas. Así mismo, bajas concentraciones de estas impurezas pueden causar manchas si el agua fluye lentamente sobre el concreto y se evapora. No existe ningún método práctico y confiable que relacione las posibilidades de manchas con los contenidos de impurezas orgánicas o de hierro contenido en el agua.

En la evaluación de las impurezas que contienen las aguas de curado se deben tener las siguientes consideraciones:

- Que no manchen las superficies del concreto.
- Que no ataquen ni deterioren el concreto.

En algunos casos, las manchas superficiales no son tan importantes, pero siempre es necesario que el agua de curado esté libre de sustancias como ácidos minerales, ácidos orgánicos, bases, sales, alcoholes, soluciones de azúcar, aceite vegetal y animal que ataquen el concreto endurecido.

Por otro lado, en el caso de concretos arquitectónicos, resulta mucho más perjudicial emplear aguas con impurezas durante su curado que en su amasado. Es el caso del agua del mar, se puede usar para amasar concreto no reforzado, pero no se puede utilizar durante su curado.

2.6.4. Calidad del agua

Las exigencias de calidad, varían en algunos países en función de las características propias del cemento, pero en general existe uniformidad de criterios fruto de los resultados de investigaciones desarrolladas en diferentes países.

En nuestro país en general, fuera de los perímetros urbanos, se corre el riesgo de utilizar aguas de calidad desconocida, las cuales no son estudiadas para su empleo en la elaboración de concretos, de ahí la necesidad de difundir esta información, que permita tratar de adquirir la mejor información de la bondad del abastecimiento, en cuanto a la calidad de los concretos que puedan generar.

2.6.5. Efecto de las impurezas en el agua de mezcla

Existe la creencia popular, que si el agua es apta para beber, es óptima para hacer concreto, sin embargo, esto no es del todo cierto, pues algunos acueductos o plantas de tratamiento de agua, utilizan o adicionan para el consumo sustancias que pueden interferir con el fraguado del cemento, o pueden promover la corrosión del refuerzo o manchar el concreto, tales como, sulfatos de aluminio, cloro, sabores artificiales, flúor, azúcares, etc.

Asimismo, un agua apta para mezclar o curar concretos puede no ser necesariamente buena para tomar. Cuando el agua para una obra proviene de un pozo, es conveniente analizarla periódica y sistemáticamente para comprobar que no varía el pH, o las impurezas a través del tiempo.

Las impurezas pueden interferir con el fraguado del cemento, afectar adversamente la resistencia del concreto o causar manchas en su superficie y provocar, además, la corrosión de los aceros de refuerzo.

Es necesario distinguir entre los efectos del agua de mezclado y el ataque al concreto endurecido por parte de aguas agresivas. En general las especificaciones de la calidad del agua para amasado plantean la necesidad que el agua se encuentre limpia y libre de

substancias perjudiciales. En algunos casos se establece que si el agua a emplearse proviene de una fuente desconocida, deben prepararse concretos con ésta y con el agua destilada o conocida, efectuar comparaciones de su comportamiento durante el fraguado, desarrollo de resistencia, cantidad de aire atrapado, etc. Se considera que el agua es aceptable, si la relación entre las resistencias de especímenes preparados con el agua de calidad desconocida y los preparados con agua destilada, es mayor del 85%. Con base en el criterio anterior de resistencia se ha establecido que para elaborar concreto, no se aceptan:

Aguas ácidas - ácido húmico -, aguas básicas provenientes de curtidurías, aguas carbonatadas provenientes de descargas de plantas de galvanización, aguas que contengan más del 3% de ClNa o 3.5% de SO₄, Na₂, aguas con azúcar. El contenido de sólidos disueltos totales no debe ser mayor de 2140 ppm, para las aguas carbonatadas.

Las siguientes aguas se aceptan para elaborar concreto, sobre la base de alcanzar más del 85% de las resistencias respecto a un agua destilada: aguas con un contenido máximo de 1% de Sulfatos; agua de mar pero no para concretos reforzados, aguas alcalinas con un contenido máximo del 0.15% de Na₂, SO₄ o NaCl, aguas provenientes de minas de carbón y yeso y aguas de desecho de fábricas como por ejemplo: cerveza, plantas de gas, pinturas y jabón.

Las provenientes de abastecimientos desconocidos, frecuentemente se usan en la elaboración de morteros o concretos en obra. Por lo cual es necesario plantear los riesgos que se afrontan, respecto a conseguir concretos técnica y económicamente aceptables, al utilizar aguas desconocidas que puedan aportar, substancias nocivas disueltas o en suspensión, tales como, materia orgánica, azúcares, sulfatos o cloruros.

El agua que se emplea para lavado de las ollas mezcladoras se puede utilizar para elaborar concreto, siempre y cuando antes del lavado ésta cumpla con los requisitos para ser empleada en el mezclado.

2.7. Aditivos

Los aditivos son componentes no esenciales del concreto y su uso se debe a que son capaces de dar beneficios físicos y económicos con respecto al concreto. Estos beneficios incluyen el uso del concreto en circunstancias en las que existían dificultades y no se podía hacer uso de concreto. (Neville, 1998)

Un aditivo se define como un producto químico (excepto en casos especiales) que se agrega al concreto durante el proceso de mezclado o durante una operación adicional antes de la colocación del concreto, con el propósito de realizar una modificación específica a las propiedades normales del concreto. (Neville, 1998)

Los antecedentes de los aditivos se remontan en los concretos romanos, a los cuales se les agregaba sangre y clara de huevo. (ASOCEM, 2013)

La fabricación de cemento portland alrededor de 1850 y el desarrollo del concreto armado, llevó a regular el fraguado con el cloruro de calcio, patentado en 1885. Al inicio del siglo se efectuaron sin éxito comercial estudios sobre diferentes aditivos. (ASOCEM, 2013)

El primer antecedente de los aditivos químicos modernos se encuentra en el empleo ocasional del sulfonato naftaleno formaldeído, que fue utilizado en 1930 para actuar como dispersante en concretos con adiciones negro de humo, destinados a carriles de pavimentos que por su coloración pudieran llamar la atención de los conductores de vehículos. Si bien en 1932 se registró una patente de los EE.UU. no se aplicó por su elevado costo y exceder los requerimientos de las construcciones de concreto de esa época. (ASOCEM, 2013)

Comentado [D1]: De donde es esta referencia

Los aditivos se clasifican por su función en el concreto es la siguiente:

- > Tipo A Reductores de agua
- > Tipo B Retardantes
- > Tipo C Acelerantes

- > Tipo D Reductores de agua y retardantes
- > Tipo E Reductores de agua y acelerantes
- > Tipo F Reductores de agua de alto rango o superfluidificantes
- > Tipo G Reductores de agua de alto rango y retardantes, o superfluidificantes y retardantes. (Neville, 1998)

2.8. Humo de Sílice

El humo de sílice es el resultado de la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón mineral en un horno de arco eléctrico, durante la producción del silicio o de aleaciones de ferro silicio. El humo de sílice consiste en partículas esféricas vítreas con una elevada superficie específica cuya composición química se basa fundamentalmente en SiO_2 (> 90 %). Presenta unas características puzolánicas muy elevadas (Frederick Measham & Hewlett, 1998).

2.8.1. Origen

El humo de sílice, también llamado micro sílice o sílice activa, es un producto inorgánico constituido por partículas esféricas de gran finura que se origina en la producción del cuarzo con carbón, durante los proceso de obtención de silicio metal y ferro silicio en hornos eléctricos de arco. El polvo se recoge en filtros de mangas, constando de partículas esféricas de SiO_2 amorfo en un porcentaje variable entre un 85% y un 98%. (Cedex Materiales, 2007)

2.8.2. Propiedades químicas

Las propiedades químicas del residuo dependen en gran medida del tipo de producto que se pretenda obtener (silicio, ferro-silicio u otras silico-aleaciones), pudiéndose distinguir tres tipos:

Procedentes de la fabricación de silicio: El contenido en SiO_2 del humo se sitúa en torno al 92%, aunque puede ser más bajo para productos cargados en carbono o carburo de silicio. El humo de sílice se condensa de los gases de emisión de los hornos de producción de silicio metal, metaloide utilizado para la fabricación de aleaciones aluminio-silicio, siliconas y silicio para placas solares.

La captación de estos humos para la protección del medio ambiente, permite obtener un nuevo producto, del que se deben aprovechar sus particulares propiedades químicas y físicas.

Procedentes de la fabricación de ferro-silicio: El contenido de Si y de SiC es menor que en el caso anterior. Las impurezas minerales son más altas, pues se utiliza cuarzo y reductores de calidad más baja. El contenido total de impurezas oxidadas puede llegar al 6 o 7%. (Cedex Materiales, 2007)

Procedentes de la fabricación de aleaciones calcio-silicio: Proviene de procesos con cargas que contienen altas proporciones de óxidos alcalino-térreos (tipo CaO). Como se trata de humos que reagrupan fabricaciones de diversas silico-aleaciones, hay que esperar composiciones muy heterogéneas. Así, el contenido en CaO puede variar del 3 al 20%. El porcentaje en SiO_2 es más bajo que el de los otros humos y además mucho más variable.

En la siguiente Tabla 2.18 se resumen las propiedades de las diferentes clases de humos de sílice junto a la composición típica:

Tabla 2.18 Composición química del humo de sílice (Cedex Materiales, 2007)

Composición (%)	Silicio	Ferro-silicio	Otras aleaciones	Humo de sílice
SiO₂	92	85-92	87	93
C libre	2.6	2.5	1.7	-
SiC	1.8	0.2	0.5	-
MgO	0.6	0.6	1.0	0.3
Si libre	0.3	0.1	0.1	-
Fe₂O₃	0.1	0.5-3	1.0	0.1
Al₂O₃	0.2	1-2.5	0.3	0.2
CaO	0.5	0.3	6.0	0.5
Na₂O	0.1	1	0.2	0.2
K₂O	0.6	1	1.6	0.4
S total	0.2	0.4	0.6	-
Humedad	0.3	0.3	0.5	0.5
Pérdida al fuego (1,000 °C)	2.8	3.0	4.0	4

2.8.3. Actividad puzolánica

Se define la actividad puzolánica de un material como la capacidad de fijar hidróxido cálcico a la temperatura ordinaria en presencia de agua, originando productos sólidos, insolubles y resistencia mecánica.

En presencia de cemento Pórtland hidratado, el humo de sílice desarrolla su actividad puzolánica, al ser un material muy fino rico en sílice (el hidróxido cálcico se combina con la sílice para formar silicato cálcico hidratado).

La actividad puzolánica del humo de sílice es efectiva en los primeros días de edad, aproximadamente al segundo día, y su actividad es tanto mayor cuanto mayor es la edad hasta los 28 días aproximadamente. A los 90 días se ha paralizado prácticamente la actividad puzolánica. (Cedex Materiales, 2007)

2.8.4. Propiedades físicas

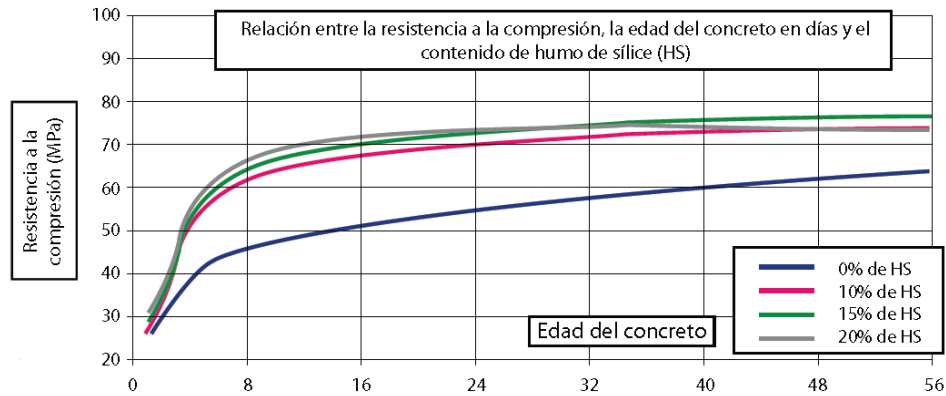
Color: El humo de sílice varía de gris claro a gris oscuro, y cuando se mezcla con agua produce una pasta de color negro.

Peso específico: El peso específico del humo de sílice es aproximadamente 2.2, inferior al del cemento Portland que es aproximadamente 3.1, aunque depende del tipo de aleación que se fabrique.

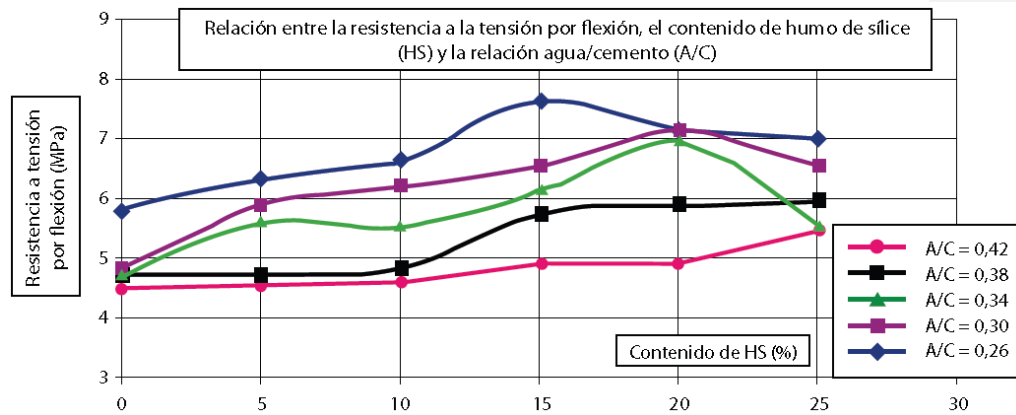
Densidad: La densidad aparente, o de conjunto, suele variar entre 130 y 430 kg/m³, aunque los valores más comunes son los valores medios de este intervalo. El humo de sílice que se produce en nuestro país tiene una densidad aparente de 200-250 kg/m³.

Tamaño de las partículas: El humo de sílice consiste en partículas esféricas muy finas con una superficie específica del orden de 20,000 m²/kg. La distribución del tamaño de las partículas de un humo de sílice típico indica que la mayoría de las mismas son menores a 1µm, con un diámetro promedio de casi 0.1 µm que es menor casi cien veces a la partícula promedio de cemento.

En las Gráficas 2.3 y 2.4 se muestra el cambio que sufre el concreto con la presencia de humo sílice en diferentes porcentajes.



Gráfica 2.3 Relación entre la resistencia a la compresión, la edad del concreto en días y el contenido de humo de sílice (HS) (Vidaud Quintana & Vidaud Quintana, 2012)



Gráfica 2.4 Relación entre la resistencia a la tensión por flexión, el contenido de humo de sílice (HS) y la relación agua/cemento (A/C) (Vidaud Quintana & Vidaud Quintana, 2012)

2.9. PET (*polyethylene terephthalate*),

El PET ($C_{10}H_8O_4$) es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo, correspondiendo su fórmula a la de un poliéster aromático. Su denominación técnica es Polietileno Tereftalato o Politereftalato de etileno.

El PET perteneciente al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres, fue descubierto por los científicos británicos Whinfield y Dickson, en el año 1941, quienes lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras. Se debe recordar que su país estaba en plena guerra y existía una apremiante necesidad de buscar sustitutos para el algodón proveniente de Egipto. Recién a partir de 1946 se lo empezó a utilizar industrialmente como fibra y su uso textil ha proseguido hasta el presente. En 1952 se lo comenzó a emplear en forma de film para el envasamiento de alimentos. Pero la aplicación que le significó su principal mercado fue en envases rígidos, a partir de 1976; pudo abrirse camino gracias a su particular aptitud para el embotellado de bebidas carbonatadas.

Es el polímero para el cual los fabricantes de máquinas internacionales han dedicado el mayor esfuerzo técnico y comercial. Efectivamente, los constructores han diseñado ex profeso y con inversiones cuantiosas, equipos y líneas completas perfectamente adaptadas a los parámetros de transformación del PET, cuya disponibilidad accesible a todos los embotelladores, unida a la adecuada comercialización de la materia prima, permitió la expansión de su uso en todo el mundo. (Textos científicos.com, 2013)

2.10. Escoria metálica

La escoria metálica también conocida como viruta es un fragmento de material residual con forma de lámina curvada o espiral que es extraído mediante un cepillo u otras herramientas, tales como brocas, al realizar trabajos de cepillado, desbastado o perforación, sobre metales. Se suele considerar un residuo de las industrias del metal.

2.11. Principales tipos de pavimentos

El pavimento puede ser definido como la unión de capas puestas unas sobre otras, de manera horizontal, utilizado como superficie para que circulen los vehículos o peatones.

Puede ser clasificado en:

2.11.1. Pavimento rígido

Está sostenido sobre una capa de material, está dotado de una losa de cemento hidráulica. Estos tienen la capacidad de soportar cargas pesadas gracias a su base de concreto. Estos tipos de pavimento son bastante económicos, sobre todo a la hora del mantenimiento. Además al ser muy resistente puede ser utilizado durante mucho tiempo, son fáciles para construir. Existen diversas clases de éste, algunos de ellos son reforzados, simple, pre esforzado, entre otros. Son muy utilizados en las ciudades y fábricas de trabajo industrial.

2.11.2. Pavimento flexible

Se denomina pavimentos flexibles aquellos cuya estructura total se flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. El uso de pavimentos flexibles se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como puedan ser vías, aceras o estacionamientos. (www.urbanismo.com, 2013)

2.11.3. Ventajas del concreto permeable

Todas las superficies son 100 % permeables

Se eliminan los charcos.

Reduce en forma notable la temperatura de las superficies.

Reduce en forma notable el ruido provocado por la circulación vehicular.

Permite la reducción o incluso eliminación los drenajes pluviales.

Evita el acuaplaneo de las llantas de los autos.

Es compatible con materiales usados para pavimentos para que se logren superficies permeables.

La superficie es plana ya que no necesita "bombeo".

Adquiere sus características de resistencia entre 24 y 72 horas.

Se puede hacer en varios colores y con distintos tipos de piedra.

Sus bases y sistemas constructivos son más baratos que los de los pisos y pavimentos tradicionales, por lo que el costo por m² instalado es más barato que el concreto hidráulico.

Se puede mezclar en obra o en plantas de premezclado.

La ausencia de finos. Los concretos sin finos transmiten las cargas en forma heterogénea a diferencia de los concretos convencionales que lo hacen en forma homogénea. En los concretos sin finos la transmisión de cargas se realiza por puntos de contacto, originando que las cargas sean repartidas en forma aleatoria, dando como resultado que éstas sean distribuidas en una superficie mucho mayor.

La transmisión heterogénea de las cargas provoca que la superficie sobre la cual éstas se reparten, sea varias veces mayor al producto de la repartición de cargas en un piso hecho con un concreto convencional o con asfalto.

Aunado a esto, las bases diseñadas para los pisos permeables son más económicas, más eficientes y no generan baches.

Una ventaja adicional, provocada por la repartición heterogénea de cargas es que casi nunca hace falta mejorar el terreno natural. (Concreto ecologico de México, 2013)

2.11.4. Aplicaciones

Dentro de algunos lugares donde se ha aplicado este tipo de concreto son:

- ✓ Plaza principal en el pueblo de Soyaló, Chiapas
- ✓ Instituto de Vivienda del Estado de Aguascalientes

- ✓ Hacienda Santa Fe, Cuajimalpa
- ✓ Fuente Plaza Los Héroes, Tecámac Edo. de México.
- ✓ Procter & Gamble Planta Talismán (patio de maniobras)
- ✓ Bacardi y Cia, Tultitlán, Edo. de México (patio de maniobras)
- ✓ Schnyder Electric, planta Tlaxcala (estacionamiento)
- ✓ Fraccionamiento Dos Bocas, Veracruz (vialidades)

3. CAPITULO III METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Análisis mecánico de los agregados

El recabar información sobre el concreto permeable permitió conocer las experimentaciones que se han hecho y tener una base para obtener parámetros como permeabilidad, resistencia de materiales utilizados, contenido de vacíos, en los cuales se basaran las pruebas que se realizaron a los materiales que utilizaremos para crear nuestra mezcla, dosificaciones, cantidades de material y los resultados obtenidos anteriormente con dichas mezclas.

3.1.1. Prueba granulométrica

El objetivo de esta prueba es poder determinar la distribución de tamaños del agregado disponible en una muestra, la cual se deja secar a temperatura ambiente para posteriormente ser dividida en cuatro partes iguales. Una vez realizado este procedimiento se procede al cernido del material por una serie de tamices, para la realización de esta prueba nos regimos bajo las especificaciones de la American Society of Testing and Materials (American Society of Testing and Materials, 2005).

En la ejecución de este proyecto de investigación se utilizaron tamices ordenados de manera descendente, esto es $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{4}$ " y del #4, el número de los tamices nos indica las aperturas del tamiz por pulgada lineal. Cada tamiz tiene un diámetro igual a la mitad del diámetro del tamiz que le precede. Esta numeración varía debido al grueso del alambre utilizado para la malla. El uso de todos los tamices dependerá de la precisión que se requiera o de las especificaciones, ya que en ocasiones sólo se utilizan algunos de ellos.

Se han establecido ciertas normas y límites tanto para el tamaño de los agregados como para su granulometría, de esta manera el ingeniero puede seguir un guía o patrón al seleccionar la combinación más adecuada de sus agregados (vea Tabla 3.1) (UNITEC, 2008).

Tabla 3.1 Procedimiento para la determinación de la granulometría de una muestra (UNITEC, 2008)

TAMIZ #	PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE NO RETENIDO
¾"	A	$\frac{A}{F} * 100 = G$	G	100 - G
½"	B	$\frac{B}{F} * 100 = H$	G + H = R	100 - R
3/8"	C	$\frac{C}{F} * 100 = I$	R + I = S	100 - S
¼"	D	$\frac{D}{F} * 100 = J$	S + J = T	100 - T
#4	E	$\frac{E}{F} * 100 = K$	T + K = U	100 - U
	Σ=F	Σ=100		

*El porciento retenido en cualquier tamiz no debe exceder del 45%.

Equipo

1. Serie de tamices para agregado grueso: ¾", ½", 3/8", ¼" y #4.
2. Charolas rectangulares.
3. Espátulas.
4. Cucharón.
5. Pala.
6. Báscula.

Procedimiento

- a. Se toma una muestra representativa de la pila del material.
- b. De la muestra del material se divide en cuatro partes iguales (cuarteo), se toma material de acuerdo con la numeración como se muestra en la figura (Fig. 3.1), hasta llenar el recipiente (tara).



Fig. 3.1 Selección del agregado de manera que la muestra sea representativa de la pila

- c. Pese la muestra, ésta debe ser alrededor de 5,000 gr.
- d. Los tamices deben estar limpios y acomodados en el siguiente orden: $\frac{3}{4}$ " , $\frac{1}{2}$ " , $\frac{3}{8}$ " , $\frac{1}{4}$ " , #4 y una charola (Tabla 3.1), (Fig. 3.2).



Fig. 3.2 Selección de tamices normados por la ASTM E11-09, 2009

- e. Se coloca el agregado que se pesó en la parte superior de los tamices previamente ordenados y comienza el proceso de cribado (Fig. 3.3).



Fig. 3.3 Cribado de los agregados por medio de diferentes tamices

- f. Se pesa el material retenido en cada tamiz (Tabla 3.2) y el que se quedó en la charola, registrando estos datos. La suma de estas cantidades debe tener una diferencia no mayor de 1%, si es mayor, el procedimiento se debe repetir.

Tabla 3.2 Cantidad de agregados gruesos que pasan por la diferentes mallas

PESO MUESTRA				
MALLA	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% PASA	
1"	0	0	100	1 1/4"
3/4"	34.8	0.696	100	1"
1/2"	433.8	8.676	99.304	3/4"
3/8"	2075	41.5	90.628	1/2"
1/4"	2235	44.7	49.128	3/8"
No. 4	170	3.4	4.428	1/4"
	51.4	1.028	1.028	No. 4
	5000			

- g. Calcule el porcentaje retenido (Tabla 3.3), porcentaje retenido acumulado y el porcentaje que pasa en cada tamiz como se demostró en la tabla anterior.

Tabla 3.3 Porcentaje de material retenido

% retenido	peso retenido
0	0
35	1732.01
25	1237.15
20	989.72
18	890.748
2	98.972
	0
	4948.6

3.1.2. Prueba de peso volumétrico

Esta prueba es muy útil para calcular la cantidad de vacíos en el agregado, para calcular las proporciones de los materiales y para convertir el volumen suelto a peso o viceversa. El peso volumétrico varía con el grado de compactación o compactación y con el contenido de humedad (González, 1999).

Equipo

1. Tara 5 litros.
2. Varilla
3. Báscula de 25 kg, resolución de 1 gr.
4. Horno de 100 litros.

Procedimiento

Esta prueba se realiza mediante la compactación del agregado seco dentro de un recipiente, el cual debe de estar debidamente pesado y calculado su volumen (Fig. 3.4); se llena el recipiente en tres capas, y se compacta con una varilla dándole 25 golpes a cada capa comenzando en una orilla y terminado en el centro. Este procedimiento se repite para cada una de dichas capas, se enrasa y se pesa el recipiente.



Fig. 3.4 Tara con agregado grueso

Se pesa el recipiente con el material, al valor obtenido se resta el peso del recipiente, el resultado final se divide entre el volumen del recipiente, dando como resultado el peso volumétrico del material (Fig. 3.5).



Fig. 3.5 Pesado del material para la determinación del peso volumétrico

3.1.3. Prueba de contenido de humedad

Este ensayo tiene por finalidad, determinar el contenido de humedad de una muestra de material. La importancia del contenido de agua que presenta un material representa junto con la cantidad de aire, una de las características más importantes para explicar el comportamiento de este (especialmente en aquellos de textura más fina), como por ejemplo cambios de volumen, cohesión, estabilidad mecánica. El método tradicional de determinación de la humedad en laboratorio, es por medio del secado a horno, donde la humedad, es la relación expresada en porcentaje entre el peso de agua existente en una determinada muestra y el peso de las partículas sólidas.

Calculado a partir de la siguiente fórmula:

$$w = (W_w / W_s) * 100 (\%)$$

Dónde:

w = contenido de humedad expresado en%.

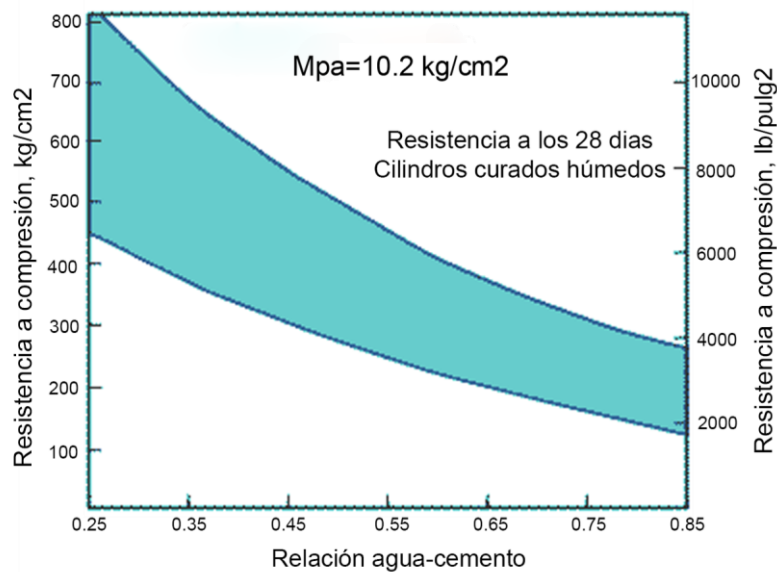
W_w = peso de la agua existente en la masa de suelo. (gr)

W_s = peso de las partículas sólidas. (gr)

3.1.4. Relación agua/cemento

La relación agua / cemento (a/c) es el factor que influye sobre la resistencia del concreto, esta debe ser lo más baja posible para lograr la mayor resistencia (Gráfica 3.1), teniendo en cuenta una adecuada trabajabilidad y compactación, para evitar en fenómeno de segregación de los agregados. (Universidad de Castilla - La Mancha, 2008).

Al reducir la relación a/c de la pasta de cemento hidratada, las partículas de cemento se acercan entre sí, produciéndose menos porosidad capilar y menos espacios libres para que se desarrollen los compuestos de hidratación que cristalizan en los espacios de agua fuera de las partículas de cemento. Como las partículas de cemento están ahora más próximas entre sí, estos compuestos tienen ahora menos espacio para desarrollar los enlaces tempranos entre esas partículas. (INECYC, 2011)



Gráfica 3.1 Curva de resistencia a la compresión debido a la relación agua/cemento (Notas de Concretos, 2013)

Como las partículas de cemento están cercanas y se enlazan con rapidez, el movimiento del agua se dificulta, lo que favorece la formación de compuestos de hidratación más compactos que se desarrollan entre las partículas de cemento. Por esto una menor relación a/c genera resistencias mayores como se muestra en la gráfica 3.1. (INECYC, 2011)

Cada uno de los ingredientes fundamentales del concreto es indispensable en su elaboración, pero el cambio en la proporción de cada uno de ellos implica un detrimento para alguna de las propiedades deseadas del concreto plástico o endurecido.

- Calidad.- El cemento y los agregados originan resistencia, durabilidad y estabilidad de volumen del concreto. Un exceso de agua puede destruir la calidad del concreto.
- Trabajabilidad.- La pasta de cemento y agua proporciona la trabajabilidad del concreto. Un exceso de agregados hace que el concreto no sea trabajable.
- Economía.- Los agregados y el agua son los ingredientes menos costosos del concreto. El empleo de un exceso de cemento hace al concreto muy costoso.

La finalidad principal del proporcionamiento de los ingredientes del concreto estriba en lo siguiente:

- Calidad adecuada para el fin deseado.
- Trabajabilidad adecuada para el mezclado, transporte, colocación y terminado del concreto en forma satisfactoria.
- La máxima economía posible con los materiales disponibles.
- Cuando ya están establecidos la relación agua / cemento, el tamaño máximo de agregado y los límites de revenimiento para una obra determinada, se recomienda realizar mezclas de tanteo con ajustes finales en revolturas de volumen completo, que cumplan exactamente las necesidades de la obra. Existen relaciones disponibles que ayudan a la obtención de mezclas convenientes con un mínimo de ajustes.

La relación más significativa que permite, en forma más directa, elegir el proporcionamiento, es la relación entre la cantidad total del agua de mezclado y el volumen del concreto. La experiencia ha demostrado que la cantidad de agua por unidad de volumen de concreto para una consistencia dada, está influida principalmente por el tamaño máximo, la forma de las partículas, la granulometría del agregado, y por la cantidad de aire incluido. Relativamente no es afectada por la cantidad de cemento (Fig. 3.6).



Fig. 3.6 Preparación de los agregados para el diseño de la mezcla

3.1.5. Diseño de dosificación

El diseño de la mezcla fue a través del método de la American Concrete Institute (ACI) 211.1-02, (2002) a partir de los pesos volumétricos y granulometría del material realizando variaciones a la norma ya que esta no contempla parámetros para un concreto permeable. Una de estas variaciones es omitir el valor de revenimiento en la mezcla debido a que esta no es fluida y no presenta revenimiento, la otra es la determinación del agregado fino, este se calcula a partir de las cantidades de peso y volumen del cemento, agua y agregado grueso, al peso volumétrico del concreto se le restan estas cantidades y se obtiene la cantidad de agregado fino, en el concreto permeable es necesario obtener

espacios vacíos por lo tanto no se utiliza agregado fino o se utiliza solo un porcentaje. La relación agua cemento varía del 0.30 al 0.45 y la relación agregado/cemento 4:1 a 5:1. Para la determinación de la dosificación es necesario tener en consideración varios factores, como lo son la trabajabilidad, su resistencia mecánica, la durabilidad y el costo del concreto.

Las proporciones de los elementos básicos y los aditivos conforman la dosificación. La propiedad de resistencia dependerá principalmente de la dosificación inicial, el proceso de mezclado de los elementos y del proceso de curado de los especímenes a ensayar. La relación agua – cemento es un factor clave en dicha propiedad.

En general una relación agua – cemento adecuada que permita la trabajabilidad del concreto conlleva a una mejor resistencia y mejor calidad del concreto. Para tal efecto se requiere una relación a/c mínima de 0.30, para que el cemento presente en la mezcla reaccione al contacto con el agua. Cualquier exceso de agua producirá una menor cantidad de espacios vacíos.

Por el contrario, una relación a/c baja provocará una reacción mínima del cemento; lo cual origina un mezcla muy débil. A continuación se presenta una tabla con dosificaciones empleadas por otros autores para la elaboración de concreto poroso (Tabla 3.6 (Zindhón, 2010)).

Tabla 3.4 Dosificación y propiedades del concreto poroso (Zindhón, 2010)

A/C (relación Agregado/cemento)	a/C (relación agua/cemento)	Edad (días)	Vacíos (%)	Resistencia Compresión (Kg/cm ²)
3.7 a 1	0.3	7	17	164
3.7 a 1	0.3	14	16.4	154
3.7 a 1	0.3	28	16.3	174
4.0 a 1	0.3	7	13.5	206
4.1 a 1	0.29	7	17	159

Para el diseño de mezcla se tomó en consideración los resultados óptimos obtenidos de la prueba de granulometría, efectuando una relación granulometría/peso, teniendo en consideración que previo a ello se realizaron pruebas aleatorias bajo el mismo proceso de prueba y error con dicha relación, una vez que se obtuvo la granulometría óptima.

La cantidad de agregado a utilizar en la mezcla es obtenida a partir del peso volumétrico (1600 Kg/m³)

Las cantidades son por cada metro cubico de mezcla teniendo una relación agua cemento del 0.30, el peso total de la grava se compondrá por las cantidades de cada granulometría, utilizando gravas con tamaño que van desde la malla No. 4 hasta la malla de ¾".

Así mismo para las diferentes mezclas utilizando adicionalmente los aditivos (PET, escoria metálica y humo de sílice), verificando en cada caso la permeabilidad de cada una de los especímenes.

Siendo la dosificación para el concreto permeable la siguiente: (Tabla 3.5)

Tabla 3.5 Dosificación obtenida por método ACI 211 modificado

Dosificación 1 (D1)		
Material	Cantidad	Unidad
Cemento	250	kg/m ³
Grava	1250	kg/m ³
Agua	90	l
Arena	270	kg/m ³

A partir de esta dosificación se fueron haciendo modificaciones de acuerdo a nuestras observaciones para lograr aumentar la resistencia del concreto permeable obteniendo así las dosificaciones que se muestran en la siguiente Tabla 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9, de todas las dosificaciones se hicieron cilindros y a su vez a estos se les hicieron las pruebas correspondientes para obtener resultados como permeabilidad, contenido de vacíos y resistencia.

Tabla 3.6 Primera modificación para mejorar las propiedades el concreto.

Dosificación 2 (D2)		
Material	Cantidad	Unidad
Cemento	250	kg/m ³
Grava	1250	kg/m ³
Agua	100	l
Arena	270	kg/m ³

Tabla 3.7 Segunda modificación para mejorar las propiedades el concreto.

Dosificación 3 (D3)		
Material	Cantidad	Unidad
Cemento	280	kg/m ³
Grava	1250	kg/m ³
Agua	110	l
Arena	270	kg/m ³

Tabla 3.8 Tercera modificación para mejorar las propiedades el concreto.

Dosificación 4 (D4)		
Material	Cantidad	Unidad
Cemento	400	kg/m ³
Grava	1425	kg/m ³
Agua	182	l

Tabla 3.9 Dosificación final para el concreto permeable.

Dosificación 5 (D5)		
Material	Cantidad	Unidad
Cemento	350	kg/m ³
Grava	1275	kg/m ³
Agua	140	l
Arena	127.5	kg/m ³

Siendo la dosificación 5 (Tabla 3.9) la que mejor resultados arrojaron en las diferentes pruebas realizadas a los cilindros.

3.1.6. Nomenclatura para especímenes

Para el manejo de las muestras, se usa la siguiente nomenclatura (Tabla 3.10). Ejemplo:

E1D1AP10 espécimen

E1: Estas siglas especifican el número de espécimen.

D1: Es la dosificación con la que está hecho el espécimen.

AP: Denomina el tipo de aditivo que se agregó al espécimen.

10: Porcentaje de aditivo adicionado a la mezcla.

Tabla 3.10 Nomenclatura para aditivos adicionados a la mezcla.

Clave	Aditivo
AP	PET
AE	Escoria metálica
AH	Humo de sílice
AS	Sin aditivo
AP	PET

En la siguiente tabla se da la relación de los especímenes hechos con su denominación y descripción

Denominación	Descripción
E13D1AS	Probeta 13 con Dosificación 2 Sin Aditivo
E14D1AS	Probeta 14 con Dosificación 2 Sin Aditivo
E15D1AS	Probeta 15 con Dosificación 1 Sin Aditivo
E01D2AS	Probeta 01 con Dosificación 1 Sin Aditivo
E02D2AS	Probeta 02 con Dosificación 1 Sin Aditivo
E03D2AS	Probeta 03 con Dosificación 1 Sin Aditivo
E04D2AS	Probeta 04 con Dosificación 1 Sin Aditivo
E05D2AE	Probeta 05 con Dosificación 1 con Escoria
E06D2AE	Probeta 06 con Dosificación 1 con Escoria
E07D2AP	Probeta 07 con Dosificación 1 con PET
E08D2AP	Probeta 08 con Dosificación 1 con PET
E09D2AP	Probeta 09 con Dosificación 1 con PET
E10D2AP	Probeta 10 con Dosificación 1 con Escoria
E11D2APE	Probeta 11 con Dosificación 1 con Escoria
E12D2APE	Probeta 12 con Dosificación 1 con Escoria
E16D3AH10	Probeta 16 con Dosificación 3 con 10% humo de sílice
E17D3AH10	Probeta 17 con Dosificación 3 con 10% humo de sílice
E18D3AH15	Probeta 18 con Dosificación 3 con 15% humo de sílice
E19D3AH20	Probeta 19 con Dosificación 3 con 20% humo de sílice
E20D3AH20	Probeta 20 con Dosificación 3 con 20% humo de sílice
E21D3AH15	Probeta 21 con Dosificación 3 con 15% humo de sílice
E22D3AH15	Probeta 22 con Dosificación 3 con 15% humo de sílice
E23D3AH20	Probeta 23 con Dosificación 3 con 20% humo de sílice
E24D3AH20	Probeta 24 con Dosificación 3 con 20% humo de sílice
E25D3AH20	Probeta 25 con Dosificación 3 con 20% humo de sílice
E26D4AH20	Probeta 26 con Dosificación 4 con 20% humo de sílice
E27D4AH20	Probeta 27 con Dosificación 4 con 20% humo de sílice
E28D4AH20	Probeta 28 con Dosificación 4 con 20% humo de sílice
E29D4AH20	Probeta 29 con Dosificación 4 con 20% humo de sílice
E30D4AH20	Probeta 30 con Dosificación 4 con 20% humo de sílice
E31D4AH20	Probeta 31 con Dosificación 4 con 20% humo de sílice
E32D4AH20	Probeta 32 con Dosificación 4 con 20% humo de sílice
E33D4AH20	Probeta 33 con Dosificación 4 con 20% humo de sílice
E34D4AH20	Probeta 34 con Dosificación 4 con 20% humo de sílice
E35D4AH20	Probeta 35 con Dosificación 4 con 20% humo de sílice
E36D5AH20	Probeta 36 con Dosificación 5 con 20% humo de sílice
E37D5AH20	Probeta 37 con Dosificación 5 con 20% humo de sílice
E38D5AH20	Probeta 38 con Dosificación 5 con 20% humo de sílice

Tabla 3.11 Relación de probetas con descripción.

3.1.7. Elaboración de mezclas

Una vez obtenida la dosificación, para la elaboración de la mezcla se pesó el material de acuerdo a las cantidades obtenidas para esta operación se ocupa una báscula de 25 kg (Fig. 3.7).



Fig. 3.7 Pesaje del material cementante empleado para la elaboración del concreto poroso

El agregado grueso se colocó en agua para saturarlo y para que al momento de la elaboración de la mezcla, el material no absorba el agua, este proceso debe de cumplir por lo menos 24 horas.

Antes de realizar la mezcla el material saturado se debe escurrir y secar el excedente de agua ya que demasiada agua en la mezcla provoca que disminuya el contenido de vacíos.

En la elaboración de la mezcla se utilizaron probetas de ensayo, también llamados cilindros de concreto; estas probetas son de 30 cm. de alto por 15 de diámetro y un volumen aproximado de 0.0053 m³, las probetas debe se les debe aplicar una capa de aceite requemado en sus paredes para facilitar el desmolde y no dañar el espécimen (Fig. 3.8).



Fig. 3.8 Aplicación de aceite a probetas

Para la elaboración de la mezcla el material se va revolviendo a través de una revolvedora mecánica (Fig. 3.9), la cual ayuda a homogenizar la mezcla, para esto se agrega primero el agregado fino y grueso, posteriormente se añade el cemento y el aditivo, esperando a que se revuelvan bien estos elementos pero sin olvidar rociar agua con una piseta, esto debido a que el material fino como el cemento y el humo de sílice con el movimiento de la revolvedora se pierden cantidades significativas, por último se agrega el agua y se deja trabajar la revolvedora por minuto y medio.



Fig. 3.9 Elaboración de mezcla utilizando revolvedora de un saco

Para el llenado del cilindro con el concreto se debe realizar en 3 capas, esto con el fin de poder compactar de manera eficiente el material dentro del molde, para realizar esto se utiliza una varilla punta de bala, con la cual se aplican 25 golpes por cada capa y lograr un mejor acomodo del material, posterior a esto se utiliza un pisón de mano para dar 7 golpes y lograr una reducción en el espacio de vacíos, para tratar de compactar de manera homogénea se utilizó un pisón de aproximadamente 60 centímetros de altura y así aplicar la misma fuerza a todos los puntos, este proceso de compactación se realizó en cada una de las capas (Fig. 3.10).



Fig. 3.10 Llenado y compactado de cilindros

La probeta o cilindro debe de desmoldarse 24 horas después de haber colocado la mezcla en el molde (Fig. 3.11).



Fig. 1.11 Desmolde de concreto permeable

Para ayudar alcanzar la resistencia del concreto las probetas se deben curar, el curado del concreto es mantenerlo húmedo logrando que este sea más fuerte la adherencia de los materiales, el término curado se emplea para referirse al mantenimiento de un ambiente favorable para continuar las reacciones químicas en el concreto esto implica la retención de humedad interior o bien el suministro de humedad al concreto, es importante el curado a edades tempranas en este tiempo es donde se constituye la estructura interna del concreto y le permite adquirir mayor resistencia.

Existen varias formas de realizar este procedimiento en nuestro caso hicimos el uso de dos, la primera que consiste en dejar en agua los especímenes durante los 7, 14 y 28 días que es el tiempo que hay que esperar para realizar las pruebas de compresión

El segundo método es el uso de una cámara de curado acelerado la cual en su interior lleva agua, la cual se calienta logrando generar vapor este proceso debe ser controlado ya que en las primeras horas debe subir gradualmente la temperatura hasta llegar a 65° y mantenerse por aproximadamente unas 12 horas y posteriormente reducirla a temperatura ambiente todo el proceso es recomendable que dure 24 horas y nos ayuda a conocer la resistencia del concreto en un menor tiempo (Fig. 3.12) para finalizar el espécimen como se muestra en la Figura 3.13.



Fig. 2.12 Probetas en la cámara de curado acelerado



Fig. 3.13 Probetas de concreto permeable

3.2. Equipo empleado

Balanza mecánica de alta resistencia de 20 kg con sensibilidad de 1gr. Capacidad de tara de 2270 gr. Calibraciones: barra delantera de 100*1gr. Barra trasera de 100*100gr. Plato de acero inoxidable de 27.9 cm de diámetro, amortiguación magnética para acelerar el proceso de pesaje (Fig. 3.14).



Fig. 3.14 Balanza 20 Kg. utilizada para pesar material

Pisón, maza con peso deslizante, cara de la maza 2" (50.8mm de diámetro), altura de caída libre 18" (457.2mm), peso deslizante de 10 libras (4.54 kg) de la marca Controls (Fig. 3.15).



Fig. 3.15 Pisón usado para compactado de mezcla

Juego de tamices de 8" de diámetro de abertura de 3", 2 ½", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", ¼" y las No. 4, 8, 10, 12, 16, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 200 fondo y tapa (Fig. 3.16).



Fig. 3.16 Tamices para cribar agregado grueso y fino

Olla eléctrica para fundir azufre con termostato ajustable y luz piloto de 3.8 lt marca ELVEC modelo E 640 (Fig. 3.17).



Fig. 3.17 Olla para fundir azufre utilizado en el cabeceo de probetas

Prensa mecánica para cilindros y vigas de concreto con manómetro digital, marca ELVEC modelo 673 de 120 toneladas de compresión con manómetro marca ADMET de reseteo automático (Fig. 3.18 y 3.19).

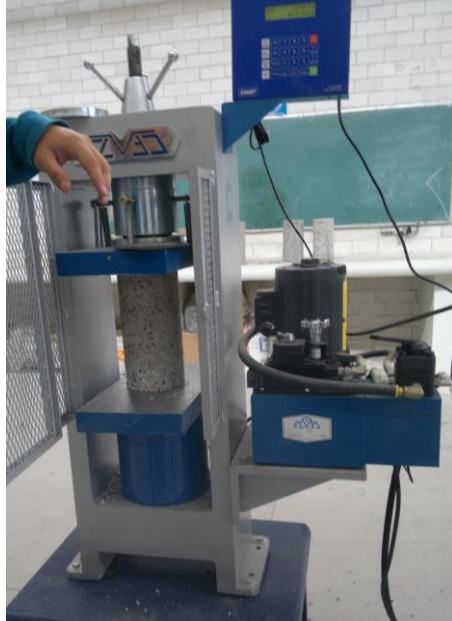


Fig. 3.18 Prensa para tronado de cilindros



Fig. 3.19 Prensa para tronado de vigas

Tanque de curado acelerado de concreto programable, No. De serie. 12011020 (Fig. 3.20).



Fig. 3.20 Cámara de curado acelerado

3.3. Aditivos

Se considera aditivo a cualquier elemento que se adiciona a la mezcla cambiando las propiedades de la misma para la investigación empleamos PET, escoria metálica y humo de sílice, para ayudar a la mezcla a obtener una mejora en cuanto a su resistencia, contenido de vacíos y permeabilidad del concreto poroso.

3.3.1. PET

Este elemento fue obtenido de botellas de plástico y agregado con el objetivo de lograr un aumento en la permeabilidad del concreto.

Se agregó en tiras de 8 cm de largo por 1 cm de ancho y un porcentaje del 10% con respecto a la cantidad de cemento que se utilizó en la mezcla (Fig. 3.21).



Fig. 3.21 PET en tiras para agregarlo a la mezcla

3.3.2. Escoria metálica

Se obtuvo de los desperdicios del acero al trabajarlo en un torno también llamado rebaba de los metales, siendo estos de diferentes tamaños y formas por lo regular son tiras muy delgadas (Fig. 3.22).

La cantidad que fue empleada fue del 10 % del cementante utilizado.



Fig. 3.22 Escoria metálica

3.3.3. Humo de sílice

Es un polvo fino parecido al cemento en un color rosa (Fig. 3.23) el cual incrementa la resistencia a la compresión, mejora la trabajabilidad y reduce la permeabilidad en la estructura interna del concreto.

Se probó con diferentes cantidades del 10, 15 y 20 % de la cantidad del cemento.



Fig. 3.23 Humo de sílice

3.4. Evaluación del concreto permeable

3.4.1. Resistencia a la compresión

La prueba para determinar la resistencia a la compresión, en esta investigación, es el dato más importante y se obtiene durante un proceso de 28 días. Todo el proceso comienza al elaborar el concreto y depositarlo en unos cilindros especiales para esta prueba, los cuales son descimbrados a las 24 hrs. de su colado, sumergiéndolos inmediatamente en un estanque de agua limpia. Los cilindros son extraídos cada 7 días para su ensaye en una máquina de compresión o en una máquina Universal, que se encarga de comprimir los cilindros hasta que éstos fallan, tomando ese dato final como la carga que resiste, ese determinado concreto, a esa determinada edad.

Ese resultado se divide entre el área del cilindro para obtener lo que conocemos como $f'c$ o resistencia a la compresión, en kg/cm^2 , a los 28 días. El avance del concreto cada 7 días nos muestra la buena o mala evolución de nuestra mezcla de concreto, siendo esto un indicador fidedigno del comportamiento real que tendrá en obra. Se puede observar de mejor manera el procedimiento en las figuras siguientes (Fig. 3.24).



Fig. 3.24 Probetas de ensayo con mezclas de concreto poroso normal y modificadas con escoria y PET



Fig. 3.25 Desmolde de probetas que serán sujetas a curado a 7, 14 y 28 días para su posterior tronado

En algunas ocasiones al realizar el desmolde de los cilindros se pueden dañar debido a sus características propias de los mismos y a su conformación granulométrica, por eso es necesario realizar este procedimiento con sumo cuidado, para que al momento de realizar la prueba de resistencia a la compresión no se tengan alteraciones de los resultados a causa de esfuerzos diferenciales (Fig. 3.25).

El curado de las probetas de ensayo deberá de efectuarse en tinas donde estos se sumergirán y se dejarán reposar durante periodos de 7, 14 y/o 28 días, estos con la intención de tener datos estadísticos que nos ayuden a tener un parámetro de la resistencia que tendrá el concreto durante los diferentes lapsos de vida del mismo (Fig. 3.26).



Fig. 3.26 Curado de cilindros a 7 días, en cubetas de capacidad de 20 lts

Cuando al desmoldar se presentan las imperfecciones antes mencionadas es necesario realizar un cabeceo a cada una de las muestras por ambos extremos, dicho proceso se realiza calentando azufre en un contenedor a una temperatura de 360°C , una vez que se ha tomado una forma líquida se vacía en un cabeceador; esto es para poder eliminar las imperfecciones que tengan las probetas (Fig. 3.27).

El procedimiento se efectúa en ambos lados del cilindro, posterior a ello se coloca el cilindro en la prensa para poder efectuar la prueba de resistencia a la compresión (Fig. 3.28 y 3.29).



Fig. 3.27 Cabeceo de cilindros con azufre



Fig. 3.28 Ensayo de probetas en prensa para prueba de resistencia a la compresión



Fig. 3.29 Falla a 45° después de aplicarse una carga

3.4.2. Contenido de vacíos

Para determinar el contenido de espacio vacíos se utilizó una cubeta, la cual se llenó a un nivel de agua aproximadamente de 25 centímetros de altura. Inmediatamente se introduce el cilindro y se mide cual es el nuevo nivel de agua para así poder determinar el porcentaje de vacíos que tiene el cilindro (Fig. 3.30).



Fig. 3.30 Determinación del contenido de vacíos

3.4.3. Permeabilidad

Con respecto a la permeabilidad se colocó alrededor del cilindro una barrera que no dejara escurrir el agua, para esto se empleó un tubo de PVC de 6" de diámetro, todo esto se colocó en la parte superior de una cubeta y se vertía un litro de agua, midiendo el tiempo que tarda el agua en caer en la cubeta y los mililitros que se filtraron, esta prueba se repitió 3 veces y se promedió el valor (Fig. 3.31 y 3.32).



Fig. 3.31 Prueba de permeabilidad



Fig. 3.32 Permeabilidad en losa

4. CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos de las pruebas de cada uno de los especímenes con sus diferentes dosificaciones y aditivos así como las pruebas realizadas en los agregados con los cuales se hizo el diseño de mezcla.

4.1. Propiedades mecánicas de los agregados

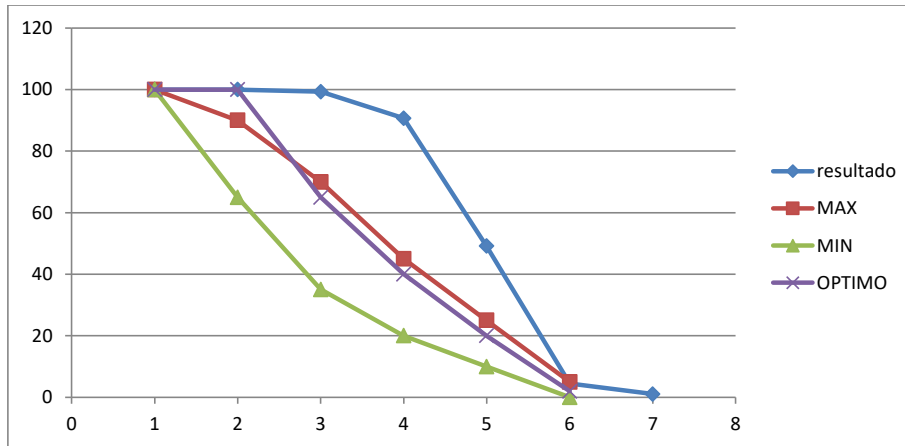
Para poder realizar el diseño de la mezcla se realizaron pruebas a los agregados, las cuales consisten en granulometría, peso volumétrico y contenido de humedad.

4.1.1. Resultado de granulometría

Tabla 4.1 Granulometría del agregado grueso

MALLA	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% PASA
1"	0	0	100
3/4"	34.8	0.696	100
1/2"	433.8	8.676	99.304
3/8"	2075	41.5	90.628
1/4"	2235	44.7	49.128
No. 4	170	3.4	4.428

La Tabla 4.1 se registran los valores obtenidos de la muestra de agregado grueso a la que se realizó la prueba de granulometría, en la gráfica 4.1 observamos valores máximos (línea color rojo), mínimos (línea color verde) dados por la normativa N-CMT-2-02-002/02 (2002) para agregados. Los valores obtenidos del muestreo del agregado (línea azul), se observa que están fuera de los valores establecidos en la norma por tal motivo se realizó un ajuste en la granulometría del material (línea morada).



Gráfica 4.1 Granulometría del agregado

Se presenta una curva granulométrica con valores fuera de los recomendados para el agregado grueso por esta razón se realizó un ajuste en la granulometría del material para cumplir los valores máximos y mínimos establecidos por las normativa de materiales.

Siendo los porcentajes retenidos utilizados en la mezcla los siguientes:

Tabla 4.2 % Retenidos del agregado grueso utilizados en la mezcla

Malla	% Retenido
3/4"	35
1/2"	25
3/8"	20
1/4"	18
No. 4	2

Los valores de la tabla 4.2 indican el porcentaje de cada una de las granulometrías del peso total del agregado grueso utilizado en la mezcla, esta granulometría debido a que tiene distintos tamaños del agregado ayuda a tener una menor cantidad de intersticios favoreciendo la resistencia a la compresión.

4.1.2. Resultados peso volumétrico

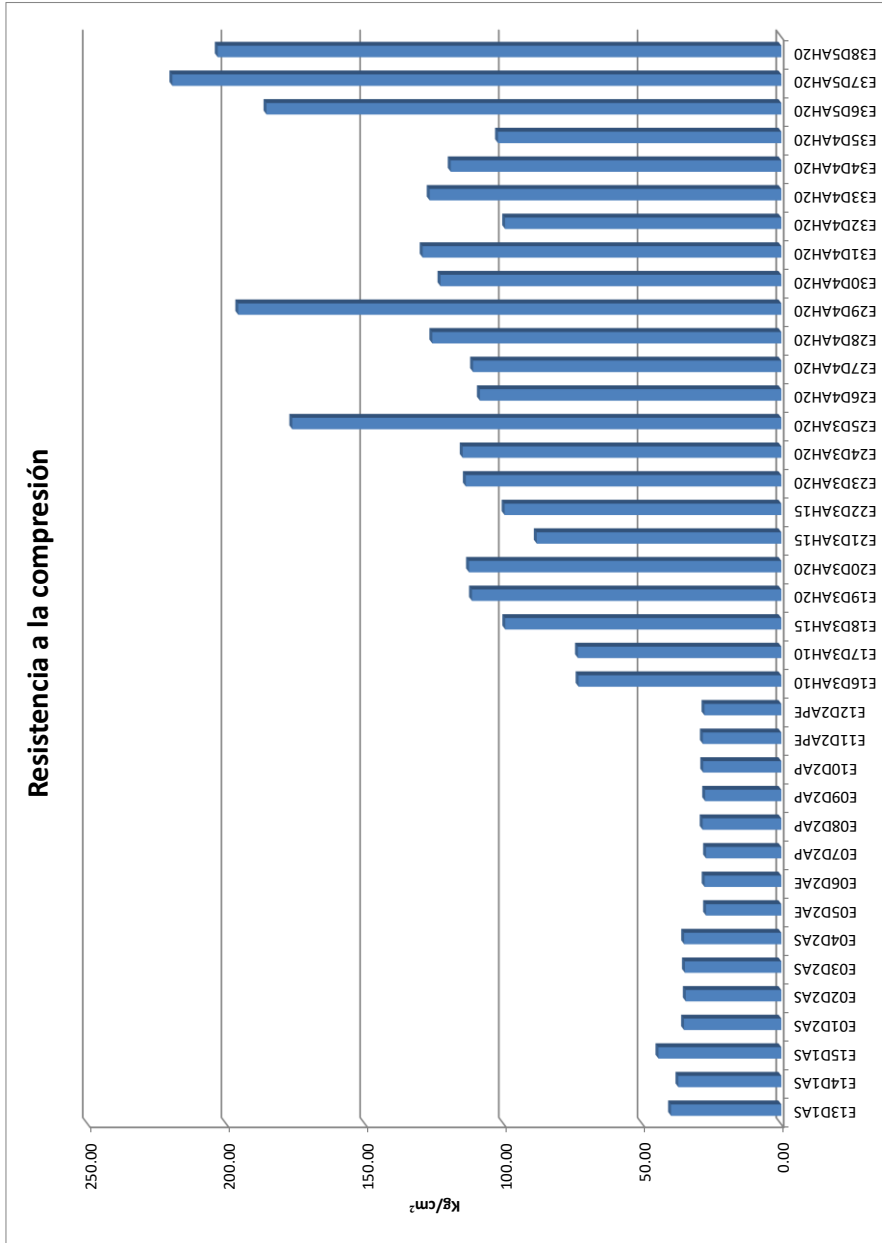
El peso volumétrico obtenido del agregado grueso que fue usado en la mezcla es de 1.3725 kg/cm³ el cual representa el peso del material existente en un centímetro cúbico, este valor es empleado en el diseño de mezcla.

4.1.3. Resultados contenido de humedad

El contenido de humedad que se presentó en la muestra del agregado en el momento de la elaboración de la mezcla fue de 8.61 este porcentaje es la cantidad de agua que absorbe el material por lo cual hay que considerarlo para compensarlo en el agua de la mezcla.

4.2. Características de los especímenes

Se presentan los resultados obtenidos de las pruebas que se realizaron a los distintos especímenes así como la interpretación de las gráficas. Se observa el desempeño con los distintos aditivos en la resistencia a la compresión. (Gráfica 4.2).



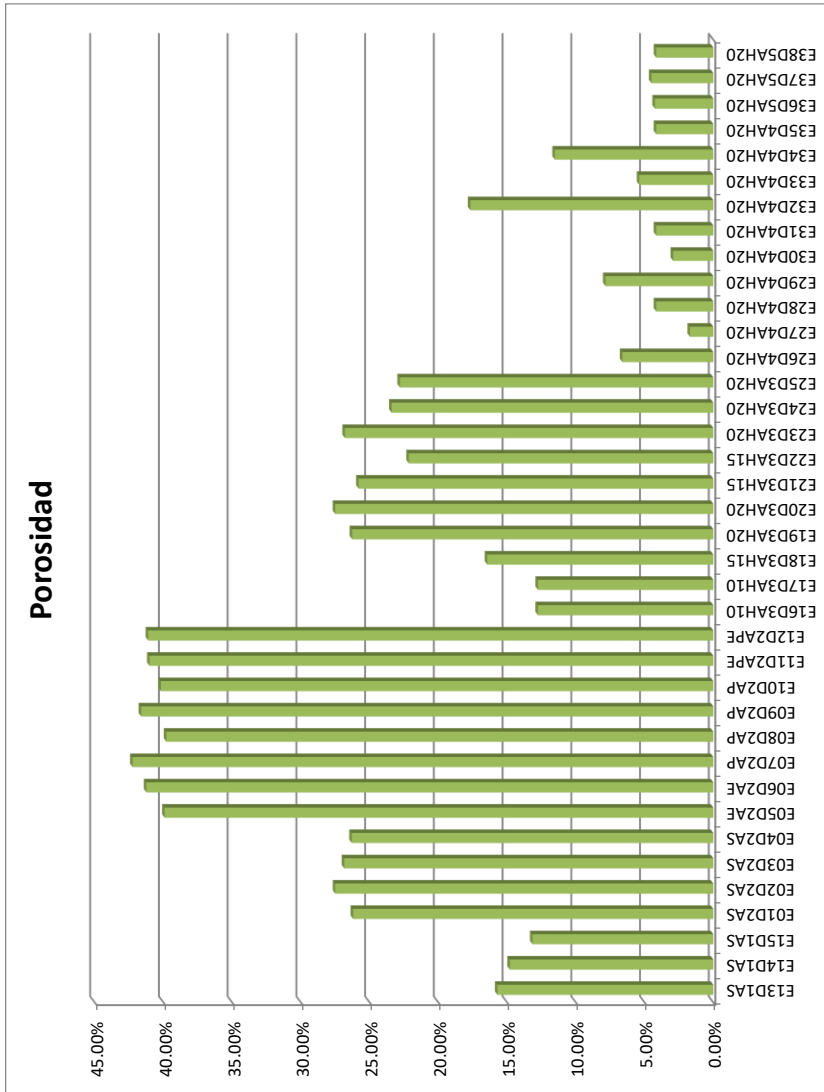
Gráfica 4.2 Resistencia a la compresión

En la gráfica 4.2 se muestra el comportamiento de los diferentes especímenes realizados. En ésta se pueden identificar resistencias a la compresión en un rango de 20 a 45 kg/cm² en los especímenes que no cuentan con algún aditivo al igual que los que tienen Escoria metálica y PET. Los especímenes con aditivo, así como los que contienen Escoria metálica y PET no obtuvieron buenas resistencias a la compresión, debido a que no permiten una adherencia adecuada en el concreto. Por tal motivo, en aquellos especímenes que no tuvieron aditivos, la adherencia fue mejor y, por lo tanto, su resistencia a la compresión también.

La gráfica 4.2 demuestra que los especímenes con mayor resistencia son los que contienen humo de sílice, ya que de acuerdo con las características que se describieron anteriormente, este es un material que ayuda a lograr una mayor resistencia permitiendo reforzar las pequeñas superficies de contacto que hay entre cada piedra de grava.

Los especímenes con humo de sílice presentan diferencias entre unos y otros. Esta variación es debido a que no todos tienen la misma cantidad de sílice, este valor de contenido de sílice varía de un 10% – 20%, donde los especímenes con mayor cantidad de resistencia son aquellos que tienen un porcentaje de sílice más alto (20%).

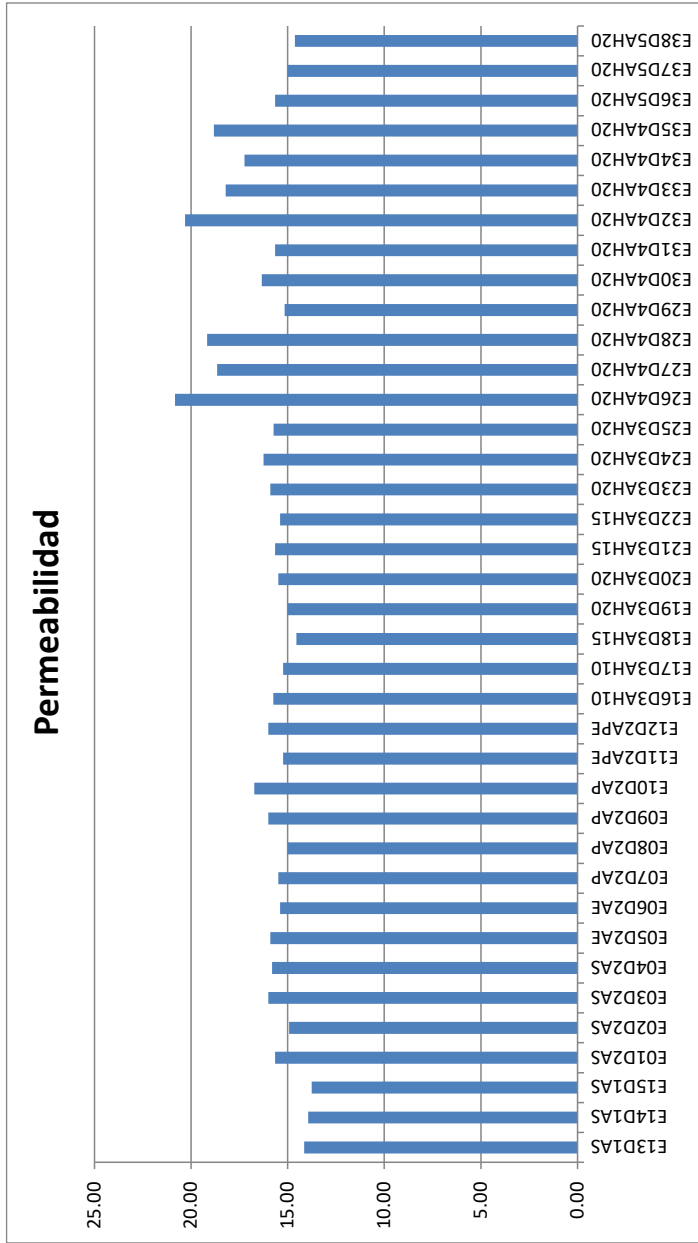
Cabe mencionar que entre los especímenes con un 20% de humo de sílice se realizó una modificación a la dosificación. Esta modificación se realizó en la cantidad de agua para así lograr una menor cantidad de espacios vacíos; sin embargo, al aumentar el agua se afectó a la relación agua/cemento, la cual al ser más alta se obtiene una menor resistencia.



Gráfica 4.3 Porosidad

La gráfica 4.3 demuestra que la mayor cantidad de porosidad se presenta en los especímenes que tienen como aditivo Escoria metálica, PET y PET-Escoria. Debido al acomodo interior, los especímenes de sílice fueron los especímenes con menor porosidad

de sílice donde en la parte derecha de la gráfica se aprecia una menor cantidad de porosidad en comparación de los especímenes de la parte central. Este cambio drástico de unos especímenes con otros se debe a la dosificación, ya que los últimos tienen un mayor contenido de agua, la cual ayudó a cerrar de manera considerable los espacios. Lo anterior se justificó para lograr una mayor resistencia a la compresión, aunque al contener mayor cantidad de agua, la relación agua/cemento se afectó como ya se mencionaba anteriormente.



Gráfica 4.4 Permeabilidad

De acuerdo con la gráfica 4.4, se muestra el comportamiento de las distintas muestras de concreto, dentro de las cuales están los especímenes sin aditivo, con escoria de alto horno, con PET y con humo de sílice, los cuales fueron empleados para tratar de aumentar la resistencia a la compresión. Con los resultados obtenidos se demuestra que cualquier dosificación puede servir de manera adecuada para filtrar el agua superficial a capas inferiores de tierra, pero también se muestra que las mezclas con humo de sílice son mejores. Como se describió en capítulos anteriores, el sílice por sus características llega a formar una capa, la cual es impermeable así no existe una pérdida de agua por la absorción de agua por el concreto.

Las muestras con PET y escoria presentaron una pequeña disminución de la resistencia por la absorción de agua pero por el aditivo que se usó ayudó a la permeabilidad a aumentarla. En el caso particular del PET es un aditivo que prácticamente no permite la adhesión con el concreto, por esta razón queda en su estado natural y de esta manera permite un paso de agua fluido a través de la estructura del cilindro de concreto.

Los especímenes con Escoria metálica tienen un comportamiento similar al PET, también impiden la adhesión del concreto, haciendo posible el flujo de agua a través del aditivo.

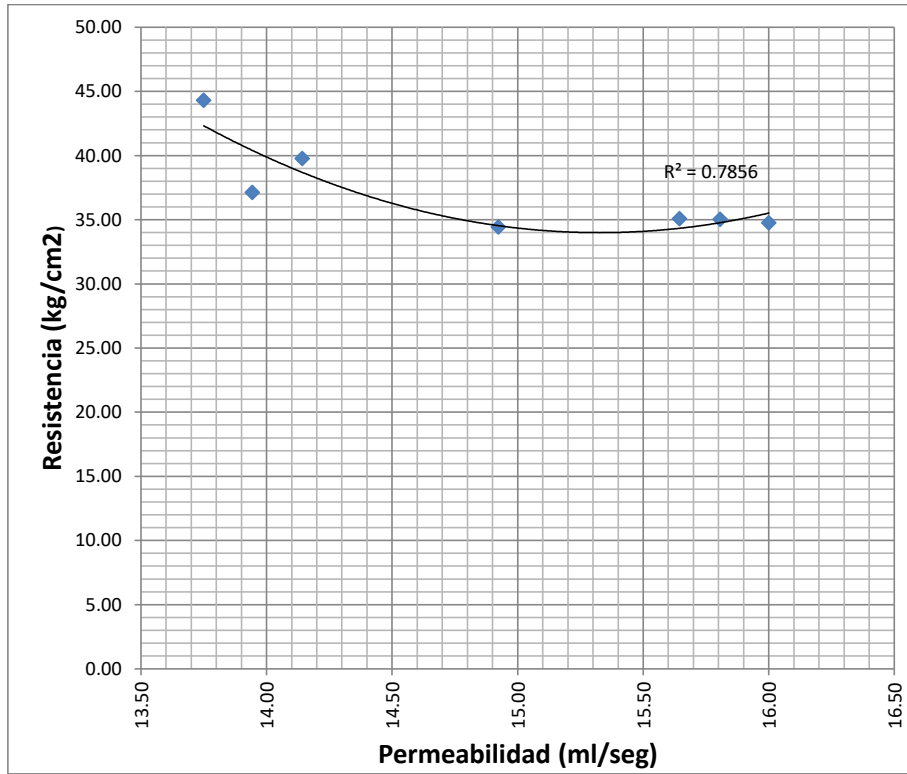
De los especímenes sin aditivo tuvieron los resultados desfavorables pero estos solo sirvieron como punto de comparativa frente al uso de los aditivos y poder comprobar si existe mejoría con el uso de aditivos.

4.2.1. Por aditivos

4.2.1.1. Sin Aditivo

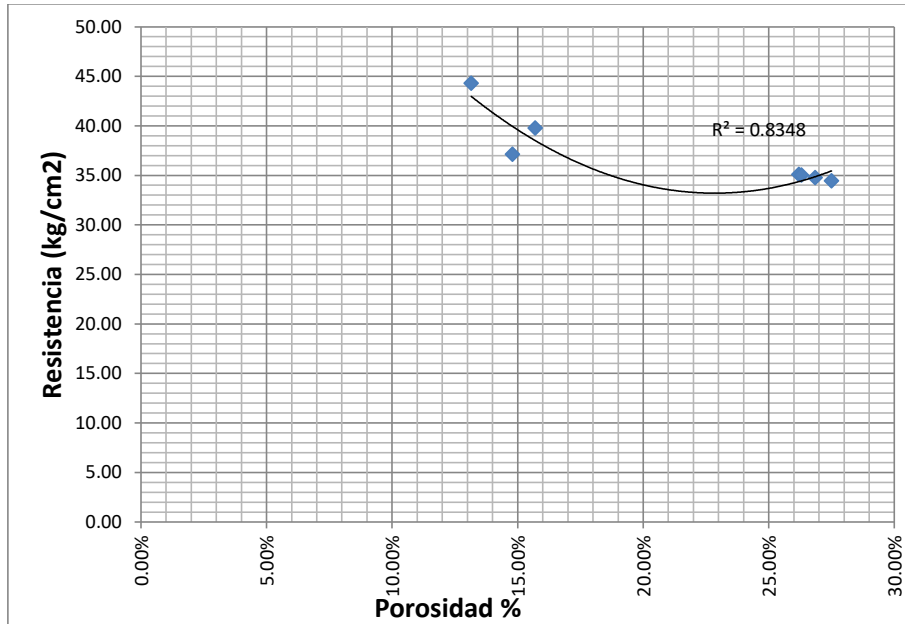
En la gráfica 4.5 se observa el comportamiento de los especímenes, describe una relación en la cual conforme aumenta la resistencia, disminuye la permeabilidad, el primer valor que tiene la mayor resistencia y menor permeabilidad en comparación de los demás

especímenes que no tienen algún aditivo. A partir de este momento comienza a disminuir la resistencia conforme aumenta la permeabilidad.



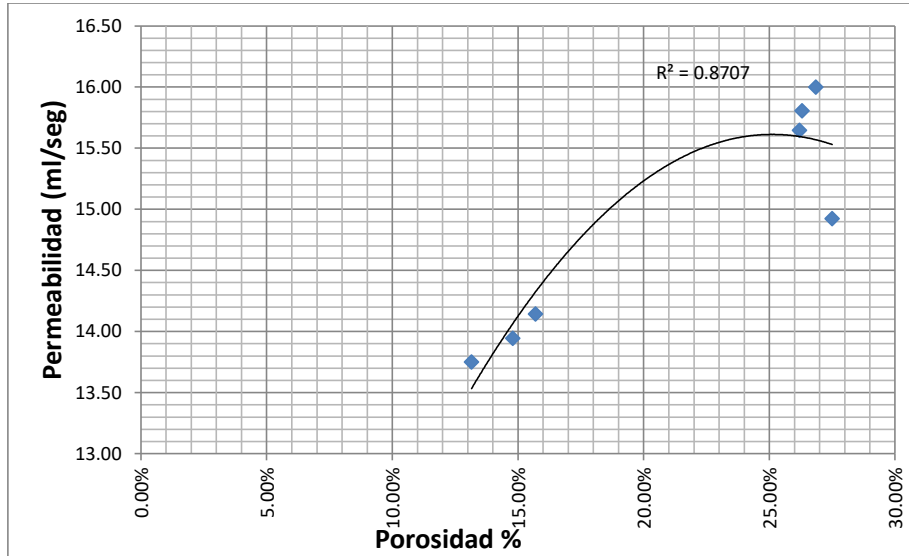
Gráfica 4.5 Resistencia y permeabilidad sin aditivo

En la gráfica 4.6 se muestra el comportamiento en la cual existe una relación entre la resistencia y la porosidad. La gráfica comienza con el valor máximo de resistencia pero con la menor porosidad. Esto representa que a menor cantidad de poros se dispone de una cantidad mayor de resistencia y conforme va disminuyendo la resistencia se va disminuyendo la porosidad, esta variación es causada por el acomodo interior, a pesar de que se siguió una rigurosa metodología para el acomodo interior de partículas, este no pudo garantizar el acomodo similar entre especímenes, dando distintos resultados en cuestión de la porosidad.



Gráfica 4.6 Resistencia vs porosidad sin aditivo

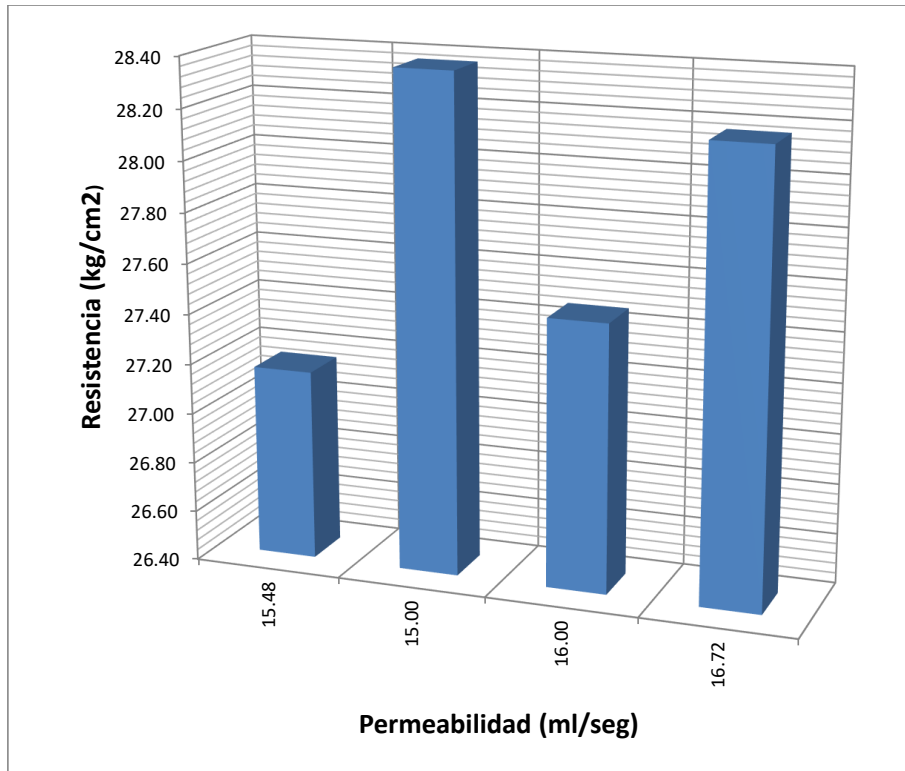
La gráfica 4.7 muestra una estrecha relación entre la permeabilidad y la porosidad sin aditivo, en la cual se aprecia que conforme la permeabilidad aumenta también lo realiza la porosidad, esto se debe a que entre mayor porosidad se obtiene una mayor permeabilidad, pues estructuralmente los especímenes que tienen mayor permeabilidad y porosidad poseen una mayor cantidad de orificios por los cuales puede pasar el agua, en el caso de esta gráfica en la parte final derecha se observa un mínimo el cual es consecuencia del espécimen E02DAS el cual debido a su acomodo se obtuvo esta variación en la gráfica.



Gráfica 4.7 Resistencia vs porosidad sin aditivo

4.2.1.2. PET

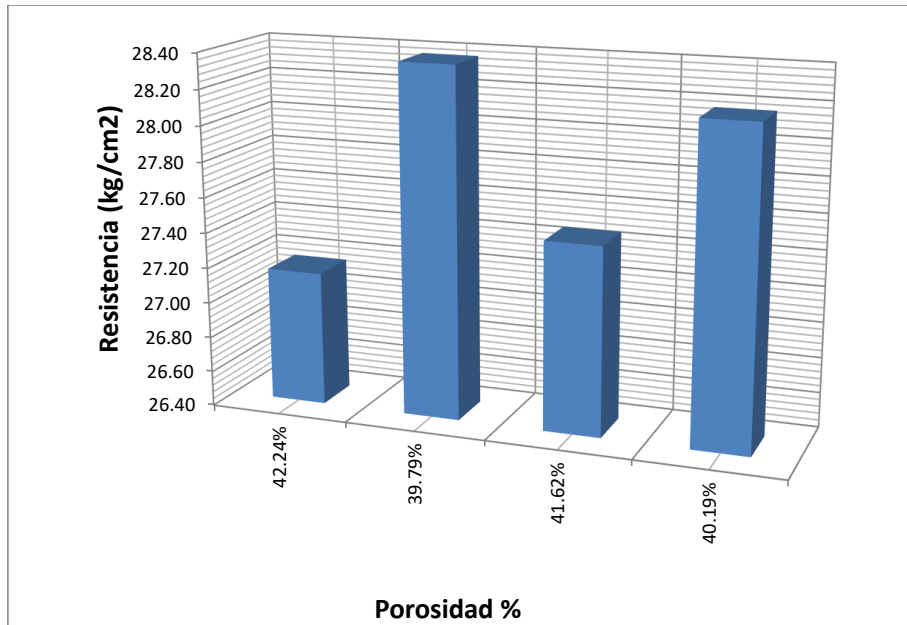
La gráfica 4.8 se nota que conforme aumenta la permeabilidad también lo hace la resistencia, solamente el segundo espécimen, el cual es diferente debido al acomodo en su estructura interior, formando conductos que favorecen la permeabilidad sin que se halla afectado a la resistencia.



Gráfica 4.8 Resistencia vs permeabilidad PET

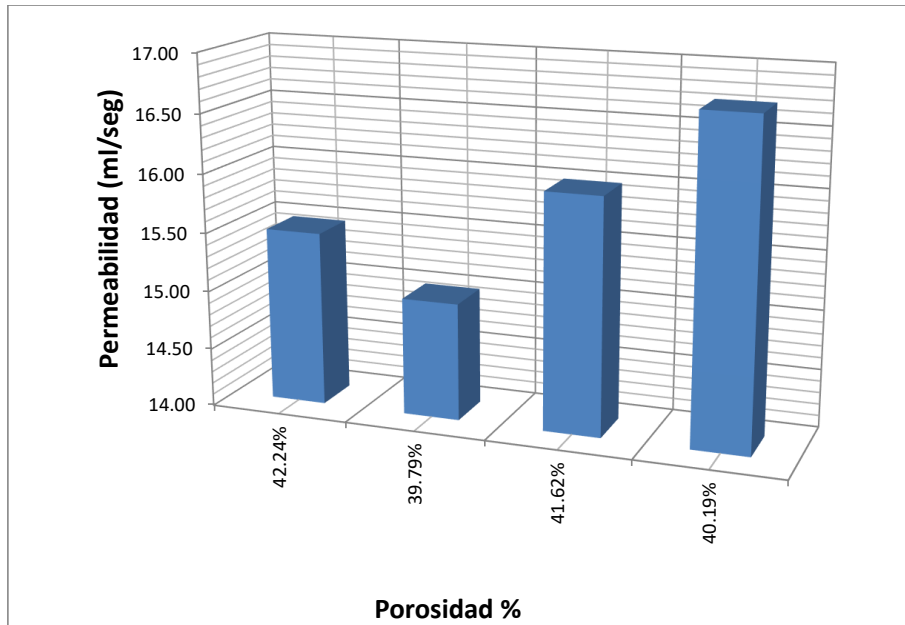
La gráfica 4.9 se puede observar que el espécimen con la mayor cantidad de resistencia es el que tiene menor porosidad, la porosidad tiene una estrecha analogía con la resistencia, pues al tener menor porosidad hay menos espacios ocupados por aire los cuales debilitan al concreto.

Para el caso de esta gráfica se aprecia que conforme se disminuye la porosidad el valor de la resistencia va ascendiendo, aquí al igual que la gráfica 4.8 se tiene un espécimen el cual no sigue este comportamiento por las razones anteriormente mencionadas.



Gráfica 4.9 Resistencia vs porosidad PET

En la gráfica 4.10 se aprecia que a mayor porosidad se obtiene una menor permeabilidad, debido al acomodo interior existe una pequeña diferencia entre los distintos especímenes, ya que los pedazos de PET en algunos casos están actuando como barrera las cuales dificultan el paso de agua y por esta razón se tiene una discrepancia.

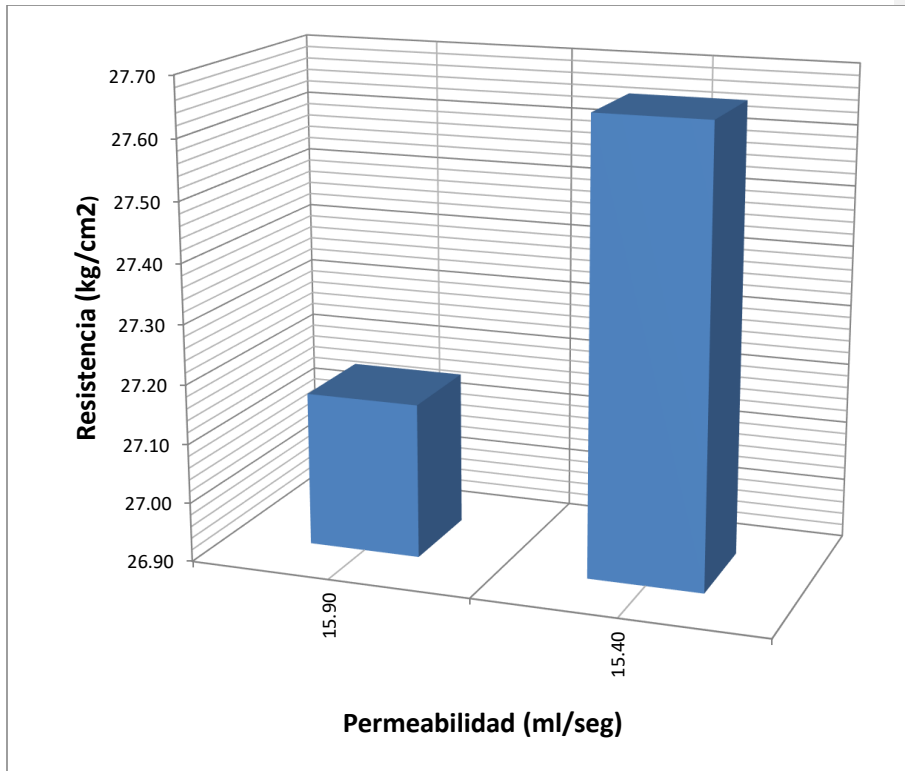


Gráfica 4.10 Permeabilidad vs porosidad PET

4.2.1.3. Escoria

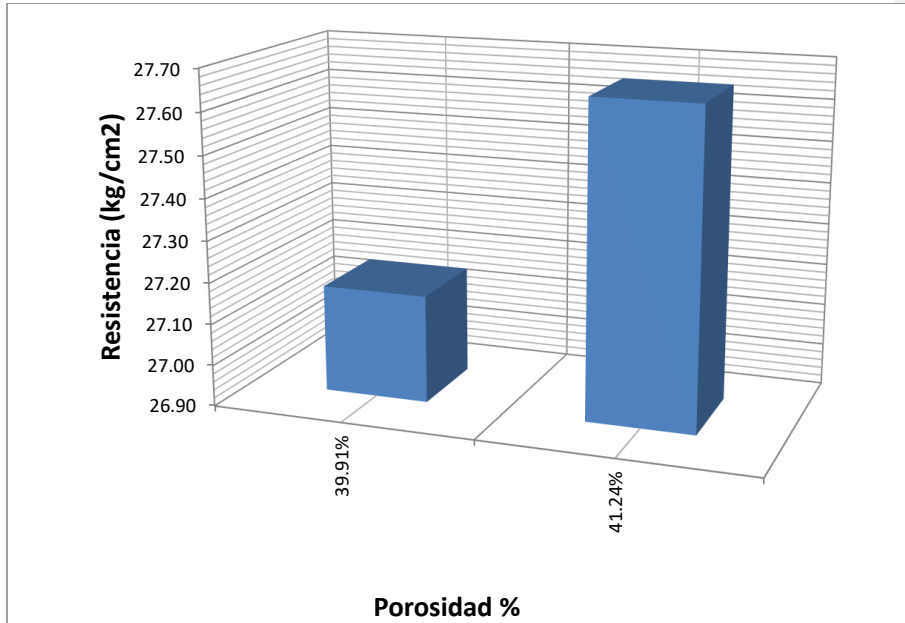
La gráfica 4.11 muestra los dos especímenes y cuyo valor promedio es de 15.65, la diferencia entre los dos especímenes se debe al acomodo interior.

También se puede percibir que a menor permeabilidad se puede lograr una mayor resistencia a la compresión aunque la diferencia entre las dos barras es pequeña.



Gráfica 4.11 Resistencia vs permeabilidad escoria

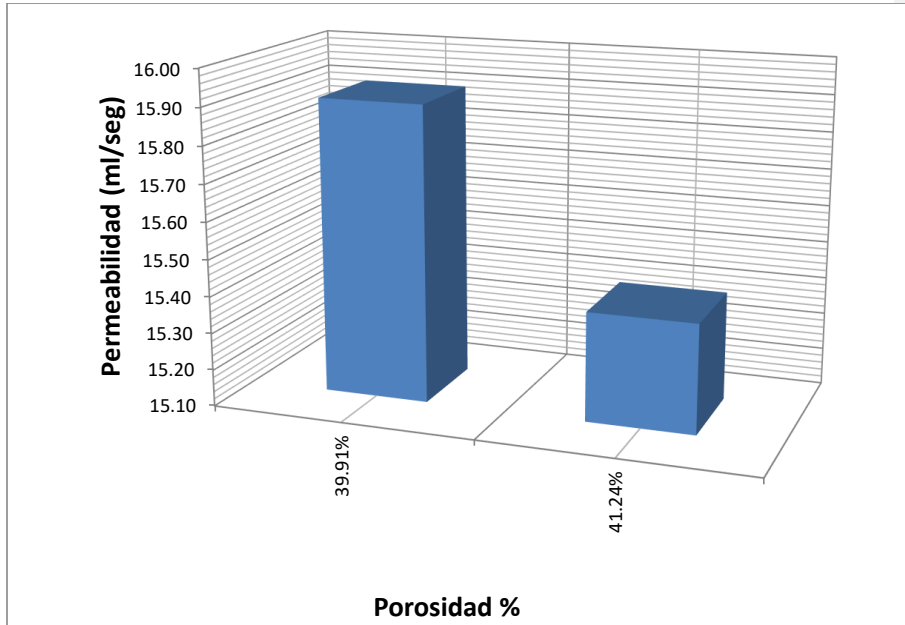
La gráfica 4.12 nos muestra la relación que existe entre la resistencia y la porosidad, en la cual se aprecia un aumento entre uno y el otro debido a la diferencia interior de su estructura al igual que a mayor porosidad se obtiene mayor resistencia.



Gráfica 4.12 Resistencia vs porosidad escoria

En la gráfica 4.13 se representa la disminución significativa que hay entre los dos especímenes, aunque esta diferencia es muy pequeña y es debida a la colocación de las partículas.

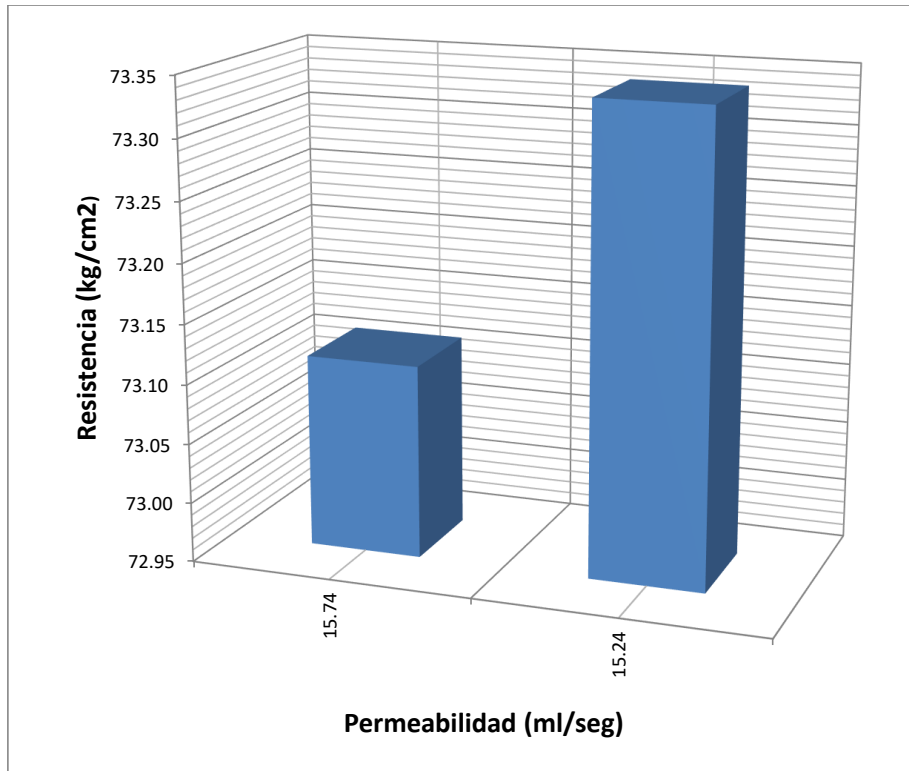
Se aprecia que a mayor cantidad de porosidad se tiene menor permeabilidad debido a que la escoria puede llegar a formar pequeñas barreras las cuales dificultan el paso del agua.



Gráfica 4.13 Permeabilidad vs porosidad escoria

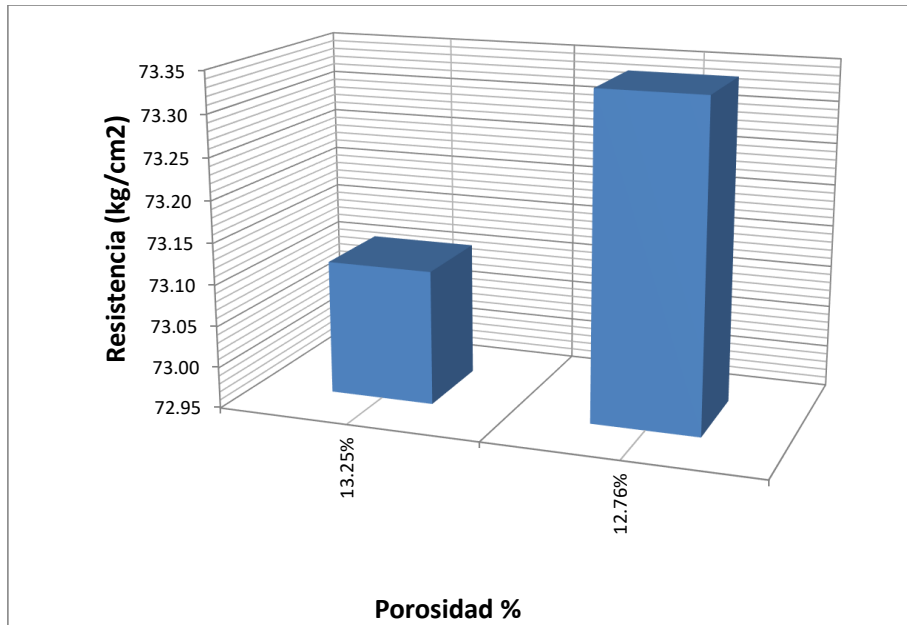
4.2.1.4. Humo de Sílice 10%

En la gráfica 4.14 se muestra como disminuye la resistencia conforme la permeabilidad aumenta, esta diferencia se debe principalmente al acomodo entre uno y el otro aunque la diferencia es pequeña obteniendo un promedio de 15.49 ml/seg.



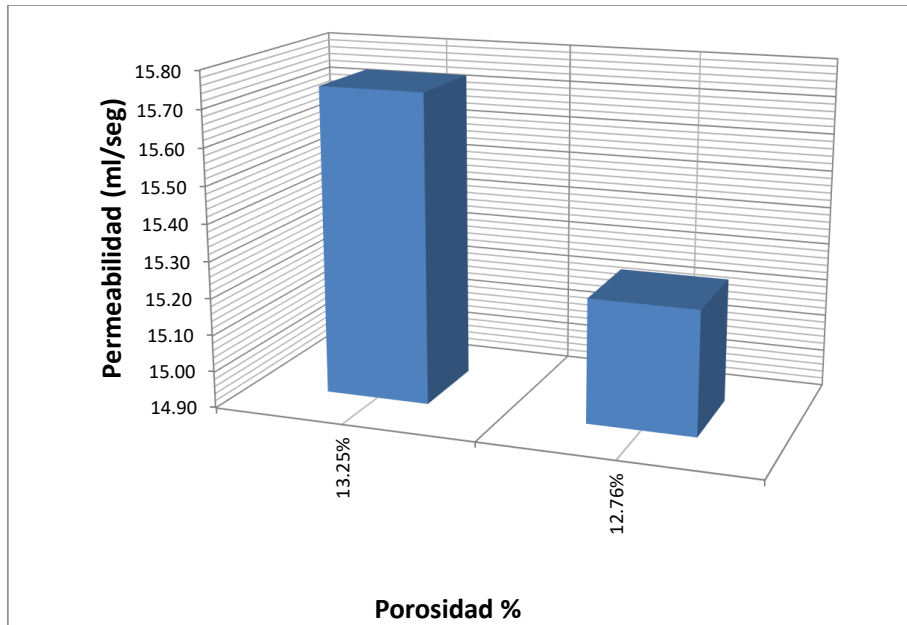
Gráfica 4.14 Resistencia vs permeabilidad sílice 10%

La gráfica 4.15 muestra como se está relacionando la resistencia con la porosidad, en la cual se muestra que a mayor porosidad se tiene una menor cantidad de resistencia aunque la diferencia entre ambas muestras es pequeña.



Gráfica 4.15 Resistencia vs porosidad sílice 10%

La gráfica 4.16 muestra la relación que hay entre la permeabilidad y porosidad, la diferencia de permeabilidad se debe a que se tienen más vías por las cuales puede filtrarse el agua y ser más permeable, sin embargo aunque existe una diferencia entre los dos puntos de la gráfica estos son pequeños y se debe a la estructura interna.

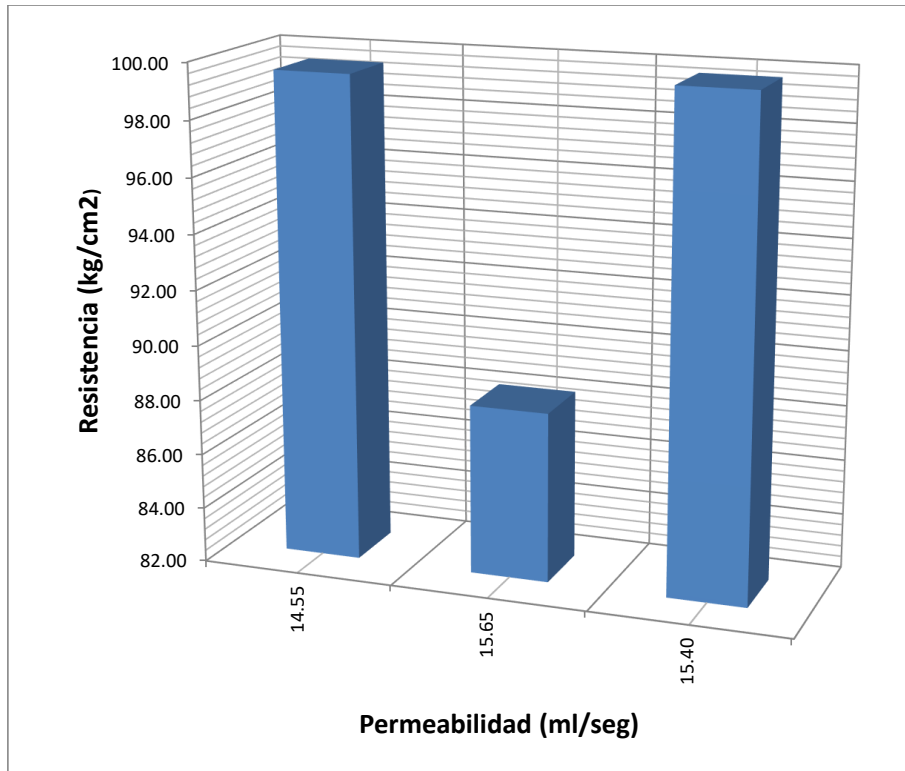


Gráfica 4.16 Permeabilidad vs porosidad 10%

4.2.1.5. Humo de sílice 15%

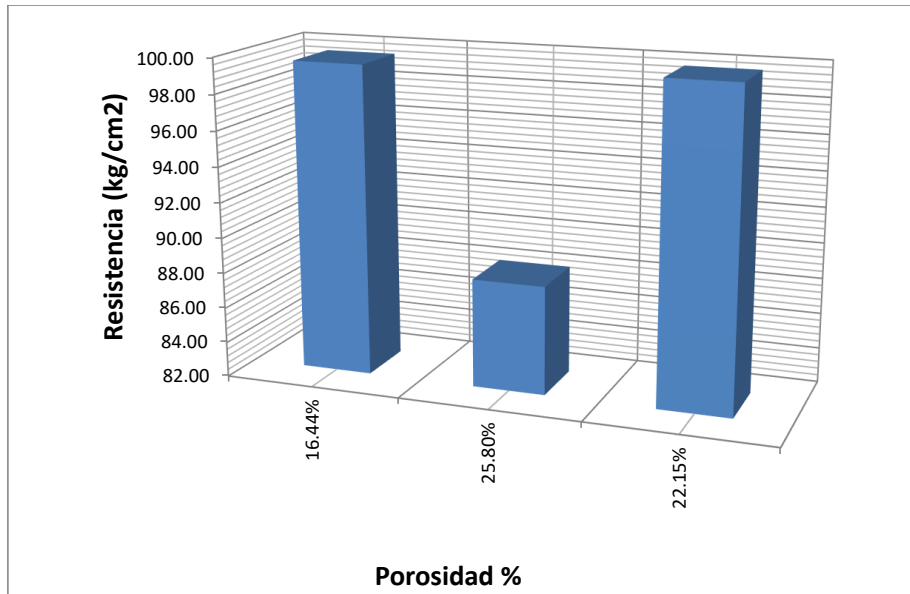
La gráfica 4.17 muestra que hay dos especímenes en los cuales la diferencia de ellos es pequeña en permeabilidad y similar en resistencia a la compresión debido al acomodo en su estructura, pues uno tiene un acomodo tal que permite un flujo mayor de agua a cambio del otro que dificulto el paso libre de agua a través del cilindro.

En esta gráfica se puede notar un espécimen el cual tiene resistencia menor que los otros dos, este espécimen no alcanzo la misma cantidad de resistencia por cómo se encontraban distribuidos sus partículas.



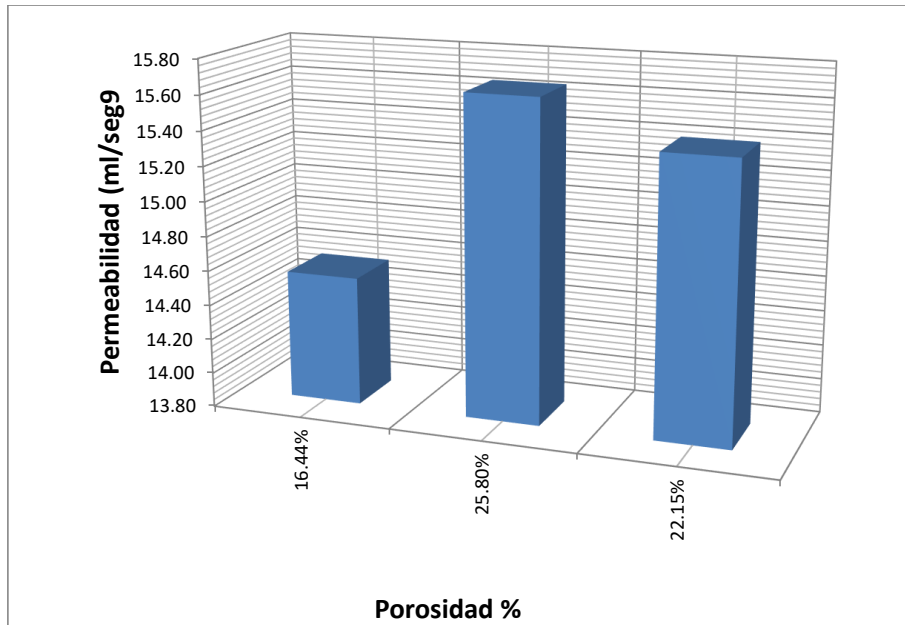
Gráfica 4.17 Resistencia vs permeabilidad sílice 15%

En la gráfica 4.18 se muestra el comportamiento que existe entre la resistencia y la porosidad, al igual que la gráfica 4.17 se obtiene un comportamiento similar, en el cual la diferencia de dos especímenes es pequeña y en comparación con el restante se tienen una diferencia mayor, la cual es ocasionada por el acomodo interior del concreto como se mencionó anteriormente.



Gráfica 4.18 Permeabilidad vs porosidad sílice 15%

Al momento de comparar la permeabilidad y porosidad se muestra que hubo un comportamiento a ir creciendo como se muestra en la gráfica 4.19.

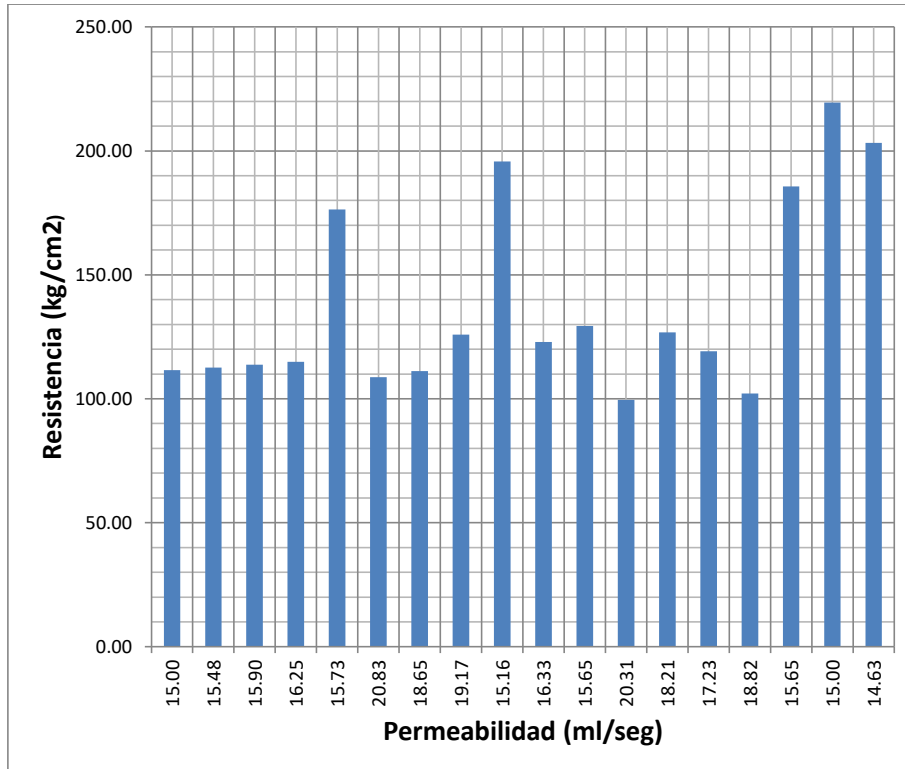


Gráfica 4.19 Permeabilidad vs porosidad sílice 15%

4.2.1.6. Humo de sílice 20%

El comportamiento de la resistencia contra la permeabilidad en las muestras elaboradas con humo de sílice en un 20% describe una tendencia a ir disminuyendo la resistencia conforme se va aumentando la permeabilidad como lo muestra la gráfica 4.20, este comportamiento sigue permaneciendo constante hasta el mínimo, en el cual ya no se tiene la misma conducta, en esta sección la resistencia va aumentando conforme la permeabilidad va incrementando.

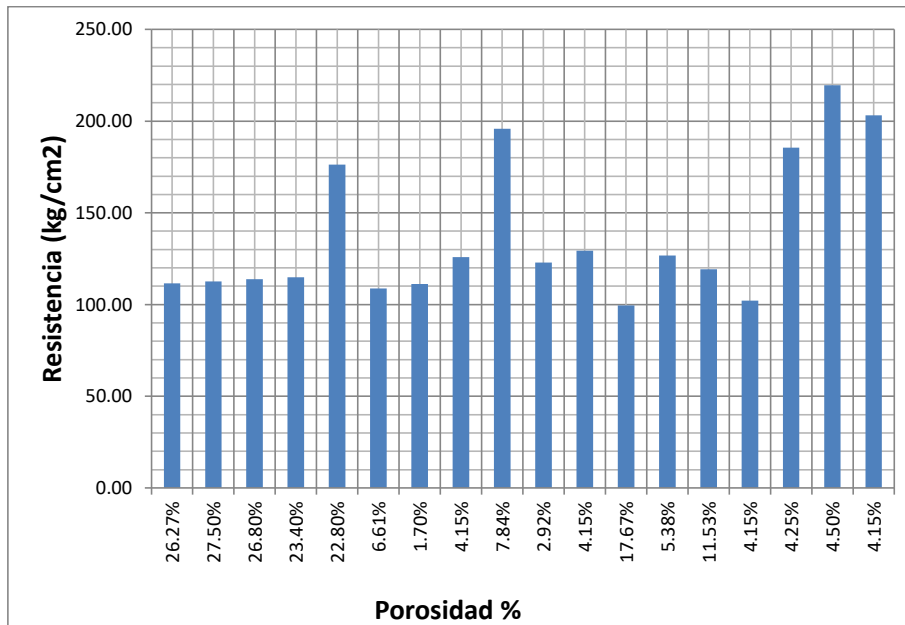
En esta gráfica se observa que los mejores cilindros en resistencia son las muestras E25DAH20, E29DAH20, E36DAH20, E37DAH20 Y E38DAH20 los cuales alcanzaron las mayores resistencias de todas las muestras. Aunque esta resistencia tan elevada provocó que tuvieran los valores más bajos de permeabilidad de toda la población de especímenes realizados, esto no significa que tengan una permeabilidad mala pues aun de esta manera siguen teniendo una velocidad de permeabilidad mayor a la de la mayoría de los suelos, por lo cual estos especímenes son los óptimos por sus características para el uso de un concreto permeable.



Gráfica 4.20 Resistencia vs permeabilidad sílice 20%

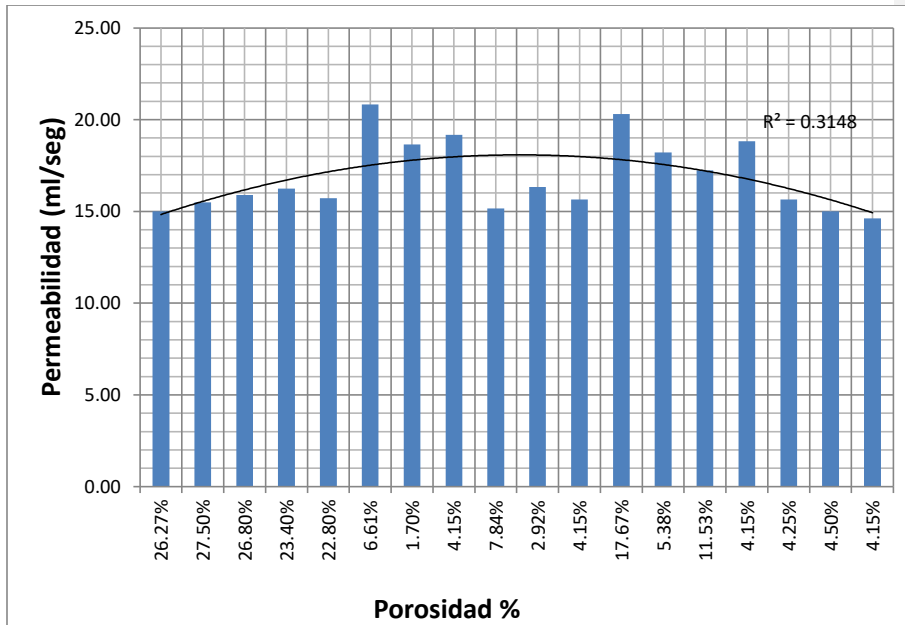
Los especímenes ubicados en la parte inferior izquierda de la gráfica 4.21 en su mayoría son en los que se agregó una cantidad mayor de agua, buscando una mayor resistencia pues el agua ayudaría a disminuir la cantidad de vacíos porque en lugar de tener espacios con aire ahora estarían contenidos de concreto.

Las muestras del lado inferior derecho de la gráfica una cantidad alta de porosidad en comparación con las primeras muestras pero con una resistencia inversa, esta diferencia se debe al acomodo en el cual para esta sección inferior de la gráfica prácticamente los resultados son similares en cuanto a resistencia solamente diferenciados en la porosidad.



Gráfica 4.21 Resistencia vs porosidad 20%

La relación entre permeabilidad y la porosidad es inversa, pues conforme el valor de la porosidad aumenta la permeabilidad disminuye como se muestra en la gráfica 4.22, aunque se menciona que existe una diferencia entre los datos de un extremo con respecto al otro se puede decir que son pequeños en cuanto a variación, esta pequeña variación es ocasionada por el hecho de que en los ejemplares con menor porosidad se logró una mejor colocación, pues los especímenes ubicados del lado derecho a pesar de tener mayor porosidad no se logró una configuración adecuada, en su estructura interna cuentan con obstáculos que hacen lenta la circulación de agua en sus poros vacíos.






Gráfica 4.22 Permeabilidad vs porosidad 20%

4.2.2. Relación de Aditivos

En las gráficas 4.23, 4.24 y 4.25 se realiza una comparativa de los mejores especímenes de cada uno de los aditivos para poder apreciar las diferencias entre uno y otro, en la Tabla 4.3 se muestran los colores utilizados por aditivos para identificar de mejor manera los diferentes tipos.

Tabla 4.3 Identificación por colores según aditivo.

Color	Tipo de aditivo utilizado
	Sin aditivo
	PET
	Escoria
	PET-Escoria
	Humo de sílice 10%
	Humo de sílice 15%
	Humo de sílice 20%

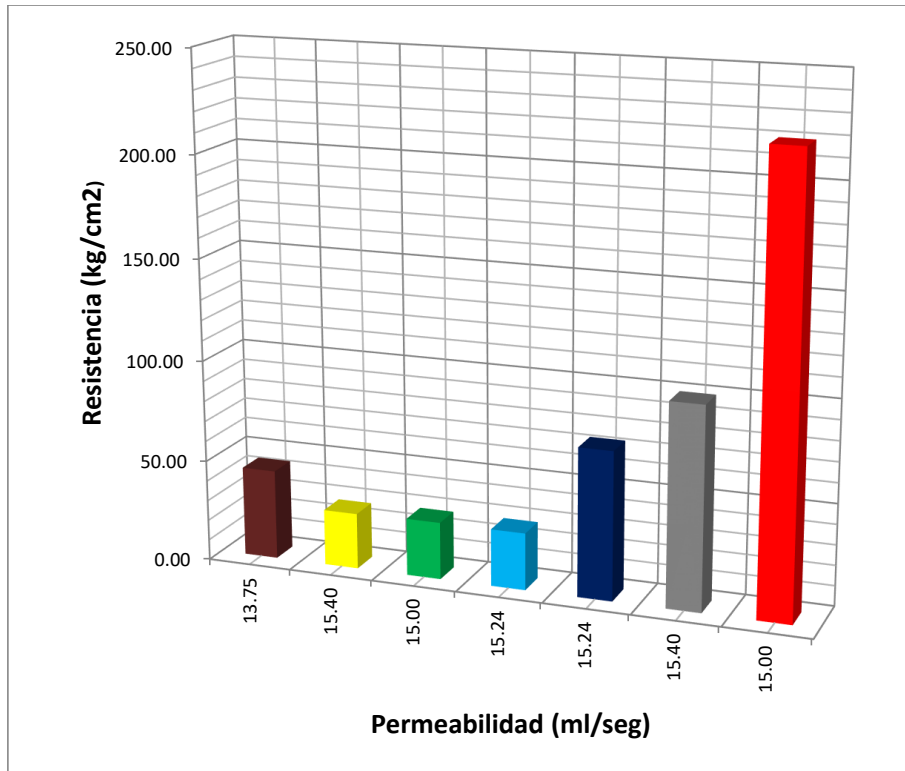
En la gráfica 4.23 se realiza la comparación de los mejores especímenes de cada tipo de mezcla (sin aditivo, escoria, PET y humo de sílice) de resistencia & permeabilidad, la cual muestra como existe una directriz hacia ir aumentando conforme se aumenta la permeabilidad.

El dato ubicado al extremo izquierdo de la gráfica 4.23 es en el cual no se utilizó algún aditivo, por estar razón es el valor menor pues no tiene algún componente que ayude a la pobre unión que tiene por la gran cantidad de intersticios o algún agente que ayude a reducir los espacios vacíos.

Los tres puntos ubicados en la parte inferior de la derecha corresponden a los cilindros con escoria y PET, los cuales fueron utilizados como aditivos para ayudar a reducir los espacios ocupados por aire, pero la forma de su comportamiento fue contrario a lo esperado, pues de acuerdo a sus tipologías de ambos materiales no permiten una gran unión con el concreto, razón por la cual lo vuelven frágil, esta situación de un poco adherencia con el concreto favoreció a la permeabilidad ya que a comparación con el cilindro sin aditivo se logró una mayor permeabilidad.

Los puntos ubicados en la parte superior de la gráfica corresponden a los ejemplares con humo de sílice, los cuales tienen una permeabilidad mayor al cilindro que no contiene aditivos debido al humo de sílice el cual ayudo a reducir la absorción y permitir una mayor salida de agua, estos cilindros con sílice llegaron a tener valores equivalentes a los logrados por los cilindros con escoria y PET.

La resistencia de los cilindros con humo de sílice fueron las mayores, se observan tres puntos en la parte superior los cuales corresponden a una dosificación de 10%, 15% y 20% respectivamente, por lo que se puede advertir la relación que existe entre la resistencia a la compresión y el contenido de sílice, pues a mayor cantidad de humo de sílice se logra una mayor resistencia a la compresión mejorando al mismo tiempo la permeabilidad, debido a las propiedades del humo de sílice que logra formar una capa impermeable disminuyendo la cantidad de agua absorbida por las moléculas del concreto.



Gráfica 4.23 Resistencia & permeabilidad

De manera similar la gráfica 4.24 tiene un comportamiento parecido a la gráfica 4.23, en la cual se ve la relación que existe entre la resistencia y porosidad, la cual tiende a disminuir la resistencia conforme la porosidad va aumentando.

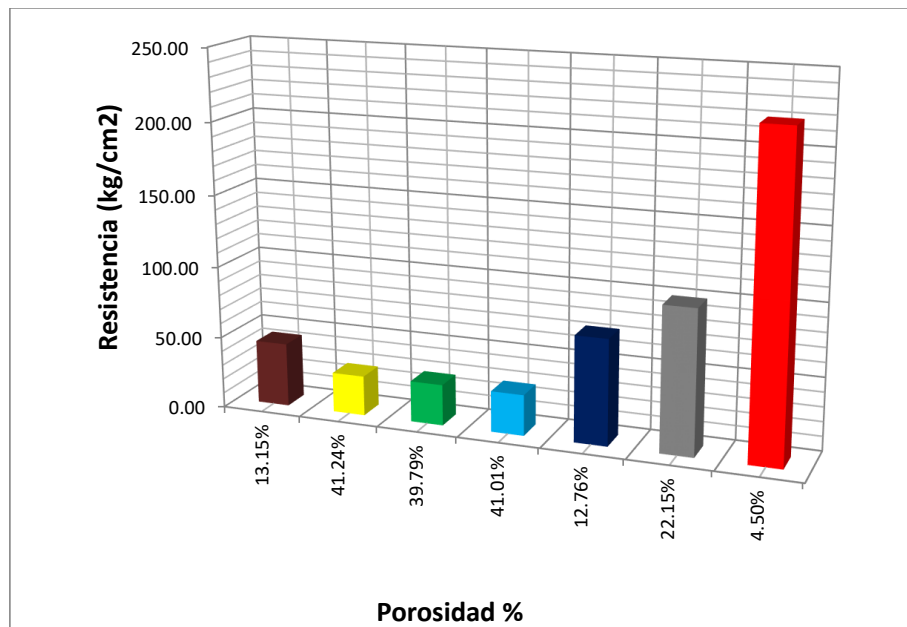
En esta gráfica se observa que el valor mayor de resistencia corresponde al espécimen elaborado con 20% de humo de sílice, el cual tiene la menor cantidad de porosidad, por esta razón es la máxima resistencia que se obtuvo de todas las muestras elaboradas, pues dentro de su estructura hay una menor cantidad de intersticios los cuales provocan una disminución en la resistencia a la compresión.

En la parte media se observan los especímenes elaborados con 15% de sílice, 10% de sílice y el cilindro que no tiene aditivo, el espécimen con 15% de sílice se encuentra por encima de la gráfica y se aprecia que tiene una menor resistencia pero una mayor cantidad de porosidad, el cambio de

resistencia en comparación con el cilindro de 20% de sílice se debe principalmente con el contenido de sílice en la muestra, como se había mencionado anteriormente existe una estrecha relación entre resistencia a la compresión con la cantidad de sílice, cabe mencionar que este tiene una mayor cantidad de porosidad frente a los cilindros de 20% de sílice, 10% de sílice y los especímenes sin aditivo debido a la forma en que se encuentra su estructura interna.

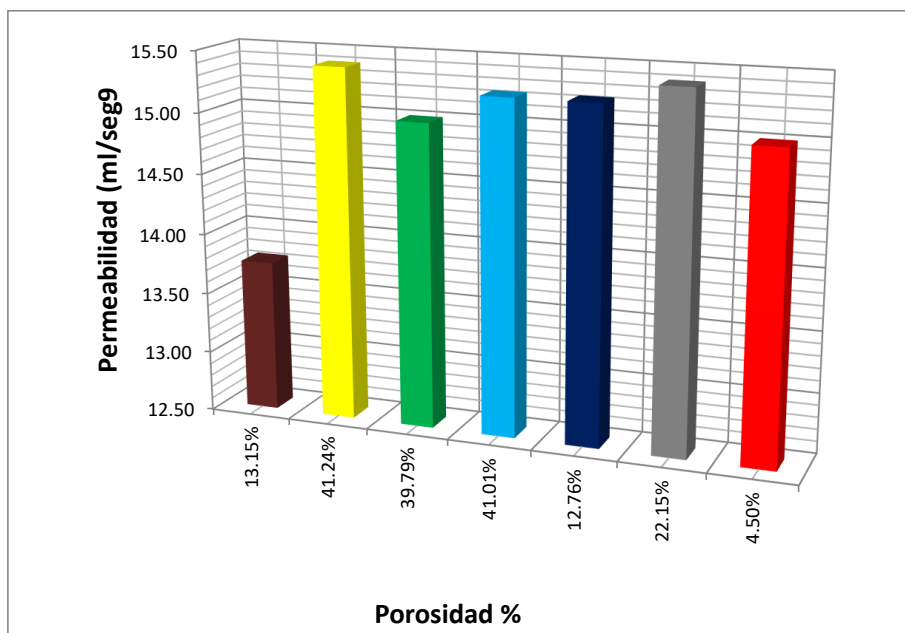
El valor de la muestra con 10% sílice se encuentra prácticamente pegado a la línea que describe le comportamiento en la parte media y tiene una diferencia también contra los otros especímenes de sílice, pues este es el cilindro con menor cantidad de sílice comparando con los otros dos anteriores, casi junto a este valor se encuentra la muestra que no contiene algún aditivo el cual tiene una porosidad similar al cilindro elaborado con 10% de sílice.

Por ultimo localizamos en la parte derecha a los cilindros que contiene PET y escoria, los cuales exhiben la mayor cantidad de porosidad comprobando de esta manera que la idea de utilizar estos componentes no desarrollaron su función que era la de lograr una menor porosidad frente a la muestra que no contiene aditivos.



Gráfica 4.24 Resistencia & porosidad

En la gráfica 4.25 se observa que la menor cantidad de permeabilidad y porosidad es del espécimen sin aditivo, el cual no tiene un agente que le ayude a tener mejores resultados, seguido se encuentran los especímenes con PET y escoria, los cuales tienen un mejor comportamiento, debido a que el PET y la escoria facilitan el fluir de agua siempre y cuando este no llegue a tener un acomodo tal que forme una barrera y el mejor comportamiento es por los especímenes de humo de sílice con las distintas dosificaciones debido a que forman una capa impermeable la cual ayuda a que no exista absorción de agua al igual que fluya más rápido.



Gráfica 4.25 Permeabilidad & porosidad

4.3. Discusión

En la presente tesis se investigó las propiedades mecánicas del concreto permeable de las cuales se analizaron la resistencia a la compresión y la permeabilidad, ambos son factores de suma importancia pues la resistencia a la compresión nos representa la carga máxima que podrá soportar y poder determinar las condiciones en las cuales podrá funcionar de forma adecuada esto sin dejar a un lado la permeabilidad la cual nos va a determinar si

este tipo de concreto es lo suficientemente permeable para poder filtrar el agua a capas inferiores.

De los resultados encontrados en esta investigación se puede decir que el usar de aditivo PET o escoria no mejora a la resistencia a la compresión, se utilizó con el fin de disminuir la cantidad de espacios vacíos pero a la hora de realizar las pruebas se pudo determinar que estos no ayudan a tener una mejor resistencia debido a las características tanto del PET como la escoria, en el caso del PET es un polímero el cual tiene un grado de cristalinidad alto, esta propiedad hace que no exista una buena adhesión con el concreto debilitando de esta manera los enlaces entre cada partícula del concreto.

En el caso de la escoria tiene una baja adherencia con el concreto, lo cual debilita los enlaces entre los componentes resultando en una baja resistencia a la compresión.

En cuanto a cuestión de permeabilidad el usar PET o escoria se notó una mejoría debido a que en ambos casos estos aditivos ayudaron a formar vías rápidas para la infiltración de agua, pues con estos aditivos el tiempo que se tarda en infiltrar el agua de su inicio a su fin es menor que el concreto permeable sin aditivo.

Otra de las razones por la cual se buscó el usar como aditivos el PET y escoria fue para mitigar los residuos de dos actividades importantes en el ser humano como es el uso del PET como envase o recipiente desechable y el forjado de metales.

El uso de humo de sílice como aditivo favorece a la resistencia a la compresión y a la permeabilidad por sus características propias de este tipo de material, la resistencia a la compresión se ve favorecida por las características cementantes el cual permite tener enlaces entre partículas más fuertes, cabe mencionar que estos enlaces son los que soportan las cargas a las cuales fueron sometidos los especímenes, por esta razón fue la importancia de mejorar las uniones entre cada molécula del concreto.

Del análisis realizado en la permeabilidad a las muestras con humo de sílice se puede afirmar que existe una mejoría frente al concreto permeable sin aditivo por la capa impermeable que cubre cada una de los elementos del concreto permeable, es decir esta capa disminuye la cantidad de agua que es absorbida por parte del concreto, permitiendo de esta manera lograr una mejor permeabilidad.

De los datos obtenidos se puede concluir que la cantidad de humo de sílice empleado en la mezcla de concreto permeable también afecta el desempeño, en el cual se demostró que a mayor cantidad de sílice se mejoraba la resistencia y la permeabilidad.

Por otro lado, si comparamos los resultados con estudios realizados anteriormente podemos observar que el uso de humo de sílice representa mejoría en las características mecánicas en la cual como mejor resultado se obtuvo como mejor resultado 46.4 kg/cm^2 (Meneses Ospina & Bravo Erazo, 2007) , 80 kg/cm^2 (Reyes & Torres, 2002), 155 kg/cm^2 (Lian & Zhuge , 2010) y 101.05 kg/cm^2 (Flores Prieto, 2010).

Con los datos recopilados se llegó al hallazgo más importante de la presente investigación el cual nos indica que el uso de humo de sílice favorece a la resistencia a la compresión, ya que todos los estudios realizados anteriormente solo utilizaron concreto sin emplear algún aditivo, ya que el resultado logrado en esta investigación fue de 219.56 kg/cm^2 .

5. CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El concreto permeable de acuerdo con sus propiedades tiene una baja resistencia a la compresión debido a la cantidad de espacios vacíos, sin embargo son necesarios para poder filtrar agua a través de la estructura interna del concreto, estos espacios hacen que los enlaces entre partícula y partícula sean pequeños y estas uniones son los que deben de soportar el esfuerzo provocado por una carga.
- Existe una relación directa entre la porosidad y permeabilidad, en la cual a mayor cantidad de espacios vacíos, se logra una permeabilidad mayor, a su vez una relación entre la porosidad y la resistencia a la compresión en la que al aumentar una la otra disminuye debido a que se tiene mayor cantidad de espacios vacíos se sacrifica la resistencia a la compresión e inversamente.
- Se realizaron especímenes con distintos aditivos para poder lograr los mejores resultados. Los distintos aditivos empleados fueron PET, escoria y humo de sílice al igual que se elaboraron especímenes sin aditivo para poder determinar si existe alguna mejora al utilizar algún aditivo, de estos aditivos el que demostró un mejor desempeño en tanto a resistencia a la compresión y permeabilidad fue el humo de sílice.
- El agregar como aditivo PET y escoria a especímenes de concreto proporcionan una menor resistencia a la compresión y permeabilidad en comparación con los especímenes sin aditivo. La resistencia se ve modificada por la característica de ambos aditivos que no permiten la adherencia del concreto y la permeabilidad también es ligeramente mayor ya que estos materiales forman vías que ayudan a una mejor conducción en el interior del concreto.
- El uso de humo de sílice favorece la resistencia a la compresión y la permeabilidad, debido a las características cementantes pues fortalece los enlaces entre las partículas del concreto al igual que forma una capa impermeable alrededor de las

Comentado [D2]: rebuscada

partículas del concreto, la cual disminuye la adsorción de agua en la muestra y así aumentar la permeabilidad.

- El porcentaje de humo de sílice afecta directamente a la resistencia a la compresión en donde a mayor porcentaje se tiene una mayor resistencia, en cuanto a la permeabilidad no se encuentra variación notoria por la barrera exterior que impide la absorción de agua por parte de la grava y el concreto.
- De acuerdo a los valores dados por la normativa internacional y los resultados obtenidos en el concreto que se ha desarrollado con 20% de humo de sílice como aditivo, el uso que se le puede dar es para vialidades urbanas secundarias tales como calles de fraccionamiento.

5.2. RECOMENDACIONES

- Para la aplicación de este tipo de concreto en las vialidades anteriormente citadas se recomienda el uso de un rodillo manual liso para dar un terminado liso a la superficie de rodamiento.
- Para el uso del concreto permeable en pavimentos, vialidades, andadores se recomienda el uso de un rodillo manual para su compactación.
- Se recomienda hacer pruebas de permeabilidad en el suelo a aplicarse para saber si es conveniente la utilización del concreto o en su defecto modificar la mezcla aumentando o disminuyendo el contenido de vacíos y la permeabilidad, permitiendo una óptima interrelación del sistema suelo-concreto permeable.
- La modificación de la mezcla debe ser en el material cementante y el agua afectando así la relación agua/cementante.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestras familias por el apoyo incondicional a este proyecto de tesis y la paciencia que demostraron para nosotros.

Agradecemos a nuestros directores de tesis: el Dr. Francisco Javier Olguín Coca y la Dra. Liliana Lizárraga por sus consejos y hacernos ver nuestros errores los cuales nos ayudaron a terminar este trabajo al igual que su tiempo dedicado.

A la universidad autónoma del estado de Hidalgo por dejar hacer pruebas en el laboratorio con los cuales pudimos experimentar y ver si nuestras hipótesis se cumplían.

Bibliografía

- INECYC. (2011). *HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO*. QUITO ECUADOR: INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN.
- American Society of Testing and Materials. (2005). *ASTM C136-05*.
- ASOCEM. (2013). *Asociación de productores de cemento*. Recuperado el 2013, de <http://www.asocem.org.pe/>:
http://www.asocem.org.pe/scmroot/bva/f_doc/concreto/aditivos/MGC19_aditivos_concreto.pdf
- Cantera de Combia. (2013). *Cantera de Combia*. Obtenido de Cantera de Combia: www.canteradecombia.com/
- Cedex Materiales. (Diciembre de 2007). Ficha técnica humo de sílice. España.
- Comisión Nacional del Agua. (2011). *Estadísticas del agua en México*. Coyoacan, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Concreto ecologico de México. (2013). SISTEMA PARA INFILTRAR O RECUPERAR EL AGUA. Cd. de México, México.
- Cooperativa La Cruz Azul, S. (2011). *Cruz Azul*. Recuperado el 2011, de Cruz Azul: <http://www.cruzazul.com.mx/productos/index.html>
- El Clarín. (17 de enero de 2000). La escasez del agua en el mundo. *El Clarín*.
- Flores Prieto, J. R. (Julio de 2010). Caracterización del concreto permeable usando el módulo de ruptura y el porcentaje de desgaste. Morelia, México.
- Frederick Measham, L., & Hewlett, P. (1998). Pozzolana and pozzolanic cements. En *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (págs. 471-631). Michigan : Arnold.
- Ghafoori, N. (1995). Building and Nonpavement applications of No-Fines Concrete. *Journal of Materials in civil engineering*.
- González, F. (1999). *Manual de Supervisión de Obras de Concreto*. México: IMCYC.
- H.F.W., T. (1978). *La química de los cementos*. España: Urmo Bilbao.
- Harmen, E. T. (2005). *DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO*. LIMA, PERU: PONTIFICA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU.
- IMCYC. (2011). *IMCYC*. Recuperado el 2011, de IMCYC: <http://www.imcyc.com/concretohistoria/consistencia.htm>

- IMCYC. (2011). *IMCYC*. Recuperado el 2011, de IMCYC.:
<http://www.imcyc.com/concretohistoria/resistencia.htm>
- Kosmatka, S. H. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Skokie, Illinois: Portland cement association.
- Lian, C., & Zhuge, Y. (2010). Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An. Estados Unidos.
- Mata, G. (29 de Octubre de 2008). *badarkablar*. Recuperado el 2011, de badarkablar:
<http://www.badarkablar.es/?p=58>
- Meneses Ospina, C. M., & Bravo Erazo, C. H. (2007). Resistencia mecánica y condiciones de obra del concreto poroso en los pavimentos según el tipo de granulometría. Medellín, Colombia.
- Neville, A. M. (1998). *Tecnología del concreto*. México: Trillas.
- NMX-C-414-ONNCE, N. (2004).
- Notas de Concretos. (2013). *Notas de Concretos*. Recuperado el 25 de 06 de 2013, de Notas de Concretos: <http://notasdeconcretos.blogspot.mx/2011/04/resistencia-la-compresion-del-concreto.html>
- Núñez Remolina, M. (16 de 02 de 2013). *Los agregados en el concreto*. Recuperado el 06 de 2013, de Los agregados en el concreto: www.argos.com.co
- Portland Cement Association. (2013). *Instituto del Cemento Portland Argentino*. Recuperado el 08 de Julio de 2013, de http://www.icpa.org.ar/publico/files/curado_del_hormigon.pdf
- Reyes, I., & Torres, I. (2002). Concreto poroso: Tecnología e investigación para su uso en pavimentos. Bogo, Colombia.
- Sánchez De Buen, D. (2001). *Tecnología del concreto y mortero*. Santafé de Bogotá: Bhandar.
- Santiago Hurtado, G. e. (2010). Eficiencia anticorrosiva de primarios en acero 1018 embebido en concreto contaminado expuesto al ambiente. *XXVII Congreso de la SMEQ*. Zacatecas.
- SCT, S. d. (2002). *CMT. Características de los Materiales*. México: SCT.
- Subramania, N. (2008). CONCRETO PERMEABLE – UN MATERIAL ECOLÓGICO. *The Indian Concrete Journal*.
- Textos científicos.com. (2013). *Textos científicos.com*. Recuperado el 2013, de <http://www.textoscientificos.com/polimeros/pet>

Torre Carrillo, I. (Mayo de 2004). CURSO BASICO DE TECNOLOGIA DEL CONCRETO PARA INGENIEROS CIVILES. Lima, Peru.

UNESCO. (2003). Agua para todos, agua para la vida. 8.

UNITEC. (27 de Enero de 2008). Prueba Granulométrica. México, México, México.

Universidad de Castilla - La Mancha. (2008). *INGENIERIA RURAL*. Recuperado el 08 de JULIO de 2013, de www.ingenieriarural.com/Trans_const/Tema10_EHE08.pdf

Urrea, D., & Cárdenas, A. (2011). *Agua sin planes ni dueños*. Bogotá Colombia: El molde gráficas LTDA.

Vidaud Quintana, M., & Vidaud Quintana, I. (2012). El humo de sílice como adición al concreto estructural. *noticreto*.

www.urbanismo.com. (2013). <http://www.urbanismo.com/>. Recuperado el 2013, de <http://www.urbanismo.com/>: <http://www.urbanismo.com/pavimentos-flexibles/>

Zindhón, R. C. (2010). *Utilización de hormigón poroso para revestimiento de taludes*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.