



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente con
valvas de concha de abanico**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Stephanie Elvira Santamaría Chipana

**Asesor(es):
Mgtr. Ing. Gaby Patricia Ruiz Petrozzi**

Piura, junio de 2020





*A Dios,
A mis padres: Iris y Gilberto,
A mis hermanos: Hans, Cinthya y David*



Prefacio

Perú es un país exportador de concha de abanico y una de sus principales ciudades que produce este producto hidrobiológico es Sechura (Piura). Actualmente las exigencias de los países de la Unión Europea (UE) han incrementado sus exigencias en cuanto a la contaminación de esta actividad económica, por lo que las empresas desvalvadoras han debido incrementar sus controles en cuanto a las prácticas de higiene y disposición de residuos acorde con las buenas prácticas ambientales.

En los últimos años se ha venido explorando nuevas alternativas de reuso de las valvas de concha de abanico. En general, las investigaciones que desarrollan su inclusión en materiales de construcción coinciden en utilizar la valva como agregado pétreo en tamaños relativamente pequeños, reemplazando la arena (Farfán, 2014; Saavedra, 2016; Varhen et al., 2017; Castañeda, 2017; Quezada, 2017, Morante, 2017). Con el afán de continuar con la línea de investigación del uso de la valva de la concha de abanico, la presente tesis busca añadir valor a estos residuos, enfocando el estudio en la evaluación del desempeño y durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente con reemplazos de valva triturada como agregado fino, asegurando que los resultados positivos de su uso sean a largo plazo.

Para finalizar, agradezco a Mgtr. Gaby Ruiz Petrozzi por su asesoría y preocupación constante durante el desarrollo de la tesis. A cada uno de los integrantes del proyecto “Factibilidad ambiental del uso de la valva de concha de abanico triturada como agregado en mezclas asfálticas”; a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura que financió el proyecto a través del concurso Ingenium y al personal técnico del laboratorio de suelos de la misma institución por su apoyo constante, permitiendo llevar a cabo esta investigación.



Resumen Analítico-Informativo

Durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente con valvas de concha de abanico

Stephanie Elvira Santamaría Chipana

Asesor: Mgtr. Ing. Gaby Patricia Ruiz Petrozzi

Tesis

Título de Ingeniero Civil

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, Junio de 2020

Palabras claves: MAC, RCA, deformación permanente, daño a la humedad, desempeño

Introducción: Debido a que los residuos de valva de concha de abanico generan problemas ambientales y contaminantes en nuestra región, se explora su uso como reemplazo de agregado fino en mezclas asfálticas en caliente. El presente trabajo evalúa el comportamiento de durabilidad a corto y mediano plazo de estas mezclas como susceptibilidad al agua y la deformación plástica.

Metodología: Se prepararon tres mezclas asfálticas con tres niveles de remplazo total de arena por el residuo de valva de concha de abanico (RCA), además de una mezcla de control sin RCA. Los remplazos de agregado fino se hicieron en tres rangos de tamaños de partículas: entre 1.2 mm a 0.3 mm; entre 0.3 mm a 0.15 mm y entre 0.15 mm a 0.075 mm. La durabilidad se evaluó mediante dos propiedades: la susceptibilidad frente al agua con la prueba de Lottman modificada (AASHTO T 283) y la deformación plástica con el ensayo de creep estático.

Resultados: Los resultados indican que las mezclas asfálticas con valvas son menos susceptibles al agua en comparación con las mezclas sin RCA debido fundamentalmente a la buena adhesión con el ligante. Además, tienen una mayor recuperación plástica y menor ahuellamiento frente a cargas estáticas que las mezclas sin RCA, debido a la geometría de la partícula de RCA.

Conclusiones: Se concluye que la incorporación del RCA en las mezclas asfálticas en caliente contribuye a mejorar su comportamiento de durabilidad a corto y mediano plazo. Sin embargo, es necesario continuar evaluando el comportamiento de estas mezclas frente a cargas dinámicas.

Fecha de elaboración del resumen: 12 de Junio de 2020

Analytical-Informative Summary

Durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente con valvas de concha de abanico

Stephanie Elvira Santamaría Chipana

Asesor: Mgtr. Ing. Gaby Patricia Ruiz Petrozzi

Tesis

Título de Ingeniero Civil

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, Junio de 2020

Keywords: HMA, PSS, permanent strain, moisture damage, performance

Introduction: Because the waste of Peruvian Scallop Seashell (RCA) generates environmental and pollution problems in our region, was explored as a replacement of fine aggregate in hot mix asphalt. The present work evaluates the behavior of short- and medium-term durability of these mixtures as susceptibility to water and plastic deformation.

Methodology: Were prepared three asphalt mixtures with three levels of total sand replacement by the waste of RCA, also a mix of control without RCA. Fine aggregate replacements were made in three ranges of particle sizes between 1.2 mm to 0.3 mm; between 0.3 mm to 0.15 mm and between 0.15 mm to 0.075 mm. The durability was evaluated by two properties: susceptibility to water with the modified Lottman test (AASHTO T 283) and plastic deformation with the static creep test.

Results: The results indicate that asphalt mixes with scallop seashell are less susceptible to water compared to mixtures without RCA due fundamentally to good adhesion with the binder. Moreover, they have a greater plastic recovery and less rutting against static loads than mixtures without RCA due to the geometry of the particles.

Conclusions: It concludes that the incorporation of the RCA in hot mixes asphalt contributes to improve its durability behavior in the short and medium term. However, it is necessary to continue evaluating the behavior of these mixtures against dynamic loads.

Summary date: June 12 th, 2020

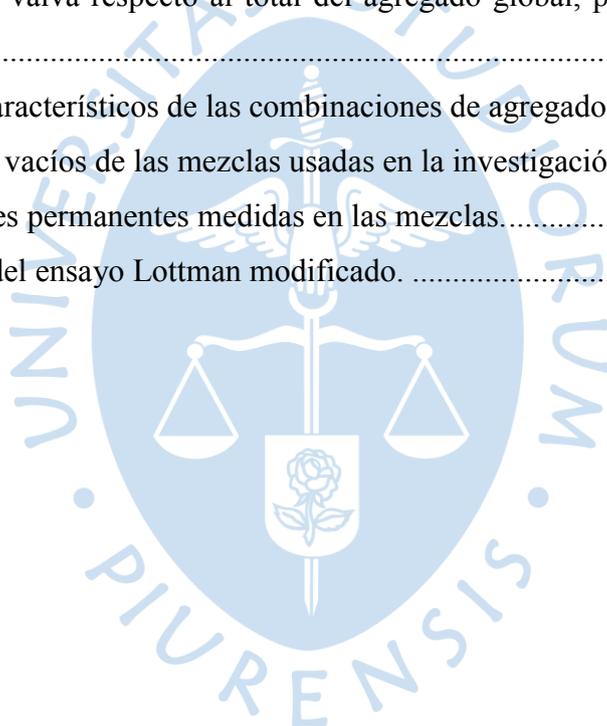
Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 1 |
| Capítulo 1..... | 5 |
| Durabilidad de las mezclas asfálticas | 5 |
| 1.1 Deformación permanente | 6 |
| 1.1.1 Factores del agregado que influyen en la deformación permanente..... | 9 |
| 1.1.1.1 Factores geométricos..... | 9 |
| 1.1.1.2. Factores volumétricos | 11 |
| 1.2. Daño por humedad..... | 13 |
| 1.2.1. Teorías de adhesión árido-ligante..... | 15 |
| 1.2.1.1. Reacción química..... | 16 |
| 1.2.1.2. Energía superficial..... | 16 |
| 1.2.1.3 Adhesión mecánica..... | 17 |
| 1.2.2 Factores del agregado que influyen al daño por humedad..... | 17 |
| 1.2.2.1 Textura superficial..... | 17 |
| 1.2.2.2 Mineralogía..... | 17 |
| 1.2.2.3 Limpieza superficial..... | 18 |
| 1.2.2.4. Factores volumétricos..... | 18 |
| 1.3. Uso de la valva de moluscos en mezclas asfálticas..... | 19 |
| Capítulo 2..... | 21 |
| Metodología..... | 21 |
| 2.1 Ensayos para la caracterización de los agregados..... | 21 |
| 2.1.1 Granulometría por tamizado | 21 |

| | |
|---|-----------|
| 2.1.2 Angularidad | 21 |
| 2.1.3 Gravedad específica y absorción | 22 |
| 2.1.4 Abrasión de Los Ángeles | 23 |
| 2.1.5 Caras fracturadas | 23 |
| 2.1.6 Partículas chatas y alargadas | 23 |
| 2.1.7 Equivalente de arena | 23 |
| 2.1.8 Adherencia Riedel Weber | 23 |
| 2.2 Diseño de las mezclas agregado-valva y de las mezclas asfálticas | 24 |
| 2.3 Evaluación de la deformación permanente | 26 |
| 2.4 Evaluación de la susceptibilidad a la humedad | 27 |
| Capítulo 3 | 31 |
| Resultados de la caracterización de materiales | 31 |
| 3.1. Agregados naturales | 31 |
| 3.2 Valva de la concha de abanico triturada | 37 |
| 3.3. Ligante asfáltico | 40 |
| 3.4. Agregado fino de las combinaciones agregado-valva | 40 |
| 3.5 Mezclas asfálticas | 44 |
| Capítulo 4 | 47 |
| Resultados de los ensayos de desempeño | 47 |
| 4.1. Deformación permanente | 47 |
| 4.2. Resistencia frente a la humedad | 51 |
| 4.3. Resultados de flujo Marshall vs deformación permanente | 56 |
| Conclusiones y recomendaciones | 59 |
| Referencias bibliográficas | 61 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Combinación de agregados naturales usado en las mezclas asfálticas de gradación. | 34 |
| Tabla 2. Caracterización de los agregados naturales usados para las mezclas en caliente | 36 |
| Tabla 3. Composición química de la valva de concha de abanico triturada [CAT]..... | 38 |
| Tabla 4. Características de la valva triturada para mezclas asfálticas..... | 39 |
| Tabla 5. Propiedades características del asfalto para pavimentación producido por | 40 |
| Tabla 6 Porcentaje de valva respecto al total del agregado global, para cada tipo de mezcla evaluada..... | 43 |
| Tabla 7. Parámetros característicos de las combinaciones de agregado fino..... | 43 |
| Tabla 8. Porcentaje de vacíos de las mezclas usadas en la investigación | 44 |
| Tabla 9. Deformaciones permanentes medidas en las mezclas..... | 48 |
| Tabla 10. Resultados del ensayo Lottman modificado. | 51 |





Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Modelo reológico del comportamiento de materiales viscoelásticos | 7 |
| Figura 2. Comportamiento típico de deformación permanente de carga repetida de materiales de pavimento. | 7 |
| Figura 3. Densidad vs contenido de vacíos de las mezclas asfálticas en caliente..... | 8 |
| Figura 4. Geometría del agregado: forma, angularidad y textura | 10 |
| Figura 5. Mecanismo de daño por humedad | 14 |
| Figura 6. Esquema de la pérdida de la unión de árido-ligante debido a la presencia de agua . | 14 |
| Figura 7. Funcionamiento del mecanismo de adhesividad | 15 |
| Figura 8. Ensayo de angularidad, en equipo | 22 |
| Figura 9. Tamaños usados para el reemplazo de la arena por valva triturada en la elaboración de las mezclas asfálticas de estudio..... | 25 |
| Figura 10. Proceso de elaboración de mezclas de asfalto | 25 |
| Figura 11. Ensayo Creep realizado en LEMC. a) Mordazas que permiten ejecución de carga a compresión uniaxial y b) Probeta colocada para ejecutar cargas en cámara bajo 40°C..... | 27 |
| Figura 12. Prueba de tracción indirecta utilizada para muestras secas y acondicionadas AASHTO T283. | 28 |
| Figura 13. Probetas sometidas al ensayo de Lottman modificado. a) Saturación al vacío; b) Congelación; c) Baño maría a 60° y d) Baño maría a 25°. | 29 |
| Figura 14. Espécimen en la máquina de prueba en el laboratorio en condiciones secas | 29 |
| Figura 15. Ubicación geográfica de la cantera Sojo para agregado grueso. | 31 |
| Figura 16. Agregado grueso de la cantera Sojo. | 32 |
| Figura 17. Ubicación geográfica de la cantera Cerro Mocho, de donde se procede la arena gruesa. | 33 |
| Figura 18. Agregado fino proveniente de la Cantera Cerro Mocho, usado | 34 |
| Figura 19. Curva granulométrica de la combinación de agregados. | 35 |

| | |
|--|----|
| Figura 20. Ubicación de los botaderos 1 y 2, Fábrica “Productos del Norte” y playa Chulliyachi - Sechura..... | 37 |
| Figura 21. Concha de abanico a) estado natural y b) triturada..... | 38 |
| Figura 22. Partículas de concha triturada en los tamaños usados. a) 2.38 mm – 1.20 mm; b) 1.20 mm – 0.60 mm; c) 0.60 mm – 0.30 mm; d) 0.30 mm – 0.15; e) 0.15 mm – 0.075 mm .. | 40 |
| Figura 23. Agregados que pasan el tamiz N°8 y se retienen en el tamiz N° 16: a) agregado natural y b) valva triturada | 41 |
| Figura 24. Agregados que pasan el tamiz N° 16 y retienen en el N° 30 : a) agregado natural y b) valva triturada | 41 |
| Figura 25. Agregados que pasan tamiz N° 50 y retienen N° 100: a agregado natural y b valva triturada | 42 |
| Figura 26 Agregados que pasan tamiz N° 30 y retienen N° 50 : a agregado natural y b valva triturada | 42 |
| Figura 27. Agregados que pasan el tamiz N° 100 y retienen en el N° 200: a) agregado natural y b) valva triturada. | 42 |
| Figura 28. Ensayo PUC de cada una de las combinaciones: a combinación A1, b combinación A2 y c combinación A3..... | 44 |
| Figura 29 Variación de la deformación permanente unitaria con el tiempo para las mezclas evaluadas..... | 47 |
| Figura 30. Variación de la deformación permanente con respecto a la angularidad del agregado | 49 |
| Figura 31. Recuperación de las mezclas evaluadas sometidas a carga estática. | 50 |
| Figura 32. Resistencia a la tracción de las muestras secas (resistencia seca) y acondicionadas (resistencia húmeda)..... | 52 |
| Figura 33. Porcentaje de relación a la resistencia a la tracción (TSR) por mezcla | 53 |
| Figura 34. Porcentaje de remplazo de RCA versus %TSR..... | 55 |
| Figura 35. Ruptura ITS mezcla M2 a) condiciones secas b) condiciones saturadas..... | 56 |
| Figura 36. Relación entre la deformación por creep estático a 600 s y 10 000 s..... | 57 |

Introducción

Las mezclas de asfalto en caliente son materiales complejos, compuestos de agregados minerales y aglutinante de asfalto. Alrededor del 95% en peso de la mezcla lo constituyen los agregados. Tanto las propiedades del agregado grueso como el fino influyen significativamente en su comportamiento.

Además de la resistencia mecánica, la durabilidad juega un rol determinante en la eficacia de la aplicabilidad de las mezclas asfálticas. Esta durabilidad se puede medir, entre otras propiedades, por la susceptibilidad al agua y la deformación permanente.

La susceptibilidad al daño por humedad es generada por diversas causas como agregados sensibles al agua, sensibilidad del aglutinante al agua, presencia de agua y tránsito, entre otras, pero siempre terminan relacionándose con la adhesión ligante-agregados. Esta adhesión es de tipo química y se fundamenta en la acidez del ligante y la alcalinidad de los agregados (Lopez T. & Miró R., 2017). Sin embargo, los agregados más resistentes suelen ser de tipo ácido, afectando la adhesión y, por lo tanto, la durabilidad de las mezclas asfálticas. Los métodos comunes que sirven para garantizarla son el uso de agentes anti-strip tal como modificadores de adherencia líquidos o cal y por la eliminación de finos de arcilla perjudiciales mediante procesos adecuados o especificaciones. El uso de agregados calcáreos puede mejorar esta adhesión y, en consecuencia, mejorar también la durabilidad de las mezclas (Hicks, Santucci & Aschenbrener, 2003), pero estos agregados suelen tener menores propiedades resistentes.

La deformación permanente es otra medida de la durabilidad de las mezclas asfálticas. Generalmente se presenta en climas de temperaturas elevadas, debido a que la viscosidad del aglutinante asfáltico disminuye y es afectada por las cargas de tránsito (Kennedy et al., 1996).

Las propiedades volumétricas de las mezclas y las propiedades físicas de los agregados son factores clave para la deformación permanente. Una de las propiedades con mayor importancia para un mejor desempeño del pavimento es la angularidad y textura en los agregados. La angularidad y textura rugosa gobiernan propiedades de fricción interna en las mezclas (Thenoux & Carrillo, 2002). Así mismo los agregados con mayores valores de angulosidad poseen mejor enclavamiento en los agregados (Neville, 1997).

En Sechura se genera más del 80% de la producción nacional y se descartan anualmente hasta 25000 toneladas métricas de valva de concha de abanico en vertederos municipales (Poicon, 2014). La disposición inadecuada de estos residuos constituye una fuente de daños ambientales y contaminación debido a los olores desagradables, insectos y hongos que acumulan (Chierighinia, 2011).

La valva de la concha de abanico triturada en tamaños pequeños (entre 5 y 1 mm) ha sido probada como reemplazo de agregado fino en concretos hidráulicos (Varhen et al, 2017). Como agregado, tiene una dureza comparable con las arenas silíceas del mismo tamaño, una angulosidad muy elevada comparada con la arena de trituración y una naturaleza alcalina. Estos tres elementos le confieren la posibilidad de constituirse en un agregado fino que puede contribuir grandemente a mejorar la durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente sin detrimento de la capacidad resistente.

El presente estudio explora la aplicación de la valva como agregado fino en mezclas asfálticas en caliente, evaluando el daño frente a la humedad y la deformación permanente a través de los ensayos de Lottman y creep estático, respectivamente.

El trabajo se estructura en cuatro capítulos. El primer capítulo consta de fundamentos teóricos acerca de las fallas de deformación permanente y daño por humedad que se propagan en los pavimentos asfálticos, teniendo como objetivo establecer la relación del comportamiento de las mezclas asfálticas con las características del agregado fino. El segundo capítulo menciona las características y propiedades de los agregados que pueden influir en la durabilidad de las mezclas. El tercer capítulo caracteriza a los materiales utilizados en la investigación, incluyendo la valva de la concha de abanico, pues composición y propiedades mecánicas de los materiales juegan un rol importante en su desempeño. El último capítulo

presenta y discute los resultados del desempeño de las mezclas, comparando aquellas con y sin residuo.





Capítulo 1

Durabilidad de las mezclas asfálticas

La composición de una mezcla de asfalto (MA) está constituida por un 95% de agregados (fino y grueso) y alrededor de un 5% de porcentaje de ligante asfáltico, ambos en peso. Las propiedades de estos componentes van cambiando en el tiempo hasta que cumplen con su vida útil. A partir de ahí empiezan a generarse fallas por deformaciones permanentes o grietas. La pérdida de fluidez y la susceptibilidad frente a la humedad también son factores principales ante la deformación permanente.

La durabilidad del aglutinante de asfalto es afectada por factores de medio ambiente, permeabilidad de la MA y características de aglutinante, como, por ejemplo, el grado de desempeño a alta temperatura. El contenido óptimo de asfalto depende de las características del agregado, una de ellas es la granulometría, y cuando hay partículas más pequeñas y/o más finas, mayor será el área superficial y por tanto mayor contenido de asfalto (Asphalt Institute, 1982)

Los pavimentos realizados con mezclas asfálticas están expuestos a las cargas directas del tránsito, que a mayor tiempo y temperaturas elevadas pueden generar deformaciones permanentes, así como fricciones con los neumáticos de los vehículos que generan desprendimientos en los agregados, causando una circulación peligrosa. Aunque la carpeta asfáltica no esté expuesta a elevadas temperaturas, los pavimentos pueden sufrir fallas solo con la circulación de un tráfico pesado, principalmente deformaciones permanentes. Por otro lado, si se expone a bajas temperaturas, puede generar grietas y desprendimiento de pedazos de carpeta asfáltica, o en caso esté expuesta a precipitaciones pluviales, es recomendable aislarlas de un nivel freático alto, así como diseñar un buen sistema de drenaje, ya que el agua es el principal factor de su deterioro (NCHRP Report 673, 2011).

Mientras más se prolongue el periodo de uso de la carpeta asfáltica, mayor influencia producen los factores que generan las fallas en un pavimento. Las fallas más comunes que se propagan en los pavimentos asfálticos que están relacionados con las características de los agregados finos son el ahuellamiento y el *stripping*.

1.1 Deformación permanente

Las mezclas asfálticas son inducidas por ciclos de carga y descarga y parte de la deformación total que se genera es recuperada, conocida como deformación resiliente. La deformación que no es recuperada se acumula con cada repetición del ciclo y es denominado deformación permanente. Esta deformación genera hundimiento o desplazamientos que en exceso puede generar fallas funcionales y/o estructurales (Huamán, 2011). Las deformaciones son variables y también dependen del clima (NCHRP Report 673, 2011).

La deformación permanente desarrollada en una capa de una mezcla de asfalto en caliente (MAC) es causada por una densificación, es decir, un cambio de volumen y por deformación de corte, que no causa cambio de volumen (NCHRP report 580, 2002). En este caso se comentará la deformación por cambio de volumen, debido a que ésta es la que se evalúa en la presente investigación.

El ahuellamiento es uno de los resultados de la deformación permanente generado por una baja resistencia de la mezcla asfáltica y por baja rigidez a altas temperaturas, y esto puede ser ocasionado por problemas en el diseño de mezcla como mala selección del aglutinante de asfalto o incorrecta selección del nivel de tráfico hacen propenso el ahuellamiento (NCHRP Report 673, 2011).

Una carpeta asfáltica presenta deformaciones resilientes o elásticas y permanentes debido a su contenido de asfalto. El asfalto es un material de comportamiento elástico lineal a temperaturas bajas (menores a 40°), pero muestra comportamiento viscoelástico a temperaturas mayores de 40°C (Huamán & Chang, 2016). La componente elástica se recupera, mientras que la plástica se acumula. La simulación de ambos comportamientos se muestra en la Figura 1 que grafica un modelo reológico de un material viscoelástico

desarrollado por Maxwell y los componentes de deformación ante un ciclo de carga y descarga (Thenoux & Carrillo, 2002).

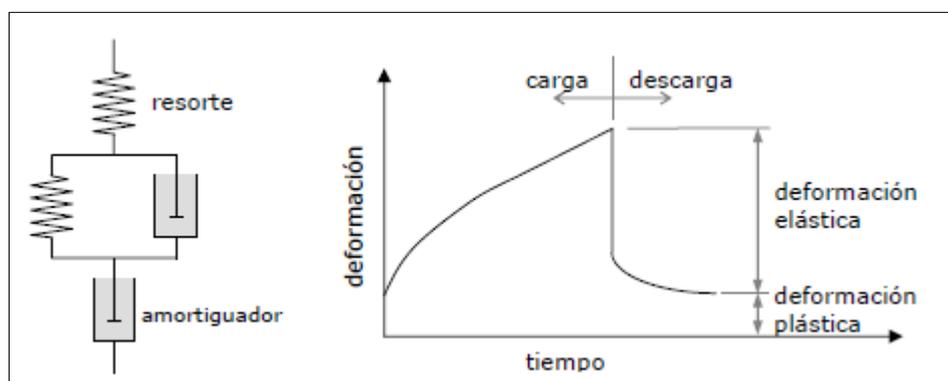


Figura 1. Modelo reológico del comportamiento de materiales viscoelásticos

Fuente: Thenoux & Carrillo, 2002

Recientes investigaciones han identificado que el comportamiento de la deformación permanente de los materiales de un pavimento, bajo carga y para condiciones ambientales (40°C) presenta tres etapas, como se muestra en la Figura 2 (NCHRP report 580, 2002).

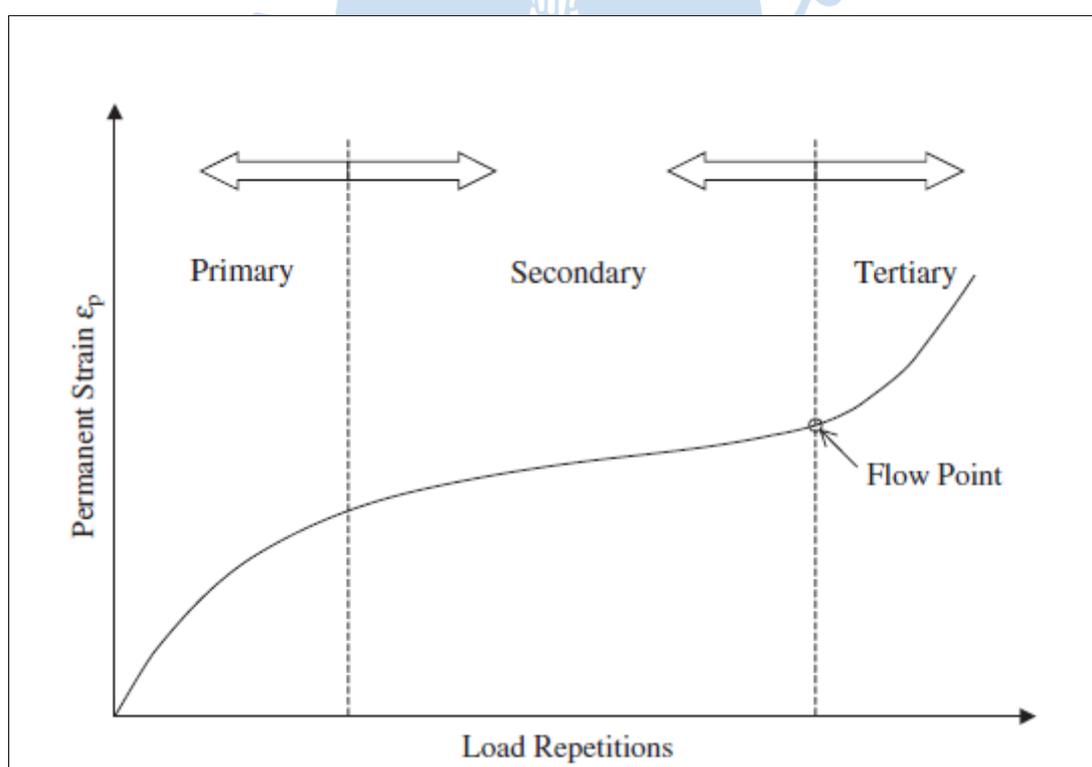


Figura 2. Comportamiento típico de deformación permanente de carga repetida de materiales de pavimento

Fuente: NCHRP report 580, 2002

Zona primaria: alto nivel inicial de deformación plástica, con tendencia decreciente y predominante cambio volumétrico;

Zona secundaria: pequeñas deformaciones plásticas, con tendencia constante y también presenta cambios volumétricos; sin embargo, las deformaciones plásticas por corte tienden a incrementar; y

Zona terciaria: alto nivel de deformaciones plásticas sin cambio de volumen, es decir, deformaciones causada por corte (NCHRP Report 580, 2002).

En general, estas deformaciones en las MAC están íntimamente relacionadas con el paso del tiempo y los niveles de uso y los cambios estacionales del clima. Por ejemplo, Foster (1984) evaluó las deformaciones de una vía y las relacionó con las estaciones de mayor temperatura en la zona. En la Figura 3 que esquematiza la densificación de las mezclas, se observa que el nivel inicial de porcentaje de aire es de 8% y después de dos o tres años se densifica y resulta con un porcentaje de vacíos de alrededor de 4%. Este intervalo de tiempo puede ser relacionado con la zona primaria del comportamiento típico de deformación permanente en una MAC, ya que existe una alta densificación inicial con alto cambio de porcentaje de vacíos.

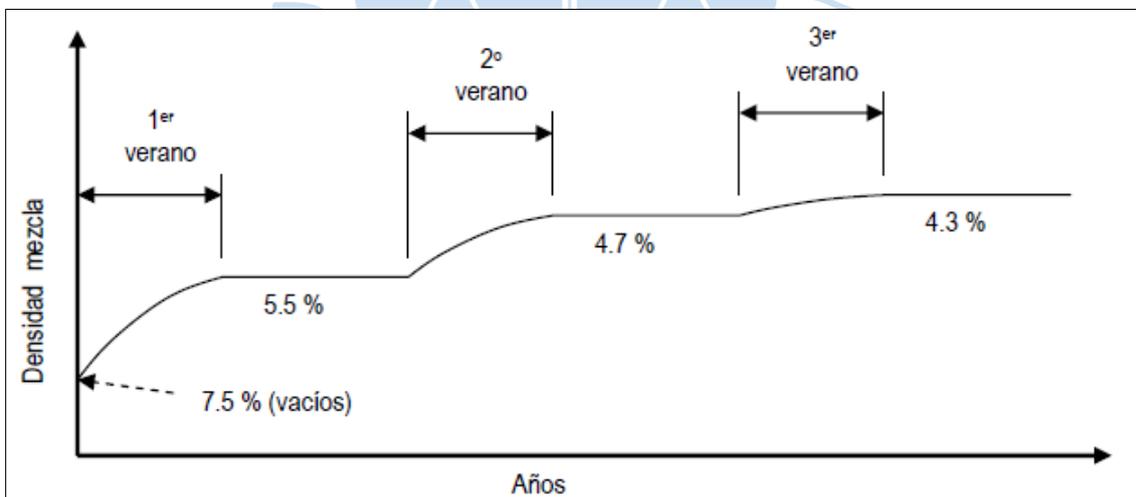


Figura 3. Densidad vs contenido de vacíos de las mezclas asfálticas en caliente.

Fuente: Foster, 1984

La deformación puede llegar a ser significativa, es decir, llegar a la zona terciaria después que los neumáticos han pasado muchas veces sobre el pavimento y en estos casos se identifica como ahuellamiento propiamente. Esta falla es un problema serio debido a que las

deflexiones contribuyen a una superficie de conducción irregular que además puede llenarse de lluvia o nieve, dependiendo de las variantes climáticas y provocar un riesgo de pérdida de control en los vehículos. Este ahuellamiento, por lo general, se ubica en la zona donde circulan los neumáticos (NCHRP Report 673, 2011).

Aunque los daños más severos en las MAC se observan cuando la deformación ha llegado a la zona terciaria, la presente investigación se centra en la deformación permanente primaria, como un primer alcance en la evaluación de las mezclas asfálticas con valvas de moluscos. Corresponde a futuras investigaciones seguir analizando la evolución en el tiempo de las deformaciones permanentes de estos materiales con los residuos en mención.

1.1.1 Factores del agregado que influyen en la deformación permanente.

1.1.1.1 Factores geométricos.

Las características de los agregados que influyen en la deformación permanente están determinadas fundamentalmente por la geometría del agregado que se explica por medio de tres propiedades: la forma, la angularidad y la textura superficial (Kuo & Freeman, 2000; Barrett, 1980). La forma es descrita como la variedad en las proporciones de la partícula; la angularidad se refiere a las variaciones de los encuentros de los lados de las partículas y la textura superficial define la irregularidad en la superficie en escala pequeña. La Figura 4 esquematiza de manera directa la geometría en una partícula de un agregado pétreo (Eyad et al, 2004).

Diversas investigaciones han confirmado que existe una relación entre la forma del agregado y el ahuellamiento en las MAC debido a que la forma influye directamente en el grado de empaquetamiento del agregado y en los vacíos en el agregado mineral (VMA) (McGennis et al., 1995; Barksdale et al., 1992). McGennis et al. (1995) encontraron que los agregados de forma angular y textura rugosa construyen uniones fuertes entre los agregados, reduciendo la deformación permanente de las mezclas. Barksdale et al. (1992) descubrieron que las propiedades de la forma del agregado están estadísticamente relacionadas con la resistencia de la mezcla frente al ahuellamiento. Por otro lado, se sabe que las partículas con formas planas y alargadas, a diferencia de las cúbicas, tienden a romperse durante la producción o construcción, dejando agregados con superficies expuestas no recubiertas,

dando lugar a mezclas MAC poco durables y resistentes (Kandhal & Parker, 1998). Esto puede producir cambios en la granulometría y dificultar la compactación de la mezcla. lo que además puede incrementar los vacíos entre sus partículas conocido también como VMA (Vavrik, Fries & Carpenter 1999).

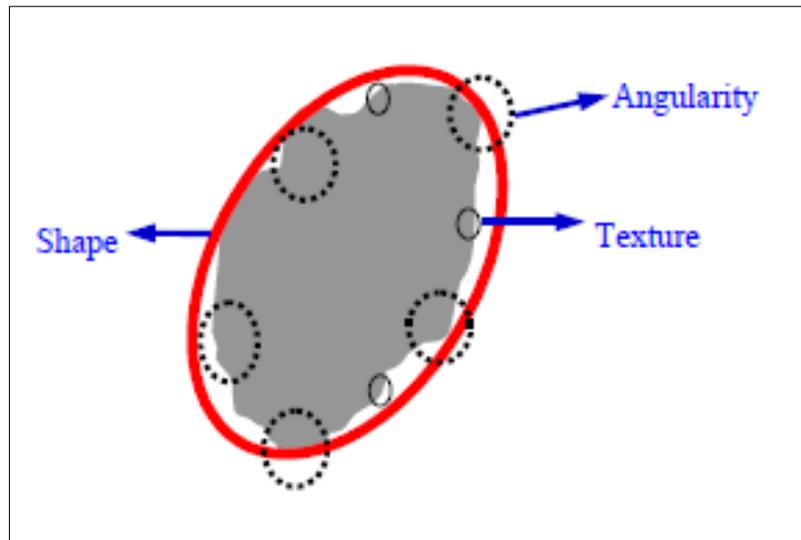


Figura 4. Geometría del agregado: forma, angularidad y textura

Fuente: Eyad et al., 2004.

Aunque estas propiedades son importantes tanto en los agregados gruesos como finos, su influencia en las deformaciones permanentes es mayor cuando se presentan en el agregado fino (NCHRP Report 405, 1998). Por ejemplo, Lefbure (1957) usó la estabilidad Marshall para comparar el comportamiento de mezclas asfálticas al variar las combinaciones de agregado grueso cúbico triturado, agregado grueso de partículas chatas y alargadas trituradas, arena natural y arena triturada. Lefbure (1957) encontró que el agregado fino era el componente determinante en las MAC. Posteriormente, otro estudio elaborado por Foster (1970) que midió la resistencia de MAC de grado denso simulando tensiones introducidas por el tráfico concluyó que el agregado fino y sus características son las que controlan las tensiones originadas por el tráfico.

Así mismo, se ha evaluado la geometría en los agregados finos. Kennedy et al (1994) determinaron que la angularidad del agregado fino es una de las propiedades físicas que ayuda en la estabilidad y a la resistencia a la deformación permanente de MAC debido a que generalmente estos agregados poseen suficiente fricción interna. También, Kandhal, Motter &

Khatri (1991) encontraron que las mezclas que poseen menos del 20% de arena natural (arena no triturada) en el agregado fino tienen un mejor desempeño que el resto que posee más del 20% de arena natural, debido fundamentalmente a su mayor angulosidad. Kalcheff y Tunnicliff (1982) encontraron que la forma del agregado fino produce efectos en el desempeño de las MAC. Ellos evaluaron el efecto en la estabilidad y el flujo Marshall, en la compresión triaxial y la resistencia a la tracción indirecta por carga estática y repetitiva. Al parecer, la arena triturada con mayor grado de angulosidad establecía mejor desempeño frente a la deformación permanente que una arena natural redondeada.

La textura superficial de los agregados implica que las partículas sean rugosas, lisas o pulidas. A su vez, esta textura depende de sus características físicas o mecánicas como la dureza, tamaño de la partícula y de los vacíos existentes en el agregado original (Ali Topal & Burak Sengoz, 2004). La textura áspera se consigue mediante la trituración de las partículas y permiten un alto porcentaje de caras fracturadas con lados angulosos (NCHRP Report 465, 2002).

Por otro lado, una mezcla con un alto valor de porcentaje de angularidad de agregado fino (FAA) no garantiza una resistencia al ahuellamiento, pues debe considerarse la textura del agregado. Por ejemplo, Park, Chowdhury, & Button (2001) analizaron valores de porcentaje de angularidad de diversas muestras de agregados finos compactadas sin ligante. Ellos encontraron que los agregados con altos valores de angularidad y de textura rugosa generan una trabazón más efectiva entre partículas que las partículas angulosas sin textura, y por eso son capaces de prevenir la formación de distorsiones y/o deformaciones en las MAC. En consecuencia, la correcta combinación de estos tres factores ayuda a mejorar la resistencia y a prevenir el agrietamiento por fatiga. (NCHRP Report 673, 2011).

Finalmente, un aspecto importante a considerar es la densidad de las partículas de los agregados. Siendo el porcentaje de asfalto un parámetro que se expresa como un porcentaje en peso del agregado mineral, un cambio en el tipo de agregado mineral sin considerar su densidad llevaría también a un cambio en la cantidad óptima requerida de asfalto, lo que alteraría la calidad de la mezcla.

1.1.1.2. Factores volumétricos.

El VMA por defecto es consecuencia de la combinación del tamaño de partículas del agregado mineral. Si se desea modificar este valor, es necesario realizar cambios en la gradación del agregado. La gradación o distribución granulométrica es una propiedad que implica específicamente a la distribución del tamaño de las partículas en rangos amplios (NCHRP Report 673, 2001). En este concepto, una correcta gradación garantiza que las partículas de menor tamaño vayan llenando los espacios vacíos que hay entre las partículas más grandes, reduciendo la posibilidad de reacomodo entre ellas como resultado de los procesos de aplicación de cargas de tráfico. Esto reduce grandemente las deformaciones por compactación. Sin embargo, esto no elimina las deformaciones por deslizamiento de partículas.

Una granulometría relativamente completa, con una combinación de tamaños que logra un buen empaquetamiento, garantiza una menor cantidad de espacios vacíos entre las partículas, que en apariencia ya ha llegado a su límite de compactación. Sin embargo, las partículas podrían desplazarse entre sí, sin incrementar los vacíos, pero generando cambios en la forma final del material. El desplazamiento de partículas provoca el cambio de forma sin reducción de vacíos entre las partículas. La posibilidad de desplazamiento relativo de las partículas se puede limitar por la fricción interna entre ellas y ésta a su vez, está condicionada por la forma y textura superficial de cada partícula.

Por ejemplo, con una misma granulometría, un valor mayor de VMA puede ser el resultado de la presencia de partículas angulares, ya que las partículas con forma angular o que tienen mayor índice de textura, no pueden empaquetarse tan herméticamente como los agregados que poseen partículas redondeadas o lisas (NCHRP Report 539, 2005). También el tamaño máximo nominal del agregado (NMAS) influye en el VMA, pues cuando éste aumenta, el VMA disminuye (NCHRP Report 673, 2011). También un alto valor de VMA se espera que sean más susceptibles de deformación, si es que no se trata de agregados angulares, con textura rugosa y de difícil compactación.

El contenido de vacíos en una mezcla de asfalto que debe encontrarse en un rango de 3 a 8 % para que mantenga un buen desempeño (Brown, 1990). Cuando las MAC tienen menos de un 3% de vacíos, la mezcla tiende a exudar y expulsar el ligante. Así mismo, si tiene un alto porcentaje de vacíos y no ha tenido un buen diseño, es densificada con mayor rapidez. Se

entiende que esta deformación podrá ser mayor en la medida que la mezcla tenga mayores espacios vacíos porque esto permitirá el desplazamiento relativo de las partículas y la consiguiente deformación de la mezcla (NCHRP report 673, 2001). Sin embargo, es inevitable que las cargas produzcan deformaciones con el paso del tiempo. Por eso, es recomendable compactar las mezclas a un nivel cercano al 8%, debido a que al cabo de dos o tres años la mezcla será compactada por el tráfico mismo (Foster, 1984).

Un porcentaje de vacíos insuficientes se considera igual o menor al 3% inmediatamente después de la colocación de la mezcla. Esto se debe a que los porcentajes de vacíos bajos permiten que el asfalto funcione como lubricante en lugar de ser un aglutinante, especialmente en temporadas de climas cálidos (NCHRP Report 580, 2007). El efecto lubricante reduce el contacto entre partículas y disminuye la fricción interna de la mezcla (Brown & Cross, 1992). Las mezclas de asfalto generalmente alcanzan su estado más denso cuando llegan a un 2% a 3% de vacíos de aire; aquí se espera que experimente un fallo por corte, ya que su reducción de vacíos no permite que la mezcla se deforme por cambio de volumen (NCHRP Report 465, 2002).

Thenoux y Carrillo (2002) al evaluar condiciones de post-construcción en mezclas asfálticas chilenas de cuatro autopistas en Chile encontraron que sería recomendable usar un porcentaje de vacíos de 4% a 5% para asegurar un comportamiento menos plástico en las mezclas y que el bajo contenido de vacíos era uno de los factores volumétricos que causaba problemas de ahuellamiento.

Neethu, Veeraragavan & Murali (2013) evaluaron mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de vacíos (2%, 4% y 7%) y concluyeron que las mezclas que poseen entre 2 y 4% de vacíos son más resistentes a las deformaciones permanentes en comparación con las mezclas que poseen un 7% de vacíos.

1.2. Daño por humedad

El daño inducido por la humedad en las MAC es ocasionado por la pérdida de unión entre el cemento asfáltico o la masilla y los agregados pétreos (Little & Jones, 2003). Esta falla se puede ocasionar mediante un mecanismo donde se puede generar la separación entre el ligante asfáltico y el agregado. En la Figura 5 se ilustra como la humedad reduce la rigidez

del ligante o masilla a través de la difusión de humedad y degrada la unión adhesiva entre el ligante o masilla y partículas de agregado.

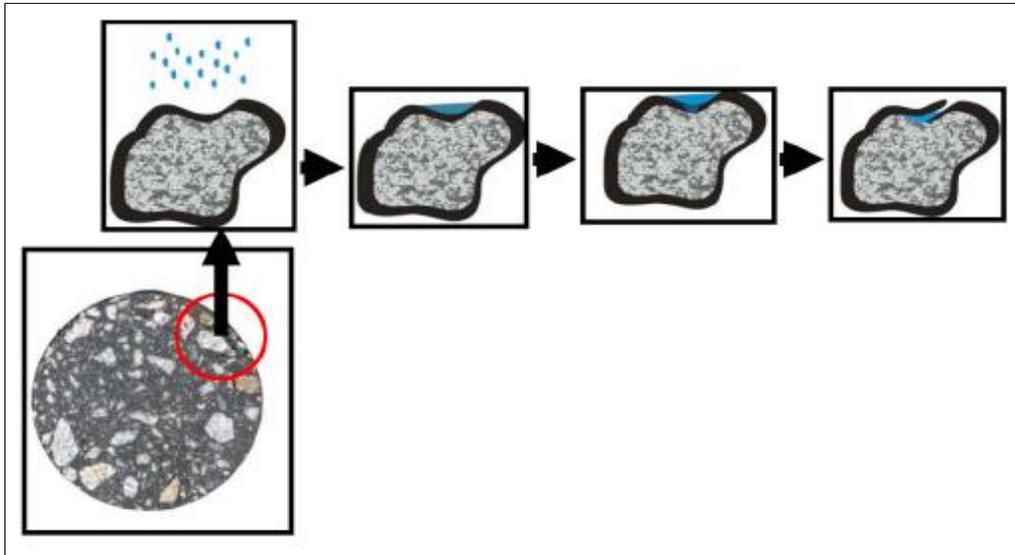


Figura 5. Mecanismo de daño por humedad

Fuente: Lutif, J.E.S. & Y. Kim, 2006

La separación del ligante de asfalto de la superficie del agregado se puede generar por desprendimiento, debido a la presencia de una película de agua (Majidzadeh & Brovold, 1968). La humedad en los pavimentos solo puede llegar a penetrarse a la interfaz árido-ligante moviéndose a través de la película de ligante, debido a la porosidad insignificante del ligante y el único proceso físico que puede llegar a explicar esta infiltración de agua es la difusión molecular (Cheng et al, 2003). Una molécula de agua que ingresa a la interfaz no genera una desunión rápida, sino que lo hace de manera progresiva a medida que la difusión de agua avanza y el gradiente de concentración de humedad disminuye (Lopez T. & Miró R., 2017). En la Figura 6 se esquematiza la introducción del agua al ligante de asfalto.

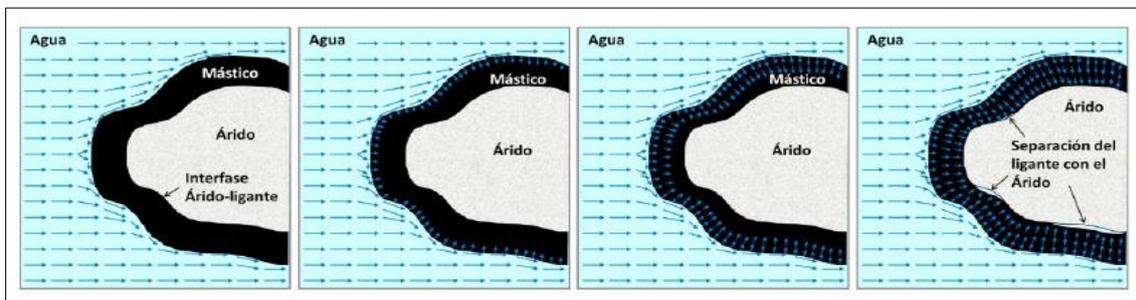


Figura 6. Esquema de la pérdida de la unión de árido-ligante debido a la presencia de agua

Fuente: Lopez T. & Miró R., 2017

Para conocer si una mezcla es resistente frente a la humedad se suele analizar la adhesión entre el árido y el ligante. La adhesión es definida como la capacidad del ligante de permanecer fijo al árido con o sin presencia de agua (Lopez T. & Miró R., 2017). Según Balaguer, Elvira y Fernandez (1979), se puede dividir en dos propiedades diferentes: adhesividad activa y adhesividad pasiva. La adhesividad activa hace referencia a la capacidad del ligante para penetrar en toda el área de un árido y está relacionada con la fluidez del ligante o la limpieza de la superficie del árido, mientras que la adhesividad pasiva se relaciona con la capacidad de ser retirado de la superficie del árido por causa del agua y tiene que ver con la adherencia de carácter químico entre el ligante y el agregado. En la Figura 7 se grafican los dos tipos de adhesividad, que comprenden el mecanismo de adhesividad entre el ligante y el árido, según López y Miró (2017).

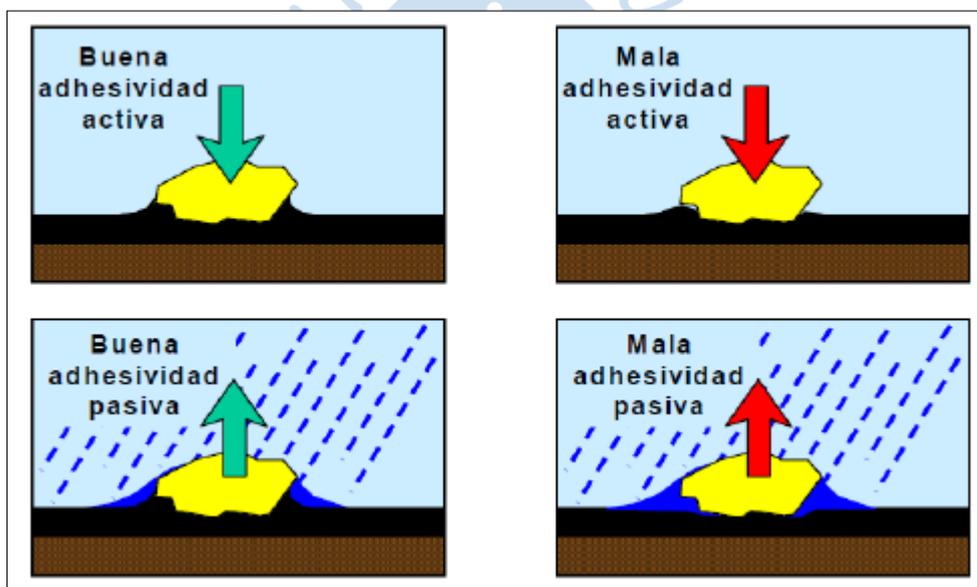


Figura 7. Funcionamiento del mecanismo de adhesividad

Fuente: (Lopez & Miró, 2017).

1.2.1. Teorías de adhesión árido-ligante.

Existen diferentes teorías usadas para explicar la adhesión entre los agregados y el asfalto, las que tienen mayor relación con el estudio realizado son: reacción química, energía superficial y adhesión mecánica. Probablemente una combinación de todos estos fenómenos ocurre sinérgicamente para producir la adhesión y no sólo una sola de ellas (Terrel & Shute, 1989). Se entiende, también, que la superficie de las partículas del agregado mineral debe estar libre de partículas polvosas que impedirían la natural adherencia con cualquier ligante.

1.2.1.1. Reacción química.

Químicamente, los cuerpos se pueden clasificar en dos grupos: ácidos y básicos; los ácidos se cargan negativamente en su superficie y los básicos se cargan positivamente. La interacción de estos dos tipos de materiales crea fuerzas de atracción muy fuerte, que contribuyen a la adherencia. El asfalto está constituido por moléculas complejas, entre ellos grupos ácidos que le aportan un carácter negativo (Lopez T. & Miró R., 2017). Las partículas de agregados, según sean ácidos o básicos, darán lugar a una reacción química con el ligante, generando compuestos insolubles al agua que resistan al desprendimiento o *stripping* (Little & Jones, 2003).

Los agregados usados en las mezclas asfálticas suelen ser de naturaleza ácida, debido fundamentalmente a su mayor resistencia mecánica. Estos agregados ácidos tienden a cargarse negativamente en presencia de agua, mientras que los agregados básicos o calizos se cargan positivamente. Esto hace que la adherencia de los agregados calizos con el asfalto sea mucho mayor en comparación con los agregados ácidos (Morante, 2017). En la región Piura, los agregados usados en mezclas asfálticas son de naturaleza ácida (Rolando, 2001), lo cual genera problemas de adherencia en las mezclas y limita grandemente su desempeño frente a condiciones de humedad.

1.2.1.2. Energía superficial.

La energía superficial está definida por parámetros termodinámicos. Entre ellos se encuentra la humectabilidad de los agregados frente al agua o al asfalto (Little & Jones, 2003). La energía superficial libre (ELS) bajo parámetros termodinámicos es definida como el trabajo necesario para crear una nueva unidad en condiciones de vacíos (Bhasin, 2007). También está relacionada directamente con la capacidad del ligante de recubrir o mojar materiales sólidos, o de los sólidos, de permitir ser recubiertos (Álvarez & Caro, 2009).

Álvarez y Ovalles (2012), realizaron mediciones en MAC de energía superficial libre y encontraron que las calizas y demolitas presentan una mejor adhesión con el asfalto en presencia de agua a comparación de gravas de basalto, pues las demolitas y calizas están constituidas principalmente por carbonatos de calcio y magnesio. Por lo que se puede inferir que las valvas de concha de abanico poseerán mejores propiedades adhesivas que los agregados usados generalmente en esta región.

1.2.1.3 Adhesión mecánica.

La adhesión mecánica se enfoca en las propiedades físicas de los agregados de la mezcla, como la textura, la forma, la absorción, etc. (Terrel and Al-Swailmi, 1994). La adhesión mecánica se consigue cuando el agregado amplía su superficie y textura, mejorando y aumentando los enlaces químicos ante la presencia de agua (Little & Jones, 2003). A mayor rugosidad, la adhesión entre el árido y el ligante mejorará; así mismo, a mayor superficie rugosa se creará mayor adhesión, porque las cargas serán distribuidas en mayor superficie del agregado (Lopez T. & Miró R., 2017).

1.2.2 Factores del agregado que influyen al daño por humedad

1.2.2.1 Textura superficial.

Los agregados con textura superficial rugosa tienen una adherencia mecánica mayor que los agregados con superficie lisa, por tanto, los agregados rugosos garantizan una mejor resistencia con el ligante (Carrillo & Gamboa, 2007).

Una manera de generar rugosidad en los agregados es mediante la trituración que aparte de generar mayor rugosidad, genera mayor energía libre, debido a que los enlaces rotos liberan energía. Por esta razón, los elementos externos que se encuentran alrededor de los agregados recién triturados son atraídos hacia la superficie. Esta atracción está asociada también a la naturaleza del material. Los agregados silíceos se cargan negativamente, atrayendo más a las moléculas de agua, mientras que los calcáreos las repelerán. Como generalmente se trabaja con agregados silíceos, el calentamiento previo a la mezcla con el asfalto favorece la eliminación del agua, tanto la libre como la absorbida; de esta manera se elimina la tensión interfacial entre el agregado y el asfalto, reduciendo el posible desprendimiento (Little & Jones, 2003).

1.2.2.2 Mineralogía.

Los agregados pétreos están compuestos por minerales, y cada mineral tiene su composición química y una estructura cristalina o amorfa. Esta composición mineralógica determina su afinidad con el agua. Los agregados hidrófilos tienen mayor afinidad con el agua y los agregados hidrófobos tienen mayor afinidad con el cemento asfáltico. Los agregados

hidrófilos contienen un alto porcentaje de sílice y son ácidos, mientras que los agregados hidrófobos contienen un bajo porcentaje de sílice y son básicos. La gran parte de piedra caliza y rocas carbonosas son clasificadas como material hidrófobo (Majidzadeh, K. & Brovold, 1968).

1.2.2.3 Limpieza superficial.

Este factor está relacionado con la presencia de los finos en la superficie de los agregados. Los materiales más frecuentes son las arcillas y otros finos similares. Su presencia puede reducir la unión del agregado con el asfalto (NCHRP Report 673, 2001).

La presencia de arcilla sobre los agregados impide que el aglutinante de asfalto ingrese de manera adecuada al agregado, de tal forma que no interactúan. Esto puede facilitar la penetración del agua en la película de asfalto, llegando a separar el aglutinante de asfalto de los agregados (NCHRP Report 673, 2001). Por otro lado, el contenido de arcilla como cobertura en los agregados cambia la química del funcionamiento en las mezclas y debilita los enlaces de unión entre el ligante y la superficie de los agregados, por lo que disminuye las fuerzas de adherencia entre estos materiales (NCHRP report 405, 2002). En cualquier caso, las partículas de arcilla o finos plásticos inducen a la separación del asfalto y del agregado cuando la mezcla asfáltica es expuesta al agua (NCHRP Report 539, 2005).

Uno de los ensayos más utilizados que ayuda a detectar si existe contenido de arcilla perjudicial en los agregados es el equivalente de arena. Mientras más alto sea el índice del resultado se interpreta como agregados más libres de polvo y partículas de arcilla (NCHRP Report 673, 2001). Es decir, los valores indicativos de partículas con mayor limpieza serán los que aporten mayor resistencia frente a la humedad en comparación con las mezclas que presenten partículas con mayor contenido de arcilla.

1.2.2.4. Factores volumétricos.

Las partículas angulosas influyen directamente en el contenido de vacíos de la estructura de los agregados. El contenido de vacíos afecta la durabilidad en las MAC. Cuando una mezcla tiene porcentaje de vacíos mayores se convierte en una mezcla permeable. En realidad, lo que se tiene es una mayor superficie de ligante expuesto al ambiente, generando una mayor interacción con los agentes de envejecimiento. Este envejecimiento se produce por

reacciones de oxidación del asfalto con el oxígeno del ambiente y el agua y por la radiación ultravioleta. De esta manera se tiene un aglutinante endurecido por la edad y por la penetración de la humedad, que se hace quebradizo y susceptible al deterioro. Por ello, se recomienda limitar los vacíos en las mezclas aplicando una compactación adecuada (NCHRP report 673, 2011). En general, se considera que la durabilidad de una carpeta asfáltica depende del contenido de vacíos, pues a medida que el porcentaje de vacíos aumenta, el desprendimiento de la película asfáltica en MAC aumenta también. Esto se explica porque existe más espacio para que la humedad se pueda introducir y aplique fuerzas hidrostáticas en la mezcla (Graf, 1986).

La resistencia a la humedad mejora con la disminución del tamaño máximo nominal en el agregado (NMAS) porque hay un aumento de VMA y cuando esto sucede, el contenido de volumen asfáltico efectivo (VBE) aumenta (NCHRP report 673, 2011). Bajo esta teoría, se espera que las mezclas con mayores valores de VMA y VBE tengan un mejor desempeño frente a la resistencia a la humedad.

1.3. Uso de la valva de moluscos en mezclas asfálticas

Las valvas de concha de abanico están compuestas por carbonato de calcio (CaCO_3) entre 95 al 99%. Este es un punto importante, ya que el asfalto es considerado como el grupo de los componentes ácidos, pudiendo inferir en los áridos calizos o básicos. Morante (2017) evaluó la adherencia de la valva de concha de abanico con ligante asfáltico, encontrando resultados favorables para la adhesividad de la valva a comparación de los áridos locales debido a su naturaleza calcárea de la valva a diferencia de la naturaleza silícea de los agregados pétreos utilizados. En pruebas de Riedel Weber, las mezclas con agregados silíceos alcanzaron un valor de 4 mientras que las mezclas con valva alcanzaron valores de 9 y 10.

Así mismo Wheaton (2007) señaló que los minerales de calcio y magnesio generan especies menos solubles con el agua y, por tanto, estos componentes pueden originar mayor adhesión con el asfalto.

Otro de los estudios elaborados en MAC con valvas de moluscos fue Arabani et al. (2014), evaluó el desempeño de la valva de moluscos como relleno mineral. Realizó remplazos de 35%, 75% y hasta un 100% y fueron comparados con remplazos de 0%. El

diseño se realizó utilizando el método Marshall, donde el porcentaje óptimo más alto de asfalto fue la mezcla con 100% de reemplazo. No obstante, al evaluar su desempeño frente a la susceptibilidad al agua y a la deformación permanente, la mezcla que mejor comportamiento mostró fue la mezcla con 100% de reemplazo.

Morante (2017) ha verificado que la adherencia de la valva con el asfalto supera ampliamente los niveles que se pueden lograr con los agregados naturales de Piura. A raíz de estos resultados, ahora se busca evaluar cómo este residuo puede ser determinante en la durabilidad y el ahuellamiento de las mezclas asfálticas en caliente.



Capítulo 2

Metodología

2.1 Ensayos para la caracterización de los agregados

2.1.1 Granulometría por tamizado

La granulometría de los agregados es determinada por un análisis de tamices (o granulometría) efectuando sobre las muestras del agregado. Su procedimiento se resume en pasar una muestra de agregado en una pila de tamices consecutivos (19.05 mm, 12.7 mm, 9.525 mm, 4.76 mm, 2.38 mm, 1.2 mm, 0.6 mm, 0.3 mm, 0.15 mm y 0.075 mm). Los agregados gruesos quedan atrapados en tamices superiores a 4.76 mm; agregados de tamaño mediano quedan en tamices medianos, entre 4.76 mm y 0.15 mm; y las partículas finas pasan a través de tamices inferiores a 0.15 mm. Posteriormente se realizan cálculos para determinar el porcentaje que pasa cada tamiz. Para determinar que el agregado tiene buena gradación, la curva granulométrica tiene que encontrarse dentro de los límites superiores e inferiores determinados según la norma a que se rige la investigación.

2.1.2 Angularidad

La angularidad del agregado fino es utilizada para una previa evaluación del desempeño de las mezclas. El método utilizado para evaluar la angularidad en el agregado fino fue AASHTO T 304, una muestra de agregado fino, menor al tamaño 2.36 mm, se coloca dentro de un embudo, permitiendo una caída libre hacia un cilindro con volumen conocido. En la Figura 8 se muestra la caída del agregado hacia el embudo. Los valores más altos indican una mayor angularidad de la muestra.



Figura 8. Ensayo de angularidad, en equipo indicado según AASHTO T 304

Fuente: Elaboración propia

2.1.3 Gravedad específica y absorción

La gravedad específica se define como la relación entre la masa de un material y la masa de un volumen igual de agua. El proceso es realizado según ASTM C 127 y consiste en pesar una muestra de agregado sumergida en agua hasta que haya sido saturada, luego se retira del agua, se seca superficialmente y se pesa. El volumen del agregado es determinado por desplazamiento de agua. Para terminar las mezclas se secan al horno y se determina su peso seco. Obteniendo todos estos datos y mediante fórmulas se calcula la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción. Mientras mayor sean los valores de densidad y de gravedad específica, el material será más denso y ocupará menor espacio en un determinado volumen. Los valores altos de absorción significan que el material posee alta capacidad para absorber lo que se encuentra en su superficie.

2.1.4 Abrasión de Los Ángeles

Para determinar si un agregado es capaz de resistir la abrasión durante el proceso de producción y cuando son sometidas a tráfico. La dureza fue determinada mediante ASTM C 13, el ensayo consiste en colocar una muestra de agregado en un cilindro de acero con esferas de acero, entre 6 a 12 esferas, dependiendo de la gradación del material, luego el cilindro empieza a rotar sobre su propio eje. Los resultados indican el porcentaje de masa perdido, por tanto, los valores más bajos son los indican mayor resistencia frente a la abrasión.

2.1.5 Caras fracturadas

El procedimiento se ha realizado mediante ASTM D 5821 y el proceso consisten en un conteo caras fracturadas del agregado grueso. Al final se reporta el porcentaje de agregado que posee como mínimo una cara fracturada y el porcentaje que tiene como mínimo dos caras fracturadas.

2.1.6 Partículas chatas y alargadas

Este ensayo es realizado mediante la norma ASTM D 4791; ese procedimiento manual consiste en relacionar las partículas planas y alargadas en 5:1 mediante un calibrador proporcional, donde la abertura de la pinza más grande se ajusta a la longitud de la partícula y si la abertura más pequeña se ajusta en el ancho de la partícula, entonces se considera como chata y alargada. Así mismo se recomienda que este valor no exceda a un 10%, pues a mayor porcentaje de partículas chatas y alargadas se desarrollan mezclas con menor desempeño, ya que estas tienden a romperse.

2.1.7 Equivalente de arena

El equivalente de arena indica las cantidades de materiales no deseables de los agregados, como finos plásticos o arcillosos. El procedimiento se realiza según AASHTO T 176 y se coloca un volumen medido de agregado fino con una solución floculante dentro de una probeta cilíndrica de plástico. Durante el proceso se realizan agitaciones con el fin de remover la arcilla de la arena, y luego se deja reposando un tiempo para que la muestra logre sedimentar. A mayor índice de equivalente de arena significa que hay menor cantidad de materiales no deseable.

2.1.8 Adherencia Riedel Weber

Este ensayo permite conocer el grado de adhesividad entre el asfalto y agregado fino. El desarrollo consiste en hervir una muestra de mezcla de asfalto con agregado fino (0.5g) tanto en agua como en concentraciones de soluciones de carbonato sódico, esto se realiza en concentraciones crecientes y en nuevas muestras. Si la mezcla pasa a mayores concentraciones de carbonato sódico, la mezcla posee mayor adherencia.

2.2 Diseño de las mezclas agregado-valva y de las mezclas asfálticas

Como se sabe el objetivo de esta investigación fue reemplazar el agregado fino por RCA, por tanto, se ha realizado reemplazando el 100% en peso del agregado fino en determinados intervalos de tamaños, manteniendo la misma granulometría del agregado original. De esta forma, el contenido de valva en el agregado total corresponde con la fracción del tamaño de partículas reemplazado. Se usaron tres intervalos de tamaños, obteniendo tres mezclas de agregado fino con una misma granulometría, pero diferente composición de partículas. Esto dio lugar a tres mezclas de agregados denominadas A1, A2 y A3., como se describen a continuación:

Agregado 1 (A1). El reemplazo de valva se realizó entre los tamices No. 8 y No. 50 (1.20 mm y 0.30 mm).

Agregado 2 (A2). El reemplazo de valva se realizó entre los tamices No. 50 y No. 100 (0.30 mm y 0.15 mm).

Agregado 3 (A3). El reemplazo de valva se realizó entre los tamices No. 100 y No. 200 (0.15 mm y 0.075 mm).

Para cada combinación de agregado fino más el agregado grueso, denominado agregado global, se preparó una muestra en el laboratorio y se observó el grado de empaquetamiento que se logra en cada uno de los reemplazos propuestos. Este grado de empaquetamiento se midió a través de la observación del arreglo de partículas para el máximo peso unitario compactado, la gravedad específica y el peso unitario.

En la Figura 9 se esquematiza como se han agrupado, por tamaños, los reemplazos en el agregado fino, correspondientes a los agregados A1, A2 y A3

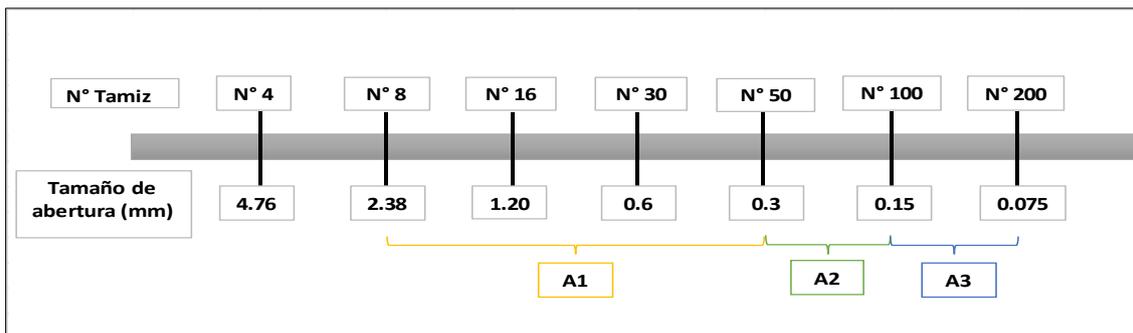


Figura 9. Tamaños usados para el reemplazo de la arena por valva triturada en la elaboración de las mezclas asfálticas de estudio

Fuente: Elaboración propia.

El agregado global (agregado fino y grueso) requerido para las mezclas asfálticas se logró combinando el agregado grueso con cada uno de los agregados A1, A2 y A3, en la proporción necesaria para cumplir las especificaciones de una mezcla asfáltica densa sin filler, cada una de las mezclas de estos agregados globales se denominaron M1, M2 y M3 respectivamente, siendo MP (mezcla patrón) el agregado sin RCA. El porcentaje óptimo de asfalto para cada una de estas mezclas se tomó de Chávez (2019), quien determinó estos valores óptimos con el método Marshall para mezclas asfálticas en caliente, y para tráfico pesado. El esquema del procedimiento para la elaboración de las mezclas se muestra en la Figura 10.

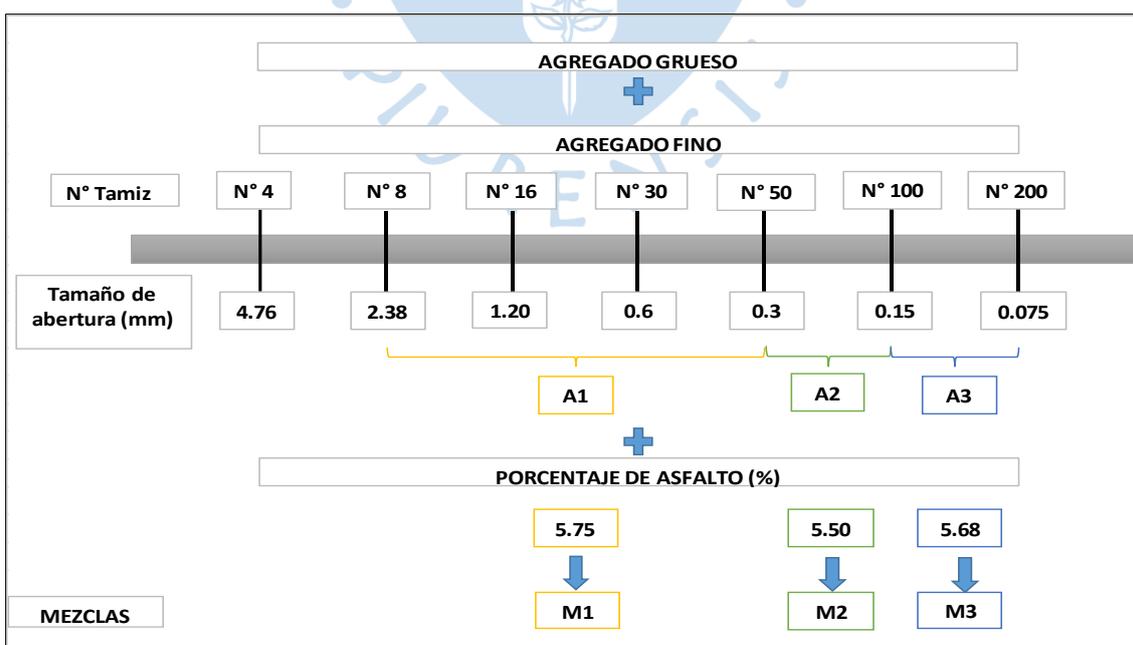


Figura 10. Proceso de elaboración de mezclas de asfalto

Fuente: Elaboración propia

2.3 Evaluación de la deformación permanente

La deformación permanente de las mezclas asfálticas se midió con la prueba de creep estático. En este ensayo se aplica un ciclo de carga y descarga en un intervalo de tiempo y se mide la deformación resiliente en el material.

Se siguió el procedimiento sugerido por NCHRP report 465, apéndice C (2002) pero con especímenes no confinados. Esto significa que las probetas no tenían esfuerzos alrededor de su diámetro, y por tanto, no estaban sometidas a esfuerzos triaxiales que simularan de manera más precisa sus condiciones in situ.

El equipo que se utilizó fue una prensa de compresión, a la que se le incorporó una cámara con control de temperatura que se fijó a 40 °C, de modo que las probetas de asfalto permanecían a temperatura constante. El sistema estaba conectado a un dial que permitía medir las deformaciones verticales de la probeta bajo esfuerzos de compresión axial.

Las probetas se colocaron en la cámara durante 3 a 5 horas antes de iniciar el ensayo. El ensayo inició con la aplicación de una precarga del 5% de 30 psi que es la carga estática uniaxial total durante 10 minutos, con 10 minutos de descanso. Inmediatamente después se aplicaron tres ciclos de 30 psi de carga durante 10000 segundos. A los 2000, 6000 y 10000 segundos se realizó un descanso de 10 minutos para observar su recuperación. En la Figura 11 se muestra la probeta con el soporte y su colocación dentro de la cámara. Durante la aplicación de las cargas, se tomaba la lectura del dial de deformación cada 5 minutos, lo cual se repetía durante los tiempos de descanso entre cargas para medir la deformación durante la recuperación de las deformaciones.



Figura 11. Ensayo Creep realizado en LEMC. a) Mordazas que permiten ejecución de carga a compresión uniaxial y b) Probeta colocada para ejecutar cargas en cámara bajo 40°C.

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Evaluación de la susceptibilidad a la humedad

La susceptibilidad a la humedad se midió a través del ensayo Lottman modificado. Esta prueba evalúa la tracción indirecta (ITS) como el fallo provocado por las tensiones de tracción, sometiendo los especímenes a una compresión diametral a lo largo de dos generatrices opuestas (Kennedy, 1977). La resistencia a la tracción indirecta es un parámetro que busca caracterizar la resistencia de la falla de una MAC frente a los esfuerzos de tracción (Ahmed et al., 2014). La resistencia se mide aplicando carga constante al espécimen a una velocidad constante, hasta que logre fallar y los esfuerzos se dividen a lo largo del eje diametral y sus cálculos numéricos representan la resistencia a la tracción horizontal en el centro de la muestra (NCHRP report 465, 2002). El ensayo Lottman modificado mide la sensibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas, relacionando la resistencia a la tracción indirecta de probetas asfálticas en condiciones húmedas con respecto a su resistencia en condiciones secas (AASHTO T283).

Para cada mezcla se evalúa el ITS en dos grupos de especímenes uno en condiciones secas y el otro sometido a condiciones de saturación y temperatura, y se compara la variación entre ambas condiciones. En la condición seca, las probetas no han sido sometidas a ningún

tipo de factor que afecte su adherencia (Figura 12), mientras que en las condiciones húmedas las probetas se saturan y congelan, acelerando su deterioro.

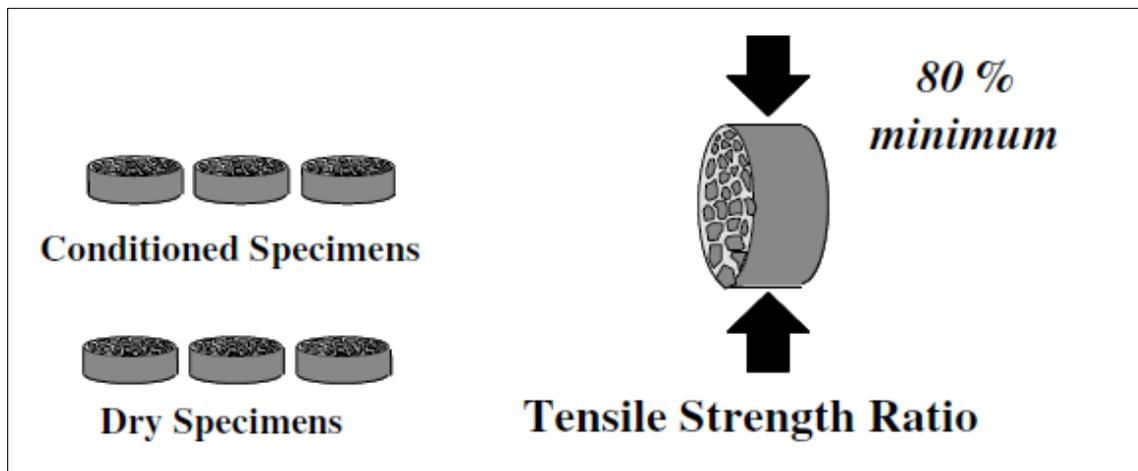


Figura 12. Prueba de tracción indirecta utilizada para muestras secas y acondicionadas AASHTO T283.

Fuente: Mansour Solaimanian et al, 2003

Las probetas de asfalto deben fabricarse con un porcentaje de vacíos del 8% para facilitar la penetración del agua y propiciar el daño frente a la humedad (Lottman, 2001). Las condiciones de humedad consisten en someter a un proceso de saturación al vacío (13 a 67 kPa de presión absoluta) durante aproximadamente 5 a 10 min las probetas para luego aplicar un ciclo de congelación de 16 horas a $-18\pm 3^{\circ}\text{C}$, seguido de otro ciclo de descongelación, colocándolos en un baño maría de $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ por espacio de 24 ± 1 hora. Finalmente, se somete a un baño de agua a $25 + 0,5^{\circ}\text{C}$ durante $2\text{ h} \pm 10\text{ min}$ adicionales. Este procedimiento es ilustrado en la Figura 13. En la Figura 14 se muestra el ensayo de las probetas frente al ITS en condiciones secas.

El ratio de resistencia a la tracción (TSR por sus siglas en inglés) corresponde a la relación entre la resistencia húmeda y la resistencia seca de las probetas ensayadas por tracción indirecta. Esta relación (TSR) se usa para evaluar la susceptibilidad a la humedad. Su valor mínimo debe estar entre 70 – 80%, para que se considere como una mezcla con buen desempeño frente a la humedad (Hicks, R.G, 1991).

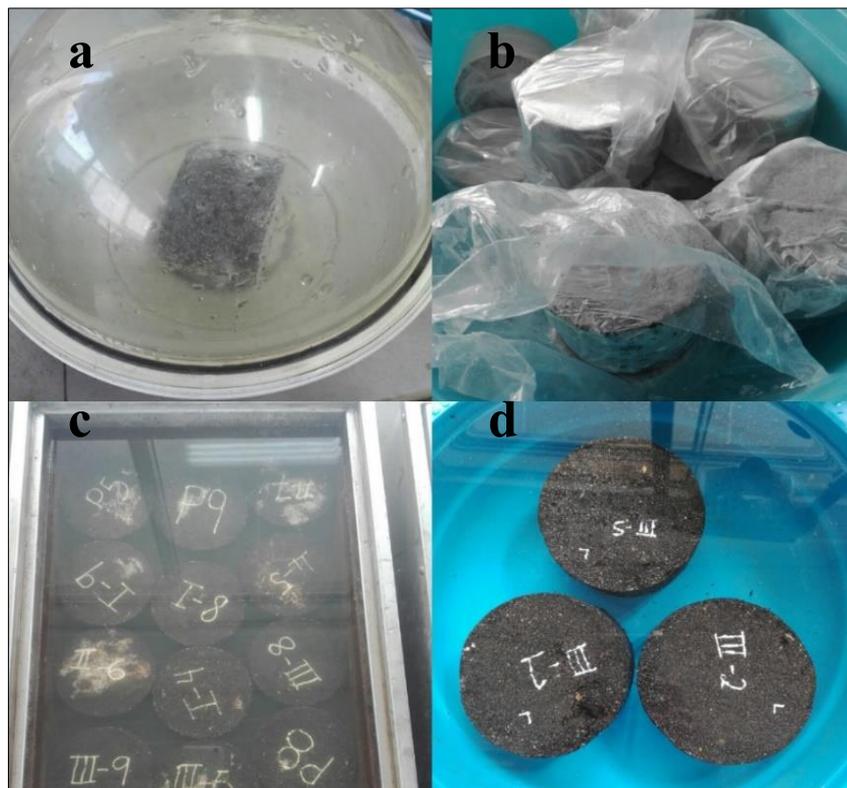


Figura 13. Probetas sometidas al ensayo de Lottman modificado. a) Saturación al vacío; b) Congelación; c) Baño maría a 60° y d) Baño maría a 25°.

Fuente: Elaboración propia



Figura 14. Especimen en la máquina de prueba en el laboratorio en condiciones secas

Elaboración Propia



Capítulo 3

Resultados de la caracterización de materiales

3.1. Agregados naturales

El agregado grueso proviene de la cantera Sojo. La cantera se encuentra ubicada en provincia de Sullana, distrito Miguel Checa a una latitud -4.904843 y longitud -80.803762 , a 70 m.s.n.m. La cantera está a 1,5 km hacia el sur del río Chira, a 1,33 km hacia el este de la localidad de Sojo y a 1,66 km de una zona agrícola. A 290 km al norte está la carretera Sullana-Sojo (Chávez, 2016). En la Figura 15 se muestra su ubicación en el mapa respecto a la ciudad de Piura.

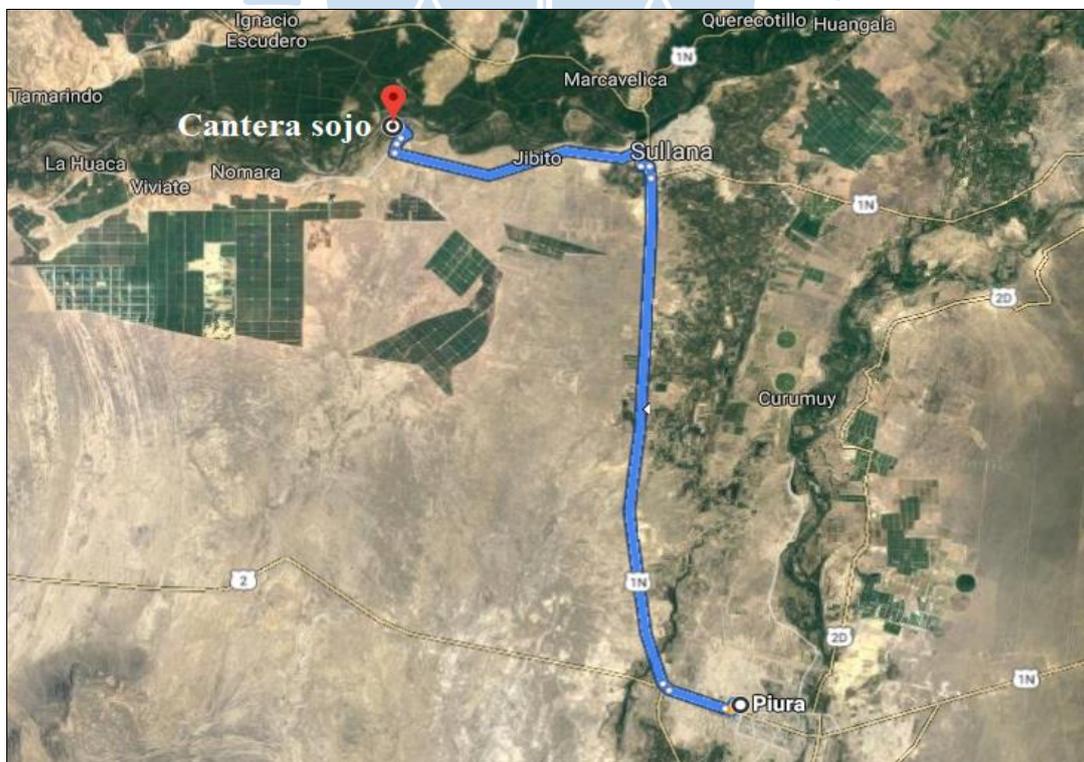


Figura 15. Ubicación geográfica de la cantera Sojo para agregado grueso.

Fuente: Google Maps.

Esta cantera posee un material cuaternario holoceno continental, una unidad geomorfológica repisa costanera, una unidad estratigráfica de depósito eólico y un dominio estructural Sechura-Lancones. A 5 km de la falla Regional está compuesta por bentonita, arcilla y yeso (Chávez, 2016). Además, este depósito se encuentra separado por la cuenca Chira, siendo el Río Chira el más próximo a la cantera (Chávez, 2016).

El agregado grueso es piedra triturada, con un porcentaje mínimo de partículas redondeadas. En general sus partículas tienen forma cúbica sin evidenciarse presencia de partículas chatas y/o alargadas. En la Figura 16 se aprecia una muestra del agregado grueso triturado de esta cantera.



Figura 16. Agregado grueso de la cantera Sojo.

Fuente: Elaboración propia.

El agregado fino proviene de la cantera Cerro Mocho, ubicada en la provincia de Sullana, distrito de Ignacio Escudero, con latitud de -4.86498 y longitud de -80.791075 . La cantera se encuentra a 35 m.s.n.m. El río Chira está a 3 km hacia el sur de la cantera y las zonas agrícolas próximas a la cantera están a 1 km al este y 1.5 km al oeste (Figura 17).

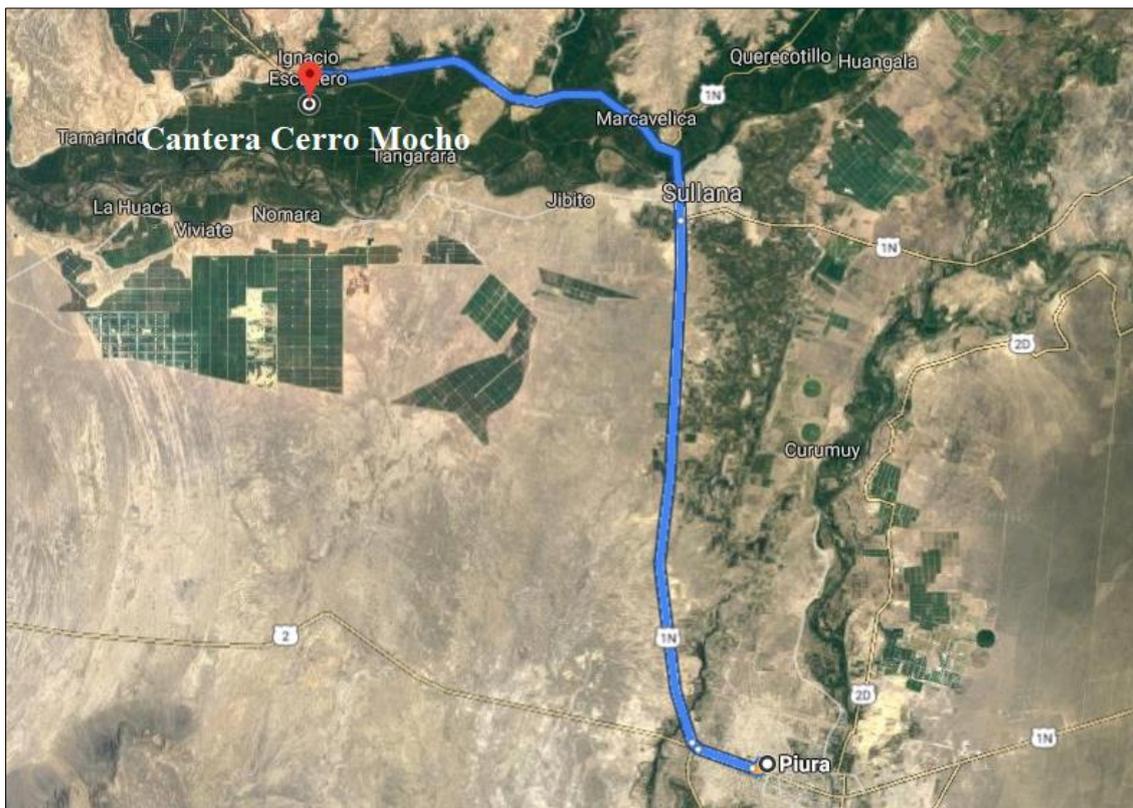


Figura 17. Ubicación geográfica de la cantera Cerro Mocho, de donde se procede la arena gruesa.

Fuente: Google Maps.

El depósito de donde se extrae el agregado está conformado principalmente por conglomerados con canto rodado de cuarcita, arenisca y rocas metamórficas como esquistos, así como rocas volcánicas e intrusivas. Por la formación del Chira en la que se ubica la cantera, se espera que en la parte inferior se encuentren lutitas bentónicas y en la superficie de la cantera, arcillas expansivas, bentonita y capas de yeso (Chávez, 2016). Poseen arcillas resultantes de la alteración de rocas ácidas y máficas, así como de las rocas calizas. Las partículas tienen un color marrón amarillento, con granos de forma angular (Figura 18).

La Tabla 1 presenta la granulometría del agregado grueso y fino combinados con la finalidad que se encuentre dentro de los límites del huso granulométrico según AASHTO y MTC. La combinación obtuvo 48% de agregado grueso y 52% de agregado fino. La Figura 19 muestra la curva granulométrica que cumple con los límites específicos de MTC. El agregado grueso presenta un tamaño máximo nominal 3/4" (19.1 mm) y el agregado fino un módulo de finura 2.58.



Figura 18. Agregado fino proveniente de la Cantera Cerro Mocho, usado en la presente investigación.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Combinación de agregados naturales usado en las mezclas asfálticas de gradación densa, sin filler.

| N° Tamiz | Tamaño (mm) | % Pasa | | | Especificación | |
|-------------|----------------|-----------------------------|---------------------------|--------|--------------------|--------------------|
| | | Agregado Grueso (48%) | Agregado Fino (52%) | Mezcla | Límite inferior | Límite superior |
| 1" | 24.40 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 3/4" | 19.10 | 94.01 | 100.00 | 97.10 | 80.00 | 100.00 |
| 1/2" | 12.70 | 42.74 | 100.00 | 72.50 | 67.00 | 85.00 |
| 3/8" | 9.50 | 22.71 | 100.00 | 62.90 | 60.00 | 77.00 |
| #4 | 4.76 | 0.00 | 98.61 | 51.30 | 43.00 | 54.00 |
| #8 | 2.38 | 0.00 | 86.23 | 44.80 | 31.00 | 47.00 |
| #16 | 1.19 | 0.00 | 66.76 | 34.70 | 23.00 | 38.00 |
| #30 | 0.59 | 0.00 | 45.51 | 23.70 | 17.00 | 29.00 |
| #50 | 0.30 | 0.00 | 29.08 | 15.10 | 11.00 | 21.00 |
| #100 | 0.15 | 0.00 | 16.10 | 8.40 | 7.00 | 15.00 |
| #200 | 0.07 | 0.00 | 7.58 | 3.90 | 4.00 | 8.00 |

Fuente: Elaboración propia

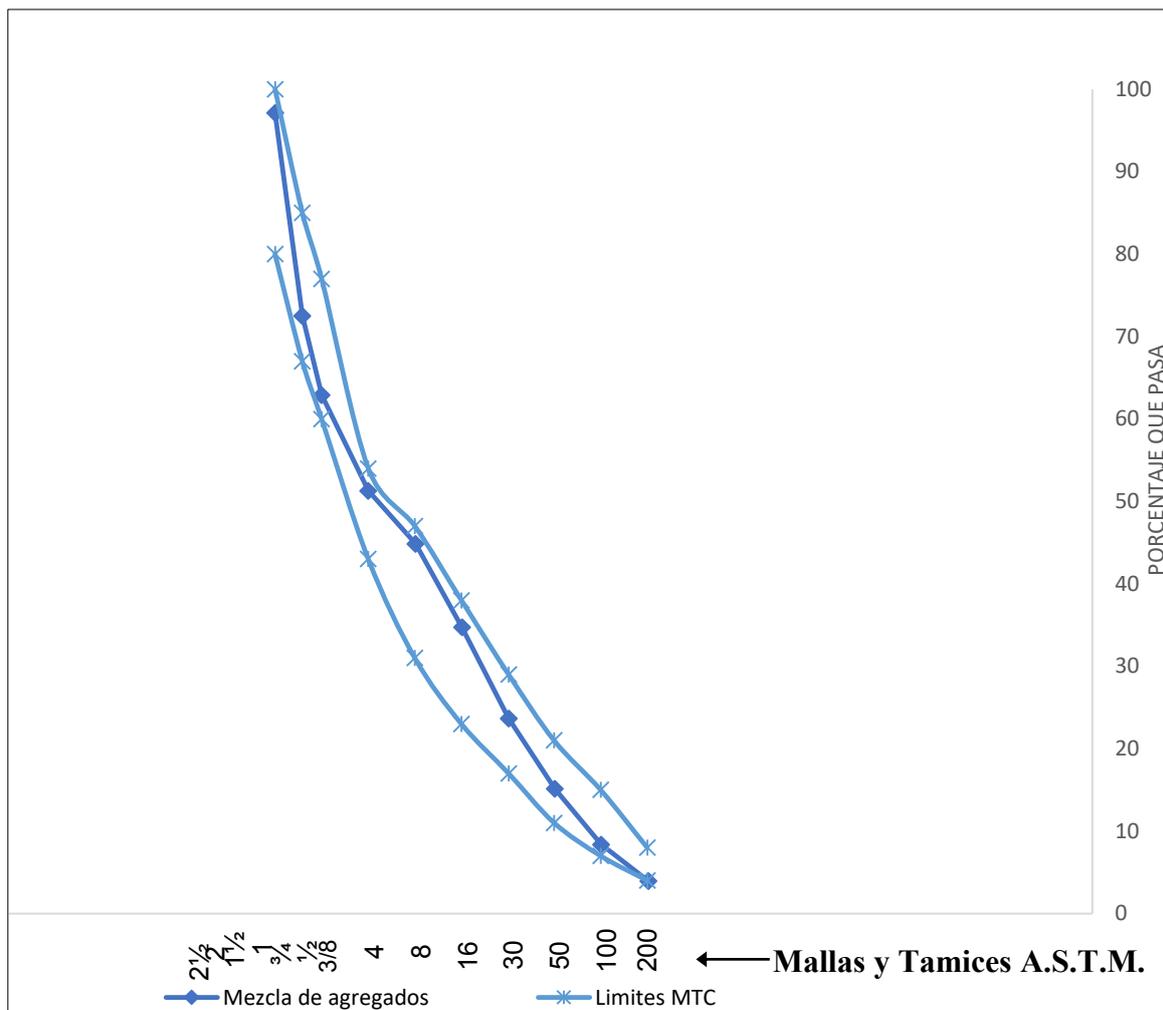


Figura 19. Curva granulométrica de la combinación de agregados.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta la caracterización del agregado grueso y fino en la Tabla 2. Se incluyen también los límites sugeridos por los estándares ASTM, AASHTO y el manual de Ensayo de Materiales del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTC, 2013).

El agregado grueso es un material denso y de baja porosidad con resistencia positiva frente a acciones mecánicas. Está compuesto por sílice y por tanto es un material resistente a la abrasión (Chávez, 2016). Se determinó además el peso específico (G_{sb}), la absorción, la presencia de partículas planas y alargadas y las pérdidas por abrasión, resultados que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización de los agregados naturales usados para las mezclas en caliente

| Ensayo | Norma | Piedra triturada | Arena natural | Lim. MTC |
|--------------------------|--------------|-----------------------------------|---------------|------------|
| Gsb (AG) | ASTM C 127 | 2.666 | 2.541 | - |
| Absorción (%) | ASTM C 127 | 1.1 | 1.27 | - |
| Planas y alargadas (%) | ASTM D 4791 | 0 ^a (2/0) ^b | - | Max. 10 |
| Caras Fracturadas (%) | ASTM D 5821 | 94/84 | - | Min. 85/50 |
| Abrasión Los Ángeles (%) | ASTM C 131 | 12.62 | - | Max. 40 |
| Durabilidad (%) | AASHTO T 104 | 0.8 | 8.32 | Max. 18 |
| Angularidad | AASHTO T 304 | - | 44 | Min. 30 |
| Equivalente de arena (%) | AASHTO T 176 | - | 37 | Min. 60 |
| Adherencia Riedel-Weber | MTC 519 | - | 4 | Min. 4 |

^a porcentaje de partículas chatas y alargadas a la vez

^b porcentaje de partículas sólo chatas / porcentaje de partículas sólo alargadas

Fuente: Elaboración Propia

En general se puede observar que las características del agregado grueso triturado cumplen con todos los requerimientos mínimos para ser parte de una MAC. La gravedad específica es de 2.67 y corresponde con un valor apropiado para un agregado grueso. El resultado a la abrasión es de 12.62, lo que indica que en el proceso de manipulación y producción no presentará rupturas en las partículas y tendrá una buena resistencia inicial. Según su porcentaje de caras fracturadas de 94/84 indica que tendrá una resistencia frente a la deformación permanente media. El índice de partículas planas y alargadas define a este agregado con un buen empaquetamiento, por lo que se espera que se compacte fácilmente, y por último es un agregado con un resultado de 0.8 en el ensayo de durabilidad al sulfato de magnesio, por lo que presenta una alta resistencia frente a la intemperie.

La gravedad específica del agregado fino es de 2.54. La angularidad es de 44, valor que se considera aceptable, ya que, aunque está un punto por debajo del valor mínimo exigido por AASHTO, está dentro del rango exigido por el MTC. Esto significa que la mezcla asfáltica podría tener problemas de ahuellamiento o presentar deformación plástica y, eventualmente, un elevado valor de flujo en el ensayo Marshall.

Tiene un equivalente de arena de 37, lo que indica que tiene un alto contenido de polvo o arcilla puede presentar problemas de adherencia con el asfalto. Este resultado es coherente con la descripción de la cantera hecha anteriormente (Chávez, 2016), pues ya se presumía la

presencia de arcillas. Esto también se verifica al observar el resultado de la adherencia Riedel Weber, pues alcanza un valor bastante bajo de 4, que es el mínimo exigido por el MTC.

3.2 Valva de la concha de abanico triturada

Las valvas de concha de abanico fueron traídas de uno de los botaderos municipales ubicados en la provincia de Sechura, donde se arrojan estos residuos. Actualmente existen dos botaderos de valva de concha de abanico donde se pueden extraer estos residuos y se encuentran en la ciudad de Sechura, provincia de Piura. En la Figura 20 se muestra a mayor detalle su ubicación.

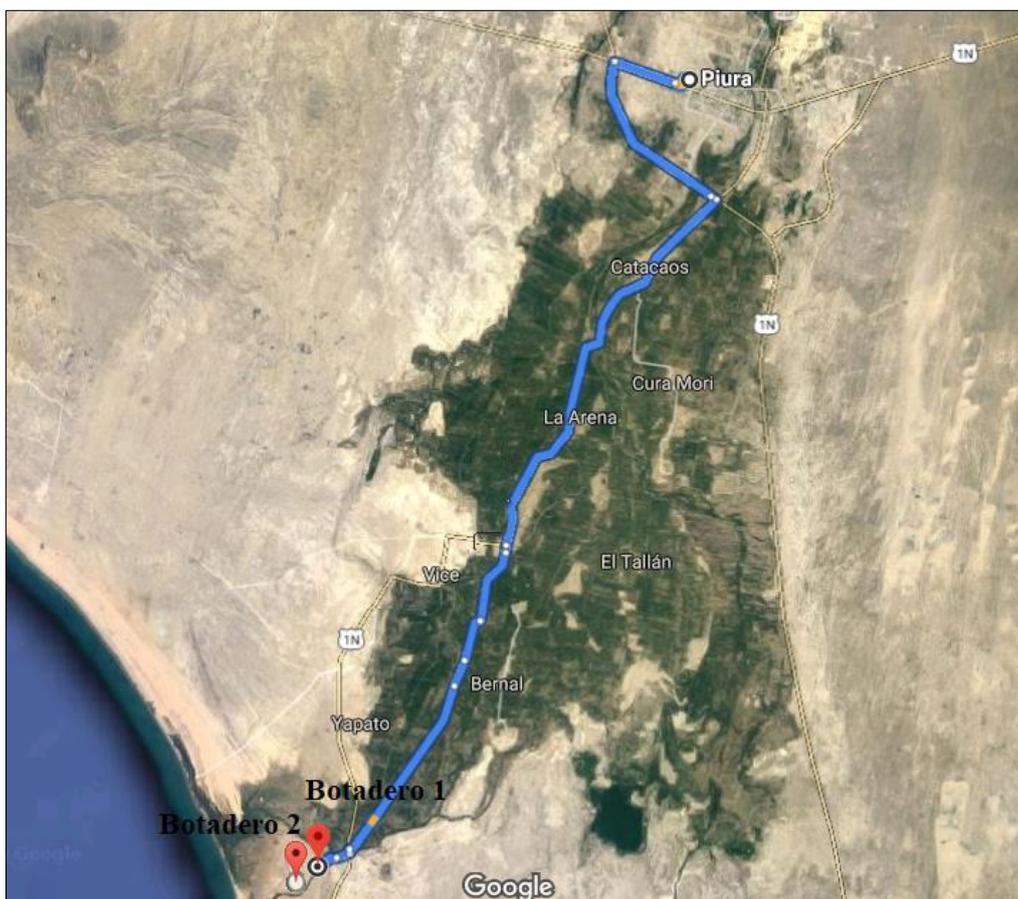


Figura 20. Ubicación de los botaderos 1 y 2, Fábrica “Productos del Norte” y playa Chulliyachi - Sechura.
Google Maps.

La concha de abanico se caracteriza por ser un molusco filtrador de dos valvas o caparazones, conformado principalmente por carbonato cálcico. Esta especie es conocida científicamente con el nombre de “*Argopecten Purpuratus*”, perteneciente a la familia “*Pectinidae*”. Químicamente, la valva de la concha de abanico es mayoritariamente carbonato

de calcio, lo cual se verifica en el análisis químico, donde el calcio está expresado como óxido de calcio (Tabla 3). Esto confirma su naturaleza calcárea.

Tabla 3. Composición química de la valva de concha de abanico triturada [CAT].

| Tamiz(mm) | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | MgO | Fe ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | SO ₃ | L.I.* |
|-----------|------------------|-------|--------------------------------|------|--------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|-------|
| CAT | 0.10 | 53.70 | 0.10 | 0.18 | 0.03 | 0.50 | 0.01 | 0.32 | 44.4 |

* Pérdida por ignición.

Fuente: Varhen, Carrillo, & Ruiz, 2017

La valva de la concha en estado natural presenta una textura lisa en su interior y una textura rugosa en su exterior con pequeños surcos (Figura 21 a). Las valvas pasan por un proceso de limpieza, de tal forma que se eliminan residuos orgánicos, luego se dejan secar y pasan a ser trituradas a través de un molino industrial de granos, las partículas tienen forma variada e irregular y se rompen siguiendo planos de foliación de la formación de la valva, generando partículas angulosas y algo laminares (Figura 21b). Luego se separan por tamaños a través del tamizado con tamices usados en los ensayos granulométricos en el agregado fino. Este procedimiento se realiza para obtener la misma granulometría de los agregados de la cantera de Cerro Mocho, de tal manera que no sea una variable más para analizar.

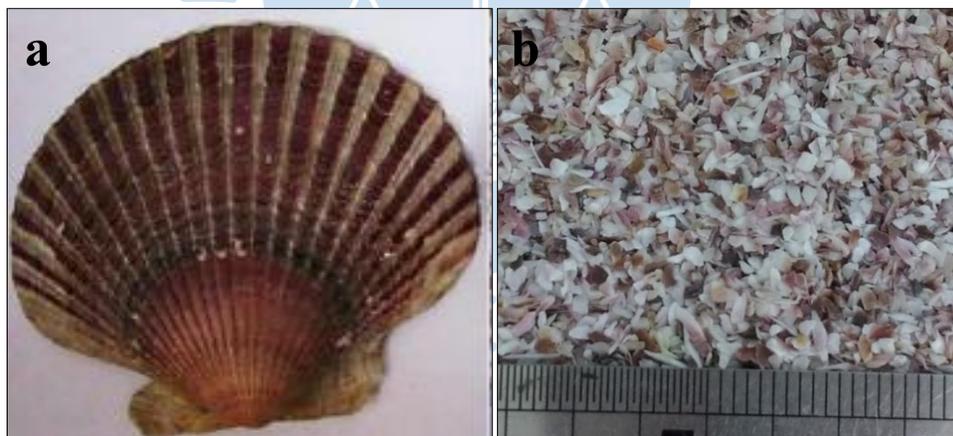


Figura 21. Concha de abanico a) estado natural y b) triturada

Fuente: Saavedra, 2016

Posteriormente se evaluaron las propiedades físicas de la valva, tratada como un agregado fino. En la Tabla 4 se resumen los resultados de la caracterización de la valva triturada. Los tamaños de las partículas de RCA utilizadas para estos ensayos fueron a partir del tamiz N°4 (4.76 mm), es decir partículas que trabajan como agregado fino.

En la Tabla 4 se observa una gravedad específica de 2.44 para la valva, que es menor a la del agregado fino. Esto indica que las mezclas realizadas con este material tendrán mayor volumen a las mezclas convencionales, pues los reemplazos fueron realizados por peso. La angularidad de 53 es un valor alto, lo que es muy probable que las mezclas tengan buen desempeño frente al ahuellamiento. Tiene un equivalente de arena de 88, indicando que tiene un bajo contenido de polvo o arcilla, esto se debe a que las valvas fueron lavadas, lo que indica que difícilmente tendrá problemas de adherencia y se demuestra en el ensayo de Riedel-Weber con un valor alto de 8, lo cual traerá mezclas con buena durabilidad. Este último resultado coincide con aquellos medidos por Morante (2014).

Tabla 4. Características de la valva triturada para mezclas asfálticas.

| Ensayo | Norma Princ. | RCA | Lim. MTC | Lim. AASHTO |
|--|--------------|-------|----------|-------------|
| Gsb | ASTM C 127 | 2.442 | - | - |
| Absorción (%) | AASHTOT 84 | 0.80 | - | - |
| Durabilidad al sulfato de magnesio (%) | AASHTOT 104 | 3.26 | - | - |
| Angularidad | AASHTOT 304 | 53 | Min. 30 | Min. 45 |
| Equivalente de arena (%) | AASHTOT 176 | 88 | Min. 60 | Min. 50 |
| Adherencia Riedel-Weber | MTC 519 | 8 | Min. 4 | - |

Fuente: Ensayos LEMC

La caracterización confirma que la valva triturada no solo cumple con los requisitos mínimos exigidos por el MTC y AASHTO para agregados finos en mezclas asfálticas, sino que supera los índices de angularidad y de limpieza del agregado mineral. La forma de rotura de la valva tiende a la foliación. Su alto equivalente de arena y elevado valor de adherencia en la prueba Riedel-Weber indica que se trata de un agregado limpio y con una muy buena adherencia con el ligante asfáltico.

Se realizó un análisis visual de la forma de las partículas de la valva según los tamaños de trituración (Figura 22). Las partículas entre los rangos de 2.38 mm a 0.3 mm tienden a poseer una forma cuadrada, angularidad considerable en sus bordes y textura rugosa. Entre los rangos de 0.3 mm a 0.15 mm la forma es más acicular, con mayor angularidad en sus bordes y textura rugosa. Las partículas entre los rangos de 0.15 mm a 0.075 mm poseen forma cúbica similar a la de un polvo, poca angularidad y menor textura que el anterior rango mencionado.

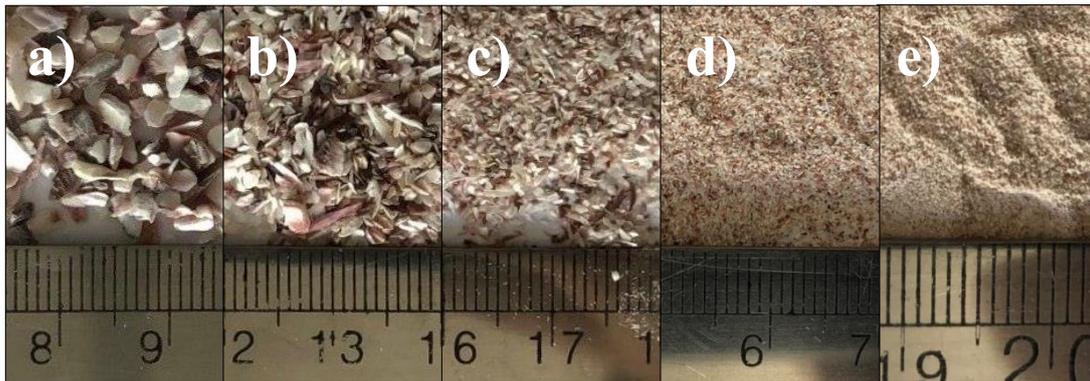


Figura 22. Partículas de concha triturada en los tamaños usados. a) 2.38 mm – 1.20 mm; b) 1.20 mm – 0.60 mm; c) 0.60 mm – 0.30 mm; d) 0.30 mm – 0.15; e) 0.15 mm – 0.075 mm
Fuente: Elaboración propia.

3.3. Ligante asfáltico

El ligante asfáltico utilizado corresponde con el cemento asfáltico comercializado en la región, con un grado de penetración PEN 60-70. Se trata de un cemento asfáltico convencional, sin aditivo modificador de adherencia. Por su naturaleza, tiene un pH ácido. Las características ofrecidas por el fabricante se muestran en la Tabla 5

Tabla 5. Propiedades características del asfalto para pavimentación producido por PETROPERU, usado en la presente investigación

| Ensayo | Unidad | Resultados | Norma |
|--------------------------------|-------------------|------------|---------------|
| Penetración (100g, 5s, 25°C) | 0.1 mm | 69 | ASTM D5-73 |
| Penetración (200g, 60s, 4°C) | 0.1 mm | 50 | ASTM D5-73 |
| Ductilidad (25°C, 5 cm/min) | cm | >150 | ASTM D113-79 |
| Solubilidad en tricloroetileno | % masa | 99.3 | ASTM D2042-76 |
| Punto de ablandamiento | °C | 49 | ASTM D36-76 |
| Punto de inflamación | °C | 300 | ASTM D92-78 |
| Pérdida por calentamiento | % masa | 0.11 | ASTM D1754-78 |
| Gravedad específica (25°C) | g/cm ³ | 1.086 | ASTM D70-76 |
| Viscosidad cinemática a 135°C | cSt | 350 | ASTM D2170-85 |

Fuente: Elaboración propia

3.4. Agregado fino de las combinaciones agregado-valva

Los tres agregados finos denominados A1, A2 y A3 fueron caracterizados como agregado fino. La primera observación fue la forma de la partícula de valva en los rangos de tamaños usados para el reemplazo.

En el agregado A1, la valva seleccionada entre los tamices No. 8 y No. 50 (1.20 mm y 0.30 mm) presenta una forma claramente angulosa, casi como agujas. Esta forma es

denominada acicular. En el agregado A2, la valva comprendida entre los tamices No. 50 y No. 100 (0.30 mm y 0.15 mm), tienen una forma casi esférica y otras, finamente aciculares. Finalmente, en el agregado A3, la valva con tamaños de partículas entre los tamices No. 100 y No. 200 (0.15 mm y 0.075 mm), además de ser muy pequeñas tienden a ser casi cúbicas.

La forma de las partículas de arenas reemplazadas y sus correspondientes de las valvas se muestran desde la Figura 23 hasta la Figura 27. Se puede observar un cambio significativo en la forma de la partícula, por lo que se estima que habrá un cambio significativo en el desempeño de las MAC.



Figura 23. Agregados que pasan el tamiz N°8 y se retienen en el tamiz N° 16: a) agregado natural y b) valva triturada
Fuente: Elaboración propia.

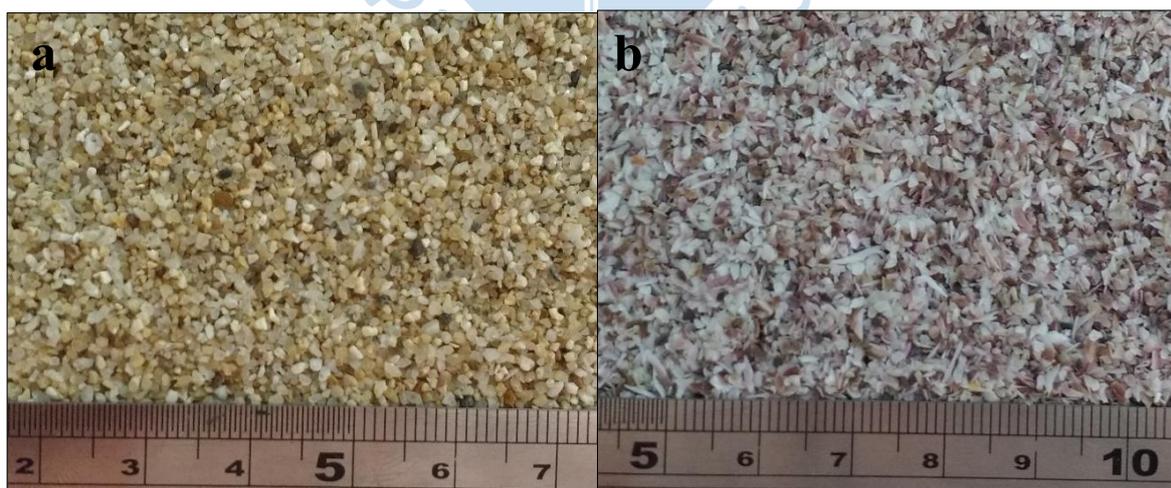


Figura 24. Agregados que pasan el tamiz N° 16 y retienen en el N° 30 : a) agregado natural y b) valva triturada

Fuente: Elaboración propia.

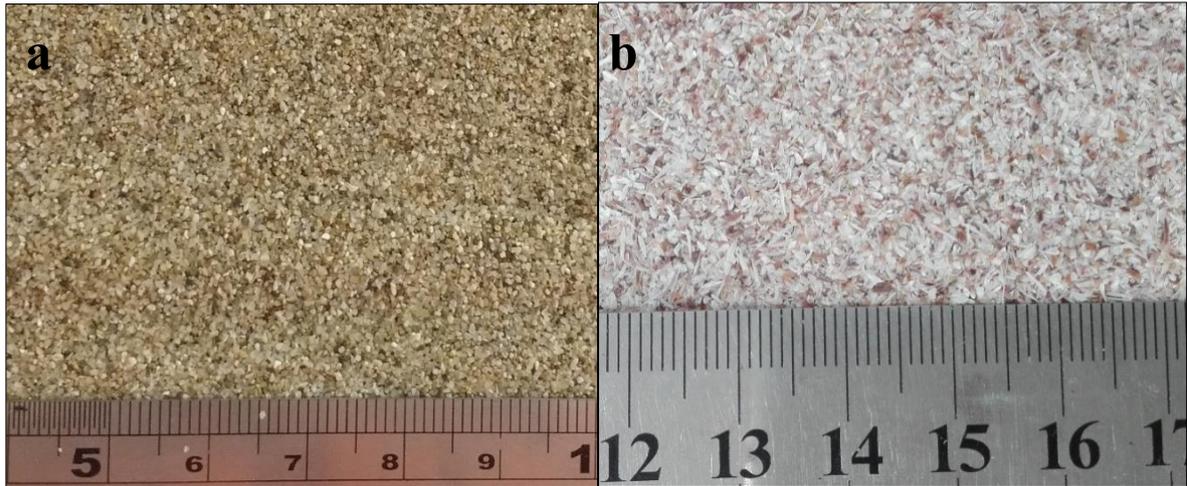


Figura 25. Agregados que pasan tamiz N° 50 y retienen N° 100: a agregado natural y b valva triturada
Fuente: Elaboración propia

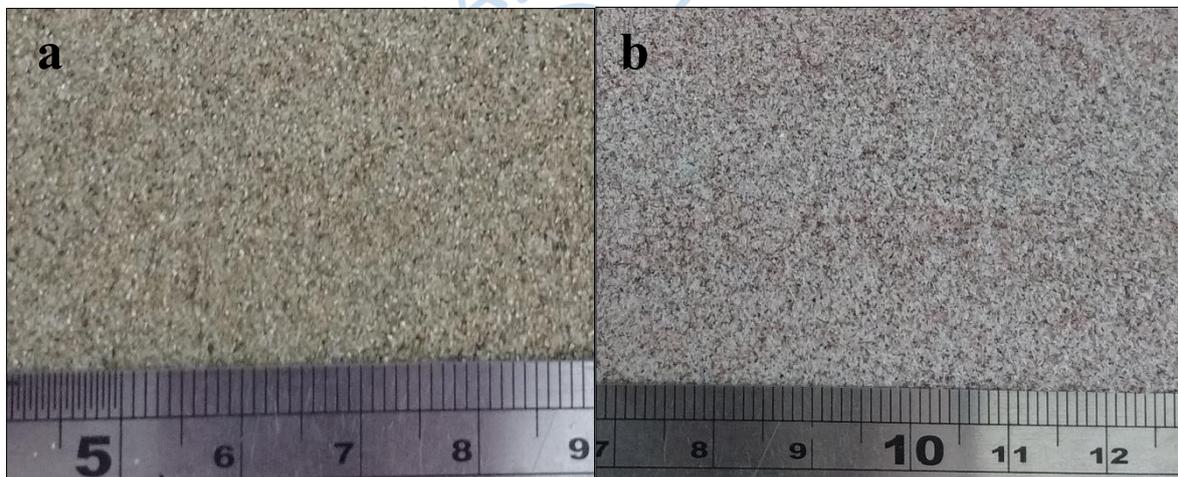


Figura 26 Agregados que pasan tamiz N° 30 y retienen N° 50 : a agregado natural y b valva triturada

Fuente: Elaboración propia



Figura 27. Agregados que pasan el tamiz N° 100 y retienen en el N° 200: a) agregado natural y b) valva triturada.

Fuente: Elaboración propia.

Si bien el reemplazo de la arena en cada rango es del 100%, cada rango de partículas representa una porción diferente del agregado global. Por lo tanto, al momento de constituir el agregado global, que incluye el agregado grueso, la cantidad total de valva respecto al agregado total será diferente. Las combinaciones de los agregados A1, A2 y A3 con el agregado grueso se han denominado mezclas M1, M2 y M3, respectivamente. En la Tabla 6 se muestran las cantidades de valva respecto al total del agregado global, en peso.

Tabla 6 Porcentaje de valva respecto al total del agregado global, para cada tipo de mezcla evaluada.

| Combinación | M1 | M2 | M3 |
|-------------|-----|----|----|
| % Valva | 30% | 7% | 4% |

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros característicos de las mezclas de agregados se muestran en la Tabla 7. Se observa que la gravedad específica disminuye conforme disminuye el porcentaje de reemplazo de la valva, esto es provocado por el reemplazo de partículas de arena por valva que posee menor gravedad específica. La angularidad es un factor predominante en el efecto del ahuellamiento y para cada combinación del agregado fino producirá diferentes valores, el mayor valor de angularidad es producido por A1, los resultados son influenciados por la forma de los agregados, pues la combinación de A2 posee mayor porcentaje de partículas de RCA cuadradas y A1 posee RCA más acicular. Los valores del peso unitario compactado (PUC) en las combinaciones son menores con respecto al agregado fino sin RCA, incrementando el porcentaje de vacíos, esto se debe a la forma de las partículas de valva y a su densidad, se observa que A1 posee menor PUC y mayor angularidad. Sin embargo, no indica necesariamente una falta de trabazón o puntos de contacto deficiente. En Figura 28 se observa la configuración de los agregados finos resultantes de las combinaciones agregado-valva (A1, A2 y A3), compactados a su máximo peso unitario, a través de un depósito transparente, notándose que sí existe un suficiente contacto entre las partículas.

Tabla 7. Parámetros característicos de las combinaciones de agregado fino.

| COMBINACIONES | Tamaño de Reemplazo (mm) | Gravedad específica GS | Angularidad (%) | PUC (kg/m ³) |
|-----------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|--------------------------|
| Agregado fino sin RCA | -- | 2.54 | 42.9 | 1724 |
| A1 | 2.38 - 0.30 | 2.51 | 50.4 | 1495.85 |
| A2 | 0.30 - 0.15 | 2.50 | 44.6 | 1644.25 |
| A3 | 0.15 - 0.075 | 2.47 | 41.7 | 1701.6 |

Fuente: Elaboración propia

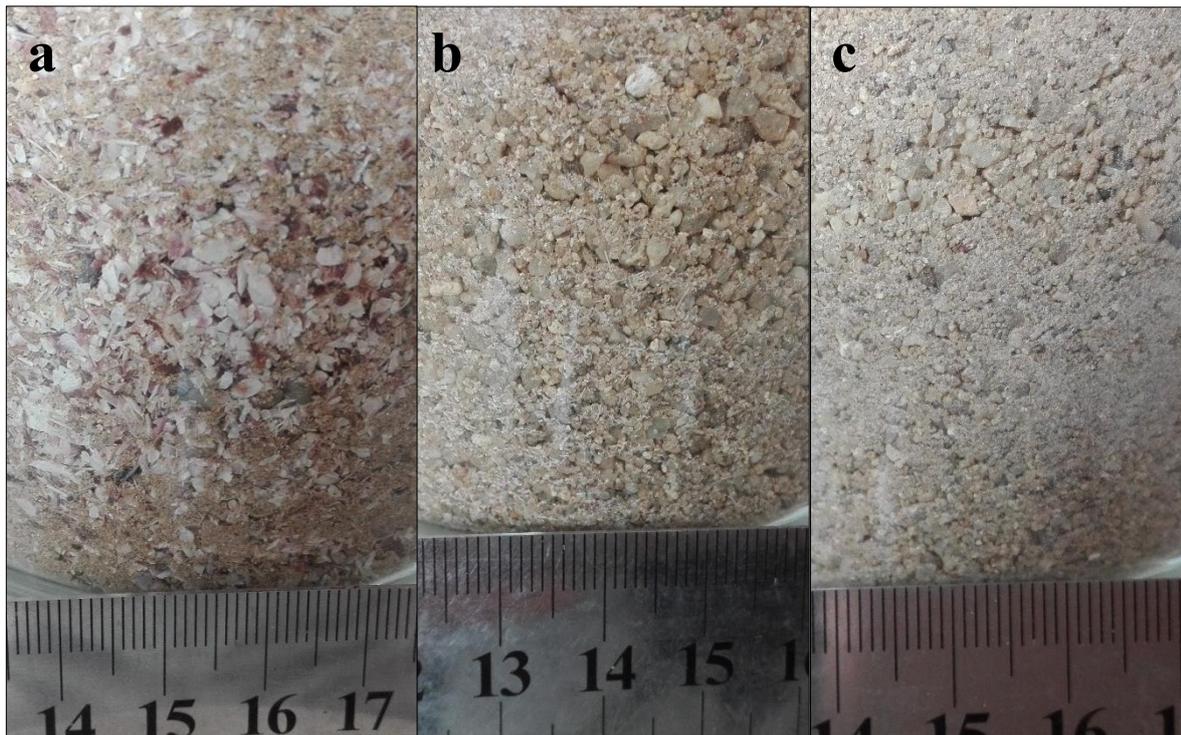


Figura 28. Ensayo PUC de cada una de las combinaciones: a combinación A1, b combinación A2 y c combinación A3.

Fuente: Elaboración propia

3.5 Mezclas asfálticas.

Una vez obtenidas todas las combinaciones, se procedió a elaborar las probetas de asfalto. Se usaron los diseños de mezcla obtenidos por Chávez (2019) quien diseñaron las mezclas asfálticas con el método Marshall, regido mediante la norma MTC E550 que permite determinar el contenido óptimo de ligante para cada agregado global.

Sin embargo, las probetas sometidas a los ensayos de durabilidad requieren tener un porcentaje de vacíos entre 7% - 9%. Como se explicó en el capítulo 1, cuando las mezclas de asfalto son colocadas en el pavimento son compactadas con un porcentaje de vacíos de 8% debido a la densificación que sufrirán en los primeros años. Estos porcentajes de vacíos se lograron modificando la energía de compactación reduciendo el número de golpes respecto al número sugerido por Marshall (originalmente 75 golpes). La Tabla 8 muestra el porcentaje de vacío para cada tipo de mezcla.

Tabla 8. Porcentaje de vacíos de las mezclas usadas en la investigación

| Mezcla | MP | M1 | M2 | M3 |
|------------|------|-------|------|------|
| Vacíos (%) | 7.00 | 10.23 | 6.70 | 7.14 |

Fuente: Ensayos LEMC

Durante la conformación de las mezclas, la mezcla M1 requirió 75 golpes, debido a su empaquetamiento difícil como consecuencia del elevado contenido de valva angulosa respecto a las otras dos muestras. La mezcla M3 fue la que presentó mayor facilidad de compactar; con 25 golpes se logró estar en el rango de vacíos sugerido.





Capítulo 4

Resultados de los ensayos de desempeño

4.1. Deformación permanente

En la Figura 29 se ha graficado la deformación permanente unitaria en el tiempo para las mezclas evaluadas. Se puede observar que la mezcla MP presenta una mayor deformación plástica. Esto indica una tendencia de la mezcla de llegar al creep de una manera más rápida y pronunciada, es decir con mayor deformación.

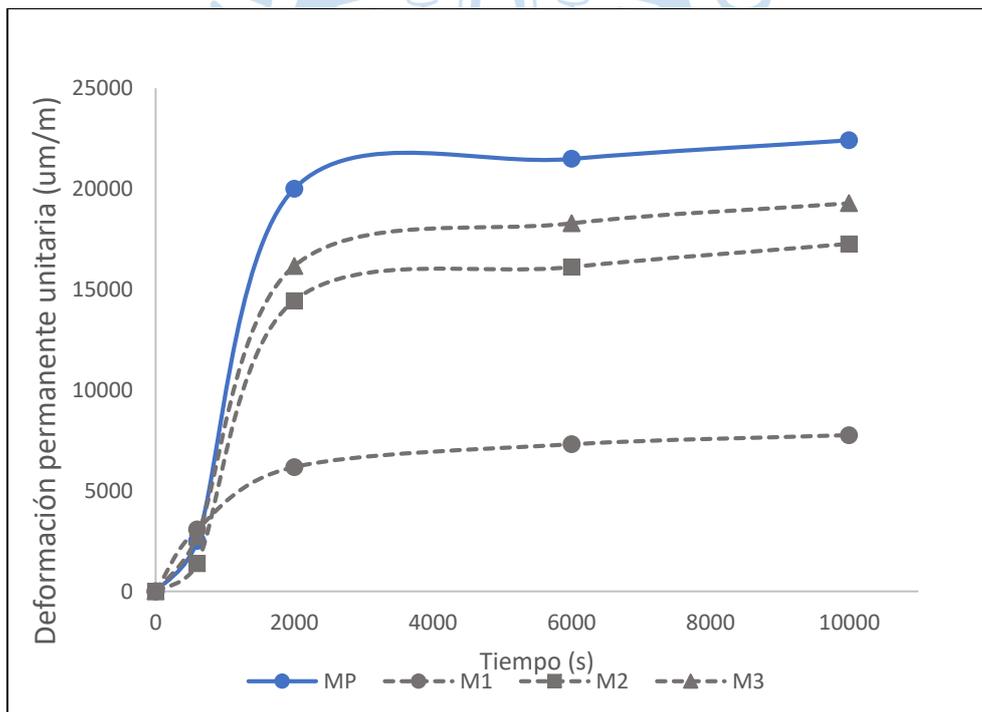


Figura 29 Variación de la deformación permanente unitaria con el tiempo para las mezclas evaluadas.

Fuente: Elaboración propia

La mezcla M1 es la que mejor se muestra ante la deformación permanente. Como la mezcla M1 presenta un alto contenido de vacíos (Tabla 8) y una alta angularidad (Tabla 7), a lo cual se añade la textura de la valva en el agregado fino, se tiene un mayor empaquetamiento. La necesidad de mayor energía de compactación, es decir un gran número de golpes para reducir su contenido de vacíos indica que la mezcla puede soportar el efecto de mayores niveles de tráfico.

La mezcla M2 presenta una mayor deformación permanente con respecto a la mezcla M1, probablemente por su menor valor de angularidad (valor de 44.6 en la Tabla 7), aunque es menor que la de la mezcla patrón sin valva. Aun así, sigue siendo apropiada para pavimentos con tráfico pesado y con buen desempeño a largo plazo. Esta mezcla muestra una fase secundaria larga en su curva de deformación, sin cambios dramáticos al final de esta fase, ofreciendo un buen comportamiento frente al ahuellamiento.

En la Tabla 9 se resumen los valores de deformación permanente finales para cada mezcla, convertidos en mm. En general, estos resultados confirman que uno de los factores más influyentes del ahuellamiento es la angulosidad de las partículas. La mezcla M3 presenta una mayor deformación con respecto a las mezclas M1 y M2 por tener una menor angulosidad. Aunque es menor que las otras dos mezclas, aún se mantiene categorizada como adecuada para pavimentos con tráfico pesado y por eso se observa el mejor desempeño que la mezcla MP. La evolución de la deformación permanente en el tiempo muestra una mayor deformación que la mezcla M2, pero con un comportamiento similar bajo una misma pendiente de cambio al final de la curva, igualmente prolongada.

Tabla 9. Deformaciones permanentes medidas en las mezclas.

| Mezcla de agregados | MP | M1 | M2 | M3 |
|------------------------|------|------|------|------|
| Deformación creep (mm) | 1.52 | 0.55 | 1.16 | 1.29 |

Fuente: Elaboración propia

La mezcla M1, con mayor tamaño de trituración, ofrece la menor deformación permanente. Al parecer, mientras menor es el tamaño de partículas, la deformación permanente es mayor y se asemeja más a la mezcla patrón. Como la angularidad y el equivalente de arena de la valva triturada son mucho mayores a los de la arena natural, se garantiza una menor deformación permanente respecto a las muestras de control. Además,

otras de las propiedades del agregado fino que tienen mayor influencia ante la deformación permanente son la forma y la textura, que también suman en la garantía de una menor deformación permanente.

Tomando en cuenta que la valva reemplaza sólo una fracción de la arena, se relacionó la angularidad en el agregado fino para cada combinación (Tabla 7) con la deformación permanente de las mezclas para los 10000 s. En la Figura 30 se muestra la relación entre estas dos variables. Se verificó que hay una reducción en la deformación permanente cuanto mayor es la angularidad del agregado fino mezclado y por ello, la mezcla M1 que ofrece la mayor angularidad tiene una menor deformación permanente. La mezcla M3 tiene una angulosidad menor que la mezcla patrón sin valva, pero sigue teniendo una menor deformación que la mezcla MP. En este caso, ya no es la angularidad la que determina la deformación permanente sino quizás, la textura áspera de las mismas que genera una mayor dificultad de movimiento en la mezcla.

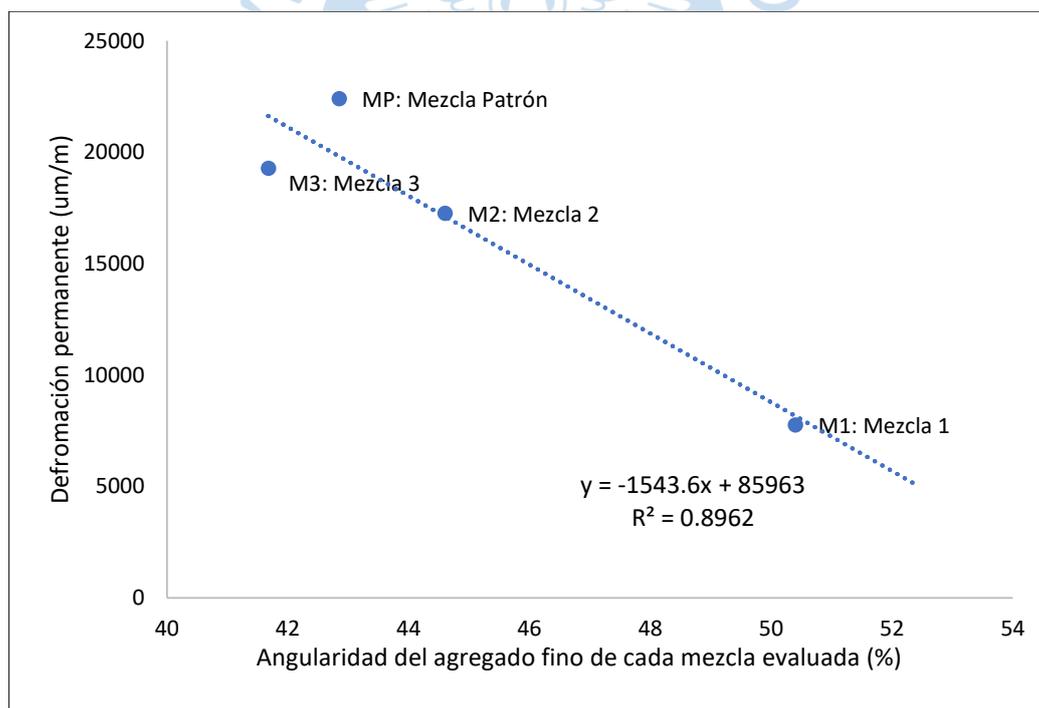


Figura 30. Variación de la deformación permanente con respecto a la angularidad del agregado fino global.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 31 se muestra la deformación elástica (recuperación) en el tiempo de cada mezcla, esta gráfica es obtenida con los datos de los valores arrojados del ensayo creep, donde

al inicio y al final de cada descanso (cuando la probeta ya no se encuentra sometida a carga) se tomaba lectura del dial para calcular la recuperación de la mezcla. Se puede observar que la mezcla MP muestra una mayor pendiente ascendente en sus recuperaciones, similar a la mezcla M3, a diferencia del resto de las mezclas que muestran una pendiente descendente. Esto se puede explicar porque en la mezcla MP no hubo reemplazos de valva triturada (limpia) por el agregado fino de la cantera Cerro Mocho. Además, influye que las mezclas con reemplazos, la forma, textura y energía superficial de los agregados aportan mayor rigidez a estas mezclas. Al parecer las mezclas M1 y M2 son más rígidas que las mezclas M3 y MP, por lo que ofrece mayor resistencia a las deformaciones elásticas y no adquiere notables deformaciones. Este comportamiento es coherente con la deformación plástica mostrada en la Figura 29.

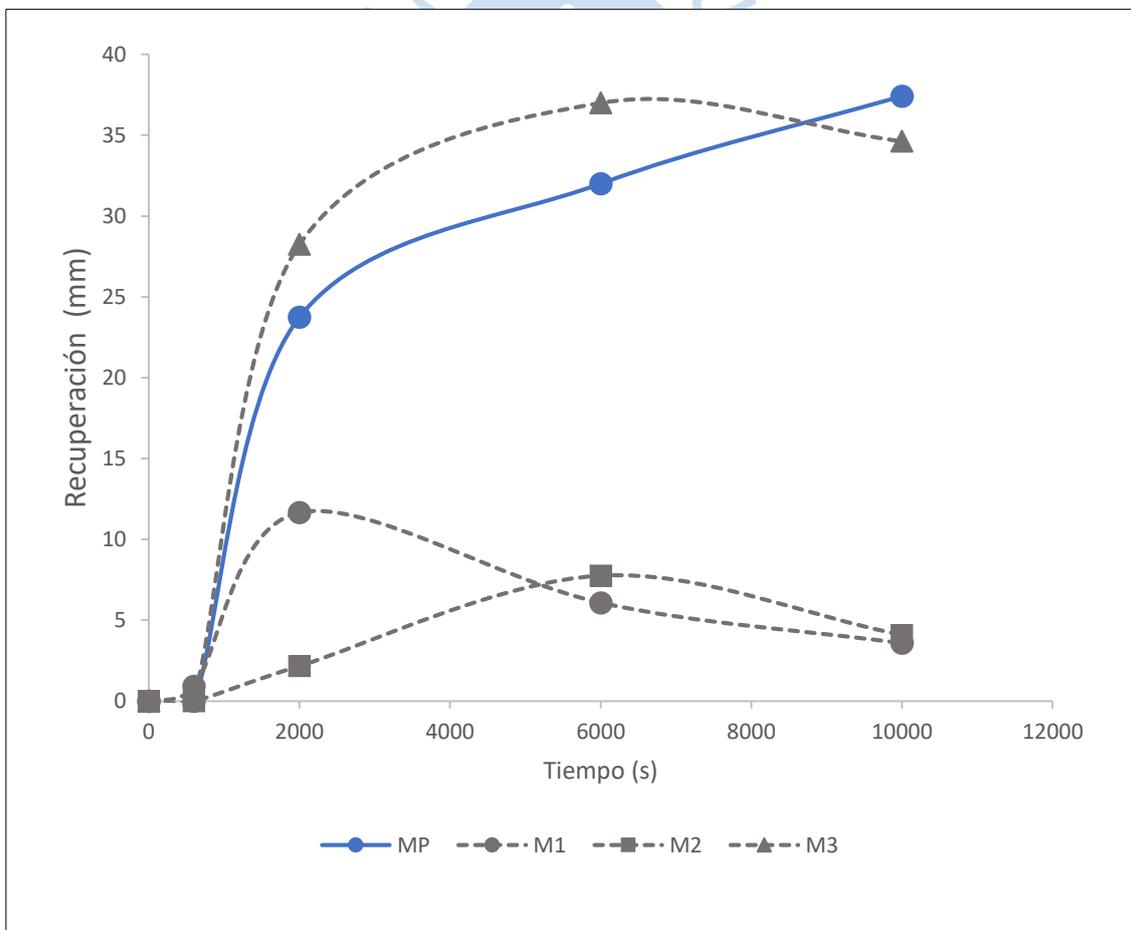


Figura 31. Recuperación de las mezclas evaluadas sometidas a carga estática.

Fuente: Elaboración propia

Esto quiere decir que la presencia de valva triturada en las mezclas asfálticas en tamaños medianos y grandes (2.38 a 0.3 mm y 0.3 a 0.15 mm) da lugar a mezclas rígidas,

mientras que en tamaños pequeños (0.15 a 0.075 mm), su efecto en la capacidad de deformación se reduce significativamente.

4.2. Resistencia frente a la humedad

En la Tabla 10 se muestran los valores registrados durante el ensayo Lottman para el patrón y para las tres mezclas de RCA. Los valores de saturación se encuentran entre 70 a 80% de la muestra patrón.

En la Figura 32 se ha graficado la resistencia a la tracción indirecta en las muestras, tanto en condición seca (resistencia seca) como en condición saturada (resistencia húmeda). Se observa que el resultado final de la resistencia a la tracción seca de las mezclas no es siempre mayor a la de la mezcla patrón. Según se observa, la resistencia a la tracción en condición seca se relaciona inversamente al tamaño de reemplazo de la valva: a mayor tamaño de la valva, menor resistencia a la tracción indirecta. La presencia de valva entre 2.36 mm y 0.30 mm (muestra M1) reduce casi en un 30% la resistencia a la tracción con respecto a la mezcla patrón, mientras que la muestra M3, con tamaños entre 0.15 mm y 0.074 mm, ocasiona un pequeño aumento de la misma resistencia con respecto a MP.

Tabla 10. Resultados del ensayo Lottman modificado.

| Probetas | MP | | | M1 | | | M2 | | | M3 | | |
|--------------------------|--------|-----|-----|--------|------|-----|--------|-----|-----|--------|-----|-----|
| % vacíos | 6.4 | 7.2 | 7.8 | 9.73 | 10.1 | 9.2 | 7.1 | 6.9 | 7 | 7 | 7.1 | 7.6 |
| Promedio seco | 7.14 | | | 9.66 | | | 7.02 | | | 7.24 | | |
| % vacíos | 6.9 | 7.1 | 7.8 | 10.2 | 9.78 | 8.9 | 6.8 | 7.2 | 7.1 | 7.2 | 7.2 | 7.6 |
| Promedio húmedo | 7.22 | | | 9.66 | | | 7.01 | | | 7.28 | | |
| Saturación (%) | 64.88 | | | 79.34 | | | 74.67 | | | 75.19 | | |
| Resistencia seca (kPa) | 662.32 | | | 480.34 | | | 618.95 | | | 673.77 | | |
| Resistencia húmeda (kPa) | 95.85 | | | 251.84 | | | 215.57 | | | 119.14 | | |
| TSR (%) | 14.47 | | | 52.43 | | | 34.83 | | | 17.68 | | |

Fuente: Elaboración propia

Esto también se puede explicar teniendo en cuenta que el ensayo para obtener los resultados de resistencia seca es el de tracción indirecta, con probetas que no han sufrido ningún tipo de condicionamiento previo. Lo mismo ocurre en el ensayo Marshall, donde las probetas son sometidas a una aplicación de carga rápida, y si bien son condicionadas, es un tiempo corto.

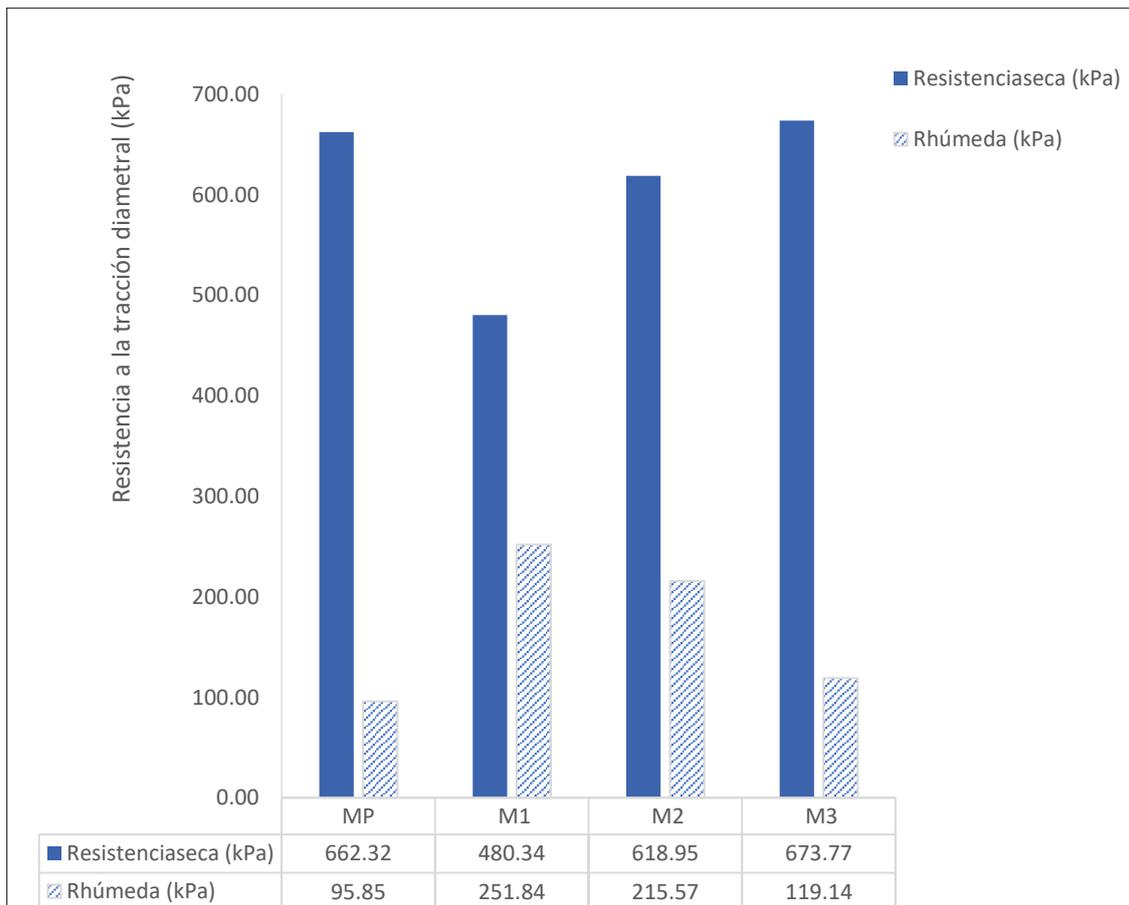


Figura 32. Resistencia a la tracción de las muestras secas (resistencia seca) y acondicionadas (resistencia húmeda).

Fuente: Elaboración propia.

Las mezclas con reemplazos de valva triturada en condiciones húmedas tienen mejores resistencias a la tracción, sobre todo si los reemplazos son de tamaños mayores. Esto se explica gracias a la interacción entre el asfalto y la valva, pues la valva prácticamente es un agregado limpio, mucho más que el agregado natural, pues el ligante tiene mayor facilidad de penetrar en las partículas. Por otro lado, se verifica también que la adhesión química existente entre la valva y el ligante ha sido determinante para resistir a la tracción en condiciones húmedas, pues la adhesión de la valva con el ligante es mayor que entre el ligante y el

agregado fino pétreo, ya que tiene mayor capacidad de no ser retirado de la superficie de la partícula en presencia de agua. Cuando existen reemplazos de agregado por valva se está mejorando la adhesión en árido-ligante. Esto se nota más en las mezclas con reemplazos mayores a 0.15 mm (M3).

Es importante recordar que la incorporación de las valvas en las mezclas supone un mayor contenido de asfalto (Chávez, 2019). Sin embargo, el contenido de asfalto no es un factor determinante para la durabilidad. Este contenido sólo asegura el adecuado recubrimiento de las partículas sin un exceso que lleve a aumentar la fluidez de la mezcla, y por tanto, a reducir su resistencia.

En la Figura 33 se observa que a mayor presencia de valva en las mezclas presenta un aumento de resistencia al agua, disminuyendo la susceptibilidad a la acción por humedad. El efecto es mayor cuando se usan reemplazos de partículas mayores a 0.3 mm (M1).

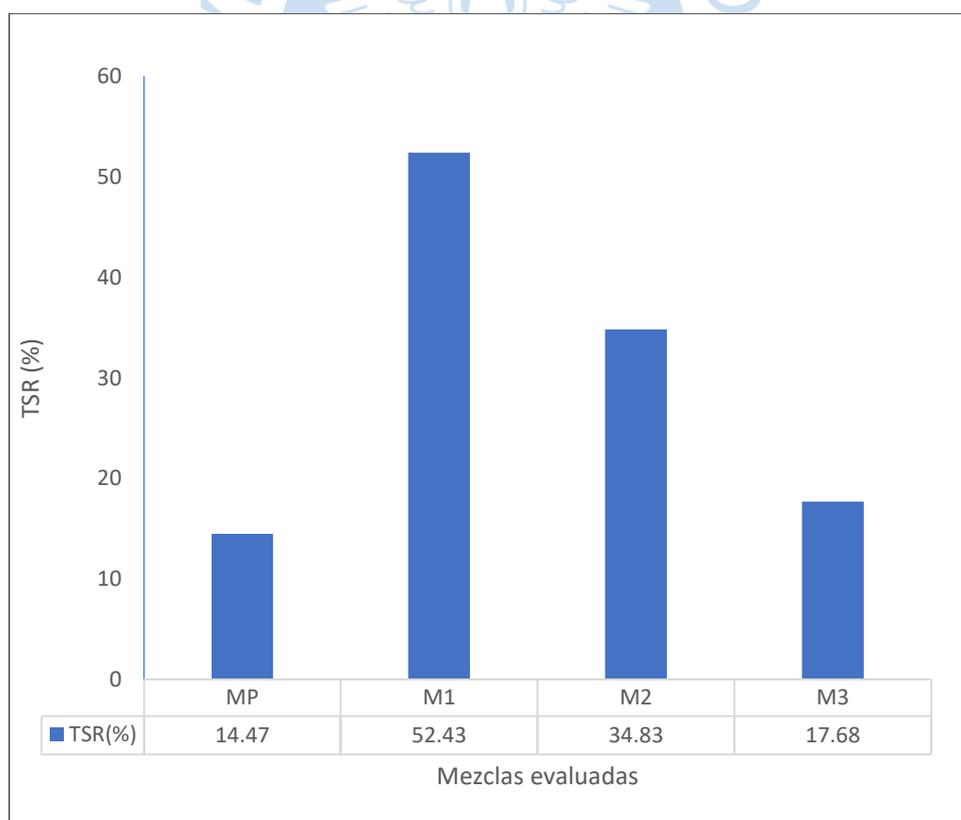


Figura 33. Porcentaje de relación a la resistencia a la tracción (TSR) por mezcla

Fuente: Elaboración propia

Se observa que todas las mezclas con reemplazos tienen un mayor TSR que la MP. Además, ninguna mezcla, ni aún la mezcla patrón MP alcanza un valor de TSR del 80%, que se sugiere como valor mínimo a cumplir en este ensayo para que una mezcla se considere resistente a la humedad. A pesar de eso, la mezcla que tiene la mejor relación de TSR es la mezcla M1, con valva triturada.

La presencia del agua juega un papel importante en las propiedades químicas del agregado y, como ya se ha mencionado, la valva triturada posee buenas propiedades que indican un buen comportamiento de adhesión con el asfalto. Por otro lado, cada tipo de mezcla modificada posee un porcentaje de valva diferente, que depende de la gradación a la que reemplazó. Se puede entonces relacionar el TSR con la cantidad de valva presente en la mezcla. En la Figura 34 se han graficado los porcentajes de reemplazos y los valores de TSR. Para la mezcla M1 los reemplazos se hicieron desde el porcentaje que pasa el tamiz N°8 (1.18 mm) y retiene tamiz N°50 (0.3 mm), lo que representa el 57.16%, porcentaje en peso del total de agregado fino (arena) usados en la mezcla asfáltica. Para la mezcla M2 se reemplazó el porcentaje que pasa el tamiz N°50 y retiene el tamiz N° 100 (0.15 mm), lo cual representa el 12.98% del total de agregado fino. Para la mezcla M3 se reemplaza el porcentaje que pasa el tamiz N° 100 y retiene el tamiz N°200 (0.075), lo que representa el 8.51%.

Al parecer, a mayor porcentaje de valva corresponde un mayor valor de TSR. Se observa en la Figura 34 una tendencia ascendente, mientras mayor sea el porcentaje de reemplazo, mayor es su valor de TSR. Como se ha mencionado ya, esto se explica por la naturaleza calcárea de la valva, que tiene una mayor adhesión química con el ligante de asfalto y, por tanto, un mejor comportamiento frente al agua. La adhesión química de la valva con el ligante disminuye la posibilidad de desprendimiento de las partículas de la mezcla, reduciendo así su vulnerabilidad al agua.

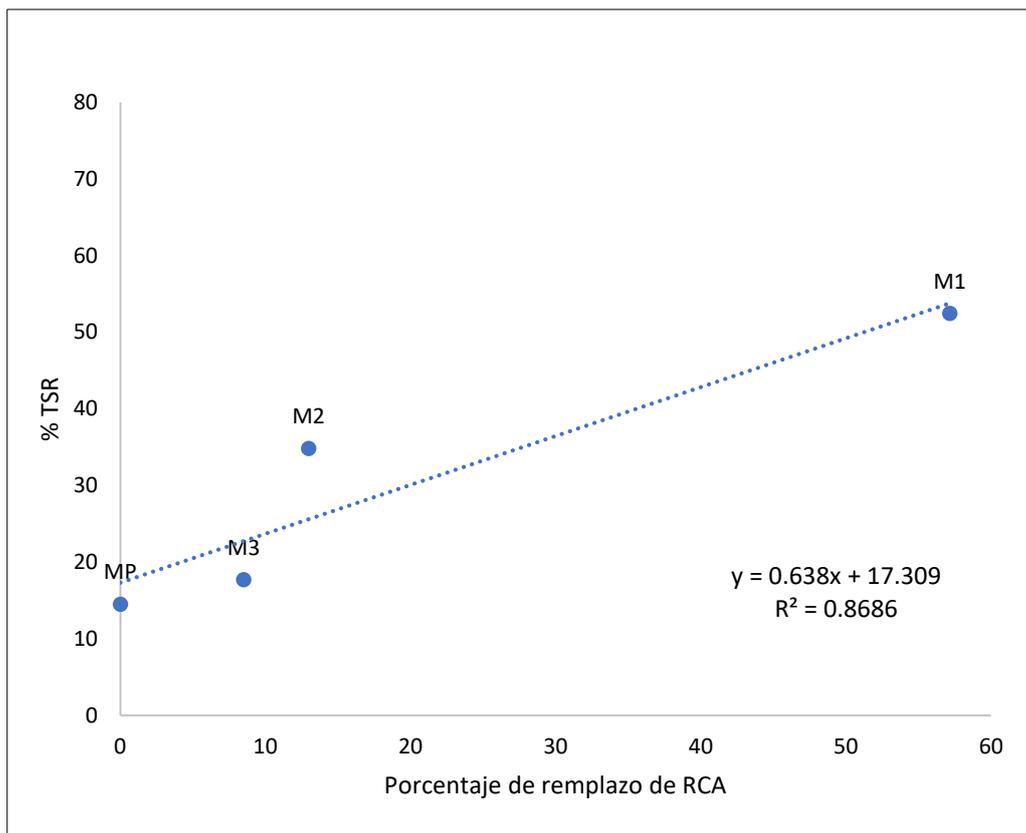


Figura 34. Porcentaje de remplazo de RCA versus %TSR

Fuente: Elaboración propia

Se verifica la adherencia al observar la condición de las probetas después del ensayo de tracción indirecta en condiciones secas y saturadas. En la Figura 35 se muestra la ruptura de la mezcla M2 que contiene agregado fino y valva triturada. Se observa que en condiciones secas el agregado grueso es el principal afectado, pues es el que sufre la falla por tracción. En condiciones saturadas, donde la mezcla sufre lavado se observa el desprendimiento del asfalto con el agregado pétreo. Sin embargo, no se observa un desprendimiento del asfalto con partículas de valva triturada.

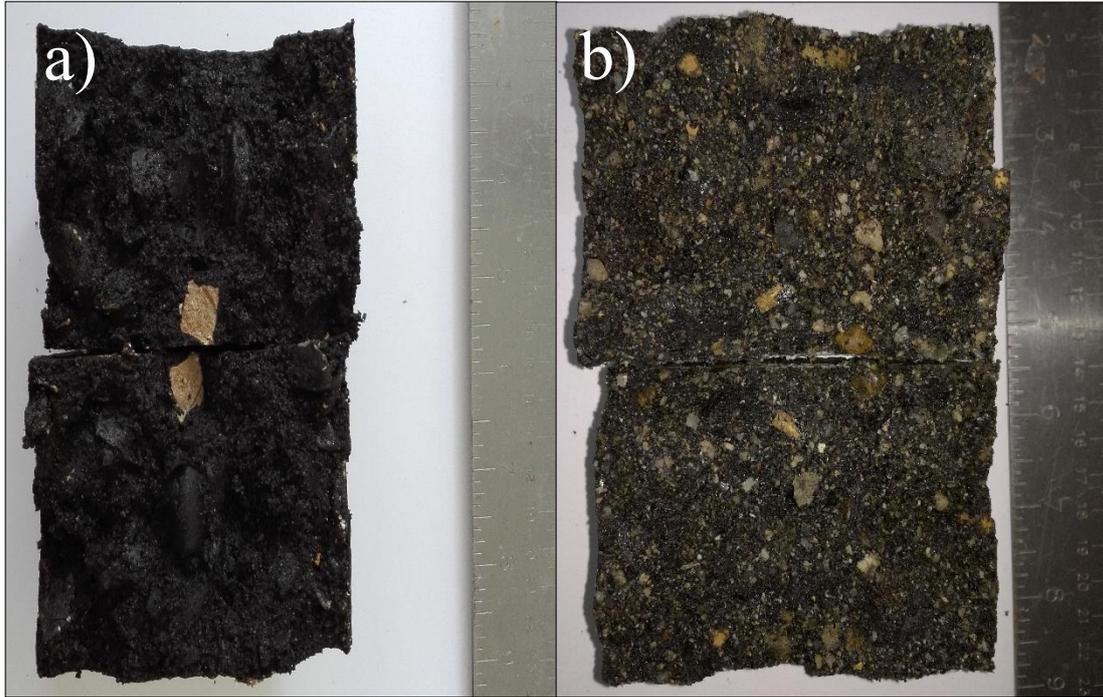


Figura 35. Ruptura ITS mezcla M2 a) condiciones secas b) condiciones
Fuente: Elaboración propia

4.3. Resultados de flujo Marshall vs deformación permanente.

Ambos ensayos miden deformaciones, pero, a diferencia del ensayo creep estático, las deformaciones en Marshall se dan en un período de tiempo corto.

Al contrastar los resultados del flujo Marshall con la deformación por creep estático a 600 s (Figura 36) se observa una coherencia, puesto que aquellas mezclas que tienen mayor flujo Marshall presentan también una elevada deformación por creep a 600 s. Al analizar los valores de creep a 10000 s, las mezclas con mayor flujo tienen menor deformación permanente.

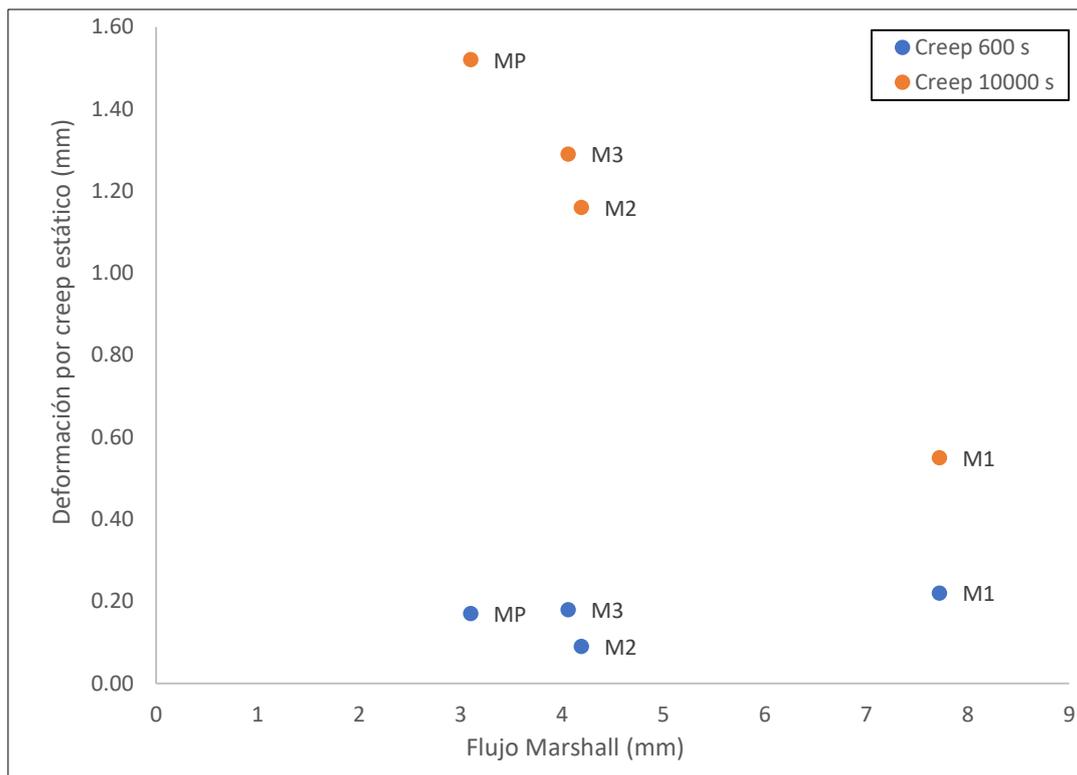


Figura 36. Relación entre la deformación por creep estático a 600 s y 10 000 s

Fuente: Elaboración propia

Esto pone en evidencia que el aporte de la valva a la deformación permanente se verifica en las etapas prolongadas de vida de la mezcla asfáltica y no es tan clara en las etapas iniciales de uso del pavimento.

Por otro lado, no se encontró relación clara entre la estabilidad Marshall y los resultados del ensayo de compresión diametral, tanto en condición seca como saturada. Lo que sí queda claro es que una buena estabilidad Marshall no garantiza un buen comportamiento del material ni en tracción y mucho menos en condiciones ambientales severas con exposición al agua.



Conclusiones y recomendaciones

El RCA puede ser utilizada como agregado fino en las mezclas asfálticas porque cumple adecuadamente con las propiedades del agregado natural para mezclas asfálticas densas y sin filler.

El reemplazo de arena por valva de concha de abanico contribuye a mejorar la resistencia de las MAC frente al daño por humedad. gracias a la mayor adhesión química con el ligante respecto al agregado natural usado en la presente investigación. Este efecto también tiene relación con el tamaño de la partícula que reemplaza y la cantidad de valva en el agregado total.

El reemplazo de agregado fino por valva disminuye la deformación permanente de las mezclas asfálticas. Esta mejora es mayor cuanto mayor es el tamaño de partícula de reemplazo, especialmente para los tamaños de valva entre 0.15 – 0.075 mm.

Las características de angularidad y limpieza de la valva respecto al agregado pétreo natural usado en la presente investigación son las razones por las que este residuo ofrece una mejor respuesta frente al daño por humedad y a la deformación permanente, logrando mezclas con mayor durabilidad

El uso de RCA en las mezclas resultó en un aumento de TSR en 262%, 141% y 22% para reemplazos de arena del 30%, 7% y 4%, en comparación con MP, para la calidad de los agregados usados en la presente investigación. Este hallazgo es significativo en Perú debido a sus altos niveles de precipitación.

También se puede concluir que, para los agregados naturales usados, las mezclas que presentan tamaños mayores de RCA como M1 (2.38 - 0.30mm) y M2 (0.30 – 0.15 mm) son más rígidas que las M3 (0.15 – 0.075 mm) y MP (sin RCA).

Considerando la calidad de los agregados naturales usados en la presente investigación, se confirma el potencial que tiene la valva de concha de abanico para ser usada como agregado en los materiales de pavimentación, combinándolo con materiales asfálticos. Esto abre una gran posibilidad de seguir investigando los efectos de la valva en las mezclas asfálticas con reemplazos en otro rango de gradaciones, con reemplazos totales de valva triturada como agregado fino o a otro tipo de mezclas, como las mezclas MAC graduadas-Gap, como *stone mastic asphalt* (SMA) o aplicando un diseño de mezclas con gradación abierta.



Referencias bibliográficas

Ahmed, K., Irfana, M., Ahmed, S., Ahmed, A., & Khattak, A. (2014). Experimental investigation of strength and stiffness characteristics of hot mix asphalt (HMA). *Fourth International Symposium on Infrastructure Engineering in Developing Countries*, 155 – 160.

Ali Topal & Burak Sengoz. (2004). Determination of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 19, 155-163.

Alvarez, A., & Caro, S. (2009). Determinación de la energía superficial libre de cementos asfálticos colombianos. *Ingeniería e Investigación*, 20-24.

Alvarez, A., & Ovalles, E. (2012). Análisis de sistemas asfalto-agregado a partir de mediciones de energía superficial libre. 114-118.

Arabani, M., Babamohammadi, S., & Azarhoosh, A. R. . (2014). Experimental investigation of seashells used as filler in hot mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 502-509.

Asphalt Institute. (1982). *Principios de Construcción de Pavimentos Mezcla Caliente en Caliente*. Lexington, KY: Administración Federal de Autopistas del departamento de transportes de los Estados Unidos .

Balaguer Camphius Enrique, J. L. (1979). *Firmes de carreteras. Tomos I y II*. Madrid: Servicio de Publicaciones E.T.S.I.C.C.P.

Barksdale, R. D. (1992). *Evaluation of Effects of Aggregates on Rutting and Fatigue of Asphalt*. Technical Report FHWA-GA-92-8812. Atlanta, Georgia: Georgia Department of Transportation.

Barrett, P. (1980). *The shape of rock particles, a critical review* (Vol. 27). Sedimentology.

Bhasin, A., Howson, J., Masad, E., Little, D. N., & Lytton, R. (2007). Effect of Modification on bond energy of asphalt binders. *Transportation Research Board*, 1-14.

Brown, E. R. (1990). *Density of Asphalt Concrete - How Much is Needed?* Alabama: National Center for Asphalt Technology, Report No. 903.

Brown, E. R., & Cross, S. (1992). *A National Study of Rutting in Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements*. Alabama: National Center for Asphalt Technology.

Carrillo, A., & Gamboa, M. (2007). *Estudio de la adhesión asfalto-agregado mineral de fuentes aluviales en la zona de Bucaramanga*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas.

Castañeda, D. (2017). *Análisis de la granulometría de la concha de abanico triturada para su uso como agregado en concretos*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil. Piura: Universidad de Piura.

Chavez, F. (2019). *Valoración de residuo de concha de abanico para uso como agregado en mezclas asfálticas en caliente*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil. Piura: Universidad de Piura.

Chávez, L. (2016). *Evaluación geoeconómica del área costera de la Región Piura*. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Piura: Universidad de Piura Programa Académico de Ingeniería Civil.

Cheng, D., Little, D., Lytton, R., & Holste, J. (2003). Moisture Damage Evaluation of Asphalt Mixture by Considering Both Moisture Diffusion and Repeated Load Conditions . *Journal of Transportation Research Record* , 42-49.

Chierighinia, D., Bridib, R., da Rochac, A. A., & Lapad, K. R. (2011). *Possibilidades do Uso das Conchas de Moluscos*. Sao Pablo, Brasil: 3rd International Workshop Advances in Cleaner Production.

Eyad, M., Little, D., Tashman, L., Saadeh, S., Al-Rousan, T., & Sukhwani, R. (2004). *Evaluation of Aggregate Characteristics Affecting HMA Concrete Performance*. Texas 77843-3135: Texas Transportation Institute.

Farfán, P. (2015). *Uso de concha de abanico triturada para mejoramiento de subrasantes arenosas*. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Piura: Universidad de Piura.

Foster. (1984). *Development of Marshall Procedures for Designing Asphalt Paving Mixtures*. Maryland: National Asphalt Pavement Association.

Foster, C. (1970). *Dominant Effect of Fine Aggregate on Strength of Dense-Graded Asphalt Mixes Report 109*. Washington, DC: National Research Council .

Graf, P. (1986). Factors Affecting Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete Mixes. *Association of Asphalt Paving Technologists*, 175-204.

Hicks, G., Santucci, L., & Aschenbrener, T. (2003). Introduction and Seminar Objectives. In T. R. Board, *Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements* (pp. 11-20). San Diego, California: Transportation Research Board.

Hicks, Gary, R; NCHRP Synthesis of Highway Practice 175. (1991). *Moisture Damage in Asphalt Concrete*. Washington, D.C.: The Transportation Research Board.

Huamán Guerrero, N. (2011). *La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

Huamán, N., & Chang, C. (2016). La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú. *Perfiles de Ingeniería. Revista de la facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma*, 23-31.

Kalcheff, & Tunnicliff, D. (1982). Effect of Crushed Stone Size and Shape on Properties of Asphalt Concrete. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, 51, 453-483.

Kandhal, P., & Parker, F. (1998). *Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements*. . National Cooperative Highway Research Program. Washington, D.C.: TRB, National Research Council.

Kandhal, P., Motter, J., & Khatri, M. (1991). Evaluation of Particle Shape and Texture: Manufactured versus Natural Sands. *Transportation Research Record 1301*, 48 - 67.

Kennedy, T. (1977). *Characterization of Asphalt Pavement Materials Using the Indirect Tensile Test*. San Antonio, Texas: Asphalt paving technology 1977.

Kennedy, T., Huber, G., Harrigan, E., Cominsky, R., Hughes, C., Quintus, H., & Moulthrop, J. (1994). *Superior performing asphalt pavements (Superpave): the product of the SHRP asphalt research program* (Vols. SHRP-A-410). Washington, DC: National Research Council.

Kennedy, T., Kandhal, P., Brown, F., Lee, D., & Roberts, F. L. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Procedure*. Lanham, Maryland: NAPA Research and Education Foundation.

Kuo, C., & Freeman, R. (2000). Imaging indices for quantification of shape, angularity and surface texture of aggregates. *Transportation research record*, 1721, 57-65.

Lefbure, J. (1957). Recent Investigations of Design of Asphalt Paving Mixtures. *Association of Asphalt Paving Technologists*, 26, 321 - 394.

Little, D. N., & Jones IV, D. R. (2003). Chemical and Mechanical Processes of Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt Pavements. In T. R.-A. Requirements, *Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements* (pp. 36-74). Washington D.C.: Transportation Research Board of The National Academies.

López Montero, R., & Miró, T. (2017). *El daño por humedad en las mezclas asfálticas*. 28020 Madrid: Plataforma Tecnológica Española de la Carretera.

Lottman, R. (2001). *Predicting moisture-induced damage to asphaltic concrete*. Washington, DC: Transportation Research Board. NCHRP Report 192.

Lutif, J., & Kim, Y. (2006). Material Selection and Design Consideration for Moisture Damage of Asphalt. *Nebraska Department of Roads Research Reports*, 52.

Majidzadeh, K., & Brovold, F. N. (1968). *Special Report 98: State of the Art: Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures*, Highway Research Board,. Washington, D.C.: National Research Council.

Mansour, S., John, H., Maghsoud, T., & Tandon, V. (2003). Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. In T. R. Academies, *Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements* (pp. 78-113). Washington, D.C.: Transportation Research Board.

McGennis, R. A. (1995). *Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis. Final Report No. FHWA-SA-95-003*. Washington, D. C.: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.

Morante Moscol, R. O. (2017). *Evaluación de la adherencia entre la concha de abanico y el ligante asfáltico. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil*. Piura: Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería.

Morea, F. (2011). *Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas efectos en la reología de los asfaltos, la temperatura y condiciones de carga. Tesis para grado de doctor en ingeniería.* La plata: Universidad Nacional La Plata.

MTC. (2013). *Manual de carreteras. Especificaciones técnicas generales para construcción. EG-2013.* Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

National Cooperative Cooperative Highway Report 580. (2007). *Specification Criteria for Simple Performance Tests for Rutting Volume I: Dynamic Modulus (E*) Volume II: Flow Number and Flow Time.* Washington, D.C: Transportation Research board.

National Cooperative Highway Research Program Report 405. (1998). *Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements.* Washington, D.C: Transportation Research Board .

National Cooperative Highway Research Program Report 539. (2005). *Aggregate Properties and the Performance of Superpave-Designed Hot Mix Asphalt.* Washington, D.C.: Transportation Research Board.

National Cooperative Highway Research Program Report 673. (2011). *A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary.* Washington, D.C.: Transportation Research Board.

National Cooperative Highways Research Program Report 465. (2002). *Simple Performance Test for superpave Mix Desing .* Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Neethu Roy, A., Veeraragavan, J., & Krishnan, M. (2013). Influence of Air Voids of Hot Mix Asphalt on Rutting Within the Framework of Mechanistic-Empirical Pavement Design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 99-108.

Neville, A. (1997). *Properties of concrete* (3rd ed.). England: Longman Ltd.

Park, D.-W., Chowdhury, A., & Button, J. (2001). *Evaluation of Superpave Aggregate Report No. 201-3F.* Texas: Texas Transportation Institute.

Poicon Rivas, S. (2014, Agosto 12). En Sechura se arrojan 100 mil toneladas al año de residuos de concha de abanico. *El Tiempo*, p. 3.

Quezada, S. (2017). *Estudio comparativo de la estabilización de suelos arcillosos con valvas de moluscos para pavimentación. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil*. Piura: Universidad de Piura.

Rolando, F. (2002). *Estudio comparativo entre mezclas asfálticas con diluido RC-250 y emulsión. Tesis para título de Ingeniero civil*. Piura: Universidad de Piura.

Saavedra, J. (2016). *Interacción de la concha de abanico triturada con los agregados triturados y redondeados en mezclas de concreto (Tesis de pregrado en Ingeniería Civil)*. Piura: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa.

Terrel, R. L., & Al-Swailmi, S. (1994). *Water Sensitivity of Asphalt–Aggregate Mixes: Test Selection. SHRP Report A-403. Strategic Highway Research Program*. Washington, D.C.: National Research Council.

Terrel, R., & Shute, J. (1989). *Summary Report on Water Sensitivity. Strategic Highway Research Program*. Washington, D.C: National Research Council.

Thenoux, G., & Carrillo, H. (2002). Análisis de Casos de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas Chilenas. *Actas 6º Congreso Internacional PROVIAL*, 11-26.

Varhen, C., Carrillo, S., & Ruiz, G. (2017). Experimental investigation of Peruvian scallop used as fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 533-540.

Vavrik, R., Fries, R., & Carpenter, S. (1999). *Effect of Flat and Elongated Coarse Aggregate on Characteristics of Gyrotory Compacted Samples*. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council.

Wheaton, F. (2007). *Review of the properties of eastern oysters, crassostrea virginica: Part I physical properties*. Maryland: Aquacultural Engineering. 37.

