

2019
Elaboración de mezclas de concreto de alta resistencia con la
utilización de asfaltos recuperados.

Jonathan Fidel
Vidrio Villaseñor



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Elaboración de mezclas de concreto de alta resistencia con la
utilización de asfaltos recuperados

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en:

Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Ing. Jonathan Fidel Vidrio Villaseñor

Dirigido por:

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Querétaro, Qro. A 07 de junio del 2019



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Elaboración de mezclas de concreto de alta
resistencia con la utilización de asfaltos recuperados

por

Jonathan Fidel Vidrio Villaseñor

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-266675

Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Elaboración de mezclas de concreto de alta resistencia con la utilización de
asfaltos recuperados

Opción de titulación:
Tesis

Que como parte para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta
Ing. Jonathan Fidel Vidrio Villaseñor

Dirigido por:
Dra. María de la Luz Pérez Rea

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Presidente

Dr. Omar Chávez Alegría
Secretario

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca
Vocal

Dra. Genoveva Hernández Padrón
Suplente

Dr. Eduardo Rojas González
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Junio 2019
México

RESUMEN

El término RAP, por sus siglas en inglés (Reclaimed Asphalt Pavement), se utiliza para nombrar a los pavimentos asfálticos que han cumplido su vida útil, que han sido extraídos o fresados, para después ser triturados. Éste se compone de agregados pétreos recubiertos de una capa de asfalto, y sus características dependen principalmente de tres parámetros que son el tipo de mezcla asfáltica de cual provienen, la metodología de recuperación y el proyecto carretero de procedencia. La mayor parte del RAP que se obtiene se utiliza para la construcción de nuevos pavimentos asfálticos, sin embargo, existe poca información del comportamiento del concreto hidráulico al adicionarse asfaltos recuperados en su composición. En el presente estudio se analizaron algunas propiedades mecánicas de probetas de concreto hidráulico adicionado con partículas de RAP. Se diseñaron tres tipos diferentes de mezclas de concreto con asfalto recuperado, variando su composición y tipo de agregados. Los ensayos que se utilizaron para determinar el comportamiento de estas mezclas de concreto fueron las de resistencia directa a compresión y resistencia directa a la flexión, para después ser comparadas con los resultados obtenidos con los mismos ensayos de probetas elaboradas con agregados pétreos vírgenes de bancos. Los resultados de los ensayos indican que las probetas que contienen RAP tienen menor resistencia a la compresión directa comparadas contra probetas con agregados vírgenes, sin embargo, éstas pueden alcanzar resistencias medias, alrededor 250 MPa.

(Palabras clave: RAP. Pavimentos, reciclados, construcción, concreto)

SUMMARY

The term RAP, by its abbreviations in English (Reclaimed Asphalt Pavement), is used to name the asphalt pavements that have fulfilled their useful life, that have been extracted or milled, to later be crushed. This is composed of stone aggregates covered with a layer of asphalt, and its characteristics depend mainly on three parameters that are the type of asphalt mixture from which they come, the recovery methodology and the road project of origin. Most of the RAP that is obtained is used for the construction of new asphalt pavements, however, there is little information on the behavior of hydraulic concrete when adding recovered asphalts in its composition. In the present study, some mechanical properties of hydraulic concrete specimens added with RAP particles were analyzed. Three different types of concrete mixtures with recovered asphalt were designed, varying their composition and type of aggregates. The tests that were used to determine the behavior of these concrete mixtures were those of direct resistance to compression and direct resistance to bending, to then be compared with the results obtained with the same tests of specimens made with virgin stone aggregates from banks. The results of the tests indicate that the specimens containing RAP have a lower resistance to direct compression compared to specimens with virgin aggregates, however, these can reach average resistances, around 250 MPa.

(Key words: RAP, pavements, recycled, construction, concrete)

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

A los alumnos de los posgrados de la Universidad Autónoma de Querétaro

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por ofrecer el soporte económico que permitió cubrir gran parte de los gastos en el transcurso del estudio de posgrado y la estancia en Santiago de Querétaro.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, a la Facultad de Ingeniería, por brindar el espacio y los medios necesarios para cursar un posgrado de calidad. de la misma manera a los profesores que forman parte del cuerpo académico de la Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres, quienes mostraron una verdadera vocación de cátedra al compartir conocimientos y experiencias con su alumnado, lo cual, en lo particular, me forjó una visión crítica con fundamentos técnicos en el área de especialidad.

Extiendo un reconocimiento especial al Dra. María de la Luz Pérez Rea por ser mi guía en el proceso de investigación, agradezco las enseñanzas, la paciencia y la motivación que mostró durante todo este tiempo.

INDICE

| | Pág. |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 12 |
| 1.1 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA | 13 |
| 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA | 15 |
| 1.3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS | 16 |
| 1.3.1 <i>Hipótesis</i> | 16 |
| 1.3.2 <i>Objetivo General</i> | 16 |
| 1.3.3 <i>Objetivo Particular</i> | 16 |
| 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA..... | 17 |
| 2.1 CONCRETO | 17 |
| 2.1.1 <i>DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO</i> | 18 |
| 2.1.2 <i>MEZCLAS DE CONCRETO CON AGREGADOS RECICLADOS</i> | 21 |
| 2.2 RAP..... | 24 |
| 2.2.1 <i>METODOLOGIA DE EXTRACCION</i> | 24 |
| 2.3 AGREGADOS PETREOS | 25 |
| 2.3.1 <i>ENSAYES PARA AGREGADOS PETREOS</i> | 25 |
| 3. METODOLOGÍA | 26 |
| 3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA A SEGUIR..... | 26 |
| 3.2 MUESTREO DE MATERIALES..... | 28 |
| 3.2.1 <i>Muestreo de RAP</i> | 28 |
| 3.2.2 <i>Muestreo de agregados vírgenes</i> | 29 |
| 3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES | 31 |
| 3.3.1 <i>Granulometrías</i> | 31 |
| 3.3.2 <i>Densidad relativa y absorción</i> | 32 |
| 3.4 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO | 35 |
| 3.4.1 <i>Elaboración de probetas</i> | 36 |
| 3.4.2 <i>Elaboración de vigas para ensayos de flexión</i> | 38 |
| 3.5 ENSAYES DE LAS PROBETAS..... | 40 |
| 3.5.1 <i>Ensaye a compresión simple</i> | 40 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.5.2 | <i>Ensaye a flexión</i> | 42 |
| 4. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 44 |
| 4.1 | ELECCIÓN, VISITA Y MUESTREO DEL BANCO DE MATERIAL..... | 44 |
| 4.2 | ENSAYES DE CARACTERIZACIÓN | 47 |
| 4.2.1 | <i>Ensayes granulométricos</i> | 47 |
| 4.2.2 | <i>Gravedad específica</i> | 49 |
| 4.3 | DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO HIDRÁULICO..... | 51 |
| 4.3.1 | <i>Elaboración de cilindros y vigas de concreto</i> | 56 |
| 4.4 | ENSAYES BAJO NORMATIVA | 58 |
| 4.4.1 | <i>Compresión Directa Simple</i> | 58 |
| 4.4.2 | <i>Flexión</i> | 60 |
| 4.5 | RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS | 62 |
| 5. | CONCLUSIONES | 65 |
| 5.1 | LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA | 68 |
| 6. | REFERENCIAS | 69 |
| 7. | APÉNDICE | 74 |

INDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| 4.1. Comparación granulométrica de los agregados..... | 48 |
| 4.2. Resultados de densidad relativa y absorción de los diferentes materiales. ... | 50 |
| 4.3. Distribución de las mezclas de concreto. | 51 |
| 4.4. Revenimiento del concreto de acuerdo a tipo de construcción. | 52 |
| 4.5. Cantidad de agua para tipos de concreto..... | 53 |
| 4.6. Relaciones de agua-cemento..... | 54 |
| 4.7. Contenido de agregado grueso. | 55 |
| 4.8. Resultados del ensaye de resistencia a la compresión..... | 58 |
| 4.9. Módulo de ruptura de las vigas de concreto..... | 60 |
| 8.1. Datos generales del ensaye granulométrico del agregado pétreo virgen..... | 74 |
| 8.2. Granulometría de gravas agregado pétreo virgen..... | 74 |
| 8.3. Granulometría de arenas del agregado pétreo virgen..... | 75 |
| 8.4. Testigo de humedad del agregado pétreo virgen. | 75 |
| 8.5. Corrección por humedad del agregado pétreo virgen. | 75 |
| 8.6. Resumen granulométrico agregado pétreo virgen. | 76 |
| 8.7. Datos generales granulometría RAP..... | 77 |
| 8.8. Granulometría de gravas RAP. | 77 |
| 8.9. Granulometría de arenas RAP. | 78 |
| 8.10. Testigo de humedad del RAP..... | 78 |
| 8.11. Corrección por humedad RAP..... | 79 |

| | |
|--|----|
| 8.12. Resumen granulométrico RAP..... | 79 |
| 8.13. Resultados de los cilindros ensayados a compresión simple..... | 80 |
| 8.14. Promedio de los resultados de compresión simple. | 81 |
| 8.15. Desviación estándar de los resultados de compresión..... | 81 |
| 8.16 Abreviatura de algunas revistas científicas..... | 89 |
| 8.17 Abreviaturas de empleo comun en español | 89 |

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

INDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| 3.1. Diagrama de la metodología a seguir..... | 26 |
| 3.2. Almacenamiento y transporte de RAP. | 28 |
| 3.3. Cuarteo del RAP. | 29 |
| 3.4. Muestreo del material de banco. | 30 |
| 3.5. Reducción de muestras de los agregados. | 30 |
| 3.6. Juego de mallas utilizadas en el ensaya granulométrico. | 31 |
| 3.7. Báscula y canastilla para sumergir material en agua. | 32 |
| 3.8. Cilindros de concreto antes de iniciar curado. | 38 |
| 3.9. Viga de concreto de 50x15x15 mm. | 39 |
| 3.10. Prensa utilizada para ensayo a compresión simple. | 41 |
| 3.11. Equipo utilizado en ensaye de resistencia a flexión. | 43 |
| 4.1. Localización banco de material "La Cañada". | 44 |
| 4.2. Muestreo del Banco de Material "La Cañada". | 45 |
| 4.3. Localización del tramo Compostela-Chapalilla. | 46 |
| 4.4. Ensaye granulométrico del agregado virgen. | 47 |
| 4.5. Ensaye granulométrico al asfalto reciclado. | 48 |
| 4.6. Curvas granulométricas de los agregados pétreos y RAP. | 49 |
| 4.7. Elaboración de cilindros de concreto. | 56 |
| 4.8. Elaboración de vigas de concreto. | 57 |
| 4.9. Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de concreto. | 59 |

| | |
|---|----|
| 4.10. Resistencia a la compresión simple de probetas de concreto..... | 59 |
| 4.11. Módulo de ruptura de las mezclas de concreto..... | 61 |
| 4.12. Resistencia a la flexión de vigas de concreto..... | 61 |
| 4.13. Fallas en las vigas ensayadas a flexión. | 64 |
| 8.1. Curva granulométrica del material del banco "La Cañada" | 77 |
| 8.2. Curva granulométrica RAP..... | 80 |
| 8.3. Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de concreto..... | 81 |
| 8.4. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 1 a 7 días. | 82 |
| 8.5. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 2 a 7 días. | 82 |
| 8.6. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 3 a 7 días. | 83 |
| 8.7. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 4 a 7 días. | 83 |
| 8.8. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 1 a 14 días. | 84 |
| 8.9. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 2 a 14 días. | 84 |
| 8.10. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 3 a 14 días. | 85 |
| 8.11. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 4 a 14 días. | 85 |
| 8.12. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 4E a 14 días..... | 86 |
| 8.13. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 1 a 28 días. | 86 |
| 8.14. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 2 a 28 días. | 87 |
| 8.15. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 3 a 28 días. | 87 |
| 8.16. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 4 a 28 días. | 88 |
| 8.17. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 4E a 28 días..... | 88 |

INDICE DE ECUACIONES

| | |
|---|----|
| 1. Densidad relativa material seco. | 35 |
| 2. Masa del material saturado y sumergido en agua. | 35 |
| 3. Densidad relativa del material saturado y superficialmente seco, (adimensional) | 35 |
| 4. Densidad relativa de los sólidos del material. | 36 |
| 5. Absorción del material. | 36 |
| 6. Resistencia a la compresión simple. | 43 |
| 7. Módulo de ruptura. | 44 |
| 8. Cálculo de contenido de cemento. | 56 |

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón o concreto hidráulico está conformado por una mezcla en ciertas proporciones de cemento, agua, agregados y opcionalmente aditivos, que darán ciertas características al concreto en función de las propiedades de cada componente de la mezcla. En consecuencia, para poder dominar el uso de este material, se deben conocer no solo las características del producto resultante, sino también la de todos sus componentes.

Un buen diseño estructural de concreto hidráulico solo será útil si durante su realización se cuenta con materiales de buena calidad, así como también de la mano de obra utilizada en el proceso de fabricación. De estos factores, aunados a las condiciones climáticas y condiciones de mantenimiento, dependerá el tiempo que una estructura se mantenga en buen estado.

El concreto hidráulico responde a las leyes físicas y químicas, por tanto, la explicación a sus diversos comportamientos siempre responde a alguna de estas leyes, y la no obtención de los resultados esperados se debe al desconocimiento de la manera cómo actúan éstas en el concreto, lo que resulta en una utilización artesanal del mismo. Una práctica sin el debido conocimiento tendrá consecuencias que no se pueden predecir, dado que durante su empleo no se respetarán las consideraciones técnicas adecuadas que nos permitan obtener los resultados óptimos esperados.

1.1 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Considerando que la técnica de reciclaje de asfaltos es una de las soluciones más rentables económica y ambientalmente, en Sultan *et al.* (2017) se expone la necesidad de analizar la fase de mantenimiento en dichos pavimentos, en términos generales, la construcción de nuevas carreteras y su mantenimiento requiere de una cantidad muy grande de agregados vírgenes, sin embargo la relación oferta-demanda de los agregados elevan sus precios y en su extracción genera mayor contaminación que la técnica de reciclar asfaltos, por lo anterior, y tal como mencionan Patiño *et al.* (2014) la técnica de reciclar asfaltos promueve la reducción de la utilización de materiales de banco vírgenes y presenta una solución a los problemas de tratamiento de residuos producto de la renovación de carreteras ya existentes.

El panorama que nos brinda el párrafo anterior es el de que existe una inmensa cantidad de material producto de remodelaciones a vías terrestres, el cual si no se trata de la manera adecuada puede generar contaminación en la zona en que se almacena y a sus alrededores. Además de esto, los grandes volúmenes que ocupan estos residuos generan la necesidad de espacios adecuados de almacenamiento: como es el caso del Estado de Victoria, en Australia; del cual Rahman. *et al.* (2014) mencionan, que implementó medidas de generación de cero residuos. Lo anterior generó problemas para las industrias en la eliminación de residuos, por lo que el gobierno de esa entidad comenzó a realizar estudios con resultados favorables de incorporar residuos asfálticos para conformar la capa sub-base de un pavimento.

De acuerdo con Okafor (2010) el RAP (Reclaimed Asphalt Pavement por sus siglas en inglés) recibe la definición de ser cualquier pavimento que ha sido recuperado y reprocesado para así poder ser utilizado una segunda vez, este mismo contiene agregados pétreos y asfalto. El mismo autor señala que la mayor parte del RAP generado se utiliza en la construcción de nuevas carpetas asfálticas, dicho lo anterior se nos presenta un desconocimiento general del comportamiento mecánico del RAP en diferentes aplicaciones, tales como la mezcla de éste con cemento Portland.

Según Huang *et al.* (2005) el uso de mezclas de cemento Portland con materiales reciclados se ha convertido en una práctica muy popular en los últimos años en el ámbito constructivo. La mayoría de los materiales reciclados incluidos en las mezclas de concreto tienen la finalidad de sustituir el volumen que ocupan los agregados pétreos vírgenes. Algunos de los materiales reciclados que han sido investigados para ser parte de nuevas mezclas de concreto son: concreto de cemento Portland triturado como agregado grueso, vidrio de desecho triturado como agregado fino, y como material actuante como cementante se ha utilizado la escoria de alto horno y cenizas.

Torres *et al.* (2014) señala que la mayoría de las reparaciones en vialidades se realiza con mezclas de emulsiones asfálticas y agregados derivados de la roca natural proveniente de bancos de material cercanos. Los pavimentos de dichas vialidades se encuentran sometidos a factores ambientales como la temperatura, humedad y precipitación que reducen su durabilidad y esto implica una mayor frecuencia de reparaciones a las que se debe someter para mantener los estándares requeridos de funcionamiento. Lo mencionado por el autor implica que las reparaciones que se efectúan para mantener la calidad en los pavimentos generan volúmenes de asfaltos que pueden volver a ser utilizados.

Se han realizado varios trabajos de investigación como es el caso de Hoppe *et al.* (2015) y Arulrajah *et al.* (2014) en los cuales se analiza la factibilidad de incorporar asfaltos recuperados y concreto triturado para la elaboración de bases y sub-bases de nuevas estructuras de pavimentos. Estos han arrojado resultados favorables que promueven un mayor uso de materiales reciclados. Sin embargo, pocos son los estudios que evalúan el incorporar material producto de la recuperación de asfaltos a nuevas mezclas de concreto hidráulico. Uno de estos es Tia *et al.* (2012). En este estudio se evalúa el comportamiento de concreto hidráulico adicionado con RAP, que será utilizado para la construcción de losas de pavimento en el estado de Florida, Estados Unidos. Los resultados obtenidos en este trabajo, al igual que en Huang (2005) sugieren que muy difícilmente las mezclas de concreto

que contienen RAP en su composición, por muy pequeño que sea el porcentaje, no superan los 250 kg/cm².

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Existe una tendencia mundial en la cual la red carretera existente está pasando de la fase de construcción a la fase de mantenimiento y rehabilitación. Esto provoca la generación de un gran volumen de asfalto recuperado que no es utilizado o tratado de la manera adecuada, según el artículo de Holtz *et al.* (2000) se estima que tal sólo en EUA, anualmente se recuperan alrededor de 33 millones de toneladas de asfalto.

Desde la década de los 70's se han hecho investigaciones para incorporar estos materiales a las nuevas mezclas asfálticas en los proyectos carreteros, obteniendo resultados favorables, estableciendo así un enfoque conservador de diseñar mezclas con un máximo de 40% de RAP para proyectos ubicados alrededor del mundo. Sin embargo, se han realizado muy pocos estudios que investiguen el comportamiento del RAP en mezclas de concreto con cemento Portland. Los resultados arrojados indican que no se ha podido producir mezclas de concreto con RAP con resistencia mayor a 25 MPa (Okafor, 2010; Hossiney *et al.* 2010; Huang, 2005). Lo anterior se debe a que la resistencia del concreto hidráulico depende principalmente de la unión del agente cementante y los agregados, en el caso de sustituir los materiales pétreos vírgenes por partículas de RAP, estas últimas contienen una película de asfalto alrededor de si, que interfiere y evita que exista una unión adecuada del cemento y el agregado.

La situación que se aborda en esta investigación es la creación de mezclas concreto hidráulico que superen los 25 MPa, incluyendo RAP en su composición.

1.3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

1.3.1 Hipótesis

La adición en ciertas cantidades de RAP en mezclas de concreto, y un proceso de envejecimiento en horno de dicho asfalto recuperado permite la creación de nuevas mezclas de concreto hidráulico que posean propiedades de alto desempeño, como lo es una resistencia a la compresión mayor a 25 MPa, así como módulos de ruptura adecuados que permitan que estas puedan ser utilizadas en la construcción de nuevas estructuras de pavimentos.

1.3.2 Objetivo General

Diseñar, obtener y probar con los ensayos adecuados, mezclas de concreto hidráulico adicionada con residuos recuperados de pavimentos (RAP), y que éstas posean una resistencia mayor a 25 MPa.

1.3.3 Objetivo Particular

- Fabricar los especímenes necesarios para ser probados por diferentes ensayos.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

En este capítulo se aborda el contexto a nivel mundial acerca de la utilización de asfalto recuperado en la creación mezclas de concreto hidráulico, así como sus inicios y sus consideraciones que se deben tener en cuenta a la hora de utilizar material reciclado. De igual manera se ahonda sobre temas relacionados con el concreto hidráulico, como lo son sus métodos de diseño, ejemplos de concretos con materiales reciclados, las características de los materiales que se deben utilizar y también los ensayos que se requieren para probar las capacidades físicas de las nuevas mezclas de concreto a desarrollar.

2.1 CONCRETO

En términos simples, el concreto es básicamente una mezcla de áridos, agua y cemento. Sin embargo, cada material aporta una cualidad para formar el elemento pétreo final, el cual también es llamado hormigón.

Los áridos antes mencionados son en realidad rocas de diferentes granulometrías, las cuales tienen como finalidad ocupar alrededor del 75% del volumen total del concreto, así como de proveer de un medio del cual el cementante pueda adherirse y proveer de la resistencia adecuada a la mezcla.

El agua actúa como hidratador de la mezcla, suele ser el elemento más barato, sin embargo, se deben de tener ciertas consideraciones para que cualquier agua pueda ser utilizada para elaborar las nuevas mezclas de concreto hidráulico, así como también utilizar debidas dosificaciones en relación a la cantidad de cemento a utilizar.

El cemento es un elemento conglomerante; es decir, es un material capaz de unir fragmentos de uno o varios materiales y dar cohesión a conjunto mediante reacciones químicas. El cemento mezclado con el agua forma una masa que recubre la superficie del resto de las partículas. La finalidad es conseguir partículas de diferentes tamaños, de tal manera que estas ocupen los espacios vacíos que se podrían generar.

2.1.1 DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO

De acuerdo con Bolívar (1987) dosificar una mezcla de concreto es determinar la combinación más práctica de los agregados disponibles, cemento, agua y en ciertos casos aditivos, con el fin de producir una mezcla con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquirirá las características de resistencia y durabilidad necesarias para el tipo de construcción en que habrá de utilizarse.

En la etapa del concreto fresco que transcurre desde la mezcla de sus componentes hasta su colocación, las exigencias principales que deben cumplirse para obtener una dosificación apropiada son la manejabilidad y economía de la mezcla; para el concreto endurecido las propiedades deseadas son las de resistencia y durabilidad. Otras propiedades del concreto como lo son los cambios volumétricos, fluencia, elasticidad, masa unitaria, etc., solo son tenidas en cuenta para dosificar mezclas especiales, en cierto tipo de obras.

Cada uno de los requisitos mencionados en el párrafo anterior requiere variaciones en la dosificación, y como consecuencia, en la mayor parte de las mezclas del concreto, se busca un balance en las proporciones para satisfacer todas en cierta medida. Un ejemplo claro que ilustra la idea anterior es que una excelente trabajabilidad generalmente requiere elevados contenidos de cemento, agregado fino y agua, y un bajo contenido de agregado grueso; es evidente que una mezcla de este tipo no resulta para nada económica y sus propiedades no serían las óptimas. Debido a esto, a medida que cambian las proporciones de una mezcla dada para mejorar una propiedad, deben de considerarse los efectos que estos cambios generan sobre las demás características del concreto, de modo que se produzca el menor efecto nocivo sobre éstas.

Existen varios métodos de diseño de mezclas de concreto como lo son el método ACI, Fuller, Walker y módulo de finura, en los cuales existen algunas similitudes y diferencias, sobre todo en la cantidad de materiales requeridos, como

lo son principalmente el agua y el cemento. Debido a que en la bibliografía consultada para el desarrollo de este trabajo de investigación se utilizó el método ACI 211 para la elaboración concreto hidráulico, se optó de igual manera utilizar esta metodología, por lo que a continuación se ahonda únicamente en el método desarrollado por el American Concrete Institute.

Según Bolívar (1987) el método ACI 211 es el resultado de intensas investigaciones de varias organizaciones americanas en el campo del concreto: el American Concrete Institute, Portland Concrete Association y United States Bureau of Reclamation. Este método se fundamenta en los trabajos experimentales de Andrew Duff, Abrams, Richart y Talbot, Goldbeck y Gray. Se establece que es un método empírico cuyos resultados han sido confirmados por una amplia información experimental. A groso modo, el procedimiento de diseño se puede realizar ya sea mezclando los materiales por volumen absoluto y luego calculando los pesos de cada uno de los componentes, o directamente calculando el peso del concreto y deduciendo después el peso de cada uno de los ingredientes, siempre como referencia el cálculo de un metro cúbico de concreto. Cabe mencionar que ambas formas de cálculo pertenecen al mismo método y que las dos consideran las condiciones relacionadas con la facilidad de colocación, resistencia a la compresión o a la flexión, durabilidad y economía. Otra ventaja con la que cuenta este método es que se puede generar una hoja de cálculo con facilidad, para un rápido y práctico manejo del método.

Antes de comenzar un diseño de mezclas de concreto es necesario conocer ciertos datos referentes a la obra a ejecutar y los materiales disponibles. Entre algunos de estos datos se encuentran.

- Resistencia a la compresión especificada, f'_c del concreto.
- Análisis granulométrico de los materiales
- Cálculo del módulo de finura de la arena
- Pesos específicos aparentes y porcentaje de absorción de los agregados
- Humedad de los agregados
- Calidad del material pétreo y del agua

A continuación, se presentan de manera breve pero concisa los pasos a seguir en su debido orden para el correcto diseño de una mezcla de concreto hidráulico.

1. Elección de la trabajabilidad de la mezcla: Esta cualidad se puede definir como la facilidad con la cual el concreto se puede mezclar, transportar y compactar con una determinada cantidad de energía. Esta propiedad influye en la resistencia del concreto endurecido ya que para lograr una resistencia adecuada es necesario compactar el material a su máximo peso por unidad de volumen. Como la trabajabilidad de la mezcla de concreto no es fácil de medir en forma directa, se puede utilizar un ensayo indirecto que mida otra propiedad ligada como la fluidez, consistencia, penetración, tales como el ensayo de asentamiento, el ensayo de penetración con la esfera de Kelly, medidor de asentamiento K. Debido a la simpleza del material utilizado, el ensayo de asentamiento es el más utilizado en todo el mundo. Este fue normalizado en A.S.T.M. C-134, en este ensayo se utiliza un cono truco de 30 cm de altura, 10 cm de diámetro superior y 20 cm de diámetro inferior; el cual debe colocarse sobre una superficie lisa y llenarse con concreto en tres capas, cada una compactada 25 veces con una varilla punta de bala de 16 mm de diámetro. Una vez compactada la mezcla en el molde y nivelada, se levanta verticalmente el cono y se mide la disminución de altura respecto a la del molde.

2.1.2 MEZCLAS DE CONCRETO CON AGREGADOS RECICLADOS

En los diferentes estudios que se han realizado sobre el comportamiento de mezclas de concreto Portland adicionadas con ciertos porcentajes de RAP en su composición se analizan tres características principales de estos materiales: las propiedades físicas del RAP, la resistencia a la compresión del concreto y la resistencia a la tensión del mismo.

Según Okafor (2010) el 75% del volumen del concreto corresponde al espacio que ocupan los agregados pétreos en la mezcla, y éstos pueden ser remplazados por materiales producto de la recuperación del asfalto, disminuyendo los costos de producción que se generarían al utilizar agregados vírgenes de banco.

Estudios realizados por el mismo autor nos señalan que la máxima resistencia a la compresión alcanzada por mezclas de concreto con RAP en su composición no superó los 25 MPa (254.9 kg/cm²). La dificultad de producir mezclas con mayor resistencia a la anteriormente mencionada se debe a diferentes factores, siendo el asfalto contenido en el RAP el principal. La resistencia del concreto depende principalmente de la unión del mortero con los agregados, y en el caso de los asfaltos recuperados, en éstos existe una película de alrededor de la partícula de entre 0.006 y 0.009 milímetros de espesor que impide que exista una unión adecuada entre el cementante y el agregado.

Los elementos que comprende la mezcla de concreto son principalmente:

- Cemento Portland
- Arena que comprende la parte fina de la mezcla
- Grava que comprende la parte gruesa de la mezcla

En los estudios realizados por Okafor (2010), se estudió la resistencia de las mezclas de concreto con RAP. Para esto se desarrollaron especímenes de control que contenían los elementos vírgenes mencionados anteriormente y que fueron comparados con demás muestras en las cuales los contenidos de agregados

gruesos y finos fueron reemplazados por asfaltos recuperados. Para poder categorizar el RAP en finos y gruesos y así poder ser utilizados en las mezclas se utilizó la malla número 4, para así diferenciar los tamaños de los agregados, las partículas que pasaron dicha malla fueron denominados RAP fino y en la otra parte, a las partículas que no pasaron se les denominó RAP grueso. Las condiciones que se analizaron fueron proporciones (cemento, arena y RAP) de 1:2:4 y 1:3:6. Así como también relaciones de agua-cemento de 0.5, 0.6 y 0.7. Un detalle resulta un tanto extraño a la hora de analizar los especímenes, fue de que el revenimiento de las mezclas que contenían mayor proporción de RAP en su composición fue menor al de las mezclas con contenidos vírgenes de banco, y esto puede ser atribuible a la forma de la partícula de RAP y a la alta viscosidad del agregado.

En Hossiney *et al.* (2010) se evalúa la viabilidad de integrar asfaltos recuperados en pavimentos de concreto. En laboratorio se fabricaron mezclas de concreto que contenían diferentes cantidades de RAP, siendo los porcentajes de 10%, 20%, 30% y 40%, y se evaluaron según las propiedades que son importantes en el desempeño de pavimentos de concreto hidráulico. Los resultados de estos ensayos en laboratorio concuerdan con los obtenidos de otros estudios e indican que la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y el módulo elástico del concreto disminuyen a medida que el porcentaje de RAP en su composición aumenta. Sin embargo, los coeficientes de contracción y expansión térmica no se ven afectados en gran proporción debido a la cantidad de asfaltos recuperados que contienen las muestras.

Hossiney (2010) al igual que Okafor (2010) mencionan que la película de asfalto adherida al agregado pétreo del RAP juega un papel importante en el comportamiento de las mezclas de concreto. El autor señala que esta película de asfalto actúa como una capa de interfaz entre el agregado y el agente cementante, que puede detener los efectos del micro-fracturamiento y retrasar la ampliación y propagación de las micro fisuras.

Para el desarrollo de los ensayos pertinentes, al igual que en Okafor (2010), el asfalto recuperado fue separado en dos categorías como lo son el RAP fino y RAP

grueso mediante la utilización de la malla número 4. Además del ensaye de granulometría que se le efectuó al asfalto recuperado, también se realizaron las pruebas de absorción de agua y gravedad específica. Los resultados del ensaye de gravedad específica no varían mucho entre el agregado virgen y el RAP, sin embargo, en la prueba de absorción de agua, el RAP presenta valores más bajos, y por razones obvias se intuye que la película de asfalto alrededor del agregado pétreo del RAP impide que absorba la misma cantidad de agua como lo haría el agregado virgen.

Huang (2005) desarrolló estudios sobre la adición de asfaltos recuperados en nuevas mezclas de concreto hidráulico, sin embargo, a la hora de los ensayes de laboratorio, creó, al igual que las muestras de control con solamente agregados vírgenes y muestras con 100% de RAP, mezclas que combinaban proporciones de agregados vírgenes y asfaltos recuperados, para así tener un panorama más amplio de los efectos que provoca el RAP en el comportamiento del concreto. Otro punto importante a notar en este estudio, es que el RAP utilizado en todos los ensayes no fue recuperado de ningún proyecto carretero existente, éste fue elaborado directamente en laboratorio, utilizando un asfalto de PG 64-22, con una proporción que garantizara el recubrimiento de todas las partículas del agregado pétreo con una película de 0.008 milímetros y envejecido durante 12 horas en un horno a 120°C, con el fin de sus características se equipararan con el RAP real. Empíricamente, el autor señala que entre más envejecido sea el asfalto recuperado, este tendrá una mejor adhesión al agente cementante, logrando así un aumento en la resistencia a la compresión.

2.2 RAP

En Valdés *et al.* (2008) se define el pavimento asfáltico recuperado (RAP, por sus siglas en inglés) como: “Es el pavimento asfáltico que ha cumplido su vida útil que ha sido fresado o extraído y posteriormente triturado”. Haciendo énfasis en que sus propiedades dependen de varios factores como lo son: i) el tipo de mezcla de cual provienen, ii) la metodología empleada en su extracción y iii) del proyecto carretero del cual provienen. A partir de lo anterior, el RAP presenta una heterogeneidad, lo cual conlleva a variaciones importantes en cuanto a la calidad y tamaño de sus partículas, además del contenido y tipo de ligante adherido a las partículas. Como lo menciona Patiño *et al.* (2014), una vez recuperados, los pavimentos deteriorados pueden ser utilizados para fabricar nuevos materiales de construcción, siendo esta técnica más económica que utilizar materiales extraídos de bancos, además de que es una opción sustentable y más amigable con el medio ambiente.

El inicio y auge de la adición de asfaltos reciclados a las nuevas mezclas de pavimento tuvo lugar en la década de 1970, como lo expone Zaumanis *et al.* (2016) Durante esta década ocurrió una crisis de petróleo, esto llevo a la consecuente elevación en los costos de los aglutinantes. Debido a esto, se realizaron grandes esfuerzos en la investigación del uso de altos contenidos de RAP. Estas investigaciones tenían el objetivo reducir el consumo de energía y los costos del asfalto al maximizar el reciclaje de éstos.

2.2.1 METODOLOGIA DE EXTRACCION

2.3 AGREGADOS PETREOS

El agregado es el material granular, generalmente inerte, resultante de la desintegración natural y/o desgaste de rocas, o que se obtiene mediante la trituración de ellas, de escorias siderúrgicas convenientemente preparadas para tal fin o de otros materiales suficientemente duros, que permiten obtener partículas de forma y tamaños estables, destinadas a ser empleadas en hormigones.

La importancia del uso de los tipos y calidad correctos del agregado (árido) no se puede subestimar. Los agregados fino y grueso ocupan cerca del 60 % al 75 % del volumen del hormigón (70 % a 85 % de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del hormigón.

Algunos depósitos naturales de agregado, llamados de gravas de mina, consisten en grava y arena que se pueden usar inmediatamente en el hormigón, después de un procesamiento mínimo. La grava y la arena naturales normalmente se excavan o dragan de la mina, del río, del lago o del lecho marino. La piedra triturada se produce triturando la roca de cantera, roca redondeada, guijarros o gravas grandes. La escoria de alto horno enfriada al aire y triturada también se usa como agregados fino y grueso. Los agregados frecuentemente se lavan y se gradúan en la mina o en la planta. Se puede esperar alguna variación en el tipo, calidad, limpieza, granulometría (gradación), contenido de humedad y otras propiedades.

El hormigón reciclado o el hormigón de desperdicio triturado es una fuente viable de agregados y una realidad económica, especialmente donde los buenos agregados son escasos. Se pueden utilizar equipos convencionales de trituración de piedras y se han desarrollado nuevos equipos para reducir el ruido y el polvo.

2.3.1 ENSAYES PARA AGREGADOS PETREOS

3. METODOLOGÍA

3.1 Diagrama de flujo de la metodología a seguir

La Figura 3.1 muestra el procedimiento metodológico empleado en la presente investigación. Se inició con el muestreo y caracterización de los especímenes de RAP obtenidos del proyecto carretero Compostela-Chapalilla en el Estado de Nayarit. La caracterización de los materiales se desarrolló con base a granulometrías y absorción, lo cual se determinó mediante los ensayos adecuados.

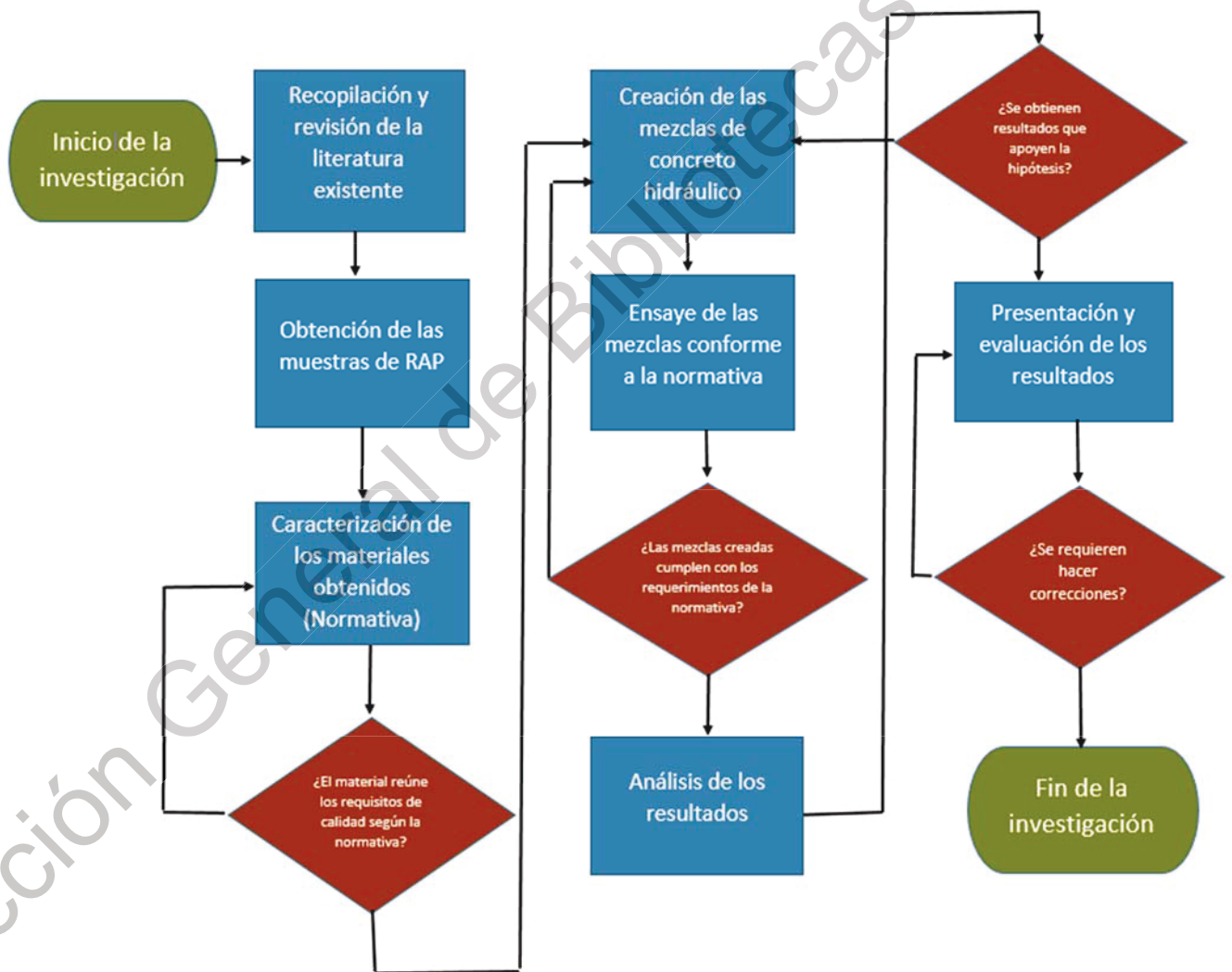


Figura 3.1. Diagrama de la metodología a seguir.
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se diseñaron las mezclas de hormigón a la cuales se les adicionó el contenido de RAP determinado. A continuación, se fabricaron las muestras que posteriormente se sometieron a diferentes ensayos. Una vez obtenidos los resultados de los ensayos, se desarrollaron conclusiones y recomendaciones para el diseño de mezclas de hormigón adicionadas con material recuperado de pavimentos.

El diseño experimental se desarrolló basándose en investigaciones previas, las cuales fueron consultadas, para poder así, realizar ensayos pertinentes y que arrojen resultados acordes al propósito de este trabajo de investigación.

Como se menciona en Huang *et al.* (2005), se realizaron ensayos de granulometría a los pavimentos de asfaltos recuperados, y estos fueron divididos en dos clases de RAP. (RAP grueso denominación para el material retenido por la malla número #4, y RAP fino para el material que pase de la malla #4).

Para cada tipo de muestra, desarrollaran tres especímenes, para poder así obtener suficientes datos que validen la hipótesis planteada en este trabajo de investigación.

Además de los ensayos que se plantean para la caracterización de los materiales que serán utilizados, de realizaran diferentes ensayos que evaluaran el comportamiento de las nuevas mezclas de concreto hidráulico, y esos son: i) Resistencia a la compresión ASTM C31. ii) ASTM C78

3.2 Muestreo de materiales

En esta sección se muestran los procedimientos utilizados para determinar las características de los materiales utilizados en la elaboración de las nuevas mezclas de concreto. Como se ha mencionado anteriormente en el apartado de diseño de concreto, es necesario conocer las propiedades de los materiales, para así lograr los objetivos deseados, tanto en trabajabilidad, economía y resistencia.

3.2.1 Muestreo de RAP

El asfalto reciclado utilizado en la elaboración de concreto fue obtenido mediante el proceso de fresado de la carpeta asfáltica de la carretera 68D, del tramo Compostela-Chapalilla, ubicado en la parte sur del estado de Nayarit.



Figura 3.2. Almacenamiento y transporte de RAP.

El RAP fue almacenado en costales y recubiertos de bolsas plásticas para evitar la pérdida o adquisición de humedad del material (figura 3.2), para así ser transportado desde el estado de Nayarit hasta el laboratorio de suelos ubicado en el campus de la Universidad Autónoma de Querétaro, donde se efectuaron los ensayos pertinentes. En la figura 3.3 se observa el cuarteo manual efectuado al RAP.



Figura 3.3. Cuarteo del RAP.

3.2.2 Muestreo de agregados vírgenes

El material pétreo virgen que se utilizó para fabricar los especímenes de concreto fue obtenido del banco de material “La Cañada”, ubicado al noreste de la ciudad de Querétaro. El muestreo se realizó conforme a lo que se indica en la norma ASTM D75 “Práctica Estándar para el Muestreo de Agregados”.



Figura 3.4. Muestreo del material de banco.

La reducción de las muestras para los diferentes ensayos a practicar se realizó mediante el método de cuarteo manual, en conformidad con la norma ASTM C702 “Practica Estándar para la Reducción de Muestras de Agregados a Tamaños de Ensayo”. Las figuras 3.4 y 3.5 muestran el muestreo y el cuarteo respectivamente del material de banco.



Figura 3.5. Reducción de muestras de los agregados.

3.3 Caracterización de los materiales

3.3.1 Granulometrías

Los agregados utilizados, tanto los vírgenes como el asfalto reciclado se caracterizaron en primera instancia mediante un análisis granulométrico en seco de acuerdo a la norma ASTM C136. El propósito de la prueba es evaluar la distribución de tamaños de partículas de las muestras, haciendo pasar los agregados de la muestra a través de un conjunto de mallas de diferentes tamaños, ordenadas de manera decreciente. En la figura 3. 6 se muestran las mallas utilizadas en el ensaye granulométrico de los materiales utilizados.



Figura 3.6. Juego de mallas utilizadas en el ensaya granulométrico.

3.3.2 Densidad relativa y absorción

Esta prueba permite determinar las relaciones de masa-volumen de los materiales respecto a la relación masa-volumen del agua, así como también la absorción de los materiales, y se utiliza para calcular los volúmenes ocupados por el agregado en sus diferentes condiciones de contenido de agua y el cambio de masa del mismo debido a la entrada de agua en sus poros, con respecto a su condición en estado seco. Cabe mencionar que las pruebas se realizan de manera diferente para las distintas fracciones del material, un procedimiento para la masa retenida en la malla #4 (4.75 mm) y otro para el material que pasa la malla #4.



Figura 3.7. Báscula y canastilla para sumergir material en agua.

El procedimiento que se realiza a la fracción del material retenido en la malla #4 inicia con un lavado del mismo, esto con el fin de eliminar cualquier residuo de polvo o material contaminante que contenga. Posteriormente se seca la muestra a una temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, hasta conseguir una masa constante, para después dejar enfriar a temperatura ambiente. Seguido a esto se deja saturando el material

en agua durante 24 horas. Transcurrido ese tiempo, se extrae el agua y el material se desliza sobre un lienzo ligeramente húmedo, con el fin de sólo secar superficialmente las partículas del agregado y se obtiene su masa. En la figura 3.7 se observa la báscula y canastilla utilizada para medir la masa de la muestra sumergida en agua.

De igual manera, se obtiene la masa de la canastilla vacía sumergida en agua. Seguido a lo anterior, se obtiene la masa del material superficialmente seco sumergido con la canastilla. Para finalizar, se seca el material en un horno a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ y se obtiene su masa, para posteriormente realizar los cálculos con los datos obtenidos hasta el momento mediante las ecuaciones siguientes.

$$S_d = \frac{W_s}{W_1 - W_3} \quad (1)$$

Donde:

S_d = Densidad relativa del material seco, (adimensional)

W_s = Masa del material secado al horno, (g)

W_1 = Masa del material saturado y superficialmente seco, (g)

W_3 = Masa del material saturado y sumergido en agua, (g), calculada como:

$$W_3 = W_2 - W_c \quad (2)$$

W_2 = Masa de canastilla conteniendo material saturado sumergido en agua (g)

W_c = Masa de la canastilla vacía y sumergida en agua, (g)

$$S_{sat} = \frac{W_1}{W_1 - W_3} \quad (3)$$

S_{sat} = Densidad relativa del materia saturado superficialmente seco

W_1 = Masa del material saturado y superficialmente seco, (g)

W_3 = Masa del material saturado y sumergido en agua, (g)

$W_2 =$ Masa de canastilla conteniendo material saturado sumergido en agua (g)

$W_c =$ Masa de la canastilla vacía y sumergida en agua, (g)

$$S_s = \frac{W_s}{W_s - W_3} \quad (4)$$

Donde:

$S_s =$ Densidad relativa de los sólidos del material, (adimensional)

$W_s =$ Masa del material secado al horno, (g)

$W_3 =$ Masa del material saturado y sumergido en agua, (g)

$W_2 =$ Masa de canastilla conteniendo material saturado sumergido en agua (g)

$W_c =$ Masa de la canastilla vacía y sumergida en agua, (g)

$$W_{ab} = \frac{W_1 - W_s}{W_s} \times 100 \quad (5)$$

$W_{ab} =$ Absorción del material, (%)

$W_1 =$ Masa del material saturado y superficialmente seco, (g)

$W_s =$ Masa del material secado al horno, (g)

3.4 Diseño y elaboración de las mezclas de concreto

Existen una gran cantidad de métodos empíricos de diseño de mezclas para obtener concretos con características específicas, sin embargo, no existe una norma como tal que mencione el procedimiento para la realización de mezclas para concreto con RAP en su composición, para nuestro caso se usara el propuesto por el ACI 211.1 El procedimiento descrito en ACI 211 detalla dos métodos de proporcionar mezclas de concreto de peso normal y denso que son:

- Basado en un peso estimado del concreto por volumen unitario.
- Basado en el cálculo del volumen absoluto ocupado por los componentes del concreto.

Los métodos descritos proporcionan una aproximación preliminar de las cantidades de materiales necesarios para elaborar la mezcla de concreto, que luego deben ser verificadas mediante mezclas de prueba en el laboratorio o en el campo y efectuar los ajustes que sean necesarios con el objetivo de lograr las características deseadas en el concreto fresco y endurecido. El método de la ACI se resume en los siguientes pasos:

- 1) Elección del revenimiento,
- 2) Elección del tamaño máximo de agregado,
- 3) Cálculo del agua de mezclado y el contenido de aire,
- 4) Selección de la relación agua- cemento,
- 5) Cálculo del contenido de cemento,
- 6) Estimación del contenido de agregado grueso,
- 7) Estimación del contenido de agregado fino,
- 8) Ajuste por humedad del agregado,
- 9) Ajustes en las mezclas de prueba.

Los tamaños de agregados para la realización del concreto permeable pueden ser agregado grueso de un solo tamaño o de una clasificación entre 3/4 y 3/8 de pulgada (19 y 9.5 mm) y deben cumplir con los requisitos de las normas ASTM D 448 Y ASTM C 33 las cuales hacen referencia a la clasificación estándar del tamaño de agregados para la construcción de caminos y elaboración de concreto respectivamente.

La calidad del agua para el concreto adicionado con RAP está gobernada por los mismos requisitos que para el concreto convencional, en el ACI 301. El agua que es potable es adecuada para usarla en el concreto.

Para el concreto con RAP, el cemento Portland que satisface las normas ASTM C150, C595 o C1157 es el adecuado para ser usado en la fabricación de las probetas.

3.4.1 Elaboración de probetas

Se elaborarán probetas cilíndricas de concreto compactado, mediante varillado de acuerdo con la norma ASTM C31. Para esto los moldes deben ser de acero, hierro forjado u otro material no absorbente y que no reaccione con el cemento.

Antes de usarse los moldes deben ser cubiertos ligeramente con aceite mineral o un agente separador de encofrado no reactivo. La varilla de compactación debe ser de hierro liso diámetro 5/8", de 60 cm de largo y con uno de sus extremos boleados, así mismo debe usarse un mazo de goma que pese entre 0.60 y 0.80 Kg.

Los especímenes deben ser cilindros de concreto vaciado y fraguado en posición vertical, de altura igual a dos veces el diámetro, siendo el espécimen estándar de 6X12 pulgadas, o de 4X8 pulgadas para agregado de tamaño máximo que no excede las 2".

Para la elaboración de las probetas se sigue la siguiente serie de pasos:

1. Debemos colocar los moldes sobre una superficie nivelada y libre de cualquier tipo de vibración.

2. Se procede a llenar el molde con el concreto, éste se deposita cuidadosamente alrededor del borde esto asegurando una correcta distribución.
3. Los moldes se llenan en 3 capas de igual volumen. Cada capa debe ser compactada con 25 penetraciones de la varilla, esto en forma de espiral distribuyéndose alrededor del cilindro y terminando en el centro. La primera capa se compacta en todo su espesor; la segunda y tercera debe ser penetrando no más de 1" en la capa anterior. Terminando de compactar cada capa se debe golpear a los lados del molde con un mazo de goma, esto con la finalidad de liberar las burbujas de aire que el concreto pueda contener.
4. Se enrasa el exceso de concreto con la misma varilla.
5. Se identifican los especímenes etiquetándolos con la información correcta y se protege adecuadamente la cara descubierta de los moldes con tela húmeda o plásticos.
6. Una vez hecho esto se llevan al lugar de almacenamiento donde deberán permanecer sin ser perturbados durante el periodo de curado inicial.

En la figura 3.8 se ilustran cilindros de concreto los cuales fueron retirados de sus moldes y requieren iniciar su curado.



Figura 3.8. Cilindros de concreto antes de iniciar curado.

3.4.2 Elaboración de vigas para ensayos de flexión.

De igual manera a las probetas de concreto para ensayos a compresión simple, la normativa que establece los parámetros para la elaboración de vigas de concreto es la ASTM C31. Los especímenes para determinar la resistencia a flexión deben de ser vigas rectangulares de concreto, coladas con la base longitudinal en posición horizontal. La longitud debe ser por lo menos, 50 milímetros mayor que tres veces el peralte en la posición de ensaye, sin exceder de 1.5 la relación del ancho del peralte. La viga estándar debe ser de 150 milímetros por 150 milímetros de sección transversal, con un agregado máximo de 50 milímetros, y 500 milímetros de base.

El vaciado de la muestra se hace con un cucharón en los moldes, posteriormente se debe distribuir el concreto utilizando una varilla de compactación. Después de la compactación, la superficie se enrasa con un mínimo de pasadas de la varilla, para producir una superficie plana y uniforme que esté a nivel con las orillas del molde y que no tenga depresiones mayores a tres milímetros de profundidad. Para evitar la evaporación del agua de los especímenes de concreto,

se deben cubrir los moldes con una placa o tela que siempre debe permanecer húmeda. La figura 3.9 muestra una viga de concreto elaborada para este trabajo de investigación.



Figura 3.9. Viga de concreto de 50x15x15 mm.

Los moldes de los especímenes de prueba elaborados para comprobar las proporciones de la mezcla para propósitos de resistencia deben retirarse 24 horas después de la fabricación, permitiendo un margen entre 20 y 48 horas. Inmediatamente después de retirar los moldes de las vigas, estas últimas deben ser almacenadas en condiciones húmedas, a una temperatura de 23 °C, con un margen de ± 2 °C hasta el momento de la prueba.

3.5 Ensayes de las probetas

En este capítulo se detallan los ensayos realizados a los especímenes de concreto elaborados. Cabe mencionar que las dos clases de ensayos son los más comúnmente utilizados, además de que los resultados que arrojan se relacionan directamente con las propiedades buscadas a la hora de diseñar y construir un pavimento rígido.

3.5.1 Ensayo a compresión simple

El ensayo con el cual se mide la resistencia a la compresión simple está establecido por la norma ASTM C39 “Método estándar de prueba de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto”. Para este ensayo se emplean moldes cilíndricos de 15 centímetros por 30 centímetros de longitud. Para cada edad se deben ensayar como mínimo dos cilindros y trabajar con el valor promedio. Una vez fabricadas y curadas las probetas cilíndricas de concreto se procede limpiar las superficies de la prensa y los extremos de la probeta, se coloca ésta sobre la prensa, alineando cuidadosamente su eje respecto al centro de la placa de carga de la prensa. Seguido a lo anterior se aplica una carga a una velocidad uniforme y continua, tratando de no producir impactos ni pérdidas de carga. Se continúa aplicando la carga, hasta llegar a la máxima permisible en la cual la probeta sufre fallas.

En la figura 3.10 se muestra un cilindro de concreto adaptado mediante almohadillas de neopreno, las cuales cumplen con la misma función de cabeceo mediante azufre, y permiten una adecuada aplicación de cargas.



Figura 3.10. Prensa utilizada para ensayo a compresión simple.

Como resultado de esta prueba se calcula y se reporta la resistencia a la compresión simple soportada por el espécimen, utilizando la siguiente expresión:

$$R = \frac{10 P}{A} \quad (6)$$

Donde:

R= Resistencia a la compresión simple, (MPa)

P= Carga máxima, (kN)

A= Área promedio de la sección transversal del espécimen (cm²)

3.5.2 Ensaye a flexión.

Las condiciones necesarias para desarrollar el ensayo de resistencia a la flexión se establecen en la norma ASTM C78 “Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto (utilizando viga simple con carga en los tercios del claro)”. Para iniciar el ensayo se debe voltear el espécimen sobre un lado con respecto a la posición de moldeado. La viga se centra sobre los apoyos, mismos que deben estar centrados con respecto a la fuerza aplicada. Los bloques de aplicación de carga se ponen en contacto con la superficie de la viga en los puntos tercios entre los apoyos. Se recomienda que los puntos tercios sean señalados mediante un plumón, para así facilitar su manejo y centrado. La carga se debe aplicar a una velocidad constante y uniforme.

Para hacer las mediciones pertinentes del ensayo se determina el ancho promedio, peralte y localización de la falla, estos datos son necesarios para el cálculo y expresión de los resultados. Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro el módulo de ruptura se calcula con la siguiente expresión:

$$R = \frac{(P \times L)}{(b \times d^2)} \quad (7)$$

Donde:

R= Módulo de ruptura, en kPa (kgf/cm²).

P= Carga máxima aplicada en N (kgf).

L= Distancia entre los apoyos (cm).

b= Ancho promedio del espécimen (cm).

d= Peralte promedio del espécimen (cm).

La figura 3.11 muestra el equipo necesario para aplicar cargas en el ensaye de resistencia a la flexión. Este dispositivo debe ser capaz de aplicar cargas en los tercios del claro, de tal manera que las fuerzas aplicadas sean perpendiculares a las caras horizontales de la viga y se distribuyan uniformemente en todo lo ancho del espécimen.



Figura 3.11. Equipo utilizado en ensaye de resistencia a flexión.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Elección, visita y muestreo del banco de material

El banco de materiales elegido para obtener los agregados que se utilizaron en la fabricación de las probetas y losas de ensaye en este trabajo de investigación fue seleccionado debido a que estudios previos daban como resultado que el banco de material "La Cañada" contaba con los requerimientos necesarios para ser utilizado en concreto. En la figura 4.1 se ilustra la ubicación del banco de material, mismo que se encuentra hacia el noreste de la ciudad de Querétaro.

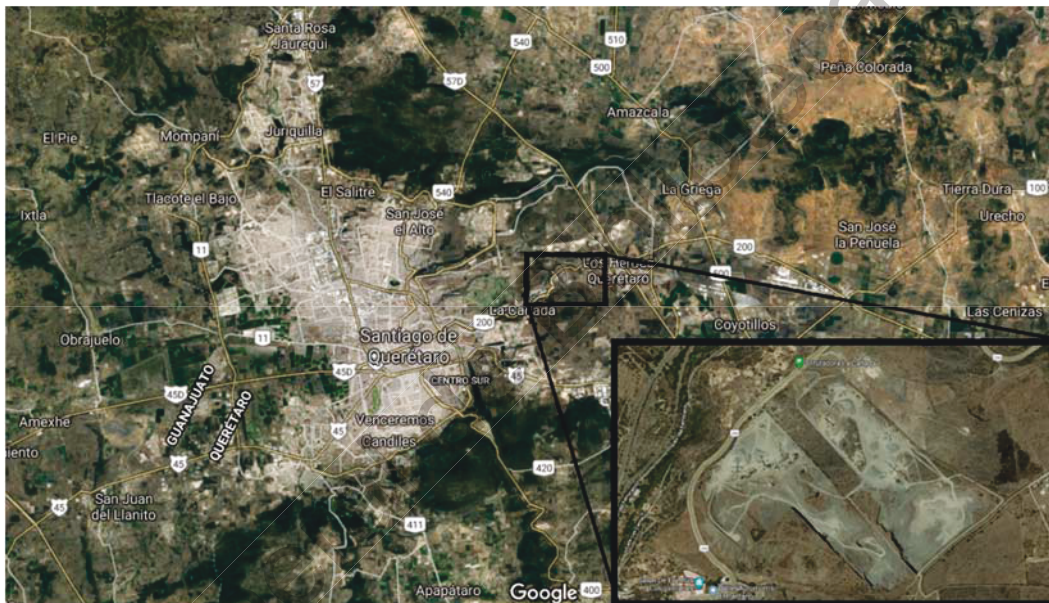


Figura 4.1. Localización banco de material "La Cañada".

El muestreo del material se desarrolló siguiendo la norma M-MM-1-01/03 Muestreo de materiales. Debido a efectos de la fuerza de gravedad, durante el proceso de molienda de los agregados pétreos y formación de los montículos donde se almacena el material, las partículas de mayor tamaño tienden a depositarse en la parte inferior y por ende las de menor tamaño en la parte superior. Con el fin mitigar este efecto y proveer de una muestra representativa de material para su posterior ensayo, se siguió el proceso de escalar hasta la parte alta de las pilas y con la utilización de una pala, se generó un canal de manera vertical, para así ir arrastrando y mezclando el agregado hasta llegar a la parte inferior de la pila. Una

vez hecho esto, el material se deposita en una superficie limpia, para así homogenizarlo, cuartearlo y tomar las muestras representativas adecuadas. La figura 4.2 ilustra de la parte posterior la generación de los canales mencionados anteriormente, así como también el cuarteo necesario para obtener muestras representativas.



Figura 4.2. Muestreo del Banco de Material “La Cañada”.

El RAP utilizado en este trabajo de investigación fue extraído mediante maquinaria encargada del fresado de la carretera 68B, del tramo Compostela-Chapalilla. A este material se le realizaron ensayos granulométricos para determinar la distribución y tamaño de sus partículas. En la figura 4.3 se puede observar la parte sur del estado de Nayarit, de igual manera se hace un acercamiento al tramo carretero del cual fue obtenido el asfalto reciclado. Una vez recolectado el RAP, fue transportado mediante costales hasta el laboratorio de Geotecnia y Materiales, ubicado en el campus de la Universidad Autónoma de Querétaro, con el propósito de realizar las pruebas necesarias para incorporar estos materiales a las nuevas mezclas de concreto hidráulico.



Figura 4.3. Localización del tramo Compostela-Chapallilla.

4.2 Ensayes de caracterización

4.2.1 Ensayes granulométricos

Una vez transportados los materiales al laboratorio de suelos, se iniciaron los ensayos granulométricos, con el objetivo de conocer la distribución de los tamaños de partículas. En la figura 4.4 se observa el procedimiento necesario al realizar el ensayo de granulometría.



Figura 4.4. Ensaye granulométrico del agregado virgen.

En la tabla 4.1 se presentan los resultados del ensayo granulométrico efectuado a los diferentes materiales que se utilizaron en la elaboración de las mezclas de concreto. Con el fin de conocer la influencia que tiene la utilización de RAP en mezclas de concreto, se propuso dividir el RAP en dos partes: la parte gruesa (retenido por la malla #4) y la parte fina (pasa malla #4). La figura 4.5 se ilustra dos porciones de asfalto reciclado, separados de acuerdo a su tamaño, mediante la utilización de la malla #4.



Figura 4.5. Ensaye granulométrico al asfalto reciclado.

La tabla 4.1 enlista la distribución de los tamaños de partículas, tanto del agregado pétreo virgen procedente den banco de material “La cañada” y el asfalto recuperado. En la figura 4.6 se ilustra la comparativa de las curvas granulométricas del agregado virgen (rojo) y el RAP (azul), ambas curvas representan la granulometría completa de los materiales, tanto de su parte fina como de su parte gruesa. Estos materiales fueron utilizados en la fabricación de los cilindros de concreto que fueron ensayados a compresión simple y vigas de concreto ensayadas a flexión. Como se puede observar en la figura 4.6, el módulo de finura del RAP es menor en comparación con el módulo de finura del material extraído de banco, y esto se debe principalmente a la metodología de extracción utilizada.

Tabla 4.1. Comparación granulométrica de los agregados.

| Malla | Abertura(mm) | Agregado virgen | RAP |
|--------|--------------|-----------------|---------|
| | | Pasa(%) | Pasa(%) |
| 2" | 50.7 | 100.00 | 100 |
| 1 1/2" | 39.94 | 97.48 | 100 |
| 1" | 25.32 | 75.67 | 100 |

| | | | |
|-------------|-------|-------|------|
| 3/4" | 19.32 | 61.70 | 95.6 |
| 1/2" | 12.54 | 41.84 | 81.9 |
| 3/8" | 10 | 33.67 | 65.0 |
| 1/4" | 6.42 | 20.70 | 30.4 |
| #4 | 4.68 | 14.66 | 16.5 |
| #10 | 2 | 3.23 | 5.2 |
| #20 | 0.85 | 1.13 | 2.2 |
| #40 | 0.425 | 0.66 | 1.4 |
| #60 | 0.25 | 0.27 | 0.5 |
| #100 | 0.15 | 0.15 | 0.1 |
| #200 | 0.075 | 0.05 | 0 |

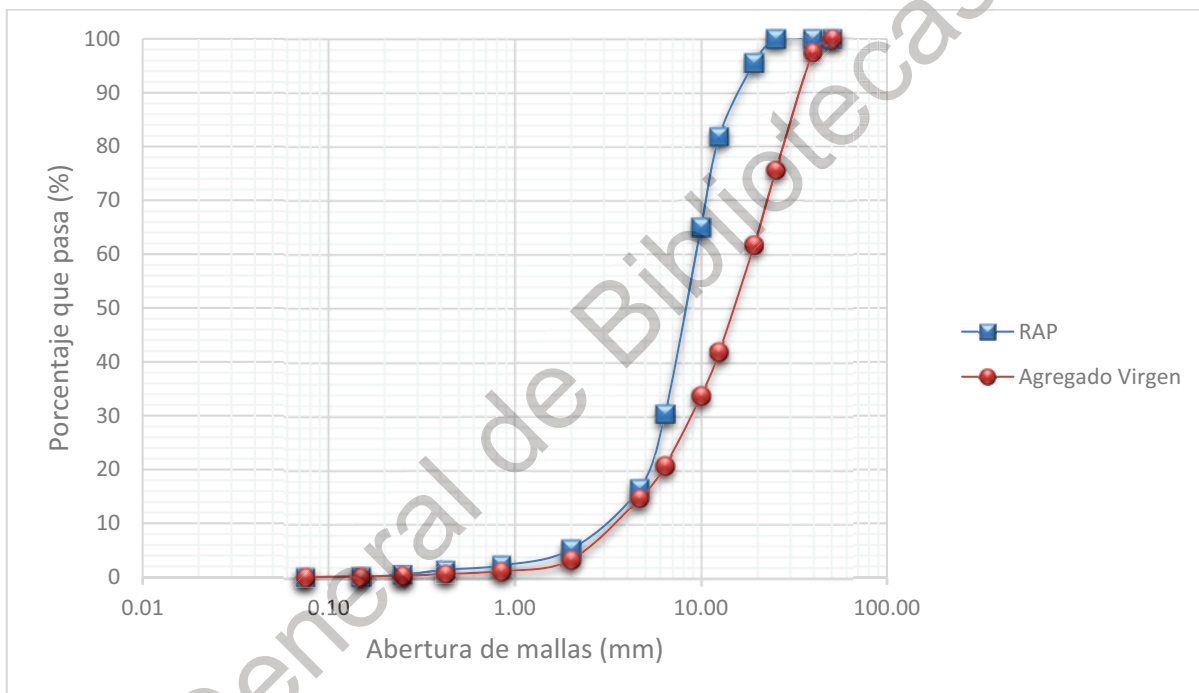


Figura 4.6. Curvas granulométricas de los agregados pétreos y RAP.

4.2.2 Gravedad específica

El propósito de la prueba conforme a la norma ASTM C127 es determinar las relaciones masa-volumen de los materiales respecto a la relación masa-volumen del agua, así como también la absorción de los materiales. Estos parámetros se utilizan para calcular los volúmenes ocupados por un material o mezcla de varios en sus diferentes condiciones de contenido de agua y cambios de volumen debido a la entrada de agua en los poros del material. El equipo utilizado para el desarrollo

de este ensayo consta de balanzas, malla #4, canastillas y recipientes para sumergir los materiales en agua.

En la tabla 4.2 se presentan los resultados de densidad relativa, densidad del material saturado superficialmente saturado, densidad relativa de los sólidos del material y absorción de los diferentes agregados a utilizar en la fabricación de las nuevas mezclas de concreto. El RAP utilizado en ésta investigación fue obtenido de un proceso de extracción superficial, causando que sus partículas se encontraran parcialmente recubiertas de asfalto, lo cual repercutió en el aumento del porcentaje de absorción difiriendo de lo que establece la bibliografía consultada, donde Okafor (2010) menciona que la humedad absorbida en el RAP decrece debido a que la película de asfalto que recubre el agregado pétreo evita que este último absorba agua por sus poros.

Tabla 4.2. Resultados de densidad relativa y absorción de los diferentes materiales.

| | Agregado pétreo virgen | RAP |
|-------------|-------------------------------|------------|
| $S_d =$ | 2.668 | 2.21 |
| $S_{sat} =$ | 2.688 | 2.27 |
| $S_s =$ | 2.722 | 2.35 |
| $W_{ab} =$ | 0.752% | 2.01% |

4.3 Diseño y elaboración de las muestras de concreto hidráulico

En la tabla 4.3 se observa la distribución de materiales para la elaboración de las mezclas de concreto que fueron ensayadas bajo la normativa. En primer lugar, se observa la mezcla 1, que será denominada como de referencia, ya que está elaborada en su totalidad de materiales pétreos vírgenes. La mezcla 2 contiene en su composición agregado grueso virgen y en su parte fina RAP. La mezcla 3, es justo lo contrario a la mezcla anterior, contiene RAP en su parte gruesa y agregado pétreo en su parte fina. La mezcla 4 es la elaborada en su totalidad con asfaltos reciclados.

Tabla 4.3. Distribución de las mezclas de concreto.

| Mezcla | Agregado Virgen Fino | Agregado Virgen Grueso | RAP Fino | RAP Grueso | Fechas de ensayo (días) | | | Numero de Especímenes |
|--------------------------|----------------------|------------------------|----------|------------|-------------------------|----|----|-----------------------|
| | | | | | 7 | 14 | 28 | |
| Mezcla 1 (Referencia) | • | • | | | • | | | 3 |
| | • | • | | | | • | | 3 |
| | • | • | | | | | • | 3 |
| Mezcla 2 | • | | | • | • | | | 3 |
| | • | | | • | | • | | 3 |
| | • | | | • | | | • | 3 |
| Mezcla 3 | | • | • | | • | | | 3 |
| | | • | • | | | • | | 3 |
| | | • | • | | | | • | 3 |
| Mezcla 4 | | | • | • | • | | | 3 |
| | | | • | • | | • | | 3 |
| | | | • | • | | | • | 3 |
| Mezcla 4E | | | • | • | | | | |
| | | | • | • | | • | | |
| | | | • | • | | | • | |

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el diseño establecido por el American Concrete Institute en el documento 211 se puede resumir en nueve pasos, los cuales se muestran a continuación. Para ejemplificar el procedimiento se muestra a continuación el diseño desarrollado para la mezcla 3, la cual está compuesta por agregado virgen grueso y asfalto reciclado en su parte fina.

Datos iniciales:

- Cemento Portland tipo I
Peso específico=3.15 gr/c3
- RAP Fino
Módulo de finura=2.11
Peso específico aparente saturado=2.3 gr/cm3
Humedad de absorción=2%
- Agregado grueso virgen
Tamaño nominal=1" (25mm)
Peso específico seco saturado=2.6 gr/cm3
Humedad por absorción= 1%
Peso unitario seco compactado= 1.531 gr/cm3

1) Elección del revenimiento

De acuerdo a la tabla 4.4, la cual nos muestra los valores permitidos de revenimiento para cada tipo de construcción, se seleccionó un valor medio de 5 cm de revenimiento.

Tabla 4.4. Revenimiento del concreto de acuerdo a tipo de construcción.

| Tipos de construcción | Revenimiento (cm) | |
|--|-------------------|--------|
| | Máximo* | Mínimo |
| Muros de cimentación y zapatas reforzadas | 7.5 | 2.5 |
| Muros de sub-estructuras, cajones y zapatas sin refuerzo | 7.5 | 2.5 |
| Vigas y muros reforzados | 10 | 2.5 |
| Columnas de edificios | 10 | 2.5 |
| Losas y pavimentos | 7.5 | 2.5 |
| Concreto masivo | 7.5 | 2.5 |

**Puede incrementarse 2.5 cm para métodos de consolidación distinta a la vibración.*

Fuente: ACI 211

2) Elección del tamaño máximo de agregado

Con los datos obtenidos en los ensayos granulométricos de los capítulos anteriores, se estableció que el tamaño máximo de los agregados es de 1" (25 mm)

3) Cálculo del agua de mezclado y el contenido de aire

De acuerdo con las variables de la mezcla, como lo son tipo de concreto (con o sin aire incluido, revenimiento y tamaño máximo del agregado) y con la utilización de la tabla 4.5 del apéndice A1 del documento ACI 211.1, se establece la cantidad de agua necesaria.

Tabla 4.5. Cantidad de agua para tipos de concreto.

| Revenimiento | | Agua, kg/m ³ de concreto para los tamaños máximos nominales de agregados indicados | | | | | | | |
|--|---------|---|------------------|----------------|--------------|--------------------|--------------|---------------|----------------|
| (cm) | (pulg) | 9.5mm (3/8") | 12.5mm (1/2") | 19mm (3/4") | 25mm (1") | 37.5mm (1 1/2") | 50mm (2") | 75mm (3"+) | 150mm (6"*) |
| Concreto sin aire incluido | | | | | | | | | |
| 2.5 a 5 | 1 a 2 | 207 | 199 | 190 | 180 | 166 | 154 | 130 | 113 |
| 7.5 a 10 | 3 a 4 | 228 | 216 | 205 | 193 | 181 | 169 | 145 | 124 |
| 15 a 17.5 | 6 a 7 | 243 | 228 | 216 | 202 | 190 | 178 | 160 | |
| Cantidad promedio total de aire atrapado en el concreto sin aire incluido % | | 3 | 2.5 | 2 | 1.5 | 1 | 0.5 | 0.3 | 0.2 |
| Concreto con aire incluido | | | | | | | | | |
| 2.5 a 5 | 1 a 2 | 181 | 175 | 168 | 160 | 150 | 142 | 122 | 107 |
| 7.5 a 10 | 3 a 4 | 202 | 193 | 184 | 175 | 165 | 157 | 133 | 119 |
| 15 a 17.5 | 6 a 7 | 216 | 205 | 197 | 184 | 174 | 166 | 154 | |
| Contenido promedio total de aire, para nivel de exposición % | | | | | | | | | |
| Exposición | Baja | 4.5 | 4 | 3.5 | 3 | 2.5 | 2 | 1.5 | 1 |
| | Media | 6 | 5.5 | 5 | 4.5 | 4.5 | 4 | 3.5 | 3 |
| | Extrema | 7.5 | 7 | 6 | 6 | 5.5 | 5 | 4.5 | 4 |

Fuente: ACI 211

Agua= 180 kg/m³

Porcentaje de aire incluido= 1.5%

4) Selección de la relación agua- cemento

En concordancia con la tabla 4.6 del apéndice A1 del documento ACI 211.1, y con el propósito de generar mezclas de concreto que alcancen altas resistencias a la compresión, se seleccionó una relación agua-cemento de 0.4

Tabla 4.6. Relaciones de agua-cemento

| Esfuerzo compresión a 28 días, kgf/cm ² | Relación agua/cemento, por peso | |
|--|---------------------------------|-------------------|
| | Sin aire incluido | Con aire incluido |
| 420 | 0.41 | |
| 350 | 0.48 | 0.4 |
| 280 | 0.57 | 0.48 |
| 210 | 0.68 | 0.59 |
| 140 | 0.82 | 0.74 |

Fuente: ACI 211

5) Cálculo del contenido de cemento

El cálculo del contenido de cemento se hace con la siguiente ecuación:

$$C = A / \left(\frac{A}{C}\right) \quad (8)$$

Donde:

C=Cantidad de cemento por m³ de concreto

A=Cantidad de agua por m³ de concreto

A/C=Relación agua-cemento

C=450 kg/m³

6) Estimación del contenido de agregado grueso

En la tabla 4.7 del apéndice A1 del documento ACI 211.1 se muestra el volumen de agregado, en m³, con base al peso volumétrico varillado seco (PVV), para un m³ de concreto. Este volumen se convierte a peso seco del agregado grueso requerido en un m³ de concreto, multiplicándolo por el peso volumétrico varillado en seco por m³ de agregado grueso.

Tabla 4.7. Contenido de agregado grueso.

| Tamaño máximo nominal del agregado | | Volumen de agregado grueso varillado en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura del agregado fino | | | |
|------------------------------------|--------|---|------|------|------|
| | | 2.4 | 2.6 | 2.8 | 3 |
| 9.5 mm | 3/8" | 0.5 | 0.48 | 0.46 | 0.44 |
| 12.5 mm | 1/2" | 0.59 | 0.57 | 0.55 | 0.53 |
| 19 mm | 3/4" | 0.66 | 0.64 | 0.62 | 0.6 |
| 25 mm | 1" | 0.71 | 0.69 | 0.67 | 0.65 |
| 3.7 mm | 1 1/2" | 0.75 | 0.73 | 0.71 | 0.69 |
| 50 mm | 2" | 0.78 | 0.76 | 0.74 | 0.72 |
| 75 mm | 3" | 0.82 | 0.8 | 0.78 | 0.76 |
| 150 mm | 6" | 0.87 | 0.85 | 0.83 | 0.81 |

7) Estimación del contenido de agregado fino

El procedimiento más exacto para calcular la cantidad requerida de agregados finos, implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes (determinación de gravedades específicas). En este caso, el volumen total desplazado por los componentes conocidos (el agua, aire, cemento y agregado grueso) se resta del volumen unitario del concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen ocupado por cualquier componente en el concreto es igual a su peso dividido entre la densidad de ese material (siendo ésta el producto del peso unitario del agua por el peso específico del material).

8) Ajuste por humedad del agregado

9) Ajustes en las mezclas de prueba

4.3.1 Elaboración de cilindros y vigas de concreto

Una vez diseñadas las cinco mezclas diferentes de concreto hidráulico se procedió a fabricar los especímenes de cilindros y vigas para sus respectivos ensayos. Inicialmente se elaboraron las probetas de concreto, pero debido a la cantidad de especímenes a fabricar y la disponibilidad de moldes cilíndricos en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma de Querétaro, se decidió fabricar nueve probetas por día y esperar hasta el momento del descimbrado de las mismas para habilitar los moldes usados y volver a utilizarlos en la fabricación de los cilindros de la siguiente mezcla a elaborar. En la figura 4.7 se observa el descimbrado de los cilindros de concreto pertenecientes a las diferentes fechas de ensayo de la mezcla 3 momentos antes de iniciar el proceso de curado.



Figura 4.7. Elaboración de cilindros de concreto.

Es necesario mencionar que debido a la ubicación en el estado de Nayarit en la cual fue recolectado el asfalto recuperado y a la dificultad de transportar el

mismo hasta las instalaciones donde se fabricaron las vigas y fueron ensayadas, se procedió a elaborar solamente dos especímenes de cada mezcla para ser probados en el ensaye de resistencia a la flexión a los 28 días. En la figura 4.8 se muestra una viga de concreto hidráulico inmediatamente después de ser descimbrada.



Figura 4.8. Elaboración de vigas de concreto.

4.4 Ensayes bajo normativa

4.4.1 Compresión Directa Simple

La figura 4.9 presenta los resultados de las diferentes mezclas en el ensaye de compresión simple. Los cilindros que presentan mayor resistencia a la compresión simple corresponden a la mezcla 1, que como se ilustra en la tabla 4.3, fue fabricada en su totalidad con agregados vírgenes de banco. En el otro extremo, los cilindros que presentan la menor resistencia la compresión son los elaborados totalmente con RAP. En la tabla 4.8 se observan los resultados del ensaye a compresión de los especímenes de las diferentes mezclas de concreto elaboradas. Cabe mencionar que no se fabricaron las tres probetas correspondientes al ensayo a siete días de la mezcla 4E; esto debido a complicaciones en la obtención y transporte de RAP desde su punto de recolección en el estado de Nayarit.

Tabla 4.8. Resultados del ensaye de resistencia a la compresión.

| Especímenes/Mezcla | | 1 | 2 | 3 | 4 | 4E | |
|-----------------------------------|---------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Resistencia a la compresión (Mpa) | 7 días | 1 | 18.8 | 18.611 | 11.763 | 10.963 | |
| | | 2 | 19.2 | 17.457 | 11.842 | 10.845 | |
| | | 3 | 18.9 | 17.943 | 11.082 | 10.273 | |
| | 14 días | 1 | 24.646 | 19.716 | 14.82 | 12.88 | 13.874 |
| | | 2 | 24.842 | 20.836 | 13.956 | 11.302 | 13.636 |
| | | 3 | 25.275 | 20.739 | 14.835 | 12.482 | 13.984 |
| | 28 días | 1 | 30.764 | 24.891 | 15.177 | 13.508 | 15.078 |
| | | 2 | 31.087 | 27.827 | 15.426 | 13.35 | 15.113 |
| | | 3 | 30.634 | 26.963 | 15.932 | 12.65 | 14.945 |

Además de lo anterior, se puede notar que la mezcla 2 presenta mayor resistencia a la compresión en comparación con la mezcla 3. Cabe destacar que ambas mezclas presentan una combinación de agregados vírgenes y RAP en su composición.

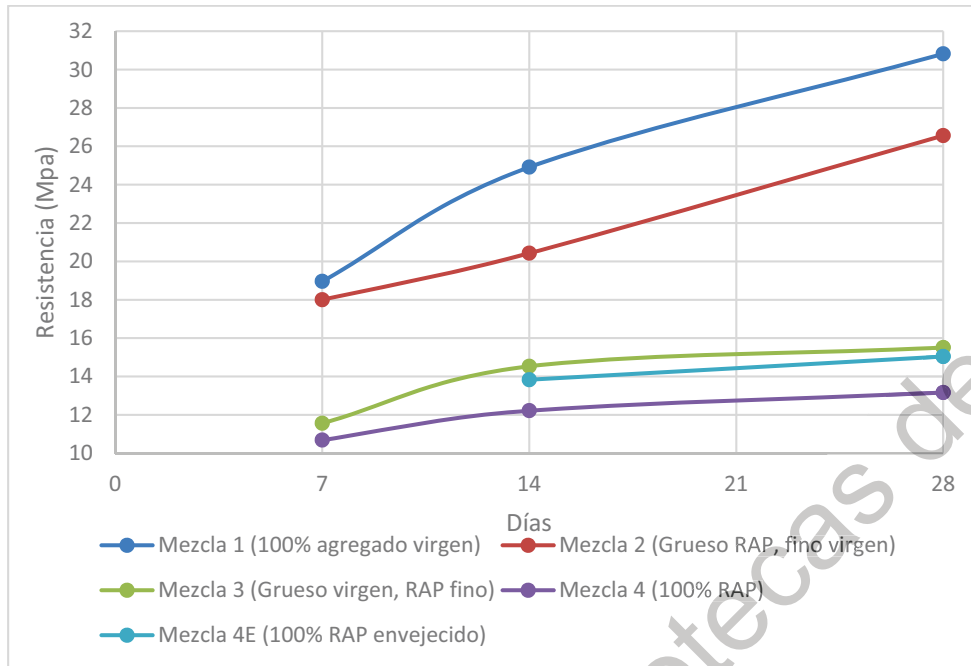


Figura 4.9. Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de concreto.



Figura 4.10. Resistencia a la compresión simple de probetas de concreto.

4.4.2 Flexión

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, el número de especímenes a ensayar a flexión se redujo debido a limitaciones en la cantidad de RAP disponible; por lo que solamente se fabricaron dos vigas por cada una de las cinco mezclas diferentes. La totalidad de las vigas fueron ensayadas a 28 días.

En la tabla 4.9 se muestran los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la flexión. Se muestra la carga aplicada a cada una de las dos vigas de cada mezcla, con su respectivo promedio y su módulo de ruptura en kg/cm². Se puede observar que la resistencia a la flexión más baja es obtenida por la mezcla 1 (referencia), la cual está fabricada enteramente por agregados pétreos obtenidos del banco de material "La Cañada". La mezcla 2 presenta un ligero aumento de resistencia, sin embargo, las vigas de la mezcla 3, la cuales se fabricaron con agregado pétreo grueso y RAP fino presentan la mayor capacidad de resistir a la flexión. Las mezclas cuatro y 4E, ambas elaboradas completamente con asfalto recuperado y diferenciadas únicamente por el tratamiento de envejecimiento que recibió el RAP la mezcla 4E presentan una disminución en la resistencia a la flexión respecto a la mezcla tres.

Tabla 4.9. Módulo de ruptura de las vigas de concreto.

| Mezcla | Espécimen | Carga aplicada (kN) | Promedio | Módulo de ruptura |
|--------|-----------|---------------------|----------|-------------------|
| 1 | 1 | 21.49 | 21.35 | 29.02 |
| | 2 | 21.21 | | |
| 2 | 1 | 21.02 | 21.43 | 29.13 |
| | 2 | 21.84 | | |
| 3 | 1 | 24.84 | 25 | 33.99 |
| | 2 | 25.16 | | |
| 4 | 1 | 20.92 | 20.54 | 27.92 |
| | 2 | 20.16 | | |
| 4E | 1 | 19.95 | 19.64 | 26.7 |
| | 2 | 19.33 | | |

La figura 4.11 muestra gráficamente el comportamiento de las mezclas de concreto diseñadas probando su resistencia a la flexión. En la figura 4.12 se observa una viga correspondiente a la mezcla 2 colocada sobre el dispositivo encargado de transmitir las cargas en los tercios momentos justos antes de ser ensayadas.

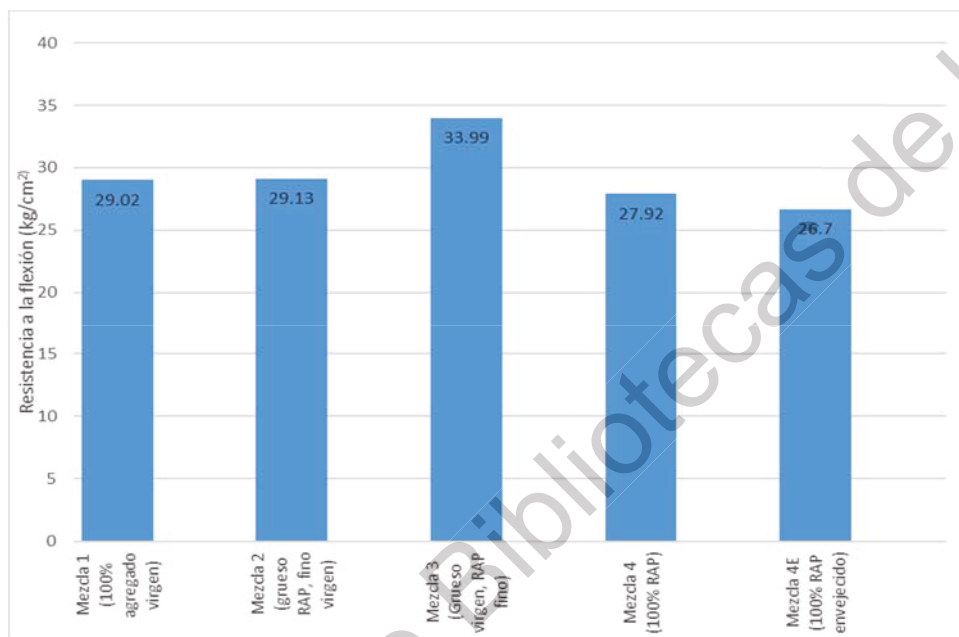


Figura 4.11. Módulo de ruptura de las mezclas de concreto.



Figura 4.12. Resistencia a la flexión de vigas de concreto.

4.5 Recopilación y análisis de los resultados

La norma NMX-C-159-ONNCCE-2016 con título “Industria de la Construcción – Concreto – Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo” establece que la cantidad de especímenes requeridos para ensayar depende de los objetivos establecidos y de la naturaleza del programa de pruebas. Sin embargo, la cantidad mínima permitida es de dos especímenes por mezcla y por fecha de ensayo. Para el desarrollo de este trabajo de investigación se diseñaron cinco mezclas diferentes para ser ensayadas a compresión y flexión. Para la prueba de resistencia a la compresión se fabricaron nueve probetas de concreto para cada mezcla, considerando así tres fechas de ensayo, por lo tanto, se ensayaron tres cilindros de cada diseño respectivamente en cada fecha de ensayo, (7, 14 y 28 días), obteniendo en total 42 cilindros de concreto. Los resultados obtenidos por cada tercia de probetas ensayadas a compresión fueron sumados y dividido entre los tres, de tal manera que el resultado final es un promedio de los diferentes valores registrados.

Como se muestra en la tabla 4.8 (pág. 61) la mezcla 1 que está fabricada completamente con agregados de banco, es la que posee una resistencia a la compresión mayor en comparación con los demás diseños, llegando a alcanzar un promedio de 30.82 mega pascales a 28 días. Esto resulta obvio, pues los agregados al ser vírgenes y estar libres de contaminantes permiten que exista una mejor unión entre el material pétreo y los demás componentes de la mezcla de concreto. La siguiente mezcla con respecto a resistencia a la compresión es el número 2 con un valor de 26.56 mega pascales a 28 días. La disminución en la resistencia se debe a que, a diferencia del diseño de referencia, esta se fabricó con RAP en su parte gruesa y agregados vírgenes en su parte fina.

Seguidas a estas anteriores se encuentran las mezclas 3, 4E y 4, con 15.51, 15.05 y 13.16 MPa respectivamente, todas a 28 días. A diferencia de la mezcla 2, el diseño 3 contiene agregado grueso virgen y RAP fino en su composición y por ende posee una mayor cantidad de asfalto, disminuyendo así su resistencia a la compresión.

Las mezclas 4 y 4E fueron diseñadas iguales, con un 100% de asfalto recuperado en su composición. Sin embargo, el RAP de la mezcla 4E sufrió un proceso de envejecimiento de 24 horas en un horno a 105 ± 5 °C, esto con el propósito de analizar la influencia de la oxidación y pérdida de masa de la película de asfalto que recubre las partículas de RAP incluidas en el concreto. El proceso anterior dio como resultado que la mezcla 4E posea una mayor capacidad de resistir la compresión antes de fallar bajo las cargas aplicadas.

Debido a la disponibilidad del concreto recuperado, se fabricaron solamente dos vigas de concreto por cada una de las diferentes mezclas diseñadas. Dando así un número total de diez vigas de concreto hidráulico, las cuales fueron ensayadas en su totalidad a 28 días. De igual manera que en el ensaye a compresión mencionado anteriormente, los resultados obtenidos de cada par de vigas correspondientes a cada mezcla fueron promediados, con el objetivo de obtener un resultado que represente de mejor manera el comportamiento a flexión de los diferentes diseños de concreto hidráulico.

Los resultados obtenidos en el ensaye de resistencia a la flexión se muestran en la tabla 4.9 (pág. 63). En esta se muestra que el diseño de la mezcla 3 es el que posee una mayor capacidad de resistir la flexión con un valor promedio de módulo de ruptura de 33.99. Lo anterior puede ser explicado debido a que una cantidad moderada de asfalto incluido en la mezcla de concreto hidráulico puede aportar un ligero incremento en el comportamiento elástico de la viga. En orden decreciente se encuentran los valores de módulo de ruptura obtenidos por las mezclas 2, 1 y 4, con 29.13, 29.02 y 27.92 kg/cm² respectivamente.

En la figura 5. 13 se ilustra una comparativa de las fallas ocasionadas por flexión en las vigas de los cinco diseños de concreto elaborados. Como se puede observar en la viga 4E (parte inferior), la película de asfalto que recubre las partículas del RAP se encuentra excesivamente envejecida, ocasionando que no exista una correcta unión entre el cementante y el agregado, lo cual es perjudicial para la capacidad de la viga de soportar la flexión. Este envejecimiento causa desprendimientos dentro de la estructura de la viga, de tal manera que la falla es provocada por la

disgregación de los materiales dentro de la mezcla, debido a la pérdida del contacto del material asfáltico en el material pétreo.



Figura 4.13. Fallas en las vigas ensayadas a flexión.

5. CONCLUSIONES

Una vez recopilada y analizada la información obtenida en la revisión bibliográfica y durante la realización de los ensayos como se mencionan en la sección de “Resultados” se pueden obtener diferentes conclusiones tales como:

- El uso de materiales reciclados en la construcción no es una tendencia reciente, desde el siglo pasado se han utilizado diferentes materiales producto de deshecho que tenían como objetivo mejorar las características de las nuevas construcciones o aportar beneficios económicos. Sin embargo, en la actualidad, debido a los problemas de contaminación, escasez de recursos y calentamiento global, resulta indispensable adoptar técnicas de reciclado a todos los ámbitos posibles de la vida cotidiana y en mayor medida a la industria de la construcción, de tal manera en la cual la nueva infraestructura, aparte de estar diseñada de tal manera que cumpla con los requisitos más exigentes de resistencia y durabilidad, también sea más amigable con el medio ambiente.
- Los asfaltos recuperados son como una gran alternativa como materiales de construcción de concreto hidráulico, mismos que cuentan con grandes ventajas económicas y ambientales. Desde el punto de vista económico, el uso de RAP para la fabricación de concreto hidráulico en la construcción de pavimentos rígidos reduce el costo en la extracción y procesamiento de los agregados. Desde el enfoque ambiental, la utilización de RAP reduce el consumo de energía y emisión de gases de efecto invernadero durante la extracción de agregados de banco de material, además de que presenta la solución a los problemas generados por la disposición de desechos.
- La metodología utilizada para el diseño de concreto ACI 211 permite diseñar mezclas con asfalto recuperado sin mayores inconvenientes, sin embargo, podría desarrollarse una metodología especializada en este ámbito, que considere las particularidades del RAP, como lo son su granulometría, cantidad de asfalto adherido, porcentaje de absorción, etc., esto con el fin de obtener diseños de concreto más económicos, duraderos y resistentes

comparados con los diseñados actualmente incorporados con asfaltos recuperados.

- El material pétreo procedente del banco de materiales “La Cañada” es adecuado para ser utilizado en la fabricación de concreto hidráulico, ya que sus principales características como lo son su granulometría y porcentaje de finos es el adecuado según la normativa mexicana.
- El RAP utilizado en la elaboración de los diferentes especímenes que fueron ensayados en este estudio posee una granulometría discontinua, ya que la mayoría de sus partículas se encuentran entre los tamaños $\frac{3}{4}$ ” y $\frac{1}{4}$ ” de pulgada, y esto se debe a la metodología de extracción y trituración del mismo. Además, existe una mayor cantidad de asfalto en la porción de RAP que atraviesa la malla #4 con respecto a la porción que es retenida por la misma malla, denominadas respectivamente RAP fino y RAP grueso. Lo anterior se debe a la relación volumen-superficie de las partículas pétreas contenidas en los asfaltos recuperados, por lo que entre menor sea el tamaño de las partículas, estas estarán recubiertas con más asfalto en proporción a las partículas de mayor tamaño respecto a su volumen.
- Los especímenes de concreto hidráulicos fabricados en su totalidad con asfaltos reciclados poseen menor resistencia a la compresión comparado con la muestra de referencia (100% agregados vírgenes) y las demás mezclas con agregados combinados. Esto se debe a que la película de asfalto que cubre los agregados en el RAP, impide que exista una correcta unión entre el cemento y el agregado. Por lo tanto, existe una relación directa entre el aumento de la cantidad de RAP en la composición del cilindro y la disminución de resistencia a la compresión del mismo.
- La resistencia a la compresión obtenida por la mezcla 2 (26.56 MPa) la cual fue fabricada con RAP grueso y agregado fino virgen indica que se ha logrado cumplir con el valor de 25 MPa establecido en la hipótesis de esta investigación. Sin embargo, hasta el momento, es inviable utilizar mezclas de concreto hidráulico con asfaltos recuperados en la construcción de vialidades de altas especificaciones, se recomienda que dichas mezclas sean utilizadas

en infraestructura que requiera una menor resistencia a la compresión, tales como obras complementarias, obras de drenaje o caminos sometidos a cargas ligeras de tránsito.

- La disminución en la resistencia a la compresión de los diseños que contienen RAP está directamente ligado a cantidad de asfalto que recubre esas partículas, sin embargo, en el caso de la resistencia a la flexión resulta a la inversa, pues las mezclas con asfaltos recuperados en su composición, como lo es en este caso en específico la mezcla 3, presentan una mayor capacidad de resistir la flexión en comparación con la mezcla de diseño, carente de asfaltos recuperados. El aumento en la resistencia a la flexión de los diseños de mezclas que contienen RAP se debe a que la película de asfalto que recubre las partículas evita que las micro-grietas que se generan al flexionar las vigas se interconecten y generen grietas mayores que ocasionan la rotura del espécimen.
- El proceso de envejecimiento del RAP utilizado para la fabricación de las vigas de la mezcla 4E es el responsable de la disminución de la resistencia a la flexión con respecto al diseño 4. Este último fue fabricado de igual manera con 100% de RAP, pero sin aplicación de dicho envejecimiento. Al someter al RAP a altas temperaturas durante 24 horas, la película de asfalto que recubre sus partículas pierda masa y se oxida, por lo que se rigidiza y pierde parte de sus capacidades elásticas, por lo que no evita que las micro-fracturas producidas por la flexión del espécimen se interconecten y de esta manera se facilite la falla de la viga.

5.1 Líneas de investigación futura

- Establecer una nueva metodología de diseño de nuevas mezclas de concreto hidráulico adicionadas con asfaltos recuperados, en la cual se contemplen las características especiales de este material, como lo son su granulometría, cantidad de asfalto y porcentaje de absorción, con el objetivo de proveer de las mejores características posibles a los nuevos diseños.
- Mediante estudios de reología a la película de asfalto del RAP establecer un proceso adecuado de envejecimiento, en el cual se potencialice de mayor manera la resistencia a la compresión y que no resulte perjudicial para la capacidad del concreto a resistir la flexión.

6. REFERENCIAS

1. Ann K.Y., Moon H.Y., Kim Y.B., Ryou J., Durability of Recycled Aggregate Concrete using Pozzolanic Materials. (2008). *Waste Management*. 28(6), 993-999.
2. Arulrajah A., Piratheepan J., Disfani M. (2014). Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol 26. 349-357.
3. ASTM C702 / C702M – 11 (2011). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. *American Society for Testing and Materials*.
4. ASTM C136 / C136M – 14 (2014). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *American Society for Testing and Materials*.
5. Collins, R.J. and Ciesielski, S.K., (1994). Recycling and Use of Waste Materials and By-Products in Highway Construction, NCHRP Synthesis of Highway Practice. *Transportation Research Board*. 199. 92
6. Delwar, M., Fahmy, M., and Taha, R. (1997). Use of Reclaimed Asphalt Pavement as an Aggregate in Portland Cement Concrete, *ACI Materials Journal*. 94(3), 251-256.
7. Evangelista L., de Brito J. (2007). Mechanical Behaviour of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 29(5), 397-401.
8. Holtz, K., Eighmy, T., (2000). Scanning European advances in the use of recycled materials in highway construction. *Public Roads*. 64 (1), 34-40.
9. Hoppe E., Lane S., Fitch M. (2015). Feasibility of reclaimed asphalt pavement (RAP) use as road base and subbase material. *Innovation and Research*.
10. Hossiney N., Tia M., Bergin M. (2010). Concrete Containing RAP for Use in Concrete Pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 3(5).
11. Huang B., Shu X., Li G. (2005). Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. *Cement and Concrete Research*. 35.

12. Huang, B., Shu, X., and Burdette, E.G., (2006). Mechanical Properties of Concrete Containing Recycled Asphalt Pavement, *Magazine of Concrete Research*, 58(5), 313-320.
13. Li G., Zhao Y., Pang S.S., Huang W. (1998). Experimental Study of Cement-asphalt Emulsion Composite. *Cement and Concrete Research*. 28(5), 635-641.
14. Kou S.C., Poon C.S. (2008). Mechanical Properties of 5-years-old Concrete prepared with Recycled Aggregate Obtained from Three Different Sources. *Magazine of Concrete Research*. 60(1), 57-64.
15. Kou S.C., Poon C. S. (2009). Properties of Self-compacting Concrete Prepared with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregate. *Cement and Concrete Composites*. 31(9), 622-627.
16. Mayfield B., Leuli N. (1990). Properties of Palletized Blast Furnace Slag Concrete. *Concrete Research*. 42(15), 29-36.
17. M-MMP-1-01/03. (2003). Muestreo de materiales para terracerías. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Estados Unidos Mexicanos.
18. M-MMP-1-03/03. (2003). Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Estados Unidos Mexicanos.
19. M-MMP-1-04/03. (2003). Contenido de Agua. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Estados Unidos Mexicanos.
20. M-MMP-1-05/03. (2003). Densidades Relativas y Absorción. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Estados Unidos Mexicanos.
21. M-MMP-1-06/03. (2003). Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Estados Unidos Mexicanos.

- 22.M-MMP-1-08/03. (2003). Masas Volumétricas y Coeficientes de Variación Volumétrica. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Estados Unidos Mexicanos.
- 23.M-MMP-2-02-056/06. (2006). Revenimiento del Concreto Fresco. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Estados Unidos Mexicanos.
- 24.M-MMP-2-02-058/04. (2004). Resistencia a la Compresión Simple de Cilindros de Concreto. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Estados Unidos Mexicanos.
- 25.M-MMP-2-02-059/04. (2004). Resistencia a la Tensión de Cilindros de Concreto. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Estados Unidos Mexicanos.
- 26.Neme L., Reyes O. Camacho J. (2013) Comportamiento de mezclas asfálticas cerradas mediante la aplicación del ensayo Fénix. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. Volumen 23(2). 17-35.
- 27.Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, (2005). Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Estados Unidos Mexicanos.
- 28.Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, (2011). Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Estados Unidos Mexicanos.
- 29.N-CMT-2-02-001/02. (2002). Calidad del Cemento Portland. Características de los Materiales. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Estados Unidos Mexicanos.
- 30.N-CMT-2-02-005/04. (2004). Calidad del concreto hidráulico. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Estados Unidos Mexicanos.

31. N-CMT-2-02-002/02. (2002). Calidad de agregados pétreos para concreto hidráulico. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Estados Unidos Mexicanos.
32. N-CTR-CAR-1-04-009/06. (2006). Carpetas de concreto hidráulico. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Estados Unidos Mexicanos.
33. Okafor F. (2010). Performance of Recycled Asphalt Pavement as Coarse Aggregate in Concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 16. 47-58.
34. Okafor F.O., Palm Kernel Shell as a Lightweight Aggregate for Concrete. (1988). *Cement and Concrete Research*. 18(6). 901-910.
35. Patiño N., Reyes O., Camacho J. (2014) Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas colombianas con adición de pavimento reciclado al 100%. *Tecnura*. 19(43). 74-83.
36. Rahman A., Imteaz A., Arulrajah A., Piratheepan J., Disfani M. (2014). Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: Geotechnical and hydraulic characteristics, *Journal of Cleaner Production*. 42. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.11.042.
37. Ravindrarajah R., Loo Y.H., Tam C.T., (1987). Recycled Concrete as Fine and Coarse Aggregate in Concrete. *Concrete Research*. 39(141), 214-220.
38. Ryu J.S., (2002). An Experimental Study on the Effect of Recycled Aggregate on Concrete Properties. *Magazine of Concrete Research*. 54(1). 7-12.
39. Stimilli A., Virgili A., Canestrari F., Bahia H. (2016) Estimation of low-temperature performance of recycled asphalt mixtures through relaxation modulus analysis. *Cold regions science and technology*. 1.
40. Sultan S., Guo Z. (2017). Evaluating the performance of sustainable perpetual pavements using recycled asphalt pavement in China. *International Journal of Transportation Science and Technology*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.01.001>
41. Tam V.W.Y; Wang K., Tam C.M., (2007). Ways to Facilitate the use of Recycled Aggregate Concrete. *Proceedings of the ICE – Waste and Resource Management*. 160(3).125-129.

42. Tia, M., Wu, C.L., Ruth, B.E., Bloomquist, D., Choubane, B., (1989). Field Evaluation of Rigid Pavement Design System-Phase IV, U.F. Project No. 4910450424912, Department of Civil Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida, USA.
43. Tia, M., Bloomquist, D., Alungbe, G.D., Richardson, D., (1991). Coefficient of Thermal Expansion of Concrete Used in Florida, U.F. Project No. 4910450422912, Department of Civil Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida, USA.
44. Torres, H., Roesler, J., Rasmussen, R. O., Harrington, D. (2012). Guide to the Design of Concrete Overlays Using Existing Methodologies. Ames, Iowa: *National Concrete Pavement Technology Center*.
45. Torres, R., Flores, P., Flores, M., Flores, V., Mairon, K. (2014). Mezclas asfálticas con materiales reciclados de construcción y demolición para la reparación de pavimentos. *Ciencias Tecnológicas y Agrarias T-1*, 93-100.
46. Valdés G., Martínez A., Pérez F. (2008). Estudio de variabilidad en mezclas asfálticas en caliente fabricadas con altas tasas de material asfáltico reciclado (RAP). *Revista de la Construcción*. 7(1). 60-71.
47. Vargas X., Reyes F. (2010). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería e Investigación*. 30(3). 27-44.
48. Wainwright P.J., Boni S.K. (1983). Some properties of concrete containing sintered domestic refuse as a coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*. 35(123). 75-85.
49. Wang, Y. (2016). The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays. *Construction and Building Materials*. 1. 335-388.
50. Yan J., Leng Z., Li F., Zhu H., Bao S. (2017). Early-age strength and long-term performance of asphalt recycled mixes with various cement contents. *Construction and Building Materials*. 137. 153-159. DOI. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.114>
51. Zaumanis M., Mallick R., Frank R. (2016). 100% hot mix asphalt recycling: challenges and benefits. *Transportation Research Procedia*. 14. 3493-3502.

7. APÉNDICE

En esta sección se puede incluir toda la información que se obtuvo a través del trabajo experimental que no es necesario que se presente ya sea en el capítulo de metodología o en el de resultados, pero que al presentarse como apéndice puede ayudar a otros investigadores a realizar otro tipo de análisis o para aclarar dudas en cuanto a la realización de alguna parte del trabajo. Si se emplean cuadros, éstos seguirán el formato que se emplee en los capítulos de metodología o de resultados. Algunas veces cuando se trata de trabajos de tesis, en esta sección el investigador incluye algunos ejemplos de cómo realizó algunos cálculos y que le podrán ser de utilidad en el futuro como referencia.

Tabla 7.1. Datos generales del ensaye granulométrico del agregado pétreo virgen.

| SEPARACIÓN POR LA MALLA NO.4 | |
|---|---------|
| Masa total de la muestra (Wm)(gr): | 8948 |
| De la fracción retenida en la malla No.4 (Wm1=Wd1), (gr). | 7640 |
| De la fracción que pasa la malla No.4 (Wm2), (gr). | 1308.55 |
| Peso Total Wm, (gr). | 8948 |
| Peso Retenido en la malla No. 4 (Wm1=Wd1), (gr). | 539.91 |
| Peso del Material que pasa la malla No.4 (Wm2), (gr) | 8928.58 |

Tabla 7.2. Granulometría de gravas agregado pétreo virgen.

| mall | abertura(mm) | abertura norma (mm) | retenido seco(g) | ret(%) | ret acum (%) | pasa(%) |
|-----------------|--------------|---------------------|------------------|--------|--------------|---------|
| 2" | 50.7 | 50 | 0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 1 1/2" | 39.94 | 37.5 | 225.42 | 2.52 | 2.52 | 97.48 |
| 1" | 25.32 | 25 | 1946.97 | 21.81 | 24.33 | 75.67 |
| 3/4" | 19.32 | 19 | 1246.88 | 13.97 | 38.30 | 61.70 |
| 1/2" | 12.54 | 12.5 | 1773.89 | 19.87 | 58.16 | 41.84 |
| 3/8" | 10 | 9.5 | 729.41 | 8.17 | 66.33 | 33.67 |
| 1/4" | 6.42 | 6.3 | 1157.55 | 12.96 | 79.30 | 20.70 |
| #4 | 4.68 | 4.75 | 539.91 | 6.05 | 85.34 | 14.66 |
| Pasa Malla No.4 | | | 1308.55 | 14.66 | 100.00 | |

| | |
|--------------|----------------|
| Total | 8928.58 |
|--------------|----------------|

Tabla 7.3. Granulometría de arenas del agregado pétreo virgen.

| mallas | apertura norma (mm) | retenido seco(g) | ret(%) | ret acum (%) | pasa(%) |
|-----------|---------------------|------------------|--------|--------------|---------|
| #10 | 2 | 213.56 | 11.42 | 11.42 | 3.23 |
| #20 | 0.8 | 39.3 | 2.10 | 13.53 | 1.13 |
| #40 | 0.42 | 8.87 | 0.47 | 14.00 | 0.66 |
| #60 | 0.25 | 7.22 | 0.39 | 14.39 | 0.27 |
| #100 | 0.149 | 2.27 | 0.12 | 14.51 | 0.15 |
| #200 | 0.074 | 1.86 | 0.10 | 14.61 | 0.05 |
| pasa #200 | | 0.91 | 0.05 | 14.66 | 0.00 |
| | | 273.99 | | | |

Tabla 7.4. Testigo de humedad del agregado pétreo virgen.

| TESTIGO DE HUMEDAD DE LA FRACCIÓN QUE PASO LA MALLA NO.4° | |
|---|--------|
| Flanera No°: | X |
| Peso de la Flanera (gr), Wf: | 126.75 |
| Wmh+Wf (gr): | 229.17 |
| Wms + Wf (gr): | 228.07 |
| W(%) | 1.086 |
| Peso de la muestra representativa, Pasa malla N°4 (gr) | |

Tabla 7.5. Corrección por humedad del agregado pétreo virgen.

| CORECCIÓN POR HUMEDAD DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA NO.4° | |
|--|----------|
| $W_{d2} = \frac{W_{m2}}{1 + \omega}$ | = 1294.5 |
| Peso total Coregido (gr), Wd1+Wd2: | = 8934.5 |
| $W_{d3} = \frac{W_{m3}}{1 + \omega}$ | = 271.05 |



Tabla 7.6. Resumen granulométrico agregado pétreo virgen.

| | malla | abertura(mm) | abertura norma (mm) | pasa(%) |
|--------|--------|--------------|---------------------|---------|
| Gravas | 2" | 50.7 | 50 | 100.00 |
| | 1 1/2" | 39.94 | 37.5 | 97.48 |
| | 1" | 25.32 | 25 | 75.67 |
| | 3/4" | 19.32 | 19 | 61.70 |
| | 1/2" | 12.54 | 12.5 | 41.84 |
| | 3/8" | 10 | 9.5 | 33.67 |
| | 1/4" | 6.42 | 6.3 | 20.70 |
| | #4 | 4.68 | 4.75 | 14.66 |
| Arenas | #10 | 2 | 2 | 3.23 |
| | #20 | 0.85 | 0.85 | 1.13 |
| | #40 | 0.425 | 0.425 | 0.66 |
| | #60 | 0.25 | 0.25 | 0.27 |
| | #100 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| | #200 | 0.075 | 0.075 | 0.05 |

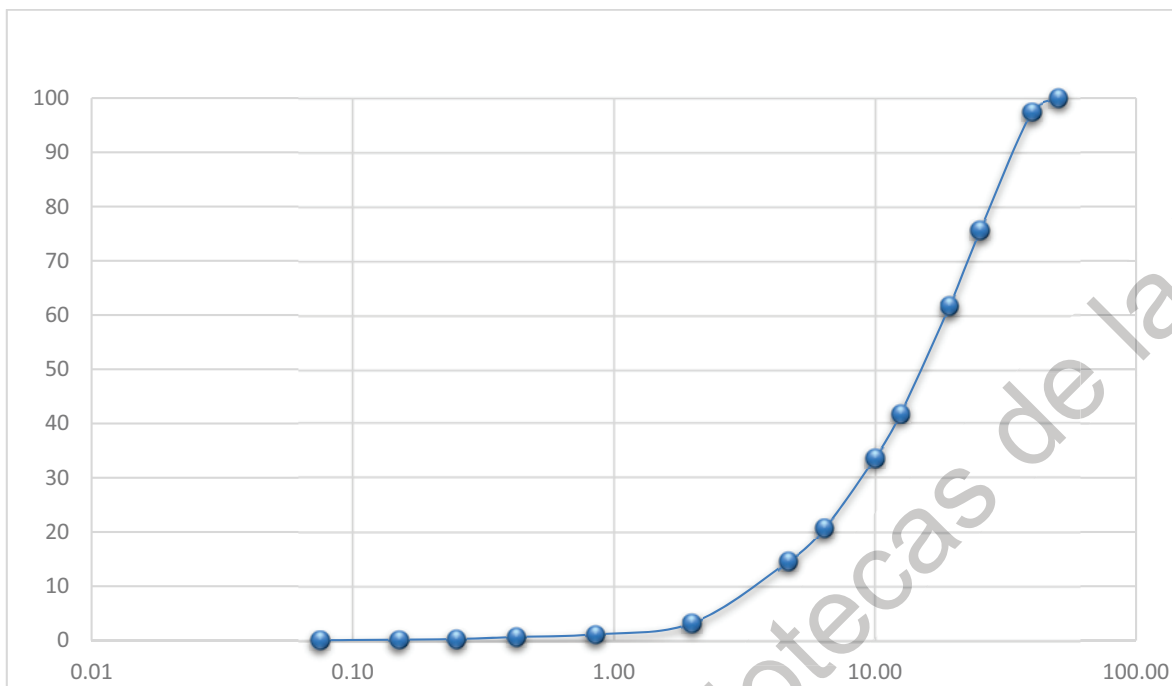


Figura 7.1. Curva granulométrica del material del banco "La Cañada"

Tabla 7.7. Datos generales granulometría RAP.

| SEPARACIÓN POR LA MALLA NO.4 | |
|---|----------|
| Masa total de la muestra (Wm): | 16370.00 |
| De la fracción retenida en la malla No.4 (Wm1=Wd1), (gr). | 11425.25 |
| De la fracción que pasa la malla No.4 (Wm2), (gr). | 4898.69 |
| Masa de la muestra para granulometría de arenas (Wm3), (gr) | 209.90 |
| Masa del material seco de la muestra (Wd), (gr) | 16174.47 |

Tabla 7.8. Granulometría de gravas RAP.

| Malla | Gravas | | | | | |
|--------|---------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| | Abertura (mm) | Abertura Norma (mm) | Masa Retenido seco (mm) | Porcentaje Retenido (%) | Porcentaje Retenido Acumulado (%) | Porcentaje que pasa (%) |
| 2" | 50.7 | 50 | 0 | 0.000 | 0.00 | 100.000 |
| 1 1/2" | 39.94 | 37.5 | 0 | 0.000 | 0.00 | 100.000 |

| | | | | | | |
|------------------------|-------|------|-----------------|--------|-------|--------|
| 1" | 25.32 | 25 | 225.8 | 1.396 | 1.40 | 98.604 |
| 3/4" | 19.32 | 19 | 383.84 | 2.373 | 3.77 | 96.231 |
| 1/2" | 12.54 | 12.5 | 1815.56 | 11.225 | 14.99 | 85.006 |
| 3/8" | 10 | 9.5 | 1978.3 | 12.231 | 27.23 | 72.775 |
| 1/4" | 6.42 | 6.3 | 4182.29 | 25.857 | 53.08 | 46.918 |
| #4 | 4.68 | 4.75 | 2839.46 | 17.555 | 70.64 | 29.362 |
| Pasa Malla No.4 | | | 358.69 | 2.218 | 72.86 | |
| Total | | | 11783.94 | | | |

Tabla 7.9. Granulometría de arenas RAP.

| Arenas | | | | | |
|-----------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Malla | Abertura Norma (mm) | Masa Retenido seco (mm) | Porcentaje Retenido (%) | Porcentaje Retenido Acumulado (%) | Porcentaje que pasa (%) |
| #10 | 2 | 93.49 | 13.49 | 13.49 | 15.873 |
| #20 | 0.8 | 28.33 | 4.09 | 17.58 | 11.785 |
| #40 | 0.42 | 48.87 | 7.05 | 24.63 | 4.733 |
| #60 | 0.25 | 13.02 | 1.88 | 26.51 | 2.855 |
| #100 | 0.149 | 3.25 | 0.47 | 26.98 | 2.386 |
| #200 | 0.074 | 1.03 | 0.15 | 27.13 | 2.237 |
| pasa #200 | | 0 | 0.00 | | |
| | | 187.99 | | | |

Tabla 7.10. Testigo de humedad del RAP.

| TESTIGO DE HUMEDAD DE LA FRACCIÓN QUE PASO LA MALLA NO.4° | |
|---|--------|
| Flanera No°: | X |
| Peso de la Flanera (gr), Wf: | 124.89 |
| Wmh+Wf (gr): | 225.83 |
| Wms + Wf (gr): | 222.75 |
| W(%) | 3.147 |
| Peso de la muestra representativa, Pasa malla N°4 (gr) | |

Tabla 7.11. Corrección por humedad RAP.

| CORECCIÓN POR HUMEDAD DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA NO.4° | | |
|--|---|---------|
| $W_{d2} = \frac{W_{m2}}{1 + \omega}$ | = | 4749.2 |
| Peso total Coregido (gr), Wd1+Wd2: | = | 16174.5 |
| $W_{d3} = \frac{W_{m3}}{1 + \omega}$ | = | 203.50 |

Tabla 7.12. Resumen granulométrico RAP.

| | mallas | abertura(mm) | abertura norma (mm) | pasa(%) |
|--------|--------|--------------|---------------------|---------|
| Gravas | 2" | 50.7 | 50 | 100.00 |
| | 1 1/2" | 39.94 | 37.5 | 100.00 |
| | 1" | 25.32 | 25 | 98.60 |
| | 3/4" | 19.32 | 19 | 96.23 |
| | 1/2" | 12.54 | 12.5 | 85.01 |
| | 3/8" | 10 | 9.5 | 72.77 |
| | 1/4" | 6.42 | 6.3 | 46.92 |
| Arenas | #4 | 4.68 | 4.75 | 29.36 |
| | #10 | 2 | 2 | 15.87 |
| | #20 | 0.85 | 0.85 | 11.78 |
| | #40 | 0.425 | 0.425 | 4.73 |
| | #60 | 0.25 | 0.25 | 2.85 |
| | #100 | 0.15 | 0.15 | 2.39 |
| | #200 | 0.075 | 0.075 | 2.24 |

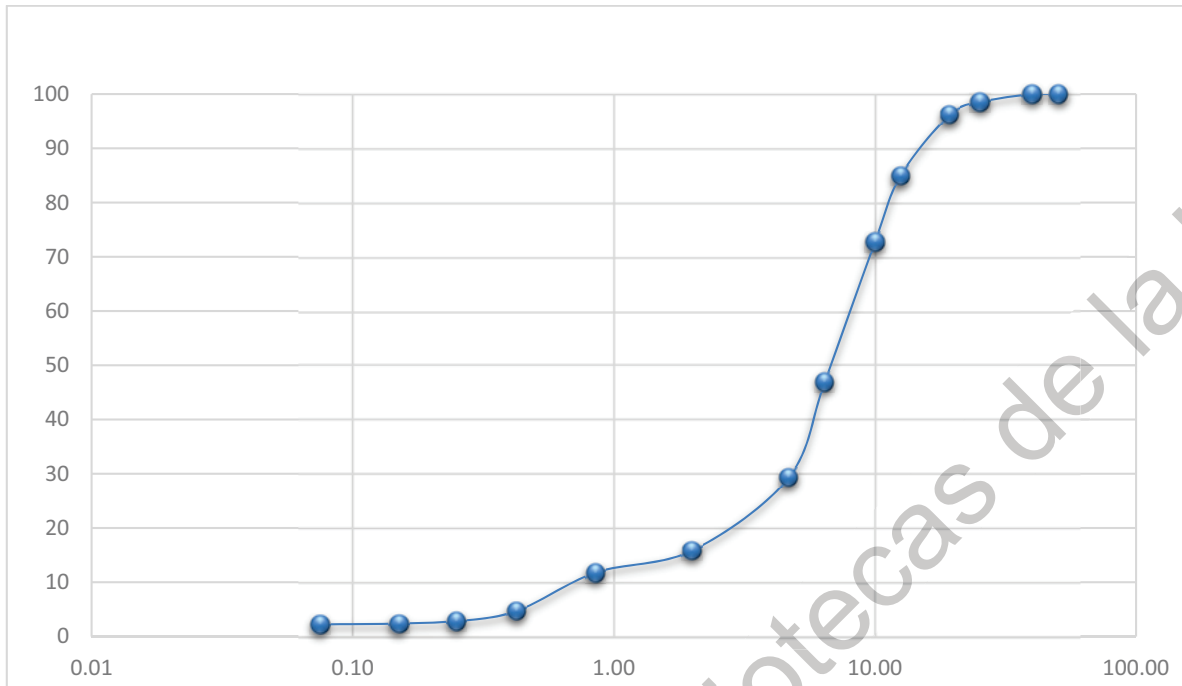


Figura 7.2. Curva granulométrica RAP.

Tabla 7.13. Resultados de los cilindros ensayados a compresión simple.

| Especímenes/Mezcla | | 1 | 2 | 3 | 4 | 4E | |
|-----------------------------------|---------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Resistencia a la compresión (Mpa) | 7 días | 1 | 18.8 | 18.611 | 11.763 | 10.963 | |
| | | 2 | 19.2 | 17.457 | 11.842 | 10.845 | |
| | | 3 | 18.9 | 17.943 | 11.082 | 10.273 | |
| | 14 días | 1 | 24.646 | 19.716 | 14.82 | 12.88 | 13.874 |
| | | 2 | 24.842 | 20.836 | 13.956 | 11.302 | 13.636 |
| | | 3 | 25.275 | 20.739 | 14.835 | 12.482 | 13.984 |
| | 28 días | 1 | 30.764 | 24.891 | 15.177 | 13.508 | 15.078 |
| | | 2 | 31.087 | 27.827 | 15.426 | 13.35 | 15.113 |
| | | 3 | 30.634 | 26.963 | 15.932 | 12.65 | 14.945 |

Tabla 7.14. Promedio de los resultados de compresión simple.

| Promedio | | | | | |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Días/Mezcla | 1 | 2 | 3 | 4 | 4E |
| 7 | 18.9666667 | 18.0036667 | 11.5623333 | 10.6936667 | |
| 14 | 24.921 | 20.4303333 | 14.537 | 12.2213333 | 13.8313333 |
| 28 | 30.8283333 | 26.5603333 | 15.5116667 | 13.1693333 | 15.0453333 |

Tabla 7.15. Desviación estándar de los resultados de compresión.

| Desviación Estándar | | | | | |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Días/Mezcla | 1 | 2 | 3 | 4 | 4E |
| 7 | 0.2081666 | 0.57938703 | 0.41785205 | 0.36905465 | |
| 14 | 0.32185556 | 0.62052908 | 0.50321665 | 0.82065908 | 0.17788011 |
| 28 | 0.23325165 | 1.50885033 | 0.38472111 | 0.45664136 | 0.08863596 |

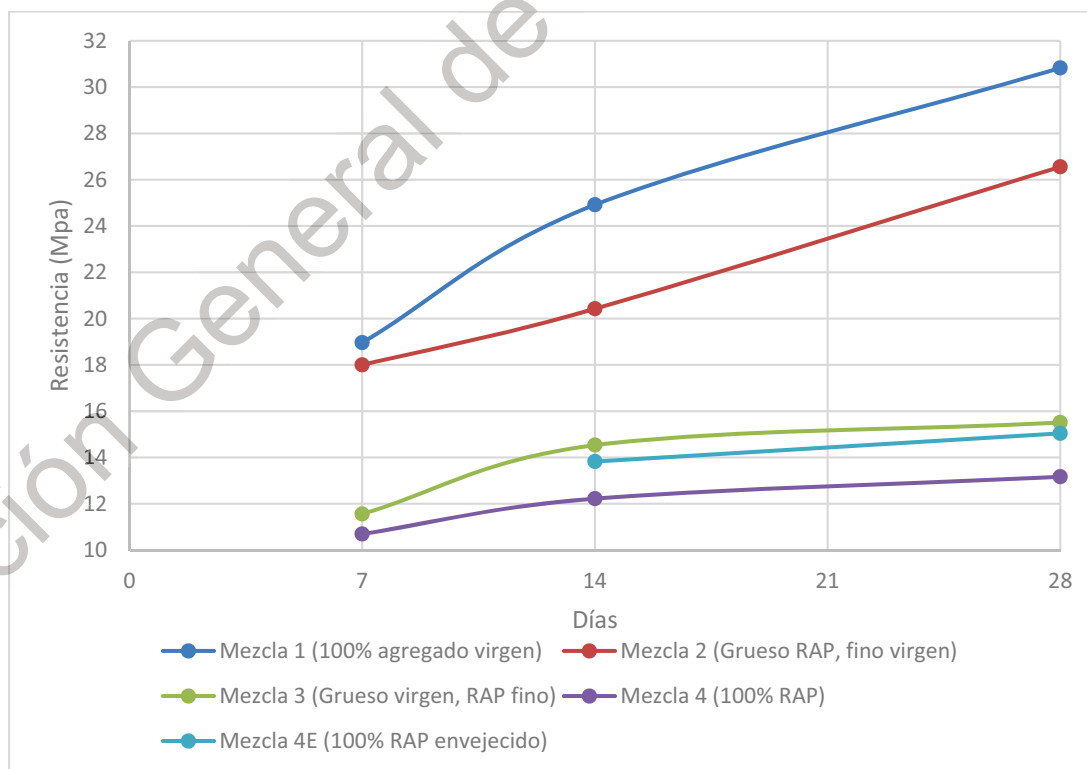


Figura 7.3. Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de concreto.

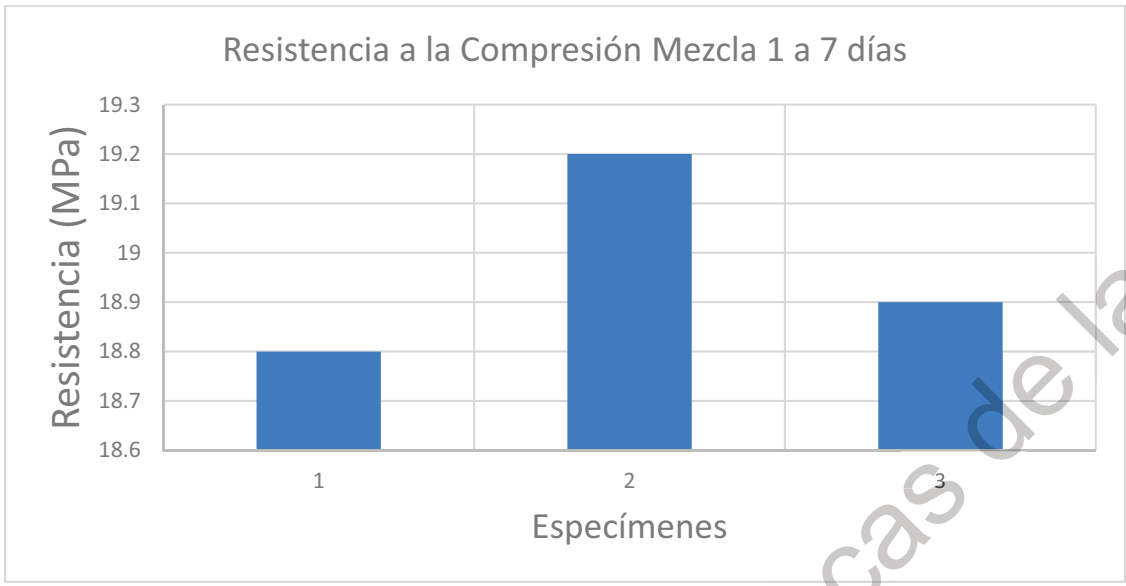


Figura 7.4. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 1 a 7 días.

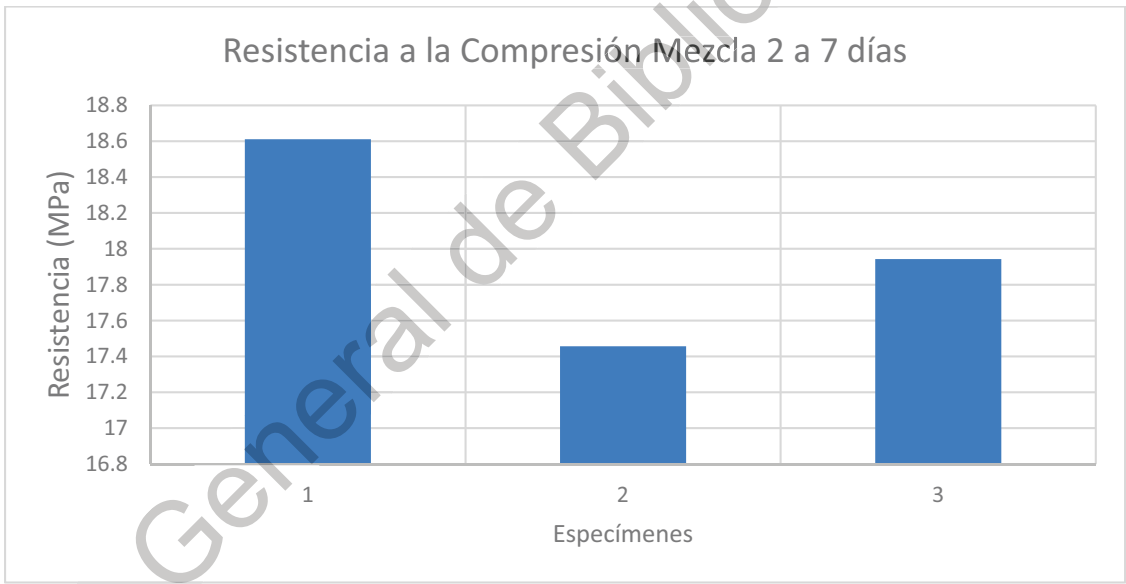


Figura 7.5. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 2 a 7 días.

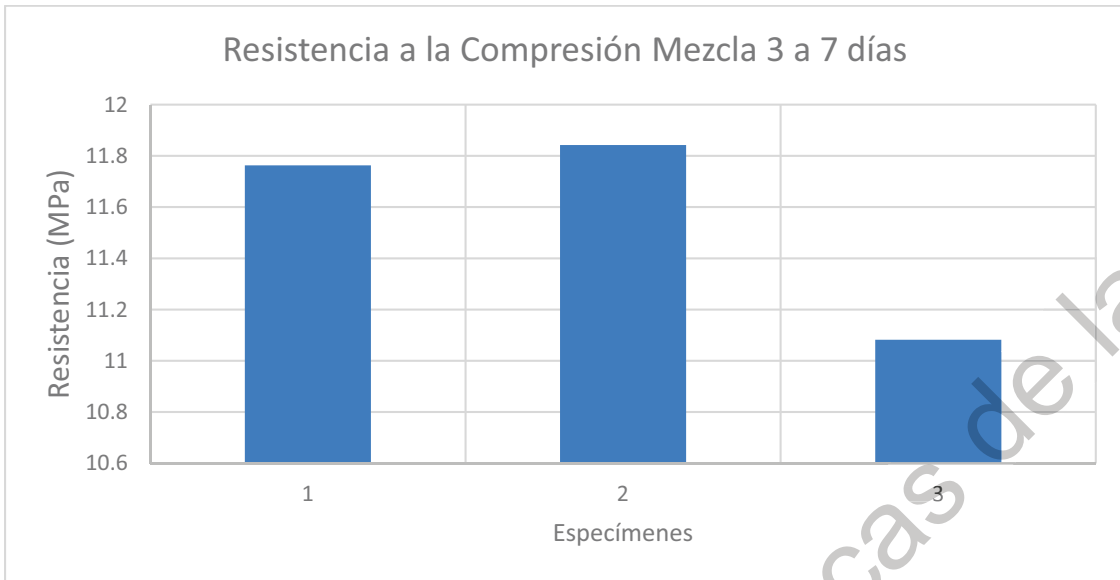


Figura 7.6. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 3 a 7 días.

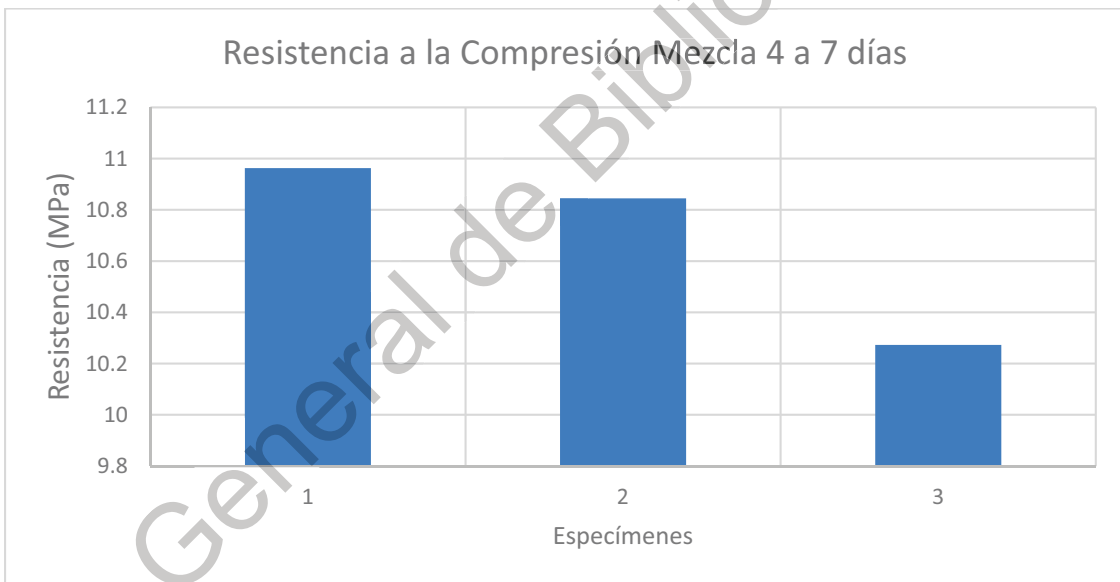


Figura 7.7. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 4 a 7 días.

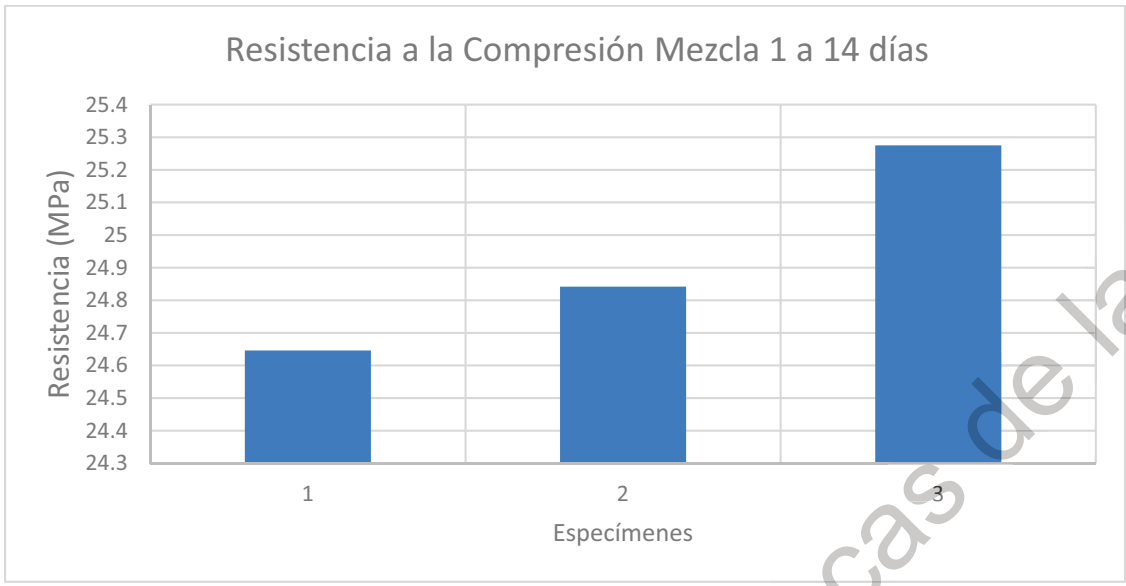


Figura 7.8. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 1 a 14 días.

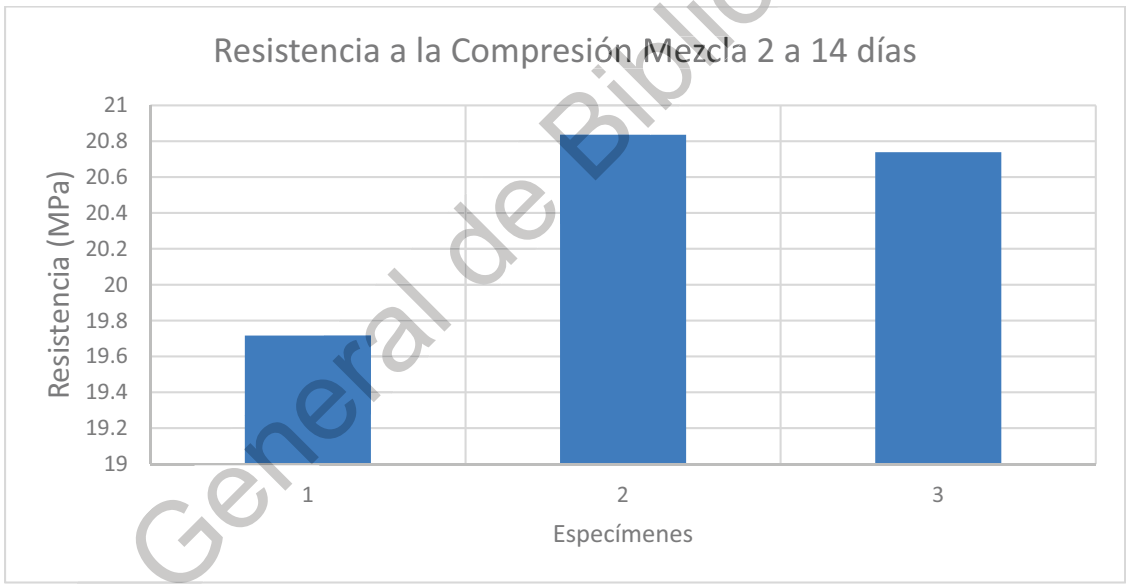


Figura 7.9. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 2 a 14 días.

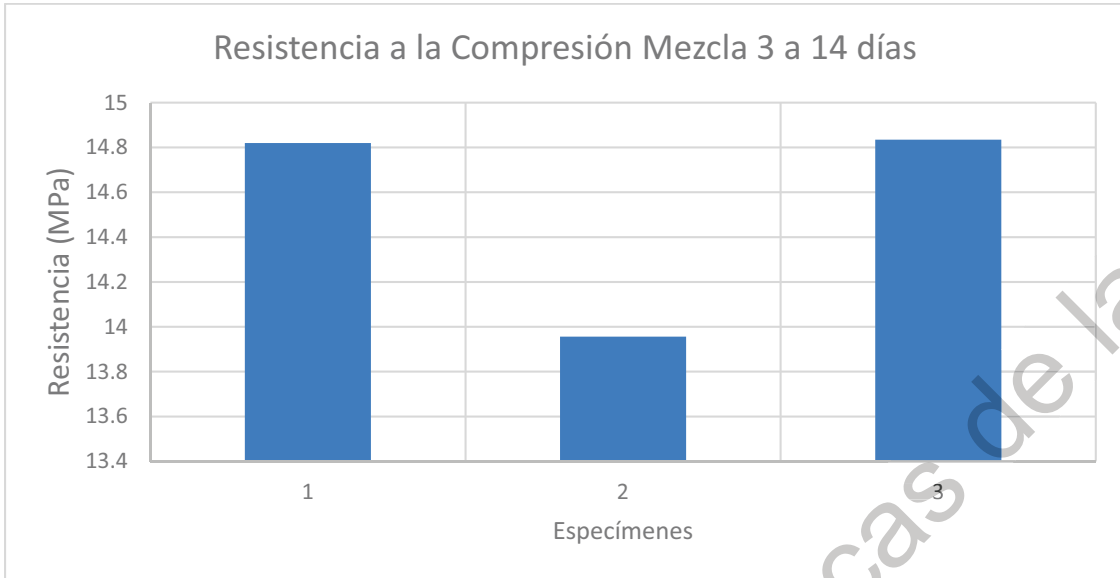


Figura 7.10. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 3 a 14 días.

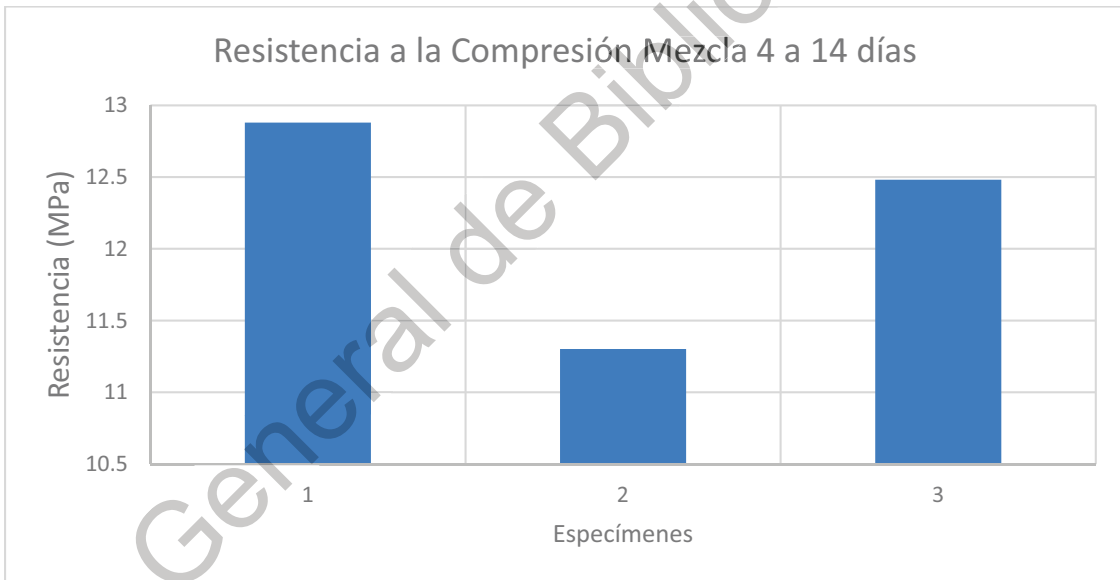


Figura 7.11. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 4 a 14 días.

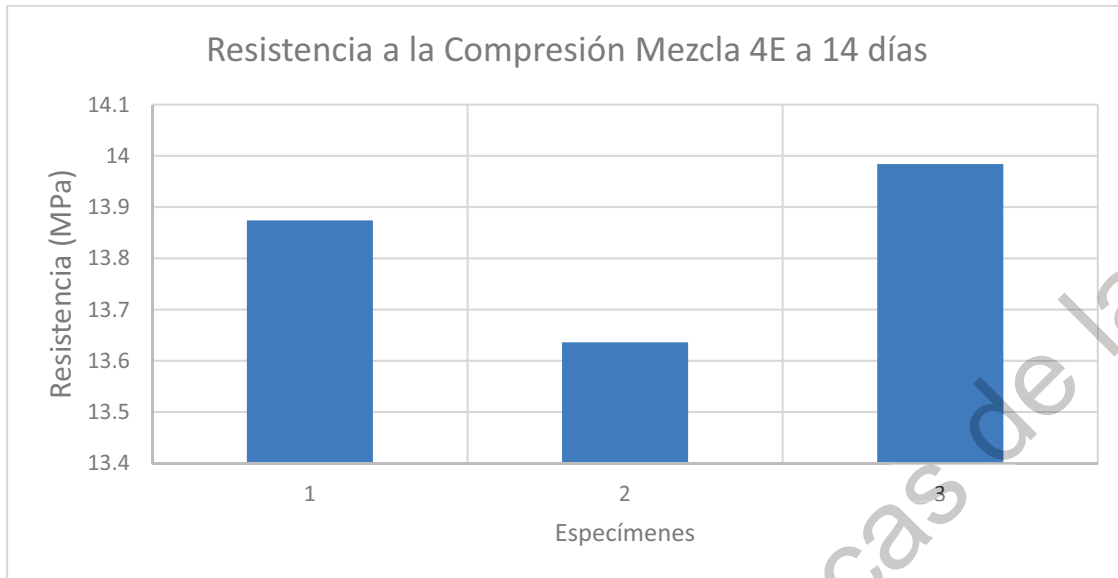


Figura 7.12. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 4E a 14 días.

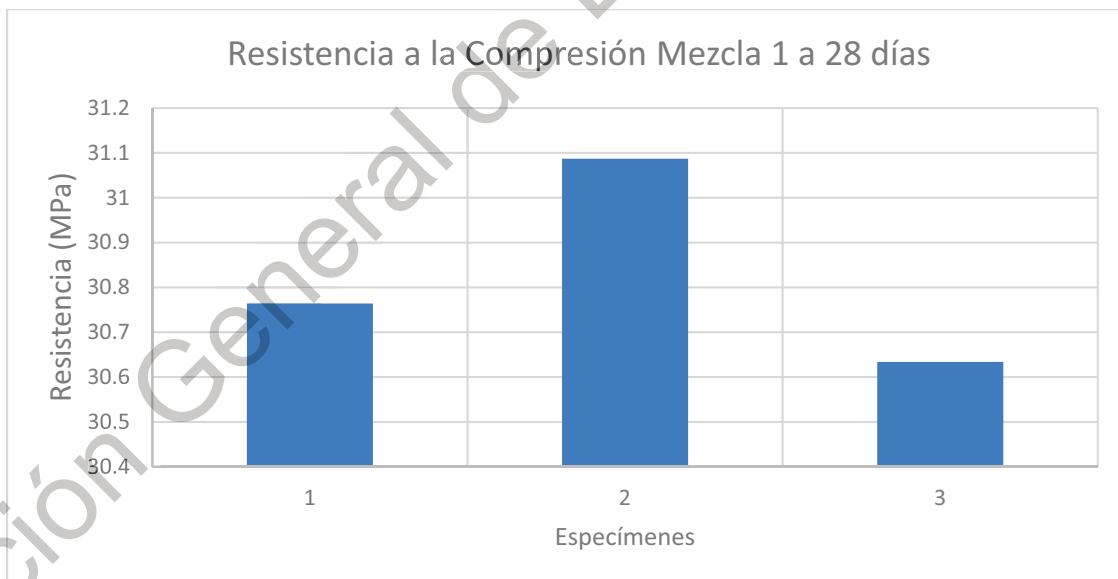


Figura 7.13. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 1 a 28 días.

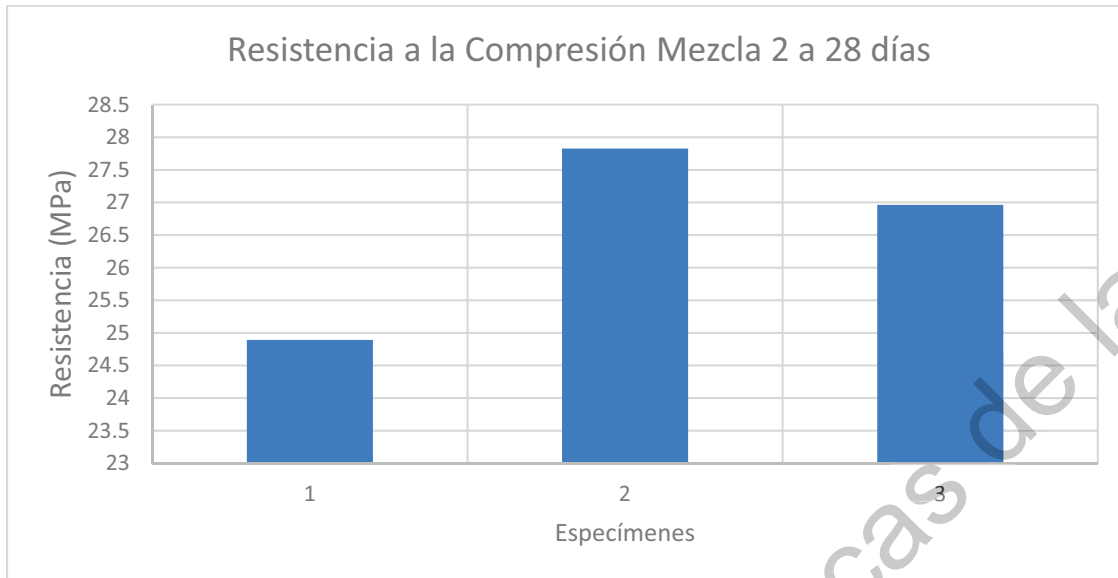


Figura 7.14. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 2 a 28 días.

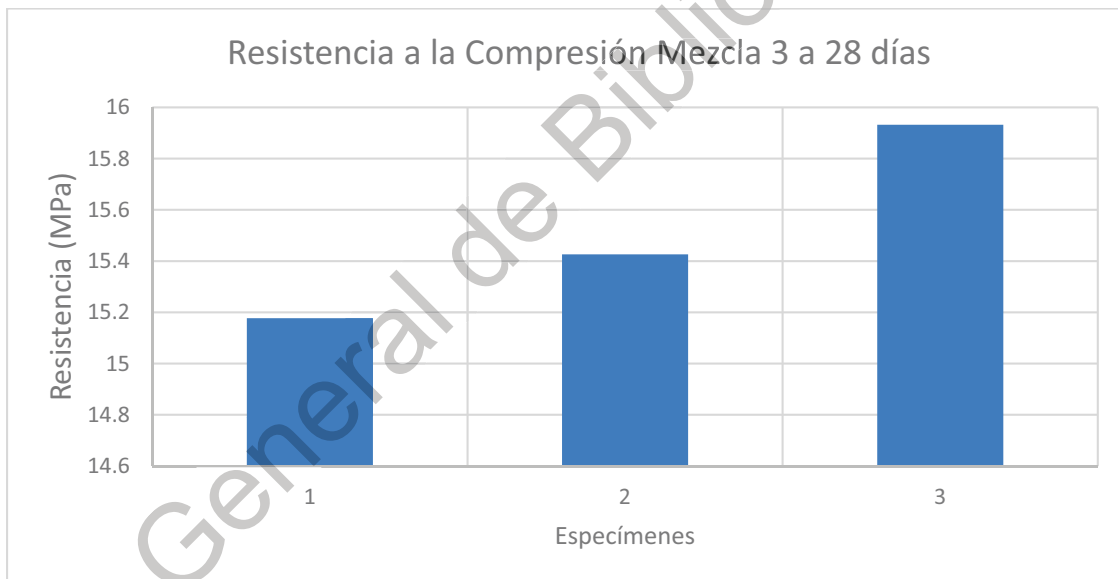


Figura 7.15. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 3 a 28 días.

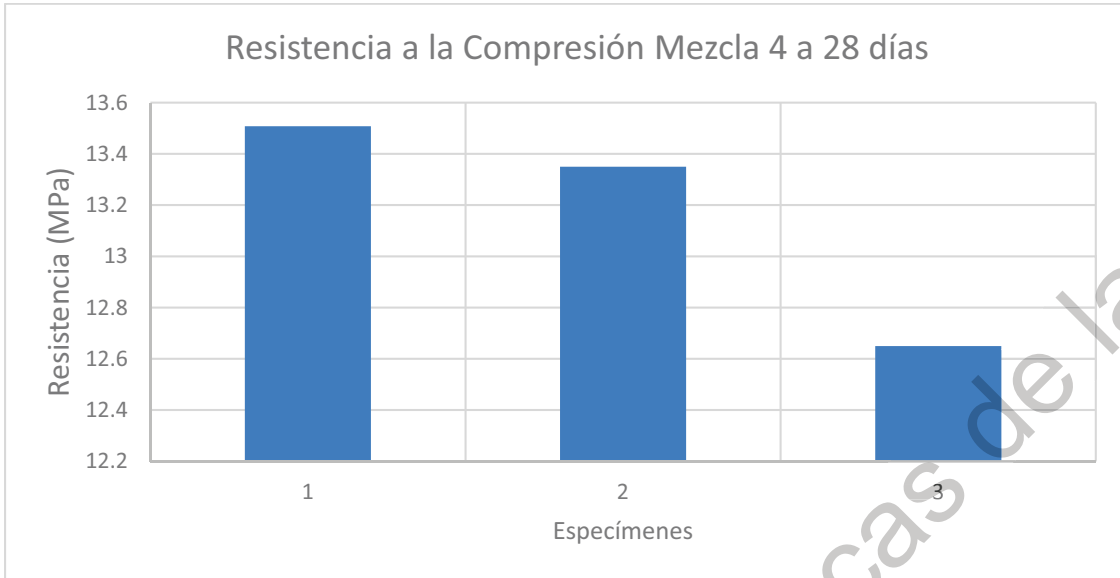


Figura 7.16. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 4 a 28 días.

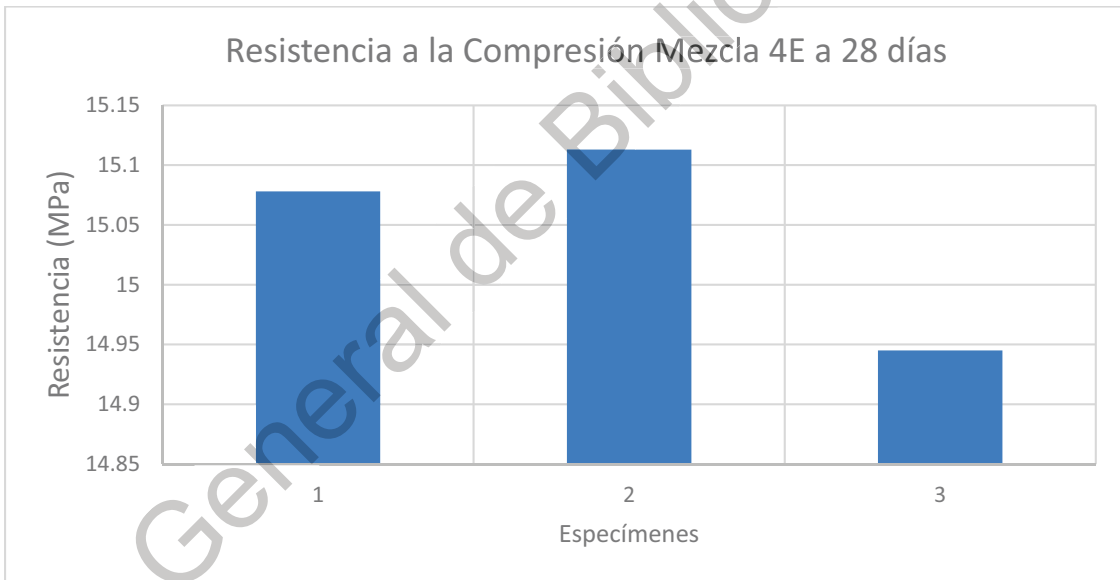


Figura 7.17. Resistencia a la compresión de los cilindros de la mezcla 4E a 28 días.

En este apéndice se presentarán algunas de las abreviaturas más comunes de revistas científicas

Tabla 7.16 Abreviatura de algunas revistas científicas

| | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Acta Agric. Scand. | Can. J. Anim. Sci. | Lipids |
| Acta Endocrinol. | Can. J. Res. Sect. D Zool. Sci | Livest. Prod. Sci. |
| Adv. Appl. Microbiol. | Cell | Meat Sci. |
| Adv. Carbohydr. Chem. Biochem. | Cereal Chem | Metabolism |
| Adv. Genet. | Clin. Toxicol. | Methods Enzymol |
| Adv. Lipid Res. | Comp. Biochem. Physiol. | Mol. Cell Endocrinol. |
| Adv. Protein Chem. | Domest. Anim. Endocrinol. | N. Engl. J. Med. |
| Agric. Eng. | Endocrinology | N.Z. J. Agric. Res. |
| Agron. J. | Eur. Assoc. Anim. Prod. Publ. | Nature (Lond) |
| Am. J. Anat. | Fed. Proc. | Nature (Paris) |
| Am. J. Clin. Nutr. | Feedstuffs. | Neth. J. Agric. Res. |
| Am. J. Clin. Pathol. | Fertil. Steril. | Neuroendocrinology |
| Am. J. Hum. Genet. | Feed Res. | Nutr. Abstr. Rev. |
| Am. J. Obstet. Gynecol. | Food Technol. | Nutr. Metab. |
| Am. J. Pathol. | Gastroenterology | Nutr. Rep. Int. |
| Am. J. Physiol | Genetics | Nutr. Res. |
| Am. J. Vet. Res. | Growth | Obstet. Gynecol. |
| Anal. Biochem. | Gut | Pharmacol. Rev. |
| Anal. Chem. | Horm. Behav. | Physiol. Rev. |
| Anim. Behav. | Immunology | Pig News Info |
| Anim. Breed. Abstr. | Infect. Immun. | Poult. Sci |
| Anim. Feed Sci. Technol. | Ir. J. Agric. Res. | Proc. N.Z. Grassl. Assoc. |
| Anim. Prod. | J. Agric. Food Chem. | Proc. Nutr. Soc. |
| Ann. Hum. Genet. | J. Agric. Sci | Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. |
| Annu. Rev. Biochem. | J. Am. Oil Chem. Soc. | Proc. Soc. Exp. Biol. Med. |
| Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol | J. Am. Vet. Med. Assoc. | Q.J. Exp. Physiol. |
| Annu. Rev. Physiol. | J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. | Recent Prog. Horm. Res. |
| Antibiot. Chemother. (Basel) | J. Anim. Sci. | Residue Rev. |
| Antibiot. Chemother. (Washington, DC) | J. Assoc. Off. Anal. Chem. | S. Afr. J. Anim. Sci. |
| Appl. Environ. Microbiol. | J. Br. Grassl. Soc. | Sci. Agric. |
| Appl. Microbiol. | J. Clin. Endocrinol & Metab. | Science (Washington, DC) |
| Arch. Biochem. Biophys. | J. Dairy Sci. | Steroids |
| Aust. J. Agric. Res. | J. Food Compos. Anal. | Theor. Appl Genet. |
| Aust. J. Biol. Sci. | J. Gen. Physiol. | Theriogenology |
| Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb. | J. Hered. | Toxicol. Appl. Pharmacol. |
| Biochem. J. | J. Nutr. | Trans. Am. Soc. Agric. Eng. |
| Biochemistry | J. Nutr. Biochem. | Vet. Rec. |
| Biochim. Biophys. Acta | J. Physiol (Lond.) | Vet. Res. Commun. |
| Biol. Reprod. | J. Physiol. (Paris) | Vitam. Horm |
| Biometrics | J. Range Manage. | World Anim. Rev. |
| Biometrika | J. Reprod. Fertil | Z. Tierz. Zuechtungsbiol. |
| Blood | J. Sci. Food. Agric. | Zentralbl. Veterinaermed. Reihe A |
| Br. J. Nutr. | Journ. Rech. Porcine Fr. | Veterinaermed. Reihe A |
| Br. Vet. J. | Lab. Anim. | |

Tabla 7.17 Abreviaturas de empleo comun en español

| | | | |
|--------|-----------------|-----------|-----------------------------|
| A | Amperio | etc. | etcétera |
| Å | Angström | EV | electronvoltio |
| a. C. | antes de Cristo | Estr. | estratigrafía |
| a.l. | años luz | F | faradio |
| Ac. | Acústica | °F | grado Fahrenheit |
| Aeron. | Aeronáutica | f.c.e.m. | fuerza contra-electromotriz |
| Agr. | Agricultura | f.e.m. | fuerza electromotriz |
| Álg. | Álgebra | Farmacol. | farmacología |

| | | | |
|-------------|-------------------------|-----------------|-----------------------|
| An.mat | análisis matemático | fig. | figura |
| Anat. | Anatomía | Fis. gral. | física general |
| Anat.comp. | Anatomía comparada | Fisiol. | fisiología |
| Antr. | antropología | Fisiol. an. | fisiología animal |
| Arit. | aritmética | Fisiol.gral. | fisiología general |
| Arm. | armamento | Fisiol. veg. | fisiología vegetal |
| Arq. | arquitectura | Fitosoc. | fitosociología |
| Art.gr. | artes gráficas | Fot. | fotografía |
| Art. y of. | artes y oficios | G | gramo |
| Astr. | astronomía | Genét. | genética |
| Astron. | astronáutica | Geod. | geodinámica |
| Atm. | atmósfera | Geof. | geofísica |
| Atom. | atomística | Geogr. | geografía |
| Biol. gral. | biología general | Geol.gral. | geología general |
| Bioq. | bioquímica | Geol.hist. | geología histórica |
| Bot.des. | botánica descriptiva | Geom. | geometría |
| Bot. sist. | botánica sistemática | Geoq. | geoquímica |
| Brom. | bromatología | GeV | gigaelectronvoltio |
| C | centígrado (s) | CHz | gigahertz |
| °C | grado centígrado | H | hora |
| c.a. | corriente alterna | Ha | hectárea |
| cal | caloría | Ha | hectárea (s) |
| Cal | kilocaloría | Hb | hemoglobina |
| c.d.g. | centro de gravedad | Histol.an. | histología animal |
| cg | centígramo | Histol.veg. | histología vegetal |
| Cin. | cinematografía | HP | caballo de fuerza |
| Cir. | cirugía | Hz | hertz |
| Citol. | citología | Ind. | industria |
| cl | centilitro | Ind. alim. | industria alimentaria |
| cm | centímetro | Ing. gral. | ingeniería general |
| Const. | construcción | J | joule (s) |
| Crist. | cristalografía | °K | grado Kelvin |
| d. C. | después de Cristo | Kcal | kilocaloría |
| d.d.p. | Diferencia de potencial | KeV | kiloelectronvoltio |
| Diag. | Diagnóstico | kg. | kilogramo |
| Dib. | Dibujo | KHz | kilohertz |
| E. | Este | Km | kilómetro |
| Ecol. | Ecología | km ² | kilómetro cuadrado |
| Edaf. | Edafología | km ³ | kilómetro cúbico |
| Electrón. | Electrónica | Kp | kilopondio |
| Electrot. | Electrotecnia | Kpm | kilopondímetro |
| Embriol. | Embriología | Kw | kilowatio |
| Entom. | entomología | Kwh | kilowatio hora |
| Est. | estadística | L | litro |
| lat. | latitud | Pat. | patología |
| Ln | logaritmo neperiano | Pat. veg. | patología vegetal |
| log | logaritmo base 10 | Petr. | petrografía |

| | | | |
|------------------|----------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| log _a | logaritmo base a | Petroq. | petroquímica |
| mw | miliwatio | Ppm | partes por millón |
| Mw | megawatio | Protoz. | protozoología |
| mμ | Milimicra | Psic. | psicología |
| N. | Norte | Psiq. | psiquiatría |
| n.a. | Número atómico | Qm | quintal métrico |
| NE. | Nordeste | Quím.an. | química analítica |
| ng | nanogramo (s) | Quím.apl. | química aplicada |
| m | metro | Quím.fís. | química física |
| m ² | metro cuadrado | Quím.gral. | química general |
| m ³ | metro cúbico | Quím.inorg. | química inorgánica |
| MA | megaamperio | Quím.org. | química orgánica |
| Mar. | marina | r.p.m. | revoluciones por minuto |
| Mastoz. | mastozoología | r.p.s. | revoluciones por segundo |
| mb | milibar | S. | Sur |
| Mcal | megacaloría (s) | SE. | Sudeste |
| Mec. | mecánica | Seg | segundo |
| Mec.apl. | mecánica aplicada | SO. | Sudoeste |
| Met. | metalurgia | Tecnol. | tecnología |
| Meteor. | meteorología | Tect. | tectónica |
| Metrol. | metrología | Terap. | terapéutica |
| MeV | megaelectrovoltio | Termol. | termología |
| mg | miligramo | Tm | tonelada métrica |
| MHz | megahertz | TND | total de nutrientes digestibles |
| Microb. | microbiología | Top. | topografía y geodesia |
| min. | minuto | Torr | torricelli (mmHg) |
| Min. | minería | Trig. | trigonometría |
| MJ | megajoule (s) | UI | unidades internacionales |
| ml | mililitro (s) | V | voltio |
| mm | milímetro | Vet. | veterinaria |
| Morf.veg. | morfología vegetal | vol. | volumen |
| msnm | metros sobre el nivel del mar | Vs | versus |
| mV | milivoltio | W | watio |
| MV | megavoltio | Zool.gral. | zoología general |
| n.m. | número de masa | μ | micra |
| NO. | Noroeste | μg | microgramo (s) |
| Un | nanomicra | μm | micrómetro (s) (micras(s)) |
| O. | Oeste | μl | microlitro (s) |
| Ocean. | oceanografía | Ω | ohmio |
| Ópt. | óptica | o' " , , | grados, minutos y segundos de arco |
| p | página | % | tanto por ciento |
| pp | páginas | ‰ | tanto por mil |
| p.a. | peso atómico | → | véase |
| p.e. | peso específico | | |

| | |
|----------|---------------------|
| p.eb. | punto de ebullición |
| p. ej. | por ejemplo |
| p.f. | punto de fusión |
| p.mol. | peso molecular |
| Paleont. | paleontología |
| Parasit. | parasitología |

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ