



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE EN LA RAMA DE
LAS VÍAS TERRESTRES**

**ESTUDIO SOBRE EL EFECTO DEL USO
DE HIDRÓXIDO DE CALCIO EN
MICROAGLOMERADOS**

**TESIS PRESENTADA POR:
MIGUEL PASAYE SALTO**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE :
MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE EN LA RAMA DE
LAS VÍAS TERRESTRES**

**ASESOR:
DR. JORGE ALARCÓN IBARRA**

A mis padres:

Por todo el cariño, comprensión y apoyo que me han brindado.

Y por siempre creer en mí.

A mis hermanos: Rodrigo y Leonardo

Por enseñarme que nada nos debe frenar para cumplir nuestros sueños.

Por tantos momentos inolvidables que hemos vivido.

Daría todo lo que tengo por verlos triunfar y prosperar.

Agradecimientos:

A Dios, por darme la fuerza para enfrentar y superar los obstáculos, por darme salud y ayudarme a no perder la esperanza.

A mis padres Bartolome Pasaye y María Guadalupe Salto, por siempre apoyarme a cumplir mis sueños y no dejarme solo. En especial a mi madre por siempre escucharme y aconsejarme, tenerme paciencia, por su cariño y por siempre cuidar de mí y mis hermanos.

A mi asesor de tesis Dr. Jorge Alarcón Ibarra, mi más sincero agradecimiento por el apoyo y la confianza que ha depositado en mí desde el primer día que lo conocí y hasta el día de hoy para llevar a cabo este proyecto de investigación. Por compartir todo su conocimiento y por todo el aprendizaje que me ha proporcionado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo que me brindaron para llevar a cabo mis estudios de posgrado.

Al Ing. Raymundo Benítez López por darme la oportunidad y gestionar mi estancia de investigación en las instalaciones de Quimi-Kao S.A. de C.V. además de las facilidades prestadas para que mi estancia fuera lo más agradable posible. Al Ing. Ernesto González por compartir su conocimiento conmigo, por la capacitación técnica proporcionada y por el apoyo brindado a lo largo del desarrollo de esta investigación.

A todos los compañeros de Quimi-Kao, por su amistad, apoyo, consejos y por haber hecho más amena mi estadía a lo largo de la investigación, en especial al M.I. Leonardo Ochoa, M.I. Daniela Bocanegra, Ing. Alvis Gutierrez, Ing. Rodrigo Guerrero, Lic. Marisol , Ing. Miriam.

A mis hermanos Leonardo y Rodrigo, esto va por ustedes. Que nunca duden en cumplir sus sueños, y como hasta ahora me lo has demostrado día con día Leo, recuerda que nada puede frenar tus sueños y metas, gracias por la gran lección de vida que me estas dando, siempre la tendré presente.

A mis amigos de toda la vida: Juan Pablo Herrejon, Jorge Rafael, Hernán Mejía y Marco Lara, gracias por brindarme su amistad y a pesar de ya no poder convivir como antes, sé que siempre voy a contar con ustedes. Gracias por todas las aventuras y buenos momentos que compartimos.

A la empresa Calidra, por el apoyo brindado y por proporcionarnos los materiales que se necesitaron para el desarrollo de este proyecto.

Índice

Resumen	V
Abstract	VI
Lista de tablas	VII
Lista de figuras	IX
Glosario	XIII
Capítulo 1. Introducción	14
1.1. Planteamiento del Problema	14
1.2. Justificación.....	16
1.3. Objetivo General	17
1.4. Objetivos particulares.....	17
1.5. Hipótesis	17
Capítulo 2. Marco Teórico	18
2.1. Tratamientos Superficiales	18
2.1.1 Antecedentes.....	18
2.1.2 Propiedades.....	19
2.1.3 Tipos de tratamientos superficiales	20
2.1.3.1 Riego de sello simple	20
2.1.3.2 Riego de sello doble	20
2.1.3.3 Tratamiento de sellado	21
2.1.3.4 Chipping.....	21
2.1.3.5 Cape Seal.....	22
2.1.3.6 Tratamiento invertido	22
2.1.3.7 Tratamientos con geocompuestos y fibras	23
2.1.3.8 Microaglomerados en frío	24

2.2. Microaglomerados.....	24
2.2.1 Cualidades.....	25
2.2.2 Limitaciones.....	26
2.3. Elementos de la mezcla de Microaglomerados.....	27
2.3.1 Agregados Pétreos	27
2.3.1.1 Pruebas de calidad	28
2.3.1.2 Granulometría.....	29
2.3.2 Emulsiones Asfálticas.....	31
2.3.2.1 Introducción	31
2.3.2.2 Historia.....	33
2.3.2.3 Clasificación.....	33
2.3.2.4 Propiedades.....	35
2.3.2.5 Pruebas de calidad	37
2.3.3 Filler de aporte.....	38
2.3.3.1 Cemento Portland	39
2.3.3.2 Hidróxido de calcio.....	40
2.3.4 Agua	41
2.3.5 Aditivos	41
2.4. Diseño de Microaglomerado	41
2.4.1 Método del Área Superficial.....	42
2.4.2 Prueba de tiempo de Mezclado	42
2.4.3 Prueba de Cohesión	43
2.4.3.1 Definición de tiempo de fraguado y tránsito.....	44
2.4.3.2 Modos de ruptura.....	44
2.4.4 Prueba de la rueda cargada (LWT) y adhesión de arena	46

2.4.5 Prueba de Abrasión en Vía Húmeda (WTAT).....	47
Capítulo 3. Metodología empleada en la experimentación.....	48
3.1. Materiales implementados	48
3.2. Caracterización de los agregados pétreos	51
3.3. Análisis de calidad de las emulsiones asfálticas	54
3.3.1 Retenido en malla N°20.....	54
3.3.2 Contenido de residuo asfáltico.....	55
3.4. Diseño de los microaglomerados	56
3.4.1 Método del Área Superficial.....	56
3.4.2 Prueba de tiempo de Mezclado	58
3.4.3 Prueba de Cohesión	59
3.4.4 Prueba de Rueda Cargada (LWT)	61
3.4.5 Prueba de Abrasión en Vía Húmeda (WTAT).....	63
Capítulo 4. Resultados	66
4.1. Agregados pétreos	66
4.1.1 Distribución granulométrica	66
4.1.2 Calidad de los agregados	67
4.2. Emulsiones asfálticas.....	70
4.2.1 Retenido en malla N°20.....	70
4.2.2 Contenido de residuo asfáltico.....	71
4.3. Evaluación del comportamiento del hidróxido de calcio en los microaglomerados	73
4.3.1 Método del Área Superficial.....	73
4.3.2 Prueba de tiempo de Mezclado	74
4.3.3 Prueba de Cohesión	84

4.3.4 Prueba de Rueda Cargada (LWT)	100
4.3.5 Prueba de Abrasión en Vía Húmeda (WTAT).....	112
4.3.6 Determinación del contenido óptimo de asfalto	126
Capítulo 5. Conclusiones	133
Bibliografía	136

Resumen

Los microaglomerados son una tecnología de conservación de carreteras desarrollada en Alemania a finales de los años 60's. Se considera una de las mejores alternativas dentro de los tratamientos superficiales gracias a sus múltiples beneficios, por tal motivo, en los últimos años se ha impulsado su implementación en México. Sin embargo, ha resultado en experiencias complicadas debido a la poca experiencia que se tiene en aspectos de diseño y aplicación. Un punto discutido y debatido ha sido el uso de agregados con alto grado de reactividad.

El propósito del presente estudio es analizar el comportamiento que pueden presentar los microaglomerados dentro de la etapa de diseño en laboratorio al realizar una sustitución parcial o completa del agregado fino que pasa la malla N° 200, por hidróxido de calcio (cal), previo al mezclado de los elementos, en comparación con el comportamiento de los microaglomerados elaborados a partir de agregados pétreos en condiciones originales. En este sentido, se realizó un muestreo de 5 bancos de material, los cuales fueron evaluados bajo 5 diferentes condiciones; los diseños se realizaron con base en las recomendaciones técnicas del manual ISSA.

Se comprobó que es posible realizar diseños con agregados pétreos con alto grado de reactividad en condiciones originales, presentando un buen desempeño. Se determinó que el uso de cal de acuerdo con los porcentajes recomendados por la ISSA permite controlar la reactividad del agregado. Las sustituciones totales o en altos porcentajes del agregado fino por cal, no proporcionaron un beneficio considerable que justifique realizarlo ya que se obtienen resultados muy similares en comparación con un agregado en condición original.

Los diseños con sustituciones parciales o totales fueron condicionados por el porcentaje de finos del agregado, ya que solamente fue posible realizarlos con agregados que contenían máximo 14% de material que pasa la malla N°200.

Palabras claves: Grado de reactividad, manejabilidad, agregado fino, fórmula de trabajo, emulsión asfáltica.

Abstract

Micro surfacing are a road preservation technology developed in Germany at the end of the 60's. It is considered one of the best alternatives within surface treatments thanks to its multiple benefits, for this reason, its implementation in Mexico has been promoted in recent years. However, it has resulted in complicated experiences due to little experience in design and application aspects. A point discussed and debated has been the use of aggregates with a high degree of reactivity.

The purpose of this study is to analyze the behavior that micro surfacing may present within the laboratory design stage when performing a partial or complete substitution of the fine aggregate that passes the sieves No. 200, by calcium hydroxide (lime), prior to the mixing of the elements, in comparison with the behavior of micro surfacing made from stone aggregates in original conditions. In this sense, a sampling of 5 material banks was carried out, which were evaluated under 5 different conditions; the designs were made based on the technical recommendations of the ISSA manual.

It was verified that it is possible to carry out designs with stone aggregates with a high degree of reactivity in original conditions, presenting a good performance. It was determined that the use of lime according to the percentages recommended by the ISSA allows to control the reactivity of the aggregate. Partial or total substitutions of the fine aggregate by lime do not provide a considerable benefit that justifies doing so, since very similar results are obtained in comparison with an aggregate in original condition.

The designs with partial or total substitutions were conditioned by the percentage of fines in the aggregate, since it was only possible to carry them out with aggregates that contained a maximum of 14% of material that passed the sieves No. 200.

Keywords: Degree of reactivity, manageability, fine aggregate, work formula, asphalt emulsion.

Lista de tablas

<i>Tabla 1 Requisitos de calidad de los agregados pétreos</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 2 Granulometría para microaglomerados AASHTO/ASTM</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3 Granulometría para microaglomerados SICT</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 4 Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas de rompimiento controlado ..</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 5 Especificaciones recomendadas para el diseño de microaglomerados</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 6 Porcentajes recomendados para el diseño de microaglomerados</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 7 Modos de ruptura</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 8 Datos de los bancos de material utilizados</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 9 Factores de corrección</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 10 Distribución granulométrica de los agregados</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 11 Calidad de los agregados pétreos</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 12 Clasificación de los niveles de reactividad</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 13 Resultados retenido en malla N°20</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 14 Resultados de residuo asfáltico en las emulsiones</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 15 Porcentaje de emulsión en el sistema por agregado</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 16 Tiempos de mezclado agregado Aeropuerto</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 17 Tiempos de mezclado agregado García Ascencio</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 18 Tiempos de mezclado agregado Agremex</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 19 Tiempos de mezclado agregado La Roca</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 20 Tiempos de mezclado agregado Buenavista</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 21 Resultados de cohesión agregado Aeropuerto</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 22 Resultados de cohesión agregado García Ascencio</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 23 Resultados de cohesión agregado Agremex</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 24 Resultados de cohesión agregado La Roca</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 25 Resultados de cohesión agregado Buenavista</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 26 Resultados LWT agregado Aeropuerto</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 27 Resultados LWT agregado García Ascencio</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 28 Resultados LWT agregado de Agremex</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 29 Resultados LWT agregado La Roca</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 30 Resultados LWT agregado Buenavista</i>	<i>111</i>

<i>Tabla 31 Resultados WTAT agregado Aeropuerto.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 32 Resultados WTAT agregado García Ascencio</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 33 Resultados WTAT agregado de Agremex</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 34 Resultados WTAT agregado La Roca.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 35 Resultados WTAT agregado Buenavista.....</i>	<i>125</i>

Lista de figuras

Fig. 1 Estructura de un riego de sello simple.....	20
Fig. 2 Estructura de un tratamiento doble.	20
Fig. 3 Estructura de un tratamiento de sellado.	21
Fig. 4 Estructura del chiping.	21
Fig. 5 Estructura del cape seal.	22
Fig. 6 Estructura del tratamiento invertido.....	23
Fig. 7 Estructura de tratamiento con geocompuestos o fibras.....	23
Fig. 8 Estructura de un microaglomerado.	24
Fig. 9 Aplicación de un microaglomerado	25
Fig. 10 Agregado para microaglomerado	28
Fig. 11 Curvas granulométricas para microaglomerados AASHTO/ASTM	29
Fig. 12 Curvas granulométricas para microaglomerados SICT	30
Fig. 13 Fases de una emulsión	31
Fig. 14 Emulsión Asfáltica	32
Fig. 15 Representación de una gota de asfalto en una emulsión aniónica.	34
Fig. 16 Representación de una gota de asfalto en una emulsión catiónica.....	35
Fig. 17 Evolución en el almacenamiento.....	35
Fig. 18 Carrotanque con emulsión asfáltica	36
Fig. 19 Aplicación de emulsión asfáltica.....	36
Fig. 20 Adhesión y cohesión del asfalto	37
Fig. 21 Tipos de filler mineral. (Cal lado izquierdo, Cemento lado derecho)	39
Fig. 22 Cemento Portland	39
Fig. 23 Proceso de obtención de los diferentes tipos de cal	40
Fig. 24 Desarrollo de la prueba de tiempos de mezclado	43
Fig. 25 Momento de la ruptura de la emulsión asfáltica	43
Fig. 26 Fabricación de las pastillas para la prueba de cohesión	44
Fig. 27 Inspección visual de los modos de ruptura.....	45
Fig. 28 Preparación del espécimen para la prueba en la rueda cargada	46
Fig. 29 Desarrollo de la prueba en la rueda cargada	46
Fig. 30 Equipo implementado para la prueba WTAT.....	47

Fig. 31 Agregado pétreo Agremex	49
Fig. 32 Agregado pétreo La Roca	49
Fig. 33 Fase acuosa para la fabricación de la emulsión.....	50
Fig. 34 Fabricación de la emulsión asfáltica.....	50
Fig. 35 Emulsiones con A-N480L y A45T.....	51
Fig. 36 Lavado del agregado.....	52
Fig. 37 Agregado después del lavado	52
Fig. 38 Desarrollo de la prueba equivalente de arena.....	53
Fig. 39 Obtención de azul de metileno	53
Fig. 40 Asfalto retenido en la malla N°20	55
Fig. 41 Mezclado de los elementos del microaglomerado.....	58
Fig. 42 Mezcla después de la ruptura de la emulsión	59
Fig. 43 Reporte de tiempo de mezclado, en seg.	59
Fig. 44 Equipo para la prueba de cohesión.....	60
Fig. 45 Fabricación de los especímenes para la prueba de cohesión.....	60
Fig. 46 Especímenes después de retirar los moldes.....	61
Fig. 47 Especímenes después de la prueba de torque	61
Fig. 48 Espécimen para prueba de rueda cargada (LWT)	62
Fig. 49 Extendido de la arena en la prueba LWT	63
Fig. 50 Espécimen para la prueba WTAT después de secar en el horno	64
Fig. 51 Preparación de la muestra para la prueba WTAT	65
Fig. 52 Desarrollo de la prueba WTAT	65
Fig. 53 Curvas granulométrica de los agregados.....	67
Fig. 55 Prueba de equivalente de arena La Roca	68
Fig. 56 Prueba de equivalente de arena Agremex	69
Fig. 57 Resultados de azul de metileno Agremex y García Ascencio	69
Fig. 58 Resultados azul de metileno La Roca y Aeropuerto.....	69
Fig. 59 Resultado azul de metileno Buenavista.....	70
Fig. 60 Asfalto retenido de diferentes emulsiones.....	71
Fig. 61 Residuo asfáltico de muestras ensayadas	72
Fig. 62 Modos de ruptura Aeropuerto del N°1 al 5	86

<i>Fig. 63 Modos de ruptura Aeropuerto del N°6 al 10</i>	<i>87</i>
<i>Fig. 64 Modos de ruptura Aeropuerto del N°11 al 15</i>	<i>89</i>
<i>Fig. 65 Modos de ruptura García Ascencio del N°19 al 23.....</i>	<i>92</i>
<i>Fig. 66 Modos de ruptura García Ascencio del N°24 al 27.....</i>	<i>93</i>
<i>Fig. 67 Modos de ruptura Agremex del N°28 al 31.....</i>	<i>95</i>
<i>Fig. 68 Modos de ruptura Agremex del N°32 al 35.....</i>	<i>97</i>
<i>Fig. 69 Modos de ruptura La Roca N°36.....</i>	<i>99</i>
<i>Fig. 70 Gráficas LWT agregado Aeropuerto.....</i>	<i>102</i>
<i>Fig. 71 Gráficas LWT agregado García Ascencio</i>	<i>104</i>
<i>Fig. 72 Especímenes para LWT García Ascencio.....</i>	<i>104</i>
<i>Fig. 73 Gráficas LWT agregado Agremex.....</i>	<i>106</i>
<i>Fig. 74 Especímenes para LWT Agremex.....</i>	<i>106</i>
<i>Fig. 75 Especímenes Agremex con arena adherida.....</i>	<i>108</i>
<i>Fig. 76 Gráfica LWT agregado La Roca.....</i>	<i>109</i>
<i>Fig. 77 Especímenes La Roca antes y después de LWT.....</i>	<i>110</i>
<i>Fig. 78 Gráficas LWT agregado Buenavista.....</i>	<i>111</i>
<i>Fig. 79 Especímenes Buenavista con arena adherida</i>	<i>112</i>
<i>Fig. 80 Gráficas WTAT agregado Aeropuerto</i>	<i>114</i>
<i>Fig. 81 Gráficas WTAT agregado García Ascencio.....</i>	<i>116</i>
<i>Fig. 82 Especímenes para WTAT García Ascencio</i>	<i>117</i>
<i>Fig. 83 Especímenes para WTAT García Ascencio</i>	<i>117</i>
<i>Fig. 84 Gráficas WTAT agregado Agremex.....</i>	<i>119</i>
<i>Fig. 85 Especímenes para WTAT Agremex</i>	<i>120</i>
<i>Fig. 86 Especímenes para WTAT Agremex</i>	<i>120</i>
<i>Fig. 87 Especímenes Agremex después de WTAT.....</i>	<i>121</i>
<i>Fig. 88 Especímenes Agremex después de WTAT.....</i>	<i>121</i>
<i>Fig. 89 Gráfica WTAT agregado La Roca</i>	<i>123</i>
<i>Fig. 90 Especímenes para WTAT La Roca</i>	<i>124</i>
<i>Fig. 91 Especímenes La Roca después de WTAT.....</i>	<i>124</i>
<i>Fig. 92 Gráfica WTAT agregado Buenavista.....</i>	<i>126</i>
<i>Fig. 93 Especímenes La Roca después de WTAT.....</i>	<i>126</i>

<i>Fig. 94 Contenido óptimo agregado Aeropuerto.....</i>	<i>128</i>
<i>Fig. 95 Contenido óptimo agregado García Ascencio</i>	<i>129</i>
<i>Fig. 96 Contenido óptimo agregado Agremex</i>	<i>130</i>
<i>Fig. 97 Contenido óptimo agregado La Roca</i>	<i>131</i>
<i>Fig. 98 Contenido óptimo agregado Buenavista.....</i>	<i>132</i>

Glosario

Acuaplaneo: Es la separación entre la superficie de la llanta y la carretera creada por una capa de agua.

Alquitranes: Líquido viscoso, de color muy oscuro y fuerte olor, que se obtiene de la destilación de maderas resinosas, carbones, petróleo, pizarras y otros materiales.

Auscultación: Es una herramienta que permite obtener información relevante sobre el estado y condición de los parámetros superficiales de las carreteras, así como parámetros estructurales como la capacidad estructural.

Emulsificante: Es una sustancia que es superficialmente activa y permite que dos líquidos inmiscibles permanezcan íntimamente mezclados y estables.

Saponificado: Es un proceso químico en el cual un elemento graso reacciona con una base en presencia de agua, para generar sales sódicas y potásicas derivadas de los ácidos grasos (jabones) y glicerinas.

Capítulo 1. Introducción

1.1. Planteamiento del Problema

Con el paso del tiempo, los pavimentos sufren una serie de fallas o deterioros debidos al paso del tránsito vehicular principalmente por el paso de vehículos pesado, por las condiciones propias de los pavimentos y por la acción de las condiciones climáticas del lugar. Estos deterioros al manifestarse en la superficie de rodamiento provocan que la seguridad y confort del pavimento se vea disminuida. (VISE, 2023)

Por lo que la conservación de carreteras es una actividad primordial, ya que permite la movilidad de personas y bienes a lo largo del territorio nacional con mayor seguridad y en menor tiempo, abatir los sobrecostos de transporte que puede generar una carretera en mal estado y lo más importante, contribuye a reducir los accidentes que se presentan en la red carretera.

La presente administración tiene como prioridad llevar a cabo el programa de conservación de carreteras, el cual tiene como objetivo mitigar el deterioro de los pavimentos y carreteras, las cuales tienen más de 50 a 60 años de vida y las cuales fueron diseñadas y construidas para otro tipo de volumen y cargas, las cuales difieren de las que se tienen hoy en día. (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2020)

Dicho programa considera la implementación de tratamientos superficiales, los cuales coadyuvan a preservar el buen estado de una carretera, mejorando sus características, las cuales se aplican dependiendo del deterioro y la gravedad de estos, los cuales se determinan a partir de estudios de auscultación.

Dentro de los tratamientos superficiales se encuentran el microaglomerado, el cual está compuesto por agregados pétreos de tamaño especial, emulsión asfáltica modificada con polímero de rompimiento controlado, filler mineral, agua y en ocasiones aditivos, el cual es mezclado y esparcido de manera uniforme en la superficie del pavimento.

Los microaglomerados requieren de materiales de alta calidad, que cumplan con los parámetros de diseño recomendados y con los requisitos de calidad. Sin embargo, no siempre se cuenta con bancos de material los cuales cumplan con todos los requisitos de calidad establecidos. Aunado a esto, esta tecnología es de uso reciente en México,

por lo que aún no se tiene la expertis ni el conocimiento suficiente en el diseño y aplicación de los microaglomerados.

Esto ha provocado que se tengan malas experiencias a la hora de su aplicación y que sea considerado como un tratamiento superficial difícil de trabajar.

La falta de estudios sobre microaglomerados en México ha impedido la determinación de la influencia de las características de los agregados pétreos que están normados sobre cómo pueden beneficiar o perjudicar el comportamiento de estos, así como afectar su vida útil y provocar desprendimientos o ahuellamientos prematuros.

Una de las características que más ha sido discutida y debatida entre los especialistas de la materia es el uso de agregados pétreos con valores de azul de metileno elevado, ya que se considera que estos agregados tienen un alto grado de reactividad, el cual se relaciona con un índice indirecto de su potencialidad expansiva.

Debido a esto, en diversos trabajos de conservación en los cuales se implementan los microaglomerados se evita el uso de estos agregados, ya que se considera que el uso de ellos podría traer repercusiones en la manejabilidad a la hora de mezclar los componentes del microaglomerado y en el tendido de este, así como desprendimientos prematuros debido al potencial expansivo que este puede generar.

1.2. Justificación

Se han realizado estudios sobre la adición de hidróxido de calcio en mezclas asfálticas en caliente como filler mineral, en las cuales se ha comprobado que la cal reacciona con el agregado, consolidando el enlace entre el asfalto y los agregados; además, reacciona con el asfalto de tal manera que contribuye a evitar el daño por humedad. También vuelve más rígida la mezcla, haciéndola más resistente a la formación de roderas y el agrietamiento por fatiga. (ANCADE (Asociación Nacional de Cales y Derivados de España))

Por otra parte, no se encontraron estudios donde se analice el comportamiento de las mezclas asfálticas en frío mediante la adición de hidróxido de calcio o sustituciones del agregado pétreo por hidróxido de calcio.

En los últimos años se ha impulsado la aplicación de microaglomerados para la conservación de carreteras en el país, ya que se considera uno de los mejores tratamientos superficiales gracias a su eficacia, rápida apertura al tránsito vehicular y su buen equilibrio entre la rentabilidad e impacto ambiental respecto a una capa fina de mezcla asfáltica en caliente. Sin embargo, en México se han tenido malas experiencias en estas aplicaciones, muchas de ellas atribuidas a las características de los agregados pétreos, los cuales en ocasiones no cumplen con los requisitos de calidad normados.

Una de las principales características de los agregados pétreos que ha sido cuestionada es cuando estos presentan un alto grado de reactividad, determinado mediante la prueba de azul de metileno, ya que se relaciona indirectamente con el potencial expansivo, el cual se cree que puede ocasionar desprendimientos prematuros de la capa de rodadura, así como un desarrollo deficiente de la cohesión entre el cemento asfáltico y el agregado pétreo.

Por ello se realizó el presente estudio sobre el comportamiento que pueden presentar los microaglomerados dentro de la etapa de diseño en laboratorio al realizar una sustitución parcial o completa del agregado fino que pasa la malla N°200, por hidróxido de calcio, previo al mezclado de los elementos, en comparación con el comportamiento de los microaglomerados elaborados a partir de agregados pétreos en condiciones originales.

1.3. Objetivo General

Evaluar el efecto de la incorporación de diferentes porcentajes de hidróxido de calcio como sustitución de la fracción fina que pasa la malla N°200, en mezclas de microaglomerado cuando los agregados presentan un alto grado de reactividad.

1.4. Objetivos particulares

- A. Realizar diseños de microaglomerados, utilizando agregados pétreos que presentan un alto grado de reactividad, con diferentes porcentajes de hidróxido de calcio.
- B. Evaluar el comportamiento que presentan los microaglomerados durante las pruebas de diseño, variando el porcentaje de hidróxido de calcio en el agregado pétreo.
- C. Comparar el comportamiento de las diferentes mezclas de microaglomerado realizadas para cada etapa del diseño.

1.5. Hipótesis

El aumento del porcentaje de hidróxido de calcio es inversamente proporcional a la reducción del grado de reactividad de los materiales; ampliando los tiempos de mezclado conforme se aumenta el porcentaje de hidróxido de calcio y permitiendo menor uso de aditivos.

La sustitución de los finos que pasan la malla N°200 por hidróxido de calcio mejora el comportamiento de las mezclas de microaglomerado, obteniendo mejores resultados en las pruebas de diseño.

La sustitución de los finos por hidróxido de calcio en materiales con un alto grado de reactividad reduce la complejidad del diseño de microaglomerados.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Tratamientos Superficiales

Los tratamientos superficiales son capas de rodadura con espesores delgados, normalmente inferiores a los 4 cm, constituidas de un ligante asfáltico y agregado pétreo. (Federación Francesa de Productores de Emulsiones Asfálticas para Caminos (SFERB por sus siglas en francés), 2010).

Dentro de las funciones principales que tienen son:

- I. Impermeabilizar la superficie evitando la filtración del agua a las capas inferiores.
- II. Recuperar la macrotextura y fricción del pavimento.
- III. Renovar pavimentos desgastados.

Los tratamientos superficiales coadyuvan a preservar el buen estado de las carreteras, mejorando ciertas características. Las diferentes tecnologías implementadas han sido reconocidas por la buena relación costo – eficiencia, facilidad de colocación, rápida apertura al tránsito, y pueden emplearse tanto en pavimentos flexibles como en pavimentos rígidos. (Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT), 2020)

Para cada pavimento específico hay que tomar en cuenta numerosos parámetros, tales como su estructura, el tránsito, los deterioros, entre otros. La solución óptima, se elige dentro del conjunto de las mejores opciones ligante – agregado, tomando en cuenta los aspectos técnicos y financieros del proyecto. (SFERB, 2010)

2.1.1 Antecedentes

Después de ser usados durante varios años en aceras, los asfaltos se comenzaron a utilizar en capas delgadas sobre los caminos. Una de las primeras aplicaciones tuvo lugar en los Campos Elíseos de París en 1840. Estos primeros tratamientos superficiales combatieron eficazmente el polvo, el barro y el desprendimiento de agregados, permitiendo que el lapso entre los trabajos de conservación pasara de un mes a un año. (SFERB, 2010)

Hasta la segunda mitad del siglo XIX aparecieron los tratamientos con alquitrán de hulla, los cuales se volvieron indispensables debido a la aparición del automóvil. Con la explotación del petróleo por las refinerías al principio del siglo XX, el uso del automóvil se incrementó aún más y apareció un competidor para el alquitrán de hulla: el asfalto. (SFERB, 2010)

Desde 1896 se da inicio a las primeras aplicaciones con derivados del petróleo sobre los caminos. En 1903 surge el término “emulsión” el cual define a los aceites pesados emulsionados y saponificados con aguas amoniacales: se empieza a utilizar la expresión “petrolizado de caminos”. (SFERB, 2010)

Las primeras emulsiones asfálticas aparecen a inicio de los años 20's, se trataron de emulsiones aniónicas. Esta nueva técnica dio origen a los tratamientos superficiales. En 1951 la industria se dio cuenta que el desarrollo de las emulsiones catiónicas reemplazaría a las emulsiones aniónicas. (SFERB, 2010)

2.1.2 Propiedades

Los tratamientos superficiales surgieron como respuesta a las necesidades de encontrar una solución a la conservación de pavimentos y a la aparición en el mercado de nuevos productos, alquitranes y asfaltos, los cuales han evolucionado constantemente hasta nuestros días. (SFERB, 2010)

Si bien en su origen evitaron las polvaredas de los caminos empedrados del siglo XIX, hoy en día los técnicos han conseguido que estos tratamientos sean una solución privilegiada como capa de rodadura en los pavimentos, debido a sus propiedades de impermeabilización y de rugosidad.

Los tratamientos superficiales mejoran la adhesión de las llantas con el pavimento, ya que aseguran un adecuado drenaje del agua superficial, disminuyendo de manera importante el umbral del acuaplaneo y tienen buena resistencia a la formación de hielo gracias a las elevadas presiones producidas por las llantas sobre las aristas de los agregados. (SFERB, 2010)

Otra de sus cualidades, es el campo de aplicación que tienen, el cual es muy diverso; además sus costo de aplicación son muy competitivos en comparación con el conjunto de capas de rodadura existentes.

2.1.3 Tipos de tratamientos superficiales

2.1.3.1 Riego de sello simple

El tratamiento consiste en un solo riego de emulsión asfáltica, seguido por un riego de sello sobre superficies ya pavimentadas o sobre bases imprimadas. También puede aplicarse sobre bases estabilizadas con un riego de curado. Son adecuados para volúmenes de tránsito bajos a medios, además es un tratamiento sencillo de construir. (Kröger García & Kröger García, 2020)

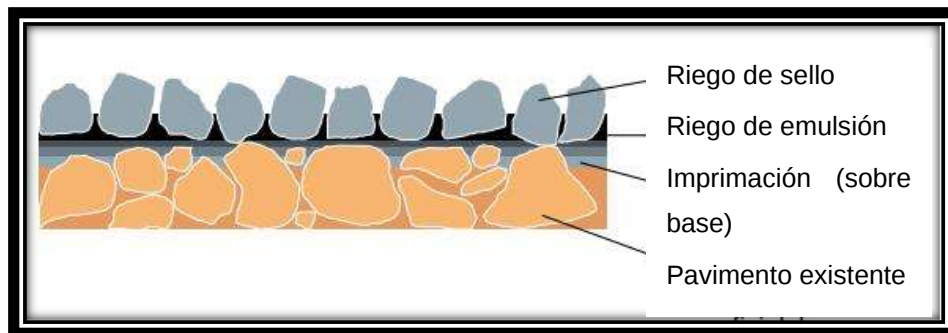


Fig. 1 Estructura de un riego de sello simple.
(Kröger García & Kröger García, 2020)

2.1.3.2 Riego de sello doble

Este es un tratamiento con dos aplicaciones de emulsión asfáltica y dos aplicaciones de agregado pétreo de distintos tamaños. La aplicación se realiza en lapsos cortos de tiempo entre uno y otro; se coloca el riego de emulsión asfáltica, seguido inmediatamente del sello de mayor tamaño, posteriormente se realiza una segunda aplicación de ligante asfáltico, seguido de manera inmediata del sello de menor tamaño.

Es adecuado para volúmenes de tránsito muy bajo a altos, ideal para situaciones de esfuerzos de tránsito elevado, donde se requiere impermeabilizar la calzada y que la macrotextura sea más cerrada. (Kröger García & Kröger García, 2020)

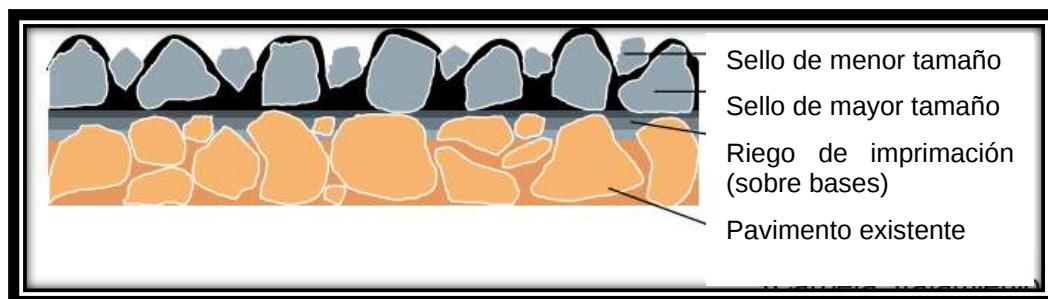


Fig. 2 Estructura de un tratamiento doble.
(Kröger García & Kröger García, 2020)

2.1.3.3 Tratamiento de sellado

El tratamiento consiste en la aplicación de emulsión asfáltica seguido de una aplicación de arena o polvo de cantera, con el objetivo de mejorar la impermeabilidad y/o disminuir la macrotextura del pavimento. (Kröger García & Kröger García, 2020)

Suelen utilizarse sobre un tratamiento simple o doble de reciente construcción con el objetivo de reducir su macrotextura. Debe tenerse cuidado en la selección de los agregados pétreos, ya que puede afectar la resistencia al deslizamiento de los vehículos.

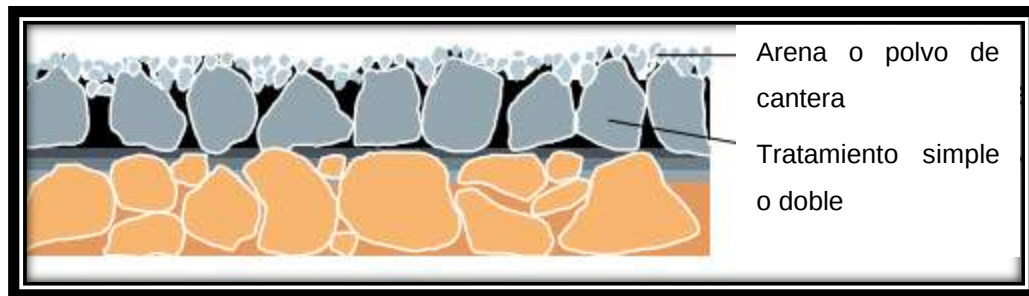


Fig. 3 Estructura de un tratamiento de sellado.
(Kröger García & Kröger García, 2020)

2.1.3.4 Chipping

El chipping consiste en la aplicación de emulsión asfáltica altamente modificada, seguida de una aplicación de arena con un eventual riego de niebla posterior con la misma emulsión. Normalmente se utilizan agregados pétreos con tamaños de 6 a 10 mm.

Se puede aplicar sobre otros tratamientos o carpetas asfálticas con la finalidad de restaurar su macrotextura y mejorar su impermeabilidad. Es adecuado para carreteras con tránsito alto. Además, juega un rol importante en el ciclo de vida del pavimento, ya que mejoran la relación asfalto/agregado pétreo. (Kröger García & Kröger García, 2020)

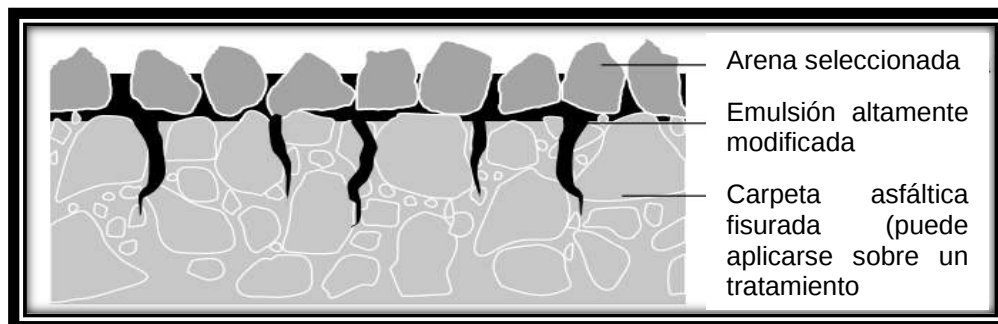


Fig. 4 Estructura del chipping.
(Kröger García & Kröger García, 2020)

2.1.3.5 Cape Seal

Es un tratamiento que consiste en dos capas, la primera es un tratamiento simple y la segunda un Slurry Seal. El tratamiento simple proporciona vacíos que son rellenados por el Slurry, facilitando la retención de los agregados del tratamiento brindando una superficie lisa, densa y homogénea con excelente fricción y bajo ruido. (Kröger García & Kröger García, 2020)

El tratamiento simple se puede realizar con sello de tamaño uniforme entre 10 – 14 mm y una emulsión convencional o modificada. El objetivo es mejorar la retención del agregado, proveer una buena macrotextura y evitar la intrusión de agua en las posibles fisuras. Para permitir que el agregado se asiente y se adhiera correctamente, se recomienda aplicar el Slurry 48 horas después del sello.

Conforma una superficie antiderrapante, altamente impermeabilizada y una estructura resistente, la cual posee buen desempeño bajo tránsito exigente.

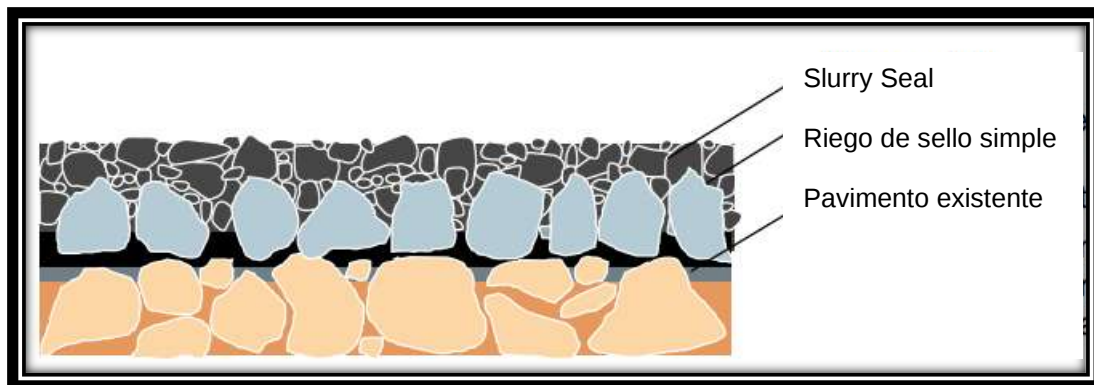


Fig. 5 Estructura del cape seal.
(Kröger García & Kröger García, 2020)

2.1.3.6 Tratamiento invertido

También conocido internacionalmente como “sándwich” es un tratamiento doble aplicado de la siguiente manera:

❖ Riego A

El agregado de mayor tamaño se aplica directamente sobre la superficie existente sin aplicación de ligante.

❖ Riego B

Se aplica la dosificación de emulsión asfáltica seguida del riego de sello de menor tamaño. Se recomienda su uso en superficies que presentan exceso de asfalto y poca

textura, o en situaciones donde se debe corregir la proporción asfalto/agregado pétreo del pavimento.

Es una solución económica para recuperar la textura de un pavimento exudado, sin embargo, en superficies demasiado exudadas, debe tenerse los cuidados pertinentes en la dosificación y construcción, ya que es complejo evaluar de manera acertada la cantidad de asfalto en exceso que se tiene. (Kröger García & Kröger García, 2020)

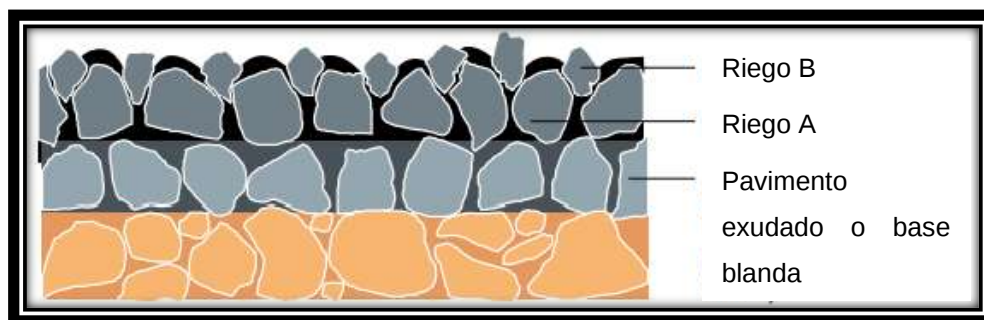


Fig. 6 Estructura del tratamiento invertido
(Kröger García & Kröger García, 2020)

2.1.3.7 Tratamientos con geocompuestos y fibras

Este tratamiento consiste en la aplicación de emulsión asfáltica sobre el pavimento fisurado seguido de una membrana de geotextil o fibras. Posteriormente se aplica una capa de emulsión y finalmente se coloca el sello seleccionado. La cantidad de ligante colocado debe saturar la membrana o las fibras y dejar suficiente material bituminoso para retener los pétreos. Se puede diseñar tanto para tratamientos simples como dobles. (Kröger García & Kröger García, 2020)

Se utiliza como refuerzo de pavimentos severamente fisurados o exudados. Se debe tener mucho cuidado en la ejecución del proyecto, ya que una mala ejecución puede resultar en el desprendimiento completo de la capa con el geotextil.

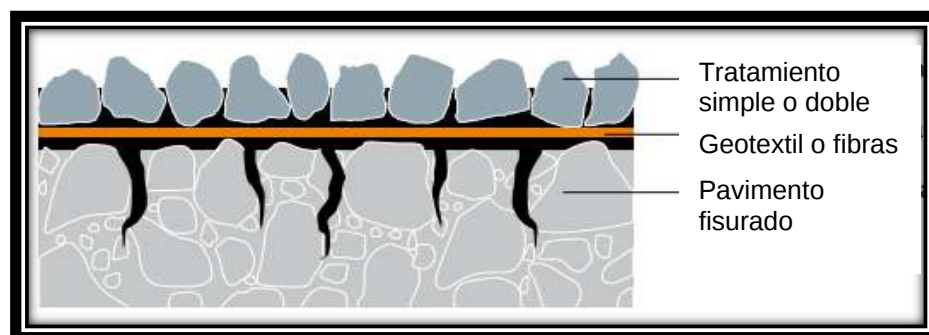


Fig. 7 Estructura de tratamiento con geocompuestos o fibras
(Kröger García & Kröger García, 2020)

2.1.3.8 Microaglomerados en frío

Es un tratamiento compuesto por agregados pétreos de tamaño especial, emulsión asfáltica modificada con polímero de rompimiento controlado, filler mineral, agua y en ocasiones aditivos. Los elementos son mezclados en las proporciones requeridas en un camión especialmente diseñado para ese propósito y aplicado a temperatura ambiente. Puede implementarse para reparar ahuellamientos mediante la colocación de una capa de micro directamente sobre las roderas. (Kröger García & Kröger García, 2020)

En el siguiente apartado se aborda de manera más amplia este tipo de tratamiento superficial.

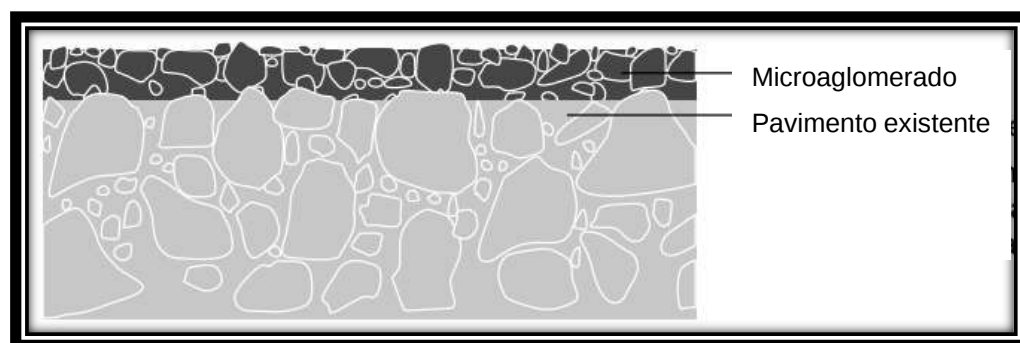


Fig. 8 Estructura de un microaglomerado.
(Kröger García & Kröger García, 2020)

2.2. Microaglomerados

Desarrollados en Alemania a finales de los 60's y principios de los 70's, los microaglomerados fueron pioneros como una forma de aplicar una lechada convencional en capas lo suficientemente gruesas para rellenar roderas profundas, pero en recorridos lo suficientemente angostos para que las costosas líneas de trazado en las autopistas no se vieran afectadas.

Introducido en los Estados Unidos en 1980, después de que el Dr. Frederick Rasching presentara su nuevo sistema de lechada, "Ralumac", en la convención de la ISSA, actualmente el microaglomerado ha sido implementado en toda Europa, EUA, y Australia, además está incursionando en otros países. (Broughton, Lee, & Kim, 2012)

De acuerdo con la guía A143 de la ISSA, el microaglomerado consiste en una mezcla de emulsión asfáltica modificada con polímero de rompimiento controlado,

agregados pétreos, agua, aditivos y filler mineral si así lo requiere; proporcionados, mezclados y distribuidos uniformemente sobre una superficie, debidamente preparada.

El tratamiento puede ser tan delgado con espesores desde los 9.5 mm (3/8”) y puede rellenar deformaciones permanentes de las ruedas de hasta 38.1 mm (1.5”) de profundidad, mediante varias capas. (ISSA, 2010)



*Fig. 9 Aplicación de un microaglomerado
(Ateb)*

Debido a que los materiales implementados en los microaglomerados son muy similares a los de un slurry seal, a veces se hace referencia a los micros como “slurry seal modificados con polímeros”. Sin embargo, una de las grandes diferencias que se tiene es que los slurry seal tienen un rompimiento a través de un proceso térmico, mientras que los microaglomerados tienen un proceso de rompimiento controlado químicamente. De hecho, es considerado la evolución del Slurry ya que permite rangos de empleo mayores. (Broughton, Lee, & Kim, 2012)

2.2.1 Cualidades

Dentro de la literatura científica, generalmente los informes emitidos sobre microaglomerados presentan resultados positivos. La mayoría de los estudios sobre su eficacia fomentan su uso como tratamiento de mantenimiento preventivo.

Cabe mencionar la importancia de realizar las aplicaciones de micros en el momento correcto del ciclo de vida de un pavimento, para poder alcanzar su durabilidad máxima y rentabilidad, antes de que el pavimento se deteriore estructuralmente. (Broughton, Lee, & Kim, 2012)

El principal beneficio que se obtiene utilizando un microaglomerado sobre otros tratamientos superficiales similares resulta de la emulsión asfáltica de rompimiento controlado, modificada con polímero, la cual acelera químicamente la evaporación de la humedad. Esto permite que el fraguado se alcance en menos de una hora en la mayoría de los casos, por lo que la apertura al tránsito se realiza rápidamente. Otro de los beneficios es que no requiere el paso de un compactador neumático. (ISSA, 2010) (Broughton, Lee, & Kim, 2012)

El Departamento de Transporte de Georgia tuvo éxito en la aplicación de microaglomerados para la corrección de deficiencias de textura y fricción, detener el desprendimiento de agregados y el agrietamiento provocado por la carga sin aumentar los niveles de ruido del pavimento. También se logró un buen valor estético con estas aplicaciones. (Watson & Jared, 1998)

Takamura llegó a la conclusión de que los microaglomerados “proporcionan un mejor equilibrio entre la rentabilidad y el impacto ambiental que una capa fina de mezcla asfáltica en caliente”. (Broughton, Lee, & Kim, 2012)

El mejoramiento de la fricción y reducción de formación de surcos son los beneficios que más se buscan obtener en la aplicación de un microaglomerado. Hixon y Ooten, encontraron que al colocar un microaglomerado se genera una reducción del 40% del ahuellamiento original y se obtienen aumentos sustanciales en las características de fricción del pavimento. (Broughton, Lee, & Kim, 2012)

2.2.2 Limitaciones

Existen algunos factores que supuestamente limitan la aplicación de los microaglomerados, los cuales son debatibles y más bien se pueden tomar como pautas sugeridas para un uso correcto.

Se ha demostrado que los microaglomerados son más efectivos bajo ciertas condiciones: Labi demostró que la eficacia del tratamiento se ve influenciada por el clima, el tránsito vehicular y el tipo de carretera; en condiciones de tránsito vehicular bajo y temperaturas no tan bajas tiene un alto valor de eficiencia en su desempeño a largo plazo.

Si bien esto indicaría que los microaglomerados no son adecuados para su uso en carreteras con alto tránsito, también se presenta una disminución comparable en la

eficiencia de otros tratamientos bajo cargas de tránsito pesado. (Broughton, Lee, & Kim, 2012)

Hixon y Ooten encontraron que los microaglomerados pueden tener una resistencia moderada al agrietamiento por reflexión, aunque no aumenta la capacidad de soporte de carga del pavimento.

El agrietamiento reflectante es la amenaza más grave para los microaglomerados. La falla prematura de microaglomerados normalmente se atribuye a su colocación en superficies inestables, agrietadas, sucias o mal preparadas. Además, un estudio realizado por el Departamento de Transporte de Texas en seis tratamientos de mantenimiento demostró que los microaglomerados no presentaban un buen comportamiento en la reflexión de grietas cuando al momento de la aplicación el pavimento base se encontraba en malas condiciones. (Broughton, Lee, & Kim, 2012)

Una conclusión razonable puede ser que los microaglomerados se pueden usar en ocasiones en caminos con deficiencias estructurales, pero se utilizan como un espacio intermedio para limitar la intrusión de agua en las grietas existentes hasta que se disponga del recurso económico para llevar a cabo la rehabilitación de este.

Una limitación indiscutible de los microaglomerados es que no nivelan los montículos del camino. Rellena depresiones y surcos, pero no puede solucionar los montículos y, de hecho, reproducirá un montículo en la superficie del tratamiento. (Broughton, Lee, & Kim, 2012)

Cualquier montículo debe nivelarse antes de aplicar el micro, y cualquier bache o sellado de grieta no debe dejarse alto.

2.3. Elementos de la mezcla de Microaglomerados

2.3.1 Agregados Pétreos

Los agregados deben transmitir las cargas de tránsito a la base que cubren, servir de elementos de desgaste y favorecer la adherencia entre el pavimento y los neumáticos de los vehículos. Para asegurar estas funciones deben ser duros, tener la forma apropiada, no deben ser susceptibles a heladas y maximizar las notables propiedades adhesivas de las emulsiones. (ISSA, 2010)



*Fig. 10 Agregado para microaglomerado
(Elaboración propia, 2023)*

Las características de los agregados dependen de la elección del banco de material y de su tratamiento.

El agregado pétreo utilizado será del tipo especificado para los requisitos particulares de la aplicación del microaglomerado. Será una piedra triturada, de alta calidad; para asegurarse que el material este 100% triturado, el agregado principal será más grande que la piedra más grande en la granulometría utilizada. (ISSA, 2010)

2.3.1.1 Pruebas de calidad

El agregado debe cumplir con los valores especificados por la dependencia correspondiente y estos son los requisitos que deben de cumplir:

Tabla 1 Requisitos de calidad de los agregados pétreos

Prueba	Método de prueba			Especificación	
	AASHTO	ASTM	SICT		
Densidad relativa en seco	-	-	M·MMP·4·04·003	2.4 mín.	
Equivalente de arena	T176	D 2419	M·MMP·4·04·004	65% mín.	
Intemperismo acelerado	T104	C88	M·MMP·4·04·008	Sulfato de sodio	15% máx.
				Sulfato de Magnesio	25% máx.
Desgaste de los Ángeles	T96	C131	M·MMP·4·04·006	30% máx.	
Angularidad de la arena	-	D1252	-	45	
Azul de metileno	TB No. 145 ISSA		M·MMP·4·04·014	-	

(Elaboración propia, 2023)

2.3.1.2 Granulometría

Cuando la prueba se realiza de acuerdo con AASHTO T 27 (ASTM C 136) y AASHTO T 11 (ASTM C 117), la granulometría del diseño de la mezcla debe estar dentro de alguna de las curvas de la fig. 11. Cuando esta se realiza de acuerdo con M·MMP·4·04·004 de la SICT, la granulometría de diseño debe estar dentro de alguna de las curvas de la fig. 12.

Tabla 2 Granulometría para microaglomerados AASHTO/ASTM

Malla		Porcentaje que pasa		Tolerancias
Abertura (mm)	Designación	Tipo II	Tipo III	
9.5	3/8 in	100	100	-
4.75	N°4	90 – 100	70 – 90	± 5%
2.36	N°8	65 – 90	45 – 70	± 5%
1.18	16	45 – 70	28 – 50	± 5%
0.600	N°30	30 – 50	19 – 34	± 5%
0.300	N°50	18 – 30	12 – 25	± 4%
0.150	N°100	10 – 21	7 – 18	± 3%
0.075	N°200	5 – 15	5 -15	± 2%

(Elaboración propia, 2023)

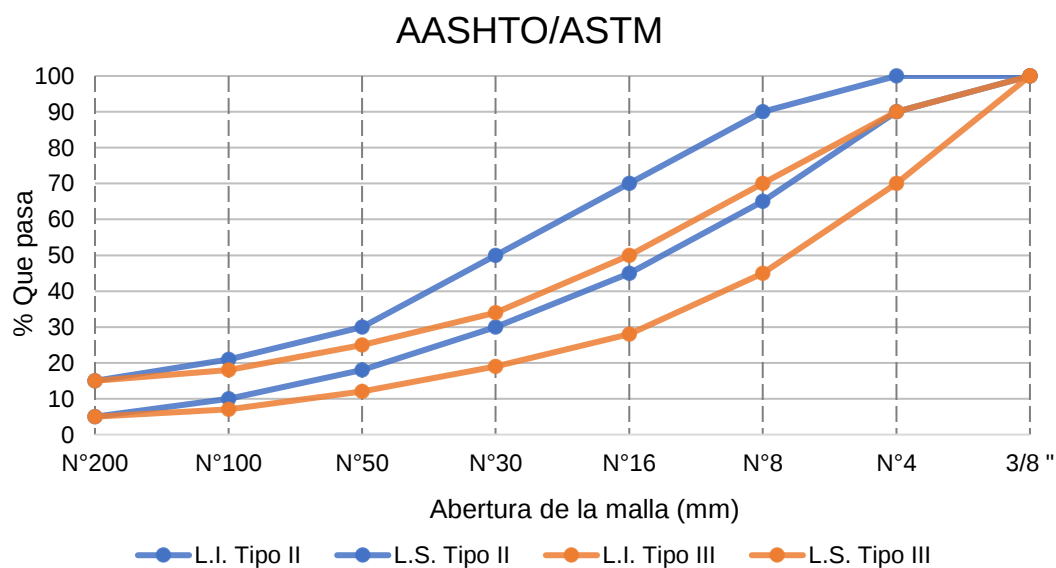


Fig. 11 Curvas granulométricas para microaglomerados AASHTO/ASTM
(Elaboración propia, 2023)

Tabla 3 Granulometría para microaglomerados SICT

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura (mm)	Designación	Tipo A	Tipo B
9.5	3/8 in	100	100
4.75	N°4	90 – 100	70 – 90
2.36	N°8	65 – 90	45 – 70
1.18	N°16	39 – 64	23 – 44
0.600	N°30	26 – 44	16 – 29
0.300	N°50	15 – 27	10 – 23
0.150	N°100	10 – 21	7 – 18
0.075	N°200	5 – 15	5 – 15

(Elaboración propia, 2023)

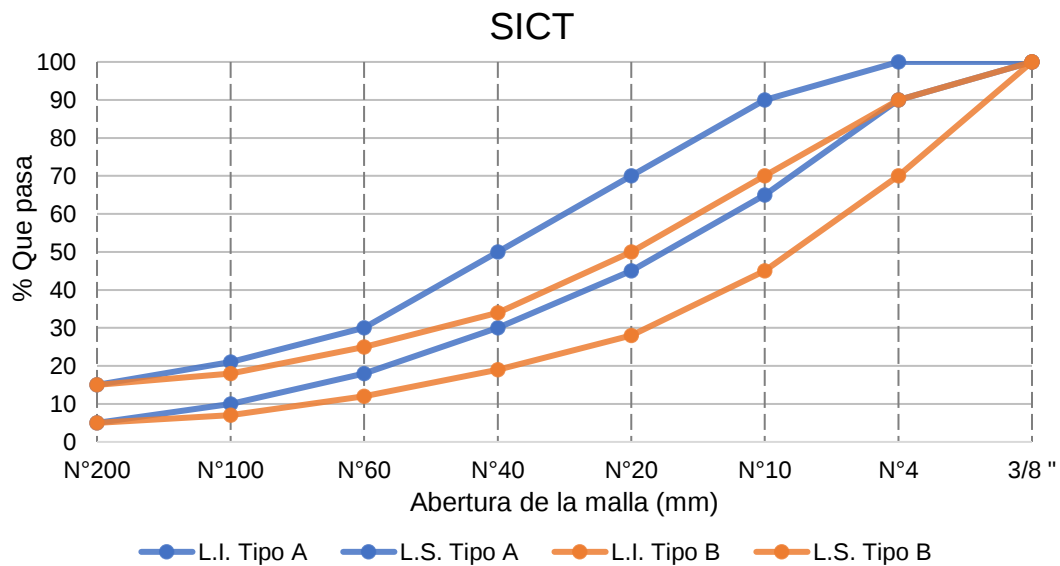


Fig. 12 Curvas granulométricas para microaglomerados SICT
(Elaboración propia, 2023)

El porcentaje de agregado que pasa por dos tamices sucesivos no debe cambiar de un extremo del rango especificado al otro extremo. El agregado se aceptará en el lugar de trabajo o en la reserva con base en 5 pruebas de granulometría muestreadas de acuerdo con AASHTO T2 (ASTM D 75). Si el promedio de las cinco pruebas está dentro de la tolerancia de la granulometría de diseño de la mezcla, el material será aceptado.

Tipo A. Esta granulometría se utiliza para rellenar huecos en las superficies, abordar los problemas de la superficie, sellar y proporcionar una superficie de desgaste duradera. Para obras de menos de un millón de ejes equivalentes y para aeropuertos

Tipo B. Esta granulometría proporciona la máxima resistencia al deslizamiento y una superficie de desgaste mejorada. Este tipo de superficies son apropiadas para pavimentos muy transitados, relleno de surcos o para colocar en superficies muy texturizadas que requieren un agregado de mayor tamaño para rellenar huecos. Se utiliza en obras de más de un millón de ejes equivalentes. (ISSA, 2010) (SICT, 2017)

2.3.2 Emulsiones Asfálticas

2.3.2.1 Introducción

Dentro de los distintos tipos de dispersiones acuosas conocidas tenemos las siguientes: suspensiones (sólido/ líquido), espumas (gas/ líquido) y emulsiones (líquido/ líquido), esta última constituye un sistema homogéneo muy diversificado.

La definición de emulsión propuesta por el estándar francés NF en ISO 862 (NF T73-000) de octubre de 1995 es la siguiente: Sistema heterogéneo con dos o más fases líquidas consistiendo en una fase líquida continua y al menos una segunda fase líquida dispersa en la primera en la forma de gotas finas (SFERB, 2010)

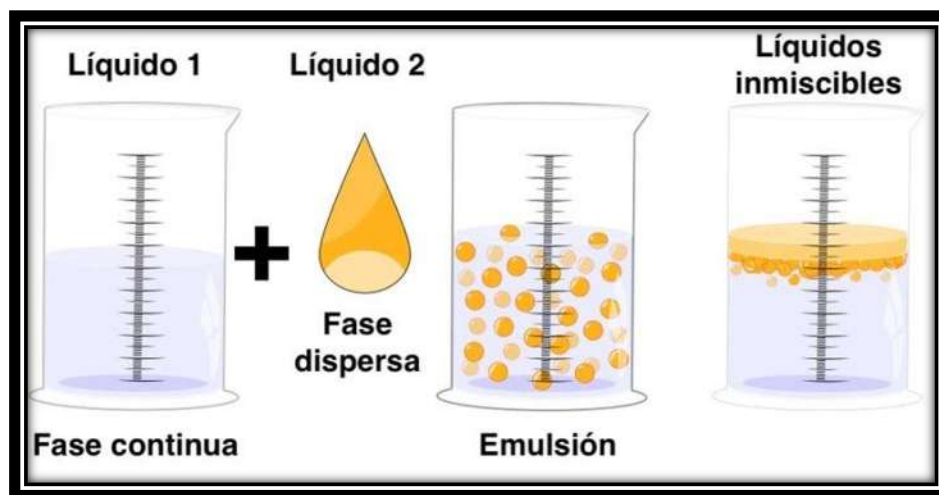


Fig. 13 Fases de una emulsión
(Ondarse Álvarez, 2021)

Cuando se tienen dos líquidos no miscibles, por definición no tiene afinidad el uno con el otro, de manera que están obligados a repelerse minimizando su área de contacto.

Por consecuencia, el estado natural de una mezcla de los líquidos de este tipo sería estar separados, estando el líquido más ligero flotando sobre el otro. Es por ello por lo que las emulsiones son vistas como un estado, impuesto y calificado de manera general como termodinámicamente inestable o metaestable. Es decir, las emulsiones son sistemas en evolución.

También mediante una acción externa se puede lograr que dos líquidos se mantengan en forma de emulsión por cierto tiempo. En cualquiera de los casos, lo primero que se debe realizar es la fragmentación del líquido que será dispersado en gotas finas, por ejemplo, mediante la aplicación de energía mecánica y posteriormente estabilizar las gotas formadas con uno o más componentes, conocidos como emulsificantes. (SFERB, 2010)

De acuerdo con la norma N·CMT·4·05·005/22, *Calidad de Emulsiones Asfálticas*, las emulsiones asfálticas son materiales asfálticos líquidos, estables, constituidos por dos fases no miscibles, en los que la fase continua de la emulsión está formada por agua y un agente emulsificante, y la fase discontinua por pequeños glóbulos de cemento asfáltico.



*Fig. 14 Emulsión Asfáltica
(Elaboración propia, 2023)*

2.3.2.2 Historia

Los primeros ensayos de dispersiones de aceites pesados de petróleo o de aceite de nafta en agua fueron realizados en los primeros años del siglo XX. En 1904 se llevó a cabo la aplicación de aceite de petróleo emulsionado sobre el circuito de las Ardenas con la finalidad de evitar accidentes debidos a las nubes de polvo provocadas por las carreras de automóviles.

Gracias al impulso del doctor Ernest Guglielminetti, médico suizo, a partir de las experiencias obtenidas en Mónaco en marzo de 1902, el alquitranado de las carreteras alcanzó un gran desarrollo, hasta tal punto que en 1904 la superficie alquitranada en Francia alcanzó 360,000 m². (SFERB, 2010)

El 9 de mayo de 1922, el químico inglés Hugh Alan Mackay presentó una patente sobre la emulsión de asfalto, este acontecimiento marcó el punto de partida de una nueva generación de ligantes de carreteras que, al paso de unos años, iba a revolucionar la técnica de los tratamientos superficiales.

En 1951 aparecen las emulsiones catiónicas; tomando en cuenta sus características, rápidamente reemplazaron a las emulsiones aniónicas. En 1962, 10 años después de los primeros ensayos, el 50% de la producción de emulsiones eran catiónicas, en 1971, esta sobrepasó el 92%. Para el 2005, las emulsiones fabricadas casi en su totalidad eran catiónicas. (SFERB, 2010)

2.3.2.3 Clasificación

Las emulsiones asfálticas, al igual que otras aplicaciones industriales, han tenido una revolución tecnológica desde su invención. En sus inicios, la fórmula química era aniónica, sin embargo, en la actualidad es principalmente catiónica. (SFERB, 2010)

Se denominan emulsiones aniónicas cuando el agente emulsificante confiere carga negativa a los glóbulos de asfalto, mientras que en las emulsiones catiónicas el emulsificante confiere carga positiva a los glóbulos de asfalto.

A continuación, se aborda más a detalle cada una de estas emulsiones mencionadas.

a) Emulsiones aniónicas

Como se mencionó anteriormente, este tipo de emulsiones utilizan emulsificantes de tipo aniónico (carga negativa), los emulsificantes que comúnmente se utilizan son jabones y detergentes y sus derivados.

Algunos asfaltos contienen de manera natural ácidos grasos, por lo regular ácidos nafténicos, los cuales pueden convertirse en jabones dentro de un medio básico. Cuando se tienen presentes en cantidades suficientes, estos asfaltos se pueden estabilizar dentro de una emulsión sin la necesidad de adicionar un emulsificante. (SFERB, 2010)

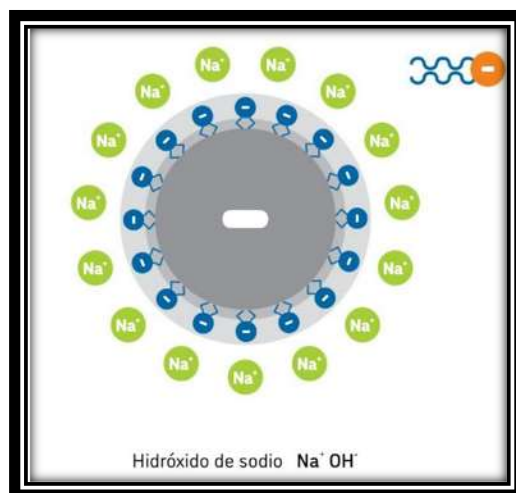


Fig. 15 Representación de una gota de asfalto en una emulsión aniónica.
(Gutiérrez Muñiz, 2023)

b) Emulsiones catiónicas

Las fases acuosas utilizadas en las emulsiones catiónicas consisten en agua, sales de tensoactivos y ácido, generalmente ácido clorhídrico, y si lo requiere la formulación, pueden añadirse agentes espesantes o sales como cloruro de calcio.

La naturaleza catiónica se incrementa en medios ácidos y la ionización de la molécula catiónica ocurre en la fase acuosa durante el proceso de emulsificación del asfalto, lo que permite que el asfalto adsorba al tensoactivo. La parte lipofílica se adsorbe en el asfalto y el grupo polar se orienta a la interfaz entre el asfalto y el agua. (SFERB, 2010)

Las gotas de asfalto se cargan positivamente, asegurando de esta manera la estabilidad de la emulsión durante el tiempo de su almacenamiento, a través de la repulsión electrostática. Cuando entra en contacto con el agregado, la emulsión se

desestabiliza y se rompe, después de esto la afinidad de las gotas de asfalto se adhieren al agregado por las cargas que contiene.

El ácido más utilizado para fabricar la fase acuosa es el clorhídrico, sin embargo, en aplicaciones especiales, se puede hacer uso de los ácidos acético y fosfórico. (SFERB, 2010)

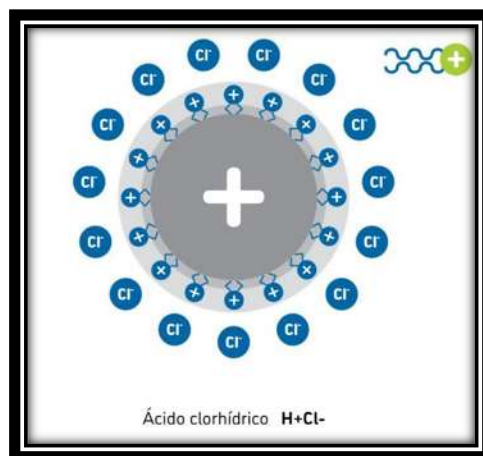


Fig. 16 Representación de una gota de asfalto en una emulsión catiónica. (Gutiérrez Muñiz, 2023)

2.3.2.4 Propiedades

La producción de emulsiones asfálticas como recubrimiento requiere del control de las propiedades de aplicación, las cuales consisten principalmente en las enunciadas a continuación:

A. Estabilidad durante el almacenamiento. Durante el tiempo que se tenga almacenada la emulsión, su estabilidad debe ser la apropiada a las condiciones que prevalezcan en el lugar de trabajo.

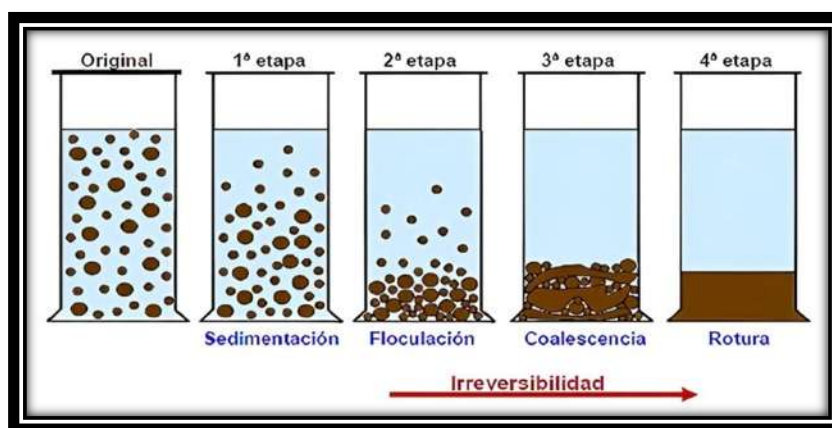


Fig. 17 Evolución en el almacenamiento (Pradas Díaz, Lucas Ochoa, & Miranda Pérez, 2020)

B. Estabilidad durante el transporte. Como regla general se tiene que las emulsiones no deben ser transportadas en distancias grandes. Sin embargo, se puede presentar el hecho de requerir una emulsión con algún producto especial, la cual deba acarreararse por varios cientos de kilómetros, en todo caso, el transporte de la emulsión no debe afectar sus características originales.



Fig. 18 Carrotanque con emulsión asfáltica
(BERGKAMP, s.f.)

C. Viscosidad. La emulsión producida debe poder ser bombeada y manipulada. Esta viscosidad también debe cumplir con las especificaciones requeridas, su reología y comportamiento de flujo deben adaptarse a las condiciones de uso de igual manera.



Fig. 19 Aplicación de emulsión asfáltica
(Guerrero Aguilera, y otros, 2019)

D. Velocidad de ruptura. Cuando entra en contacto con el agregado, la emulsión debe romper de manera que el asfalto residual recupere sus

propiedades macroscópicas y actúe como ligante del material con el cual se está usando.

- E. Adhesión del asfalto.** La formulación de la emulsión debe asegurar que su componente asfáltico se adhiera correctamente a la superficie de los agregados con los que entra en contacto, ambos inmediatamente y a largo plazo. (SFERB, 2010)



*Fig. 20 Adhesión y cohesión del asfalto
(DOCPLAYER, 2019)*

2.3.2.5 Pruebas de calidad

Como se explicó anteriormente, las emulsiones utilizadas para la aplicación de microaglomerados son de rompimiento controlado, modificadas con polímero. De acuerdo con la guía de la ISSA A143 tanto la emulsión como el residuo asfáltico debe cumplir con los requisitos de AASHTO M 208 o ASTM D 2397 para CQS-1h con algunas excepciones, estos requisitos se muestran en la tabla 4.

Así mismo, la norma N·CMT·4·05·005/22 contiene los requisitos de calidad para la emulsión y el residuo asfáltico utilizado en los microaglomerados, que se clasifican como ECCR-62P, estos requisitos se muestran a continuación en la tabla 4.

Tabla 4 Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas de rompimiento controlado

	Método de prueba		Especificación	Método de prueba	Especificación
	AASHTO	ASTM		SICT	
Contenido de cemento asfáltico en masa. %.	T 59	D 6997	62 mín.	M·MMP·4·05·012	62 mín.
Estabilidad de asentamiento y almacenamiento, 24 hr., %.	T 59	D 6930	1 máx.	-	-
Viscosidad, Saybolt-Furol a 25°C, s.	T 59	D 7496	20 - 100	M·MMP·4·05·004	20 mín.
Retenido en malla N° 20 en la prueba del tamiz, %.	-	-	-	M·MMP·4·05·014	0.1 máx.
Carga eléctrica de las partículas.	T 59	D 7402	(+)	M·MMP·4·05·017	(+)
Disolvente en volumen, %.	-	-	-	-	3 mín.
Del residuo de la destilación:					
Penetración a 25°C, en 100g y 5 s, 10 ⁻¹ mm.	T 49	D 5	40 – 90	M·MMP·4·05·006	40 – 90
Recuperación elástica por torsión a 25°C, %.	-	-	-	M·MMP·4·05·024	20 mín.
Recuperación elástica en Ductilómetro a 10°C, 20 cm/5minutos, %.	-	-	-	M·MMP·4·05·026	20 mín.
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/minuto, cm.	-	-	-	M·MMP·4·05·011	40 mín.
Punto de reblandecimiento (anillo y bola)	T 53	D36	57 °C mín.	-	-

(Elaboración propia, 2023)

2.3.3 Filler de aporte

Se puede utilizar filler mineral para mejorar la consistencia de la mezcla y para ajustar las propiedades de curado y rotura de la mezcla. Se debe usar cemento Portland, cal hidratada, polvo de piedra caliza, cenizas u otro relleno aprobado que cumpla con los requisitos de ASTM D 242 si así lo requiere el diseño de la mezcla. Los niveles de uso típicos son normalmente entre 0.1 – 3.0 por ciento del peso seco del agregado y pueden considerarse parte de la granulometría agregada.



Fig. 21 Tipos de filler mineral. (Cal lado izquierdo, Cemento lado derecho)
(Sarsam & Jlalil, 2015)

2.3.3.1 Cemento Portland

El cemento Portland es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua, endurece y conserva su resistencia y estabilidad, incluso bajo el agua. A este proceso se le conoce como hidratación. (CEMEX, 2019)

Para los diseños de microaglomerados, el cemento se utiliza para acelerar el rompimiento de la emulsión asfáltica y que la mezcla tenga tiempos de rotura y curado menores.



Fig. 22 Cemento Portland
(RUBI ESPAÑA, 2022)

2.3.3.2 Hidróxido de calcio

De acuerdo con la norma N·CMT·4·03·001/17, *Cal para Estabilizaciones*, la cal es el producto de la calcinación de rocas calizas, constituido principalmente por óxido de calcio (CaO) y otros componentes. Según su composición química se clasifica en:

a) Cal viva:

La cal viva es el producto de la calcinación de la roca caliza, constituido en su mayor parte por óxido de calcio (CaO), o bien óxido de calcio asociado con óxido de magnesio (MgO), capaces de reaccionar con el agua exotérmicamente, lo que produce su apagado o hidratación.

b) Cal hidratada / Cal Química:

La cal hidratada es un polvo seco, obtenido al tratar la cal viva con la suficiente agua para satisfacer su afinidad química, provocando su hidratación. Consiste esencialmente en hidróxido de calcio [Ca(OH)_2] o una mezcla de hidróxido de calcio, óxido de magnesio (MgO) e hidróxido de magnesio [Mg(OH)_2].

Dentro de los diseños de microaglomerado, generalmente se utiliza cal hidratada, con la finalidad de retardar el rompimiento de la emulsión asfáltica y que la mezcla tenga tiempos de rotura y curado mayores.



Fig. 23 Proceso de obtención de los diferentes tipos de cal
(Cordero, Serment, & de la Cruz)

2.3.4 Agua

El agua debe estar libre de sales y contaminantes nocivos. Si la calidad del agua está en duda, debe enviarse al laboratorio con las demás materias primas para el diseño de la mezcla.

2.3.5 Aditivos

Pueden usarse aditivos para acelerar o retardar la rotura/fraguado del microaglomerado. Los aditivos apropiados y su rango de uso aplicable deben ser aprobados por el laboratorio como parte del diseño de la mezcla.

2.4. Diseño de Microaglomerado

Es muy importante desarrollar el diseño de un microaglomerado, el cual debe ser realizado por un laboratorio con experiencia en el tema, ya que en él se evalúa y determina la compatibilidad del agregado, el asfalto emulsionado modificado con polímero, el agua, el filler mineral y otros aditivos.

El diseño de la mezcla se lleva a cabo con materiales consistentes suministrados por el contratista del proyecto.

De acuerdo con el manual A143 de la ISSA las pruebas y los valores recomendados son los siguientes:

Tabla 5 Especificaciones recomendadas para el diseño de microaglomerados

Prueba	ISSA TB No.	Especificación
Tiempo de mezclado a 77°F (25°C)	TB 113	Controlable a 120 segundos como mín.
Cohesión - A los 30 minutos, mín. (set) - A los 60 minutos, mín. (Traffic)	TB 139	12 kg-cm mín. 20 kg-cm mín.
Cubrimiento en húmedo	TB 114	Aprobado (90% mín.)
Pérdida por abrasión por vía húmeda - Curado de una hora - Curado de seis días	TB 100	50 g/ft ² (538 g/m ²) máx. 75 g/ft ² (807g/m ²) máx.
Desplazamiento lateral Gravedad específica después de 1000 ciclos de 125 lb (56.71 kg)	TB 147	5% máx. 2.1 máx.
Exceso de asfalto con LWT y adhesión de arena	TB 109	50 g/ft ² (538 g/m ²) máx.
Clasificación de compatibilidad	TB 144	11 puntos de calificación como mín. (AAA, BAA)

(Elaboración propia, 2023)

La prueba de abrasión en húmedo se realiza en condiciones de laboratorio como un componente del proceso de diseño de la mezcla. Esta prueba no se recomienda como prueba de aceptación o de control de calidad en campo. ISSA TB 136 describe las causas potenciales de los resultados inconsistentes de la prueba de abrasión en húmedo.

La prueba de tiempos de mezclado puede ser una buena referencia para verificar fuentes consistentes del material. Según las condiciones de campo, es posible que se requieran ajustes dentro de los rangos específicos del diseño de la mezcla.

El porcentaje de cada material requerido debe mostrarse en el informe del laboratorio. Los materiales de los componentes se diseñarán dentro de los siguientes límites recomendados:

Tabla 6 Porcentajes recomendados para el diseño de microaglomerados

Material	Límites recomendados
Asfalto residual	5.5 – 10.5% peso seco de agregado
Filler mineral	0.0 – 3.0% peso seco de agregado
Contenido de polímero	Mínimo 3.0% de sólidos con base en el contenido en peso de asfalto residual
Aditivos	Según sea necesario
Agua	Según sea necesario para producir la consistencia adecuada en la mezcla

(ISSA, 2010)

2.4.1 Método del Área Superficial

Este método sirve para estimar el contenido teórico de asfalto tanto para los Slurrys como para los microaglomerados. El método de diseño del área superficial se presentará en tres secciones que analizan el cálculo de la cantidad de asfalto necesario para recubrir el área superficial del agregado pétreo, las características de absorción del agregado y el contenido total de asfalto. (ISSA, 2005)

2.4.2 Prueba de tiempo de Mezclado

Este método de ensayo mide los tiempos de mezclado de una combinación específica de materiales para un sistema de Slurry Seal y microaglomerados. La prueba verifica la compatibilidad que tienen los materiales y establece las proporciones

adecuadas de los componentes, para asegurar un tiempo de mezcla suficiente para la aplicación del producto (ISSA, 2012).



*Fig. 24 Desarrollo de la prueba de tiempos de mezclado
(Elaboración propia, 2023)*



*Fig. 25 Momento de la ruptura de la emulsión asfáltica
(Elaboración propia, 2023)*

2.4.3 Prueba de Cohesión

Este método de prueba es utilizado para determinar el desarrollo inicial del fraguado y curado de los microaglomerados, como una función de torque a través del tiempo (ISSA, 2012). Esto con la finalidad de determinar el tiempo necesario antes de que sea sujeto al tránsito de vehículos.



*Fig. 26 Fabricación de las pastillas para la prueba de cohesión
(Elaboración propia, 2023)*

2.4.3.1 Definición de tiempo de fraguado y tránsito

El tiempo de fraguado es el punto en el que el microaglomerado alcanza un torque mínimo de 12 kg-cm. Un microaglomerado de fraguado rápido alcanza un torque mínimo de 12 kg-cm en 30 minutos.

El tiempo de apertura al tránsito ocurre al alcanzar un torque mínimo de 20 kg-cm. Un microaglomerado de rápida apertura al tránsito alcanza un torque mínimo de 20 kg-cm en 60 minutos. (ISSA, 2012)

2.4.3.2 Modos de ruptura

En ocasiones, los valores de torque máximo que se alcanzan son menores a 20 kg-cm debido a las características de curado de los microaglomerado. Una vez alcanzado el máximo, el pie de neopreno puede generar menor fricción con la superficie del espécimen. Debido a esto, el valor de torque debe ir acompañado del modo de ruptura, el cual se determina de manera visual (Fig. 27), los cuales se describen a continuación:

Tabla 7 Modos de ruptura

Modo de ruptura		Descripción
N	Normal	Por debajo de 12 kg-cm, se observan múltiples grietas radiales
NS	Giro Cercano (Near Spin)	Solo se observa una grieta radial. El valor de cohesión equivalentes es 20 kg-cm.
S	Giro (Spin)	No aparecen grietas, pero el agregado se desplaza directamente debajo del pie y “mueve” debajo del pie. El valor de cohesión equivalente es 23 kg-cm.
SS	Giro Sólido (Solid Spin)	No se presentan grietas ni agregado desplazado. El pie patina o resbala sobre la superficie. Puede que una parte de la capa de asfalto sea eliminada. El valor de cohesión equivalente es 26 kg-cm.

(ISSA, 2012)



Fig. 27 Inspección visual de los modos de ruptura
(KAO, 2021)

2.4.4 Prueba de la rueda cargada (LWT) y adhesión de arena

La prueba de rueda cargada se implementa para compactar mezclas asfálticas de agregados finos, por medio de una rueda alternativa cargada con un neumático de caucho. La prueba se puede utilizar con fines de diseño para establecer límites máximos para el contenido de asfalto, con el fin de evitar una exudación de asfalto bajo cargas de tránsito pesado.

También se pueden realizar varias mediciones accesorias durante esta prueba para estudiar las velocidades de compactación y la deformación plástica de muestras de mezcla asfáltica de una o múltiples capas. (ISSA, 2018)



*Fig. 28 Preparación del espécimen para la prueba en la rueda cargada
(Elaboración propia, 2023)*



*Fig. 29 Desarrollo de la prueba en la rueda cargada
(Elaboración propia, 2023)*

2.4.5 Prueba de Abrasión en Vía Húmeda (WTAT)

Este método de prueba mide las cualidades de desgaste de los microaglomerados en condiciones de abrasión en húmedo.

Este ensayo establece el contenido mínimo de emulsión asfáltica de un determinado microaglomerado. La susceptibilidad a la humedad a largo plazo se determina mediante un procedimiento de acondicionamiento bajo agua durante seis días.

En la fig. 30 se muestra el equipo utilizado para el desarrollo de esta prueba.



*Fig. 30 Equipo implementado para la prueba WTAT
(Elaboración propia, 2023)*

Capítulo 3. Metodología empleada en la experimentación.

3.1. Materiales implementados

Para la presente investigación se utilizaron 5 diferentes agregados pétreos, los cuales presentaban un alto valor de azul de metileno y fueron muestreados en distintos bancos de materiales; 1 en el estado de Guanajuato, 1 en Michoacán, 1 en Jalisco y 2 en Querétaro. Todos ellos 100% producto de trituración de roca sana, a continuación, se muestra en la tabla 8 un resumen con información de estos bancos de materiales:

Tabla 8 Datos de los bancos de material utilizados

N°	1	2	3	4	5
Banco de material	Agremex	La Roca	Agregados Chapala, de García Ascencio	Buenavista	Aeropuerto
Estado	Guanajuato	Michoacán	Jalisco	Querétaro	Querétaro
Ubicación	Carretera Querétaro - León Km 157+800 Desviación Izquierda	Carretera Morelia-Salamanca Km 25+500 Desviación a la derecha 300 m	-	E.C. (Querétaro - San Miguel de Allende) - Buenavista	Carr. Querétaro-Tequisquiapan, Km. 35, Desviación Derecha
Latitud	20.94972	19.88035	-	20.86198	20.59515
Longitud	-101.53083	-101.14425	-	-100.4716	-100.06969
Origen del material	-	-	-	-	-
Tratamiento del agregado pétreo	Trituración Total y Cribado	Trituración Total	Trituración Total y Cribado	Trituración Total y Cribado	Trituración Total y Cribado
Usos recomendados	Balasto, Base, Concreto Asfáltico, Mezcla Asfáltica en el lugar, Mampostería	Terracerías, Balasto, Base, Concreto Asfáltico, Mezcla Asfáltica en el lugar, Sello, Concreto Hidráulico	-	Subbase, Base, Concreto Asfáltico, Mezcla Asfáltica en el lugar, Sello, Concreto Hidráulico	Subbase, Base, Concreto Asfáltico, Mezcla Asfáltica en el lugar

(Elaboración propia, 2023)



*Fig. 31 Agregado pétreo Agremex
(Elaboración propia, 2023)*



*Fig. 32 Agregado pétreo La Roca
(Elaboración propia, 2023)*

En cuanto a las emulsiones asfálticas implementadas, se utilizaron un total de 8 emulsiones diferentes, usando 4 emulsificantes con características propias y reacción de rompimiento diferente, estos emulsificantes fueron el A-208, N-480L, A-510 y A-45T; así mismo se utilizó la dosificación mínima y máxima recomendada para cada emulsificante, siendo estas 12kg/ton y 18kg/ton. El asfalto base utilizado para la fabricación de las emulsiones fue un PG 64-22, procedente de la refinería de Salamanca, Guanajuato; la concentración de asfalto fue al 62% mínimo; la concentración de polímero adicionado fue de 3% de látex.



*Fig. 33 Fase acuosa para la fabricación de la emulsión
(Elaboración propia, 2023)*



*Fig. 34 Fabricación de la emulsión asfáltica
(Elaboración propia, 2023)*



*Fig. 35 Emulsiones con A-N480L y A45T
(Elaboración propia, 2023)*

De acuerdo con el objetivo del trabajo, se analizó el comportamiento de los microaglomerados bajo diferentes condiciones, variando los porcentajes de hidróxido de calcio y el material retenido en la malla N°200 del agregado pétreo, obteniendo un total de 37 fórmulas de trabajo distintas de microaglomerados .

Las condiciones que se evaluaron fueron las siguientes:

- I. Agregado en estado original.
- II. Agregado con sustitución al 50% del material fino por hidróxido de calcio, sin pretratamiento.
- III. Agregado con sustitución al 100% del material fino por hidróxido de calcio, sin pretratamiento.
- IV. Agregado con sustitución al 50% del material fino por hidróxido de calcio, con pretratamiento.
- V. Agregado con sustitución al 100% del material fino por hidróxido de calcio, con pretratamiento.

3.2. Caracterización de los agregados pétreos

La caracterización de los agregados consistió en determinar la distribución y la curva granulométrica, para conocer si era tipo A o B, así como la determinación de su calidad.

Para el análisis granulométrico se empleó el método de prueba de la SICT M·MMP·4·04·004.

El procedimiento fue el siguiente:

- I. Se realizó el secado y cuarteo del material
- II. Se realizó un lavado del agregado pétreo con la ayuda de la malla N°200 para eliminar las partículas que pasan esta malla (fig. 36). Una vez limpio el agregado (fig. 37), se metió al horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ para su secado hasta masa constante.
- III. Una vez seco, se realizó el análisis por cribado utilizando el arreglo de mallas que establece la norma N·CMT·4·04/17 para los microaglomerados.



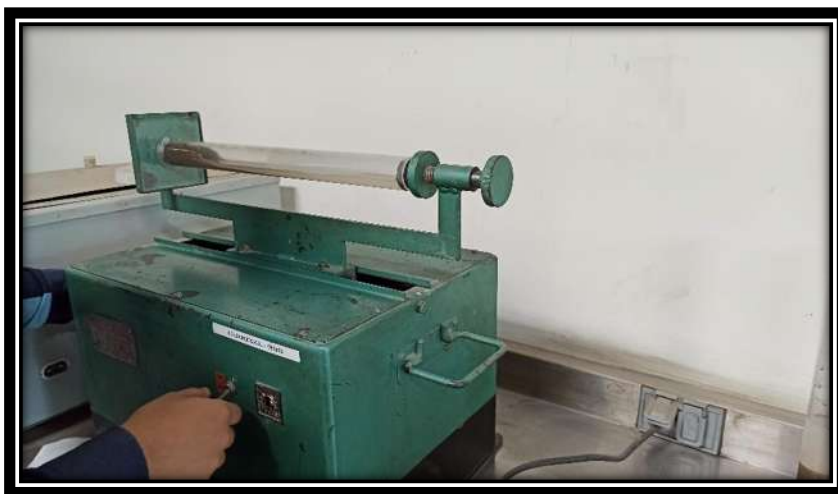
*Fig. 36 Lavado del agregado
(Elaboración propia, 2023)*



*Fig. 37 Agregado después del lavado
(Elaboración propia, 2023)*

La calidad del agregado pétreo se evaluó mediante las pruebas de: equivalente de arena (fig. 38) y azul de metileno (fig. 39), las cuales se realizaron con base a los métodos de prueba M·MMP·4·04·004 y M·MMP·4·04·014 de la SICT respectivamente.

La prueba de equivalente de arena solo se realizó en el agregado pétreo original, así como para el caso del azul de metileno.



*Fig. 38 Desarrollo de la prueba equivalente de arena
(Elaboración propia, 2023)*



*Fig. 39 Obtención de azul de metileno
(Elaboración propia, 2023)*

3.3. Análisis de calidad de las emulsiones asfálticas

Como se mencionó anteriormente, para realizar el estudio se fabricaron 8 diferentes emulsiones, todas ellas emulsiones catiónicas de rompimiento controlado rápido.

A cada emulsión se le determinó una clave de identificación, la primera parte consta del emulsificante utilizado y la segunda va de acuerdo con la dosificación utilizada, por lo que las emulsiones utilizadas fueron las siguientes:

- I. A-208 (12kg/ton)
- II. A-208 (18kg/ton)
- III. A-N480L (12kg/ton)
- IV. A-N480L (18kg/ton)
- V. A-510 (12kg/ton)
- VI. A-510 (18kg/ton)
- VII. A-45T (12kg/ton)
- VIII. A-45T (18kg/ton)

Las pruebas de calidad que se realizaron a las emulsiones fueron el retenido en la malla N°20 y el contenido de residuo asfáltico. Para poder llevar a cabo las pruebas, se tuvieron que dejar en reposo las emulsiones al menos 18 horas después de su fabricación.

3.3.1 Retenido en malla N°20

Se llevó a cabo mediante el método de prueba M·MMP·4·05·014 de la SICT; esta prueba permite cuantificar el asfalto de una emulsión que es retenida en la malla N°20, sirve para estimar la uniformidad de la emulsión cuando esta contiene glóbulos de asfalto relativamente grandes, los cuales puede llegar a provocar problemas de estabilidad, así como ocasionar problemas durante el bombeo de las emulsiones.

El cálculo del retenido se realiza con la siguiente fórmula:

$$R_{20} = \frac{W_{r20} - W_{t20}}{W_{i20} - W_{t20}} * 100$$

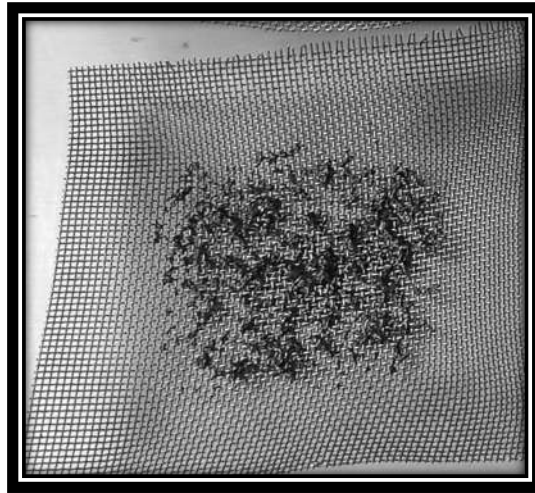
Donde:

R_{20} = Material asfáltico retenido en la malla N°20, (%)

W_{i20} = Masa de la malla N°20 con su retenido y fondo, antes de secarse en el horno, (gr)

W_{r20} = Masa de la malla N°20 con su retenido y fondo, después de secarse en el horno, (gr)

W_{t20} = Masa de la malla N°20 y su fondo, sin retenido, (gr)



*Fig. 40 Asfalto retenido en la malla N°20
(Elaboración propia, 2023)*

3.3.2 Contenido de residuo asfáltico

Para determinar el contenido de residuo asfáltico se siguió el método de prueba M·MMP·4·05·012 de la SICT, dicho procedimiento nos permite determinar mediante destilación, el residuo asfáltico, el contenido de agua y disolventes. Para este estudio solamente se determinó el porcentaje de residuo asfáltico inmerso en la emulsión asfáltica.

La prueba consiste básicamente en efectuar la destilación de una muestra de emulsión asfáltica, hasta una temperatura máxima de 260°C, para separar el residuo asfáltico.

El residuo asfáltico producto de la destilación, expresado como un porcentaje de la masa inicial de la muestra, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\% CA = \frac{W_f - W_t}{W_i - W_t} * 100$$

Donde:

%CA = Contenido de residuo asfáltico

W_t = Masa de la tara, (gr)

W_i = Masa inicial de la muestra, (gr)

W_f = Masa final de la muestra, (gr)

3.4. Diseño de los microaglomerados

Una vez caracterizados los agregados pétreos y las emulsiones asfálticas a utilizar, se procedió a realizar los diferentes diseños.

Lo primero que se llevó a cabo fue calcular el contenido teórico de asfalto y el porcentaje de emulsión requerido, para la condición original del agregado; posteriormente se procedió a realizar la prueba de tiempo de mezclado para determinar la fórmula de trabajo, una vez obtenido este dato se elaboraron las pastillas requeridas para la prueba de cohesión con las diferentes fórmulas de trabajo obtenidas y se ensayaron.

Después se repitió el procedimiento anterior para las 4 condiciones diferentes restantes, tomando como base las fórmulas de trabajo obtenidas para el agregado original.

Para poder llevar a cabo estos ensayos, lo primero que se hizo fue la sustitución del material fino por el hidróxido de calcio, para lo cual se realizó el cribado del material, separando la fracción fina, y de acuerdo con la condición a ensayar se realizó dicha sustitución en porcentaje del peso seco del agregado, después el material se mezcló de manera uniforme y cuando la condición a ensayar requería un pretratamiento, se adicionó 2% de agua, con respecto al peso seco del agregado, se mezcló nuevamente, deshaciendo los grumos generados; por último se dejó reposar por 24 horas antes de proceder a realizar las pruebas.

Una vez obtenidos los resultados, se eligieron las mejores fórmulas de trabajo de cada condición para cada agregado, con las 37 fórmulas de trabajo definidas se procedió a realizar los especímenes para las pruebas de rueda cargada y abrasión en vía húmeda.

Por último, se realizó el cálculo del contenido óptimo de asfalto, calculándolo a partir de los resultados de estas dos últimas pruebas.

3.4.1 Método del Área Superficial

El área de superficie del agregado de trabajo se determina multiplicando el porcentaje de agregado que pasa por un tamiz dado por un factor de área de superficie basado en el tamaño del tamiz, a continuación, se describe brevemente el cálculo de este. Las unidades de superficie se dan el ft^2/lb y m^2/kg . Para obtener el área de superficie corregida (CSA) se calculó con la siguiente fórmula.

$$CSA = SA * \frac{2.65}{ASG}$$

Donde:

SA = Área superficial total

ASG = Es la gravedad específica aparente del agregado.

Conociendo el área superficial y el espesor deseado de la película de asfalto, se puede obtener el volumen de asfalto requerido. A partir de estos parámetros se calculó el asfalto necesario para recubrir la superficie.

$$SAB = CSA * t * 0.02048 * SG_B$$

$$SAB = CSA * t * 0.09996 * SG_B$$

Donde:

SAB = Volumen de asfalto requerido, en porcentaje del peso total seco del agregado

CSA = Área superficial corregida, de agregado seco

T = Espesor de la película de asfalto, en micras

SG_B = Gravedad específica del asfalto
0.02048 y 0.09996 son coeficientes de conversión para las unidades de la ecuación

Si no se conoce la gravedad específica del asfalto, el asfalto requerido para cubrir el agregado se puede calcular asumiendo SGB=1.0. El error que resulta de asumir SGB=1.0 es pequeño y no afectará mucho a los requisitos finales de diseño.

Asfalto total

El requisito total de asfalto se obtuvo sumando el porcentaje de asfalto requerido para el espesor de la película y el porcentaje de asfalto requerido para la absorción. Todos los porcentajes se basan en el peso seco del agregado. El total se obtuvo de la siguiente manera:

$$BR = SAB + KA$$

$$BR = (CSA * t * 0.02048 * SG_B) + KA$$

$$BR = (CSA * t * 0.09996 * SG_B) + KA$$

Donde:

BR = Asfalto total requerido, en porcentaje del peso total seco del agregado

KA = Porcentaje absorbido de queroseno del peso total seco del agregado

El porcentaje requerido de emulsión asfáltica se puede calcular dividiendo el asfalto total requerido para la emulsión.

3.4.2 Prueba de tiempo de Mezclado

Esta prueba permitió determinar las proporciones adecuadas de los materiales para la fórmula de trabajo de los microaglomerados. Se llevaron a cabo diferentes combinaciones, variando las cantidades de agua, así como la cantidad y los tipos de aditivos y filler de aportación, las variaciones se realizaron con respecto al peso seco del agregado pétreo.

Las mezclas se prepararon con materiales acondicionados a una temperatura de 25°C, para lo cual se tuvo que hacer uso de una cámara con regulación de temperatura, cuando la temperatura ambiente era demasiado fría. El mezclado se realizó de manera manual a una velocidad promedio de 60 – 70 RPM con movimientos circulares los primeros 30 seg, posterior a ello, se realizaba a una velocidad promedio de 40 – 50 RPM.



*Fig. 41 Mezclado de los elementos del microaglomerado
(Elaboración propia, 2023)*

Cada mezcla realizada se evaluó de manera visual una vez que esta se endurecía o que la manejabilidad era muy baja y se fracturaba, de esta manera se determinaba si la emulsión había roto. Si esto ocurría, el tiempo que había transcurrido se establecía como tiempo de mezcla y se registraba. La fig. 42 muestra la apariencia de la mezcla de microaglomerado después de romper correctamente la emulsión.



*Fig. 42 Mezcla después de la ruptura de la emulsión
(Elaboración propia, 2023)*

Si la mezcla presentaba líquidos libres, exceso de espuma o si la mezcla estaba excesivamente dura o rígida antes del tiempo mínimo recomendado, se debía de ajustar la combinación de materiales en las sucesivas mezclas de prueba.

Para el informe de la prueba, el tiempo de mezclado se informaba en segundos.



*Fig. 43 Reporte de tiempo de mezclado, en seg.
(Elaboración propia, 2023)*

3.4.3 Prueba de Cohesión

Una vez determinadas las fórmulas de trabajo de las diferentes condiciones a evaluar, se llevó a cabo la prueba para medir la cohesión desarrollada por los microaglomerados, mediante el método de modos de ruptura.



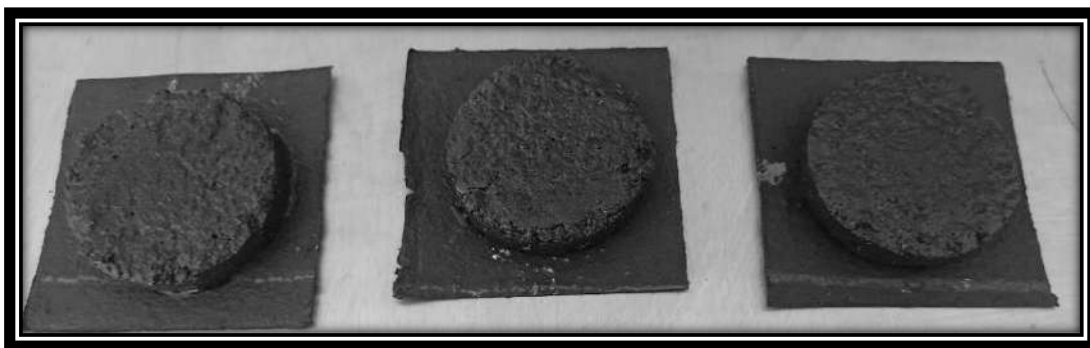
*Fig. 44 Equipo para la prueba de cohesión
(Elaboración propia, 2023)*

Se fabricaron 3 especímenes para cada prueba (fig. 45), ya que las mediciones de torque se realizaron a los 30, 60 y 120 minutos después de verter la mezcla en los moldes. Los moldes en forma de anillo de 6 mm se utilizaron para las granulometrías de tipo A y los de 10 mm para las granulometrías de tipo B.



*Fig. 45 Fabricación de los especímenes para la prueba de cohesión
(Elaboración propia, 2023)*

Una vez que la muestras tenían la firmeza necesaria para resistir derrames, se retiraron los moldes en forma de anillo, (fig. 46).



*Fig. 46 Especímenes después de retirar los moldes
(Elaboración propia, 2023)*

Se calibró el instrumento para realizar el ensayo estableciendo con la presión de aire en 200 kPa y se verificó que el pie bajara hacia la muestra a un ritmo de entre 8 y 10 cm por segundo. El medidor de torque se colocó en cero y se ubicó sobre la biela. Se aseguró que el pie de neopreno estuviera preparado para el ensayo.

Para el informe se registró la medición del torque junto con el modo de ruptura y el intervalo de tiempo.



*Fig. 47 Especímenes después de la prueba de torque
(Elaboración propia, 2023)*

3.4.4 Prueba de Rueda Cargada (LWT)

Esta prueba se considera como una prueba de desempeño, mide la resistencia de la mezcla contra la exudación bajo tránsito intenso. Mediante esta prueba se estableció el contenido máximo de asfalto necesaria para evitar la exudación de las mezclas de microaglomerado.

Para la preparación de los especímenes se realizaron mezclas de prueba para ajustar y determinar las características de consistencia de la formulación seleccionada a través de los tiempos de mezclado.

La mezcla se realizó rápidamente para lograr colocarla 30 segundos después de la adición de la emulsión. El molde seleccionado se centró sobre un pedazo de papel asfaltado y se rellenó uniformemente con la mezcla.

Cuando la muestra se endureció lo suficiente para evitar el desplazamiento, se retiró el molde. Cada muestra se secó durante un mínimo de 12 horas hasta peso constante en un horno a 60°C (140°F) $\pm 3^{\circ}\text{C}$ (5°F).



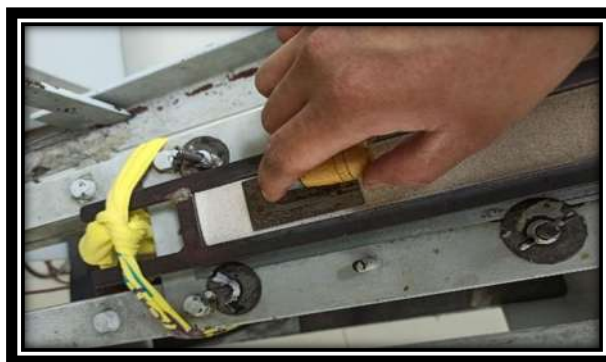
*Fig. 48 Espécimen para prueba de rueda cargada (LWT)
(Elaboración propia, 2023)*

La temperatura de prueba fue a $22^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ($72^{\circ}\text{F} \pm 5^{\circ}\text{F}$) por lo que cada espécimen se acondicionó durante 1 hora y posteriormente se montó sobre la máquina de prueba. La carga aplicada para la prueba fue de 56.7 kg.

La máquina de pruebas se calibró a 44 ciclos por minuto, una vez calibrada se inició la prueba. La muestra se compactó durante 1000 ciclos, posteriormente se descargó y se eliminaron las partículas sueltas de la muestra.

Se registró el peso como peso de la muestra original, y nuevamente se montó en su posición original y se aseguró para evitar la pérdida de arena.

Se pesaron 200 gramos de arena y se calentaron a 82.2°C (180°F). Se extendió uniformemente en el marco y se cubrió con la tira metálica, esto en menos de dos minutos (Fig. 49), como lo indica el método de prueba, posteriormente se compactó nuevamente el espécimen durante 100 ciclos.



*Fig. 49 Extendido de la arena en la prueba LWT
(Elaboración propia, 2023)*

Se desmontó la muestra sobre un contenedor de desechos y se golpeó suavemente para eliminar la arena suelta, después se registró el peso como peso final de la muestra con la arena adherida.

Para el cálculo de la adhesión de arena se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Arena adherida} = \frac{W_f - W_i}{A_t}$$

Donde:

W_f = Peso final de la muestra con arena adherida, en gr

W_i = Peso de la muestra original, en gr

A_t = Área de la tira de metal, en m^2

Para el informe se registró la arena adherida por m^2 .

3.4.5 Prueba de Abrasión en Vía Húmeda (WTAT)

Esta prueba también se considera una prueba de desempeño, ya que simula el desgaste que puede experimentar en campo el microaglomerado bajo condiciones de abrasión en húmedo. A través de esta prueba se determinó el contenido mínimo necesario de asfalto para evitar el desprendimiento excesivo de agregado pétreo de la mezcla de microaglomerado, una vez abierta al tránsito.

Al igual que la prueba del LWT, para la preparación de los especímenes se realizaron mezclas de prueba para ajustar y determinar las características de consistencia de la formulación seleccionada a través de los tiempos de mezclado.

Antes de realizar las mezclas de ajuste, se cuarteó una cantidad suficiente del agregado que pasa la malla N° 4 para obtener al menos 800 gramos por mezcla.

Una vez obtenida la mezcla de ajuste se mezclaron todos los componentes adecuadamente y de manera homogénea. Posteriormente se añadió la emulsión asfáltica y se mezcló durante 30 segundos de manera manual y en círculos, posteriormente se vertió la mezcla en el molde, el cual se colocó sobre papel asfaltado.

La mezcla se niveló hasta el borde, cuidando que la superficie quedara plana, de textura uniforme, con el objetivo de lograr resultados precisos. Una vez que la muestra generó la suficiente cohesión para no perder su forma, se retiró el molde y se dejó curando cada espécimen por lo menos 3 horas al aire libre, posteriormente eran colocados en el horno a 60°C (140°F) durante un mínimo de 15 horas y no más de 23 horas.

Se retiró el espécimen seco del horno (fig. 50) y se dejó enfriar a temperatura ambiente y se registró el peso.



*Fig. 50 Especimen para la prueba WTAT después de secar en el horno
(Elaboración propia, 2023)*

Se colocó el espécimen en un baño de agua a 25°C durante 60 minutos antes de iniciar la prueba, después se acopló a la bandeja y a la placa de montaje. Se cubrió el espécimen por completo con 6.35 mm de agua a 25°C como se muestra en la fig. 51.



*Fig. 51 Preparación de la muestra para la prueba WTAT
(Elaboración propia, 2023)*

Se aseguró el cabezal de abrasión de la manguera de goma al eje de la máquina Hobart, así como la velocidad al mínimo. La prueba duró de acuerdo con lo indicado en la tabla N°9, para el modelo A-120, mostrada a continuación.

Tabla 9 Factores de corrección

Factores de corrección de pérdidas para la correlación con C-100			
Modelo Hobart	Duración Equivalente de Ensayo	Multiplique la pérdida de gramos por el factor adecuado para obtener la pérdida por área unitaria	
	Segundos	gr/ft ²	gr/m ²
C-100	300 ± 2	3.06 * 1.0	32.9 * 1.0
A-120	405 ± 2	2.78 * 1.17	29.9 * 1.17
N-50	315 ± 2	3.48 * 0.78	37.5 * 0.78
N-50 Modificada	315 ± 2	3.06 * 1.0	32.9 * 1.0

(ISSA, 2012)



*Fig. 52 Desarrollo de la prueba WTAT
(Elaboración propia, 2023)*

La manguera fue rotada o reemplazada después de cada pasada a fin de obtener una sección sin abrasión para cada ensayo.

Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos de la investigación elaborada, así como el análisis de estos.

4.1. Agregados pétreos

4.1.1 Distribución granulométrica

A continuación, en la tabla 10 se presentan los resultados del porcentaje que pasa a través de cada malla para cada uno de los 5 agregados del estudio. De acuerdo con los parámetros de la norma N-CMT-4-04/17 de la SICT, los agregados de los 5 bancos tienen una granulometría tipo A, por lo que son aptos para obras menores de un millón de ejes equivalentes.

Así mismo en las fig. 53 se muestran las curvas de distribución granulométrica con su límites correspondientes.

Tabla 10 Distribución granulométrica de los agregados

Malla		% Que pasa				
Abertura (mm)	Designación	Agremex	La Roca	Buenavista	García Ascencio	Aeropuerto
9.5	3/8 in	100	100	100	100	100
4.75	N°4	99	97	98	100	97
2.36	N°8	65	58	62	65	65
1.18	N°16	42	41	42	41	41
0.600	N°30	27	30	27	23	23
0.300	N°50	21	25	21	15	15
0.150	N°100	18	23	19	12	12
0.075	N°200	14	19	15	7	8
Tipo de Agregado		A	A	A	A	A

(Elaboración propia, 2023)

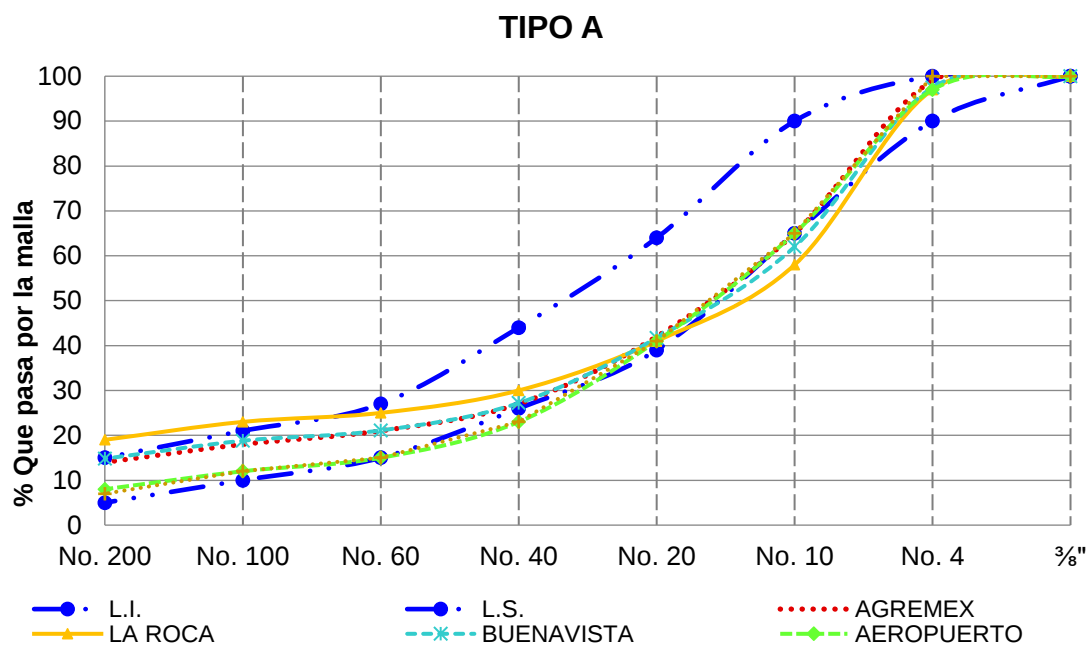


Fig. 53 Curvas granulométrica de los agregados
(Elaboración propia, 2023)

4.1.2 Calidad de los agregados

Los resultados de las pruebas de calidad realizadas a los agregados pétreos se muestran en la tabla 11 y de acuerdo con la tabla 1, estos deben cumplir con un valor mínimo de 65% para la prueba de equivalente de arena, mientras que para el azul de metileno se debe clasificar su nivel de reactividad con base a la tabla 12.

Tabla 11 Calidad de los agregados pétreos

Característica	Agremex	La Roca	García Ascencio	Buenavista	Aeropuerto
Equivalente de arena	72.1	61.2	77.6	54.3	82.2
Azul de Metileno	22	22	27	10	13

(Elaboración propia, 2023)

Tabla 12 Clasificación de los niveles de reactividad

Azul de Metileno		
Calidad del material (Nivel de reactividad)	0 – 6	Excelente
	7 – 12	Marginalmente Aceptable
	13 – 19	Alta reactividad
	> 20	Muy reactivo

(Elaboración propia, 2023)

Con base en los resultados, los agregados pétreos con menor calidad son La Roca y Buenavista, ya que no cumplen con el valor mínimo de equivalente de arena, siendo el de Buenavista con el menor valor, sin embargo, su nivel de reactividad es marginalmente aceptable y es el que menor valor de azul de metileno tiene. El agregado que mejor cumple con el equivalente de arena es el de Aeropuerto, con 82.2% y tiene el segundo menor valor de azul de metileno. El mayor valor de azul de metileno lo tiene el material de García Ascencio con 27, el cual se clasifica como muy reactivo.

En las imágenes 55 y 56 se pueden apreciar los resultados que se obtuvieron con las muestras de La Roca y Agremex para la prueba de equivalente de arena, en las cuales se pueden apreciar las arenas separadas de los finos, así como las alturas que se obtuvieron de cada una.

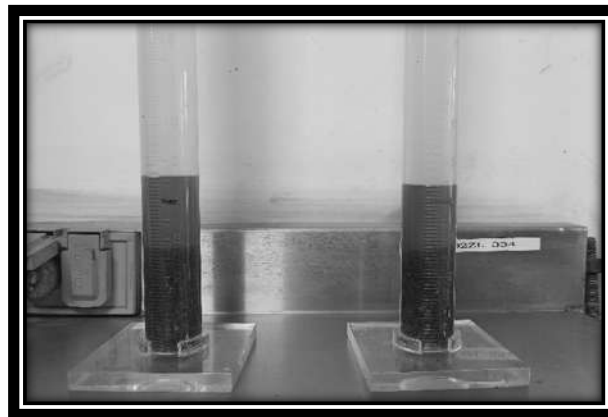


Fig. 54 Prueba de equivalente de arena La Roca
(Elaboración propia, 2023)

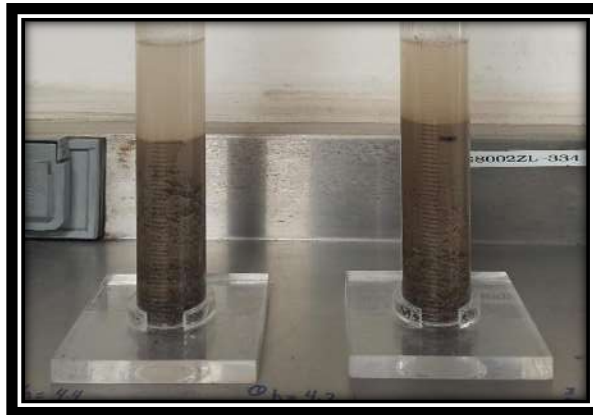


Fig. 55 Prueba de equivalente de arena Agremex
(Elaboración propia, 2023)

En las Fig. 57, 58 y 59 se muestran los resultados obtenidos en la prueba de azul de metileno para cada uno de los 5 agregados del estudio.

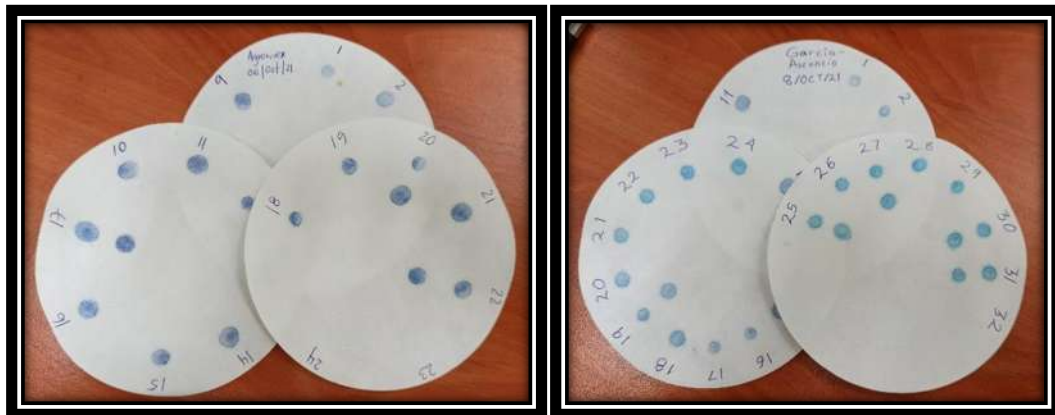


Fig. 56 Resultados de azul de metileno Agremex y García Ascencio
(Elaboración propia, 2023)



Fig. 57 Resultados azul de metileno La Roca y Aeropuerto
(Elaboración propia, 2023)



Fig. 58 Resultado azul de metileno Buenavista
(Elaboración propia, 2023)

4.2. Emulsiones asfálticas

Para la realización del estudio se planificó la fabricación de las diferentes emulsiones a implementar en lotes de 2 litros por emulsificante y dosificación, con el objetivo de generar el menor desperdicio de material y que no estuvieran mucho tiempo almacenadas; conforme se requirió, se fabricaron las emulsiones con anticipación, de manera que el desarrollo de la investigación no se retrasara debido a falta de emulsión asfáltica. Cada lote que se fabricó fue analizado, con el objetivo de garantizar la calidad a lo largo del estudio.

4.2.1 Retenido en malla N°20

Las emulsiones utilizadas para realizar las mezclas de microaglomerado cumplieron con la especificación establecida en la tabla 4. La tabla 13 muestra los resultados que se obtuvieron en las primeras muestras fabricadas para el estudio. Todas las muestras cumplieron con esta prueba, por lo que ninguna presentó exceso de grumos, lo cual podría provocar un rompimiento prematuro de la emulsión. En la fig. 60 se puede observar los retenidos que tuvieron algunas de las muestras analizadas.

Tabla 13 Resultados retenido en malla N°20

Emulsificante	Dosificación	Especificación	% Ret.
A – 208	12kg/ton	0.1%, máx.	0.01
	18kg/ton		0.01
N – 480L	12kg/ton		0.10
	18kg/ton		0.01
A – 510	12kg/ton		0.01
	18kg/ton		0.10
A – 45T	12kg/ton		0.06
	18kg/ton		0.00

(Elaboración propia, 2023)

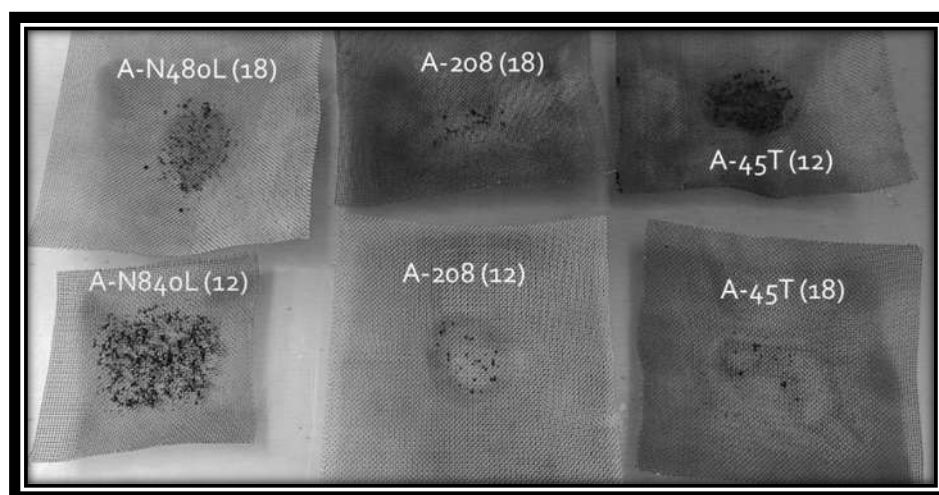


Fig. 59 Asfalto retenido de diferentes emulsiones
(Elaboración propia, 2023)

4.2.2 Contenido de residuo asfáltico

El contenido de residuo asfáltico a cumplir era de 62% mín. de acuerdo con la tabla 4, sin embargo, se tuvieron ligeras variaciones durante la producción de las emulsiones, por lo que no se pudo obtener el mismo residuo para todas.

En la tabla 14 se muestran los resultados de las primeras emulsiones fabricadas, donde el máximo contenido de residuo asfáltico que se obtuvo fue en la emulsión A – 208 a 18 kg/ton con un 64.8 % de CA, mientras que el mínimo fue de 62.2% de CA en la emulsión A – 208 a 12 kg/ton.

Tabla 14 Resultados de residuo asfáltico en las emulsiones

Emulsificante	Dosificación	Especificación	% CA
A – 208	12kg/ton	62%, mín.	62.2
	18kg/ton		64.8
N – 480L	12kg/ton		63.0
	18kg/ton		63.5
A – 510	12kg/ton		63.7
	18kg/ton		63.6
A – 45T	12kg/ton		63.5
	18kg/ton		63.3

(Elaboración propia, 2023)

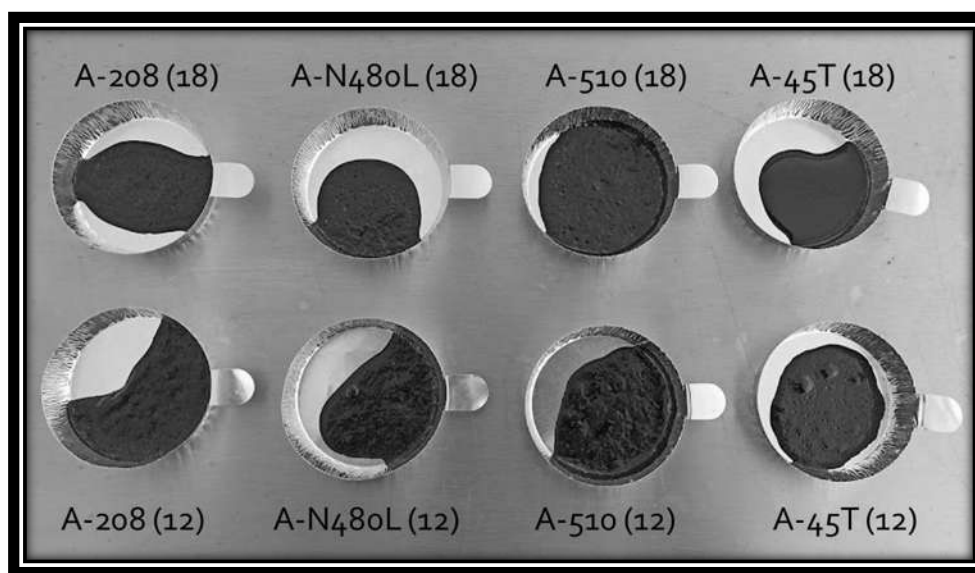


Fig. 60 Residuo asfáltico de muestras ensayadas
(Elaboración propia, 2023)

4.3. Evaluación del comportamiento del hidróxido de calcio en los microaglomerados

Una vez analizados los agregados pétreos y las emulsiones a utilizar para las mezclas de microaglomerado, se procedió a realizar los diseños, para evaluar y comparar el comportamiento que presentan los microaglomerados con agregado en condiciones originales y microaglomerados con sustituciones de material pétreo que pasa la malla N°200 por hidróxido de calcio. En total se evaluaron 36 fórmulas de trabajo hasta la prueba de cohesión, de estas fórmulas solamente a 8 se les realizó la prueba de rueda cargada y abrasión en húmedo.

4.3.1 Método del Área Superficial

Para cada agregado pétreo se realizó la prueba del área superficial para determinar el contenido teórico de asfalto en la condición original del agregado pétreo y este porcentaje se utilizó para todas las condiciones de ese mismo agregado, para tener las mismas condiciones en la comparativa. Además, para todos los materiales se utilizó la curva para materiales con propiedades promedio.

En la tabla 15 se muestran los contenidos teórico de asfalto y emulsión que se calcularon para cada agregado.

Tabla 15 Porcentaje de emulsión en el sistema por agregado

Agregado pétreo	Contenido teórico de asfalto, en %.	Emulsión en el sistema, en %.
Aeropuerto	9.2	14.5
García Ascencio	9.2	14.5
Agremex	10.0	16.0
Buenavista	10.0	16.0
La Roca	10.2	16.5

(Elaboración propia, 2023)

Como se puede observar, el agregado de la Roca requirió mayor cantidad de asfalto, debido a que su contenido de material fino es muy grande, así como por su composición granulométrica. Por otra parte, el agregado con el menor contenido teórico de asfalto es el de aeropuerto.

4.3.2 Prueba de tiempo de Mezclado

Los componentes principales para encontrar las fórmulas de trabajo fueron: agua y emulsión asfáltica, pero cuando estos componentes no eran suficientes para alcanzar los tiempos de mezclado recomendados se utilizaba filler de aporte (Cemento Portland o Hidróxido de Calcio) y aditivos (Sulfato de Aluminio o A – N480L) de acuerdo con lo que requería el diseño.

En las tablas 16, 17, 18, 19 y 20 se muestran las fórmulas de trabajo que cumplían con los 120 seg. mín. que recomienda la ISSA para la prueba, para cada uno de los agregados, con las 5 condiciones evaluadas. El primer agregado evaluado fue el de Aeropuerto, con el cual se analizaron dos condiciones extras:

- i. Agregado con 100% cal, pretratado 24 h., sin agua.
- ii. Agregado con 100% cal, pretratado 4 h., con 1% agua.

Esto con el objetivo de evaluar si una de estas condiciones tenía algún beneficio adicional en los tiempos de mezclado o era similar a alguna de las condiciones establecidas anteriormente y poder seleccionar el tiempo y tipo de pretratamiento óptimo para los agregados. A continuación, se muestra la tabla 16 con los resultados obtenidos para el agregado de Aeropuerto:

Tabla 16 Tiempos de mezclado agregado Aeropuerto

Condición	Emulsificante (kg/ton)	Filler (%)	Agua (%)	Aditivo (%)	Emulsión (%)	Tiempo de mezclado (seg)	Tiempo de ruptura (min)	ID
Agregado Natural (Sin Cal)	A – N480L (12)	-	10.0	0.3 SA	14.5	130	15	1
	A – N480L (12)	0.3 CAL	11.0	-	14.5	125	15	2
	A – 510 (12)	0.3 CP	11.0	0.6 SA	14.5	120	5	5
	A – 510 (12)	0.3 CAL	9.0	-	14.5	145	15	4
Agregado con 50% Cal, sin pretratamiento	A – N480L (12)	-	12.0	0.3 N480L	14.5	125	17	6
Agregado con 100% Cal, sin pretratamiento	A – N480L (12)	-	13.0	0.5 SA	14.5	140	19	7
	A – N480L (12)	-	12.0	0.3 N480L	14.5	135	21	8
Agregado con 100% Cal, pretratado 24 hr sin agua.	A – N480L (12)	-	13.0	0.3 SA	14.5	135	18	9
	A – N480L (12)	-	11.5	0.3 N480L	14.5	125	17	10
Agregado con 100% Cal, pretratado 4 hr., con 1% agua	A – N480L (12)	-	9.0	-	14.5	120	22	11
Agregado con 50% Cal, pretratado 24 hr., con 1% agua	A – N480L (12)	-	11.0	-	14.5	130	17	12
	A – N480L (12)	-	11.0	0.3 SA	14.5	120	17	13
Agregado con 100% Cal, pretratado 24 hr, con 1% Agua	A – N480L (12)	-	11.5	-	14.5	130	19	14
	A – N480L (12)	-	11.5	0.3 SA	14.5	120	17	15

(Elaboración propia, 2023)

Los tiempos de mezclado que se obtuvieron fueron entre 120 y 145 seg, mientras que los de ruptura estuvieron entre los 5 y 22 min.

Para el agregado natural se utilizaron dos emulsificantes diferentes (A – N480L y A – 510) con la misma dosificación (12 kg/ton), obteniendo tiempos de mezclado similares y el mismo tiempo de ruptura, pero con menor porcentaje de agua usando A – 510 como

era de esperarse (ID 2 y 4), ya que este emulsificante es menos reactivo en comparación con el A – N480L. En cuanto a los tiempos de ruptura, estos fueron iguales a excepción del N° 6, el cual tuvo un tiempo de ruptura bastante bajo, debido a que en esta fórmula de trabajo se incorporó Cemento Portland, lo que aceleró de manera considerable el rompimiento.

Los agregados que no tuvieron pretratamiento requirieron mayor porcentaje de agua para poder alcanzar el tiempo de mezclado recomendado en comparación con el agregado natural, así como tiempos de ruptura mayores.

El agregado con una sustitución del 100% con cal sin pretratamiento y el agregado con la misma sustitución, pero con pretratamiento sin agua obtuvieron resultados muy similares, por lo que la segunda opción fue descartada para ser analizada en los agregados restantes ya que no se obtuvieron resultados significantes que justificaran su análisis.

El agregado que tuvo un pretratamiento de 4 horas permitió reducir el porcentaje de agua, el cual en parte se debió a la adición de agua al momento de hacer el pretratamiento, además no fue necesario hacer uso de filler mineral o aditivos para alcanzar el tiempo de mezclado mínimo.

Los agregados que tuvieron un pretratamiento de 24 horas antes de realizar las mezclas de microaglomerado obtuvieron tiempos de mezclado muy similares al agregado original, mientras que los tiempos de ruptura fueron ligeramente más prolongados, necesitando porcentajes más grandes de agua. Por lo que no se pudo observar una gran mejorar para este agregado, en la prueba de tiempos de mezclado, con las sustituciones del agregado fino por hidróxido de calcio.

Esto se puede observar al comparar las fórmulas de trabajo N° 1, 11 y 13, en las cuales se utilizaron los mismos componentes; a mayor sustitución por hidróxido de calcio, mayor cantidad de agua, debido a que el área superficial a cubrir era mayor.

También se concluyó que adicionar Sulfato de Aluminio como aditivo a los agregados con hidróxido de calcio, reducía los tiempos de mezclado (fórmulas de trabajo N° 10, 11, 12 y 13).

En la tabla 17 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de García Ascencio.

Tabla 17 Tiempos de mezclado agregado García Ascencio

Condición	Emulsificante (kg/ton)	Filler (%)	Agua (%)	Aditivo (%)	Emulsión (%)	Tiempo de mezclado (seg)	Tiempo de ruptura (min)	ID
Agregado Natural (Sin Cal)	A – 45T (12)	0.5 CAL	14.0	0.5 SA	14.5	135	14	19
Agregado con 50% Cal, sin pretratamiento	A – 510 (12)	-	14.0	0.8 SA	14.5	130	20	20
	A – 510 (12)	-	12.5	0.3 N480L	14.5	135	20	21
Agregado con 100% Cal, sin pretratamiento	A – 510 (12)	-	14.5	-	14.5	140	21	22
	A – 510 (12)	-	13.5	0.3 N480L	14.5	125	19	23
Agregado con 50% Cal, pretratado 24 hr., con 1% Agua	A – 510 (12)	-	12.0	-	14.5	120	20	24
	A – 510 (12)	-	12.0	0.3 N480L	14.5	130	20	25
Agregado con 100% Cal, pretratado 24 hr, con 1% Agua	A – 510 (12)	-	14.5	-	14.5	135	18	26
	A – 510 (12)	-	13.0	0.3 N480L	14.5	120	18	27

(Elaboración propia, 2023)

El agregado de García Ascencio tiene el valor de azul de metileno más alto del estudio, por lo que fue necesario implementar las emulsiones asfálticas con los dos emulsificantes menos reactivos con los que se contaba (A – 510 y A – 45T) con una dosificación de 12 kg/ton en ambos casos.

Para el agregado original no se pudo implementar el emulsificante A – 510 ya que este generaba demasiada espuma al momento de realizar la mezcla y provocaba falso Slurry, a pesar de que se probaron diferentes combinaciones con los fillers y aditivos

disponibles para el estudio, en ningún caso fue posible erradicar la espuma y generar cohesión.

Al usar el emulsificante A – 45T fue necesario incluir cal como filler mineral y Sulfato de Aluminio como aditivo, ya que, por la alta reactividad del agregado, este rompía rápidamente una vez que era adicionada la emulsión.

En cuanto a los agregados con sustitución por hidróxido de calcio se observó que no se tuvo reducción en el porcentaje de agua o en el porcentaje de aditivos usados, los tiempos de mezclado no aumentaron considerablemente, en cambio los tiempos de ruptura incrementaron, provocando que el curado de las mezclas fuera más tardado.

Los agregados que tuvieron un pretratamiento antes de la prueba permitieron reducir 0.5% el porcentaje de agua con respecto a los que no recibieron un pretratamiento.

El aditivo que mejor funcionó con este agregado fue el A – N480L, ya que el Sulfato de Aluminio reducía los tiempos de mezclado al implementarlo en la fórmula de trabajo, y conforme aumentaba el porcentaje utilizado el tiempo de mezclado disminuía.

Un efecto que se observó en ciertas mezclas de prueba con el agregado al 50% de hidróxido de calcio sin pretratamiento fue el siguiente: después de agregar la emulsión asfáltica a la mezcla, al ser mezclados y homogeneizados, se generaba de manera muy rápida cierta cohesión, pero sin impedir el seguir mezclándola, por lo cual se procedía a seguir mezclando, lo que provocaba que la cohesión generada se perdiera de manera gradual hasta volverse fluida nuevamente a partir de los 40 seg desde el inicio del mezclado, hasta alcanzar tiempos de mezclado entre 120 y 150 seg. Estas fórmulas de trabajo no fueron incluidas en la tabla debido a que este comportamiento no es deseable al momento de realizar la aplicación de un microaglomerado, ya que podría generar problemas en la maquinaria por la cohesión que genera en un inicio, así como impedir extender de manera uniforme la mezcla sobre el pavimento.

En la tabla 18 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de Agremex.

Tabla 18 Tiempos de mezclado agregado Agremex

Condición	Emulsificante (kg/ton)	Filler (%)	Agua (%)	Aditivo (%)	Emulsión (%)	Tiempo de mezclado (seg)	Tiempo de ruptura (min)	ID
Agregado Natural (Sin Cal)	A – 510 (12)	0.3 CAL	9.0	-	16.0	130	20	28
	A – 510 (12)	-	10.0	0.8 SA	16.0	120	14	29
Agregado con 50% Cal, sin pretratamiento	A – 510 (12)	-	13.0	-	16.0	145	22	30
	A – 510 (12)	-	14.5	0.3 SA	16.0	145	23	31
	A – 510 (12)	-	13.0	0.3 N480L	16.0	135	22	32
Agregado con 100% Cal, sin pretratamiento	No se encontró alguna combinación que cumpliera con los tiempos de mezclado mínimo y que tuviera la manejabilidad adecuada para ser aplicado en campo.							
Agregado con 50% Cal, pretratado 24 hr., con 1% Agua	A – 510 (12)	-	14.0	-	16.0	120	21	33
	A – 510 (12)	-	13.0	0.3 SA	16.0	140	21	34
	A – 510 (12)	-	11.0	0.8 N480L	16.0	120	23	35
Agregado con 100% Cal, pretratado 24 hr, con 1% Agua	No se encontró alguna combinación que cumpliera con los tiempos de mezclado mínimo y que tuviera la manejabilidad adecuada para ser aplicado en campo.							

(Elaboración propia, 2023)

Este agregado altamente reactivo, contenía 13.6% de material fino, un porcentaje alto de agregado que pasa la malla N° 200, por lo que fue necesario usar el emulsificante A – 510 con una dosificación de 12 kg/ton para poder encontrar fórmulas de trabajo que cumplieran con la recomendación mínima de 120 seg de mezclado.

Para el agregado original se determinaron dos diferentes fórmulas de trabajo, en las cuales los tiempos se mezclado fueron muy similares, sin embargo, en la N° 28 el tiempo de ruptura fue mayor con respecto al N°29, en este caso la cal ayudo a retardar el tiempo de ruptura, a comparación del Sulfato de Aluminio.

En los agregados con sustitución al 100%, tanto sin pretratamiento como con pretratamiento no fue posible encontrar alguna combinación que permitiera definir una fórmula de trabajo que cumpliera con el tiempo mínimo de mezclado recomendado, así como la manejabilidad adecuada para su aplicación en campo. Se hicieron pruebas con las emulsiones que contenían emulsificante A – 510 en dosificaciones de 12 y 18 kg/ton y en todas las combinaciones que se hicieron pruebas, al adicionar el agua se formaron grumos difíciles de deshacer, lo que provocó que no se pudiera homogeneizar con los demás componentes de manera correcta, y que por consecuencia al agregar la emulsión la mezcla tuviera una alta viscosidad, lo que complicaba su manejabilidad y bajos tiempos de mezclado.

El agregado con sustitución al 50% sin pretratamiento siguió la tendencia respecto al Sulfato de Aluminio el cual reduce los tiempos de mezclado en comparación con el que usa solamente agua o aditivo A – N480L, por lo que requirió mayor porcentaje de agua para poder cumplir con el tiempo mínimo.

En el caso del agregado con sustitución al 50% con pretratamiento el Sulfato de Aluminio permitió un mayor tiempo de mezclado con menor porcentaje de agua, con respecto al que solo utilizó agua. El aditivo A – N480L permitió reducir el porcentaje de agua para cumplir con el tiempo de mezclado.

A continuación, en la tabla 19 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de La Roca.

Tabla 19 Tiempos de mezclado agregado La Roca

Condición	Emulsificante (kg/ton)	Filler (%)	Agua (%)	Aditivo (%)	Emulsión (%)	Tiempo de mezclado (seg)	Tiempo de ruptura (min)	ID
Agregado Natural (Sin Cal)	A – 510 (12)	0.3 CAL	12.0	-	16.5	155	13	36
Agregado con 50% Cal, sin pretratamiento	No se encontró alguna combinación que cumpliera con los tiempos de mezclado mínimo y que tuviera la manejabilidad adecuada para ser aplicado en campo.							
Agregado con 100% Cal, sin pretratamiento	No se encontró alguna combinación que cumpliera con los tiempos de mezclado mínimo y que tuviera la manejabilidad adecuada para ser aplicado en campo.							
Agregado con 50% Cal, pretratado 24 hr., con 1% Agua	No se encontró alguna combinación que cumpliera con los tiempos de mezclado mínimo y que tuviera la manejabilidad adecuada para ser aplicado en campo.							
Agregado con 100% Cal, pretratado 24 hr, con 1% Agua	No se encontró alguna combinación que cumpliera con los tiempos de mezclado mínimo y que tuviera la manejabilidad adecuada para ser aplicado en campo.							

(Elaboración propia, 2023)

Al igual que el agregado de Agremex, el de La Roca presentaba un valor de azul de metileno de 22, lo que se considera como un agregado muy reactivo, además su porcentaje de material que pasa la malla N° 200 era de 19.5, el cual excedía el límite permitido por la normativa de la SICT. Otro aspecto importante fue que no cumplió con el requisito mínimo del equivalente de 65, ya que la prueba arrojó un resultado de 61.2.

Para el agregado original se realizaron pruebas con 3 de los emulsificantes disponibles: A – N480L a 12 kg/ton, A – 510, con dosificaciones a 12 y 18 kg/ton y el A– 45T con dosificaciones de 12 y 18 kg/ton. Se decidió utilizar el A – 510 a 12 kg/ton ya que tuvo un mejor comportamiento en las primeras pruebas en las cuales solamente se utilizó agua. Se continuo con las pruebas, ya con la adición de filler mineral y aditivos, lo que permitió encontrar una fórmula de trabajo únicamente, adicionando hidróxido de calcio.

Debido al alto porcentaje de material fino que contenía el agregado y a lo anteriormente expuesto, para los agregados con sustituciones por hidróxido de calcio no fue posible determinar alguna fórmula de trabajo, ya que los tiempos de mezclado

rondaban entre los 5 y 40 seg. además, la manejabilidad al momento de mezclar no era la adecuada para poder ser aplicada en campo.

Se realizó una prueba de mezclado con el agregado con sustitución al 50% sin pretratamiento, en la cual se utilizó 16% de agua, excediendo el límite recomendado de 14%, y 0.8% de aditivo A – N480L, para observar el comportamiento de la mezcla y que tanto retardaría el rompimiento de la emulsión, así como el tiempo que tardaría en generar cohesión, esta mezcla tuvo un tiempo de mezclado de 120 seg. alcanzando el mínimo recomendado y un tiempo de rompimiento de 28 min., el cual es demasiado largo, ya que a los 30 min este debería de haber roto por completo y haber generado cierta cohesión, cosa que esta mezcla no había conseguido en dicho tiempo; transcurridos 45 min después de haber realizado la mezcla y fabricado la pastilla, está aún era muy blanda, por lo que no era viable probarla en el equipo de torque. En este punto se decidió no seguir evaluando esta fórmula de trabajo, debido al retardo excesivo de cohesión que había generado el hidróxido de calcio en la mezcla. Por ello se descartó esta fórmula de trabajo, sin embargo, se comprobó que, en porcentajes muy altos, el hidróxido de calcio alarga demasiado los tiempos de rompimiento de la emulsión y generación de cohesión en mezclas de microaglomerado, sin importar que estos sean altamente reactivos.

En la tabla 18 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de Buenavista.

Tabla 20 Tiempos de mezclado agregado Buenavista

Condición	Emulsificante (kg/ton)	Filler (%)	Agua (%)	Aditivo (%)	Emulsión (%)	Tiempo de mezclado (seg)	Tiempo de ruptura (min)	ID
Agregado Natural (Sin Cal)	A – 510 (18)	0.5 CAL	14.0	-	16.0	130	12	37
Agregado con 50% Cal, sin pretratamiento	No se encontró alguna combinación que cumpliera con los tiempos de mezclado mínimo y que tuviera la manejabilidad adecuada para ser aplicado en campo.							
Agregado con 100% Cal, sin pretratamiento	No se encontró alguna combinación que cumpliera con los tiempos de mezclado mínimo y que tuviera la manejabilidad adecuada para ser aplicado en campo.							
Agregado con 50% Cal, pretratado 24 hr., con 1% Agua	No se encontró alguna combinación que cumpliera con los tiempos de mezclado mínimo y que tuviera la manejabilidad adecuada para ser aplicado en campo.							
Agregado con 100% Cal, pretratado 24 hr, con 1% Agua	No se encontró alguna combinación que cumpliera con los tiempos de mezclado mínimo y que tuviera la manejabilidad adecuada para ser aplicado en campo.							

(Elaboración propia, 2023)

El agregado de Buenavista tenía un valor de azul de metileno de 10, el más bajo de los 5 estudiados y su nivel de reactividad era marginalmente aceptable, sin embargo, en la prueba de equivalente de arena, obtuvo el valor más bajo, con 54.3, no pudiendo cumplir con el valor mínimo requerido de 65.

Para el agregado original se hicieron pruebas con los emulsificantes A – N480L y A – 510 con dosificaciones de 12 y 18 kg/ton. El que mejor funcionó en las pruebas preliminares fue el A – 510 a 18 kg/ton, por lo que se continuó usando esta emulsión para encontrar una fórmula de trabajo. La única fórmula que se encontró fue usando cal como filler mineral, ya que el uso de aditivos no logró alcanzar el tiempo mínimo requerido.

En el caso del agregado con sustituciones con hidróxido de calcio no fue posible encontrar fórmulas de trabajo que cumplieran con el tiempo de mezclado ni la manejabilidad adecuada para ser aplicada en campo.

4.3.3 Prueba de Cohesión

Esta prueba se realizó a 37 fórmulas de trabajo, entre los diversos agregados del estudio, con todas sus variantes. Al final fueron seleccionadas 11 como las mejores fórmulas, estas fueron las que tuvieron el mejor desempeño en los 3 especímenes probados y en los cuales se garantiza que una vez aplicados, estos microaglomerados pueden ser abiertos al tránsito vehicular en menos de 1 hora.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos para cada agregado, también se pueden observar las fotografías tomadas a los especímenes después de realizar la prueba y sus modos de ruptura. En la tabla 21 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de aeropuerto.

Tabla 21 Resultados de cohesión agregado Aeropuerto

Condición	Emulsificante (kg/ton)	Cohesión 30	Cohesión 60	Cohesión 120	ID
Agregado Natural (Sin Cal)	A – N480L (12)	16 NS	15 S	20 SS	1
	A – N480L (12)	17 N	17 N	21 NS	2
	A – 510 (12)	28 N	30 NS	34 S	5
	A – 510 (12)	13 N	17 N	21 S	4
Agregado con 50% Cal, sin pretratamiento	A – N480L (12)	15 N	20 N	22 S	6
Agregado con 100% Cal, sin pretratamiento	A – N480L (12)	13 N	17 N	21 NS	7
	A – N480L (12)	14 N	20 N	27 NS	8
Agregado con 100% Cal, pretratado 24 hr	A – N480L (12)	15 N	17 N	20 NS	9
	A – N480L (12)	15 N	18 N	21 N	10
Agregado 100% con Cal, pretratado 4 hr, 1% Agua	A – N480L (12)	13 N	17 N	22 NS	11
Agregado con 50% Cal, pretratado 24 hr, 1% Agua	A – N480L (12)	17 N	21 N	23 S	12
	A – N480L (12)	17 N	19 N	20 NS	13
Agregado con 100% Cal, pretratado 24 hr, 1% Agua	A – N480L (12)	15 N	16 N	20 NS	14
	A – N480L (12)	18 N	20 NS	23 S	15

(Elaboración propia, 2023)

Se analizaron 15 fórmulas de trabajo para el agregado de Aeropuerto en la prueba de cohesión, se reportó el valor de torque del equipo, así como el modo de ruptura obtenido de la inspección visual realizada.

Las fórmulas de trabajo con el mejor desempeño son la N° 1, 5 y 13, las primeras dos se obtuvieron con agregado natural, mientras que la última se logró con una sustitución al 100% con hidróxido de calcio, pretratado durante 24 hr, con 1% de agua. En los tres casos antes mencionados se utilizó como aditivo Sulfato de Aluminio, en diferentes porcentajes; adicionalmente, en la N° 5 se requirió agregar Cemento Portland como filler mineral.

En la Fig. 62, 63 y 64 se muestran las pastillas después de realizada la prueba, en ellas se puede apreciar el daño que sufrieron y la forma de su agrietamiento.

Las pastillas de la fórmula de trabajo N° 2 y 4 sufrieron el mayor daño a los 30 y 60 min, esto se debe a una mala cohesión, lo que provocó la fragmentación y agrietamiento excesivo de las mismas, por ello se les asignó un modo de ruptura "N". Sin embargo, a los 120 min, las mezclas lograron desarrollar una mejor cohesión, lo que les permitió que las pastillas no se desintegraran y solo sufrieran ligeras fisuras en ciertas zonas, gracias a ello, la N°2 se tomó como "NS", mientras que la N°4 logró una calificación "S".

La fórmula N°1 desde los 30 min, logró desarrollar una buena cohesión entre los materiales, ya que solamente presentó 4 fisuras visibles sin desintegrarse la pastilla; a los 60 min la mezcla estaba curada por completo, la cual únicamente presentó una ligera fisura, casi imperceptible; cumplidos los 120 min, la mezcla ya no sufrió daño alguno, por lo que se le otorgó la calificación "SS".

La fórmula N°5 también tuvo un buen desempeño, ya que a los 30 min solamente tuvo agrietamiento moderado, pero conservando su forma circular; a los 60 min había curado casi por completo, presentaba ligeras fisuras, las cuales no eran tan notables y una ligera pérdida de materiales finos en el centro de la pastilla; por último, a los 120 min

la mezcla había curado por completo y solo presentaba una muy pequeña fisura, sin algún otro daño o deformación visible.

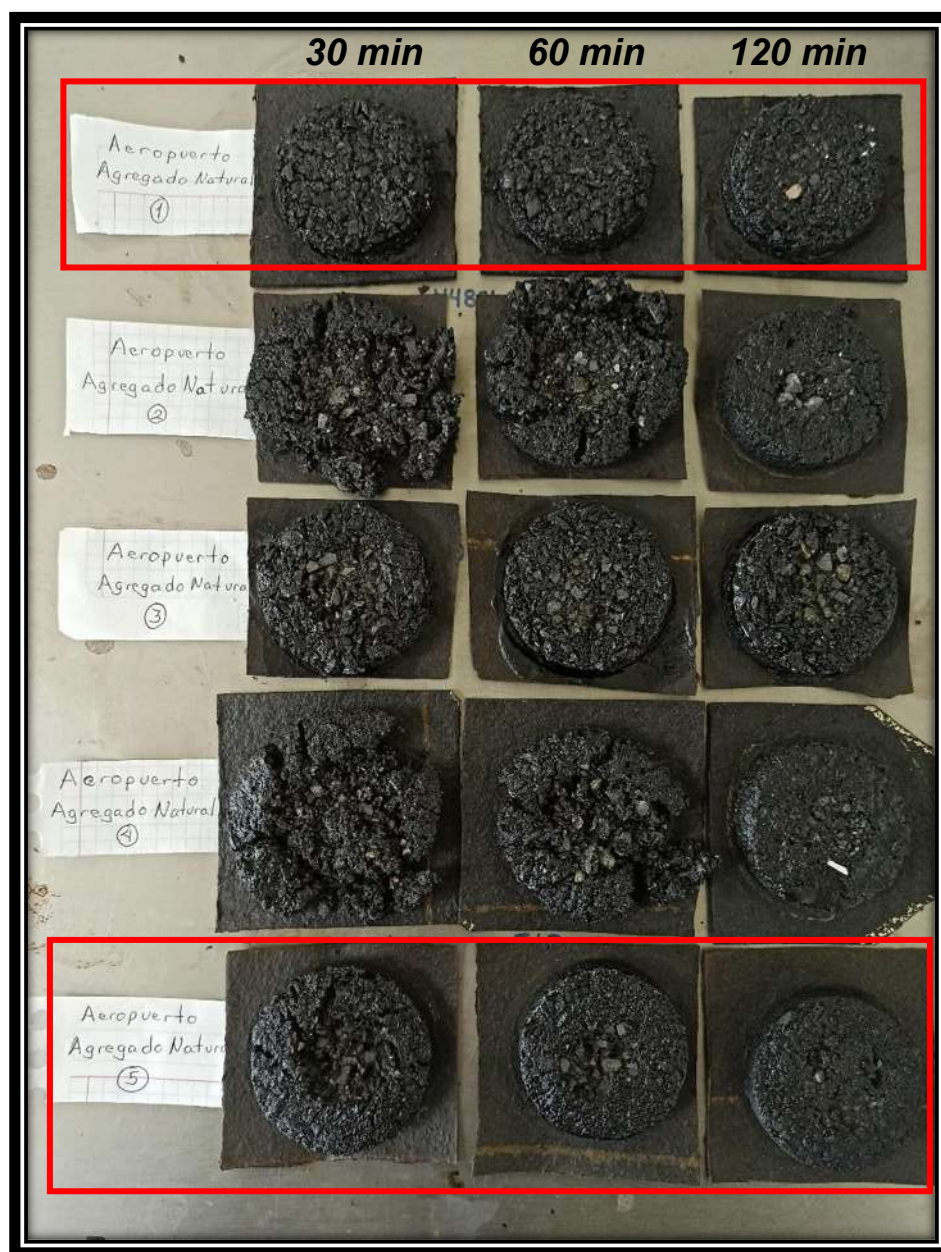


Fig. 61 Modos de ruptura Aeropuerto del N°1 al 5
(Elaboración propia, 2023)

Las fórmulas de trabajo N° 6, 7, 8 y 9 tuvieron un comportamiento muy similar; a los 30 y 60 min desarrollaron una cohesión muy baja, por lo que presentaron un agrietamiento de moderado a severo, y en el centro de las pastillas la cohesión se perdió

por completo; sin embargo a los 120 min, presentaron un desarrollo de cohesión aceptable, siendo la N°6 la mejor de las 4, ya que solo presentó una pequeña fisura, sin perder su forma ni tener perdidas de agregado, mientras que las fórmulas restantes presentaron algunas fisuras pero sin fragmentarse en varios pedazos.



Fig. 62 Modos de ruptura Aeropuerto del N°6 al 10
(Elaboración propia, 2023)

La fórmula N° 10 no logró desarrollar buena cohesión en ninguna de las 3 pastillas probadas, todas presentaron más de 4 grietas y una fragmentación considerable, por lo que todas ellas recibieron una calificación “N”.

Las fórmulas 11 y 12 tuvieron un desempeño similar, a los 30 y 60 min presentaron múltiples fisuras y fragmentación, por lo que se les otorgó una calificación “N”, sin embargo, a los 120 min la N°12 mejoro bastante su cohesión, lo que le permitió alcanzar una calificación “S”, ya que solamente presentaba dos ligeras fisuras al interior del espécimen y ningún otro daño. Por otro lado, la N° 11 tuvo formación de varias grietas, y un poco de deformación al centro, por ello la calificación otorgada fue “NS”.



Fig. 63 Modos de ruptura Aeropuerto del N°11 al 15
(Elaboración propia, 2023)

La fórmula N°15 tuvo un buen desempeño a lo largo del tiempo; a los 30 min aún no desarrollaba demasiada cohesión la mezcla, sin embargo, el espécimen no se desintegró por completo, presentó ciertos agrietamientos además de ligero desprendimiento de finos; a los 60 min ya había logrado desarrollar una buena cohesión, se formaron algunas fisuras, pero sin perder su forma, gracias a ello recibió una calificación “NS”; por último, a los 120 min la mezcla logró alcanzar una muy buena

cohesión, no presentó fisuras o algún daño visible, por ello se le otorgó una calificación “S”.

En la tabla 22 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de García Ascencio.

Tabla 22 Resultados de cohesión agregado García Ascencio

Condición	Emulsificante (kg/ton)	Cohesión 30	Cohesión 60	Cohesión 120	ID
Agregado Natural (Sin Cal)	A – 45T (12)	18 N	19 N	28 S	19
Agregado con 50% Cal, sin pretratamiento	A – 510 (12)	10 N	17 N	24 S	20
	A – 510 (12)	11 N	18 N	25 S	21
Agregado con 100% Cal, sin pretratamiento	A – 510 (12)	10 N	16 N	22 SS	22
	A – 510 (12)	11 N	20 NS	22 NS	23
Agregado con 50% Cal, pretratado 24 hr, 1% Agua	A – 510 (12)	13 N	19 N	25S	24
	A – 510 (12)	13 N	20 N	25 S	25
Agregado con 100% Cal, pretratado 24 hr, 1% Agua	A – 510 (12)	11 N	17 N	20 NS	26
	A – 510 (12)	11 N	16 N	20 N	27

(Elaboración propia, 2023)

De las 9 fórmulas de trabajo evaluadas, se seleccionaron 3 como las que mejor desempeño tuvieron, las cuales fueron la N° 22, 24 y 25, además las N° 20 y 21 también tuvieron un buen desempeño, ligeramente por debajo de las antes mencionadas.

Las 3 formulas seleccionadas implementaron sustituciones con hidróxido de calcio, con diferentes condiciones, como se muestra en la tabla 20. Las fórmulas 22 y 24 no requirieron el uso de aditivos adicionales, mientras que la fórmula N°25 implemento A – N480L como aditivo en la mezcla.

Las fórmulas seleccionadas a los 30 y 60 min después de realizadas las mezclas solamente alcanzaron calificación “N”, sin embargo, sus valores de torque aumentaron

considerablemente, lo que indica que, a pesar de haber sufrido daños severos, se requirió más fuerza de torque para poder provocar dicho daño. A los 120 min alcanzaron una cohesión aceptable, lo que les permitió obtener un modo de ruptura “S” y “SS” en el caso de la N°22, mientras que sus valores de torque siguieron aumentando.

La fórmula de trabajo N°28 alcanzó el mayor valor de torque a los 120 min, obteniendo un valor de 28 kg-cm. Por otro lado, la fórmula 27 obtuvo la más baja a los 120 min obteniendo un valor de 20 kg-cm con un modo de ruptura “N”. La mejor calificación la logró la fórmula N°22, con un valor de 22 kg-cm y un modo de ruptura “SS”.

En la Fig. 65 y 66 se muestran las pastillas después de realizada la prueba, en ellas se puede apreciar el daño que sufrieron y la forma de su agrietamiento.

La fórmula de trabajo N° 22 fue una de las seleccionadas con mejor desempeño, a los 30 min su cohesión era muy baja aún, por lo que al espécimen se le generaron varias grietas y en la parte central se desmoronó de manera notable, por lo que el modo de ruptura se catalogó como “N”; a los 60 min logró aumentar su cohesión, el espécimen solo se separó en 4 fragmentos alrededor del centro, con un valor de torque de 16 kg-cm, y un modo de ruptura “N”; a los 120 min desarrolló buena cohesión, el espécimen no sufrió fisuras ni desprendimiento de agregados, obteniendo un valor de torque de 22 kg-cm y un modo de ruptura “SS”.

Las fórmulas N°20 y 21 a los 30 y 60 min sufrieron un agrietamiento severo, y a pesar de que sus valores de torque aumentaron, los especímenes no lograron mantener su forma, se desintegraron en varios pedazos y ciertas zonas se desintegraron por completo, por eso sus modos de ruptura se calificaron como “N”; a los 120 min ambas fórmulas lograron desarrollar una buena cohesión, por lo que solo sufrieron ligeras fisuras, pero sin perder su forma.

Las fórmulas 19 y 23 lograron generar a los 60 min buena cohesión, por lo que sus modos de ruptura se catalogaron como “NS”, con ciertas grietas alrededor del espécimen,

pero manteniendo la forma; sin embargo, a los 120 min no alcanzaron el modo de ruptura “S” debido a que las mezclas presentaron algunas grietas y fisuras al centro y a alrededor del espécimen.

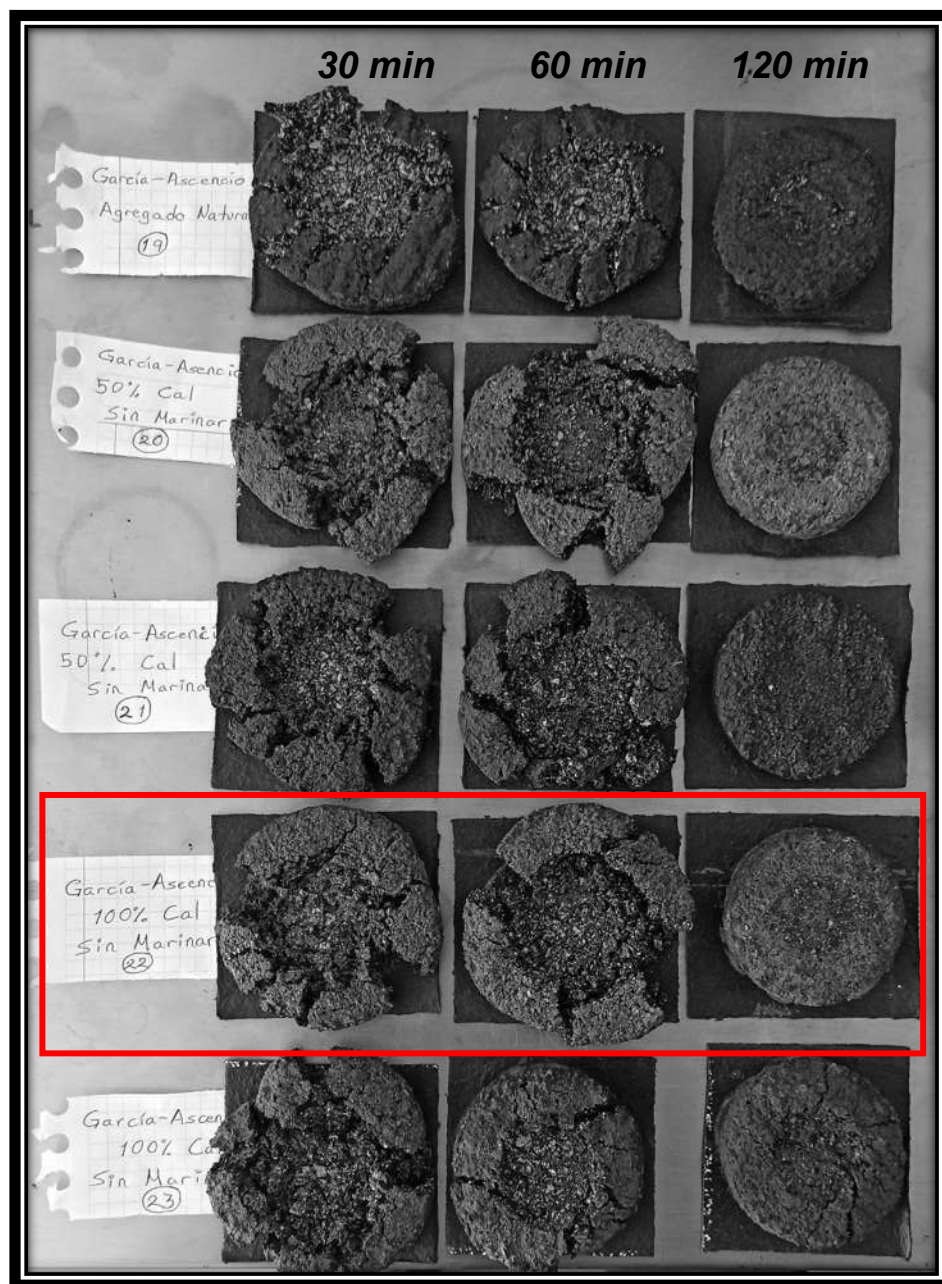


Fig. 64 Modos de ruptura García Ascencio del N°19 al 23
(Elaboración propia, 2023)

La fórmula de trabajo N°24 a los 30 min sufrió algunos agrietamientos y en el centro se desmoronó, su valor de torque fue de 13 kg-cm y su modo de ruptura “N”; a los 60 min subió su valor de torque a 19 kg-cm pero su modo de ruptura siguió siendo “N” ya que aún se generaron varias grietas y desprendimientos del agregado fino; a los 120 min alcanzó una buena cohesión, pequeñas fisuras al centro del espécimen pero manteniendo su forma y sin desprendimiento de agregados, por ello el modo de ruptura fue “S” y su valor de torque de 25 kg-cm.

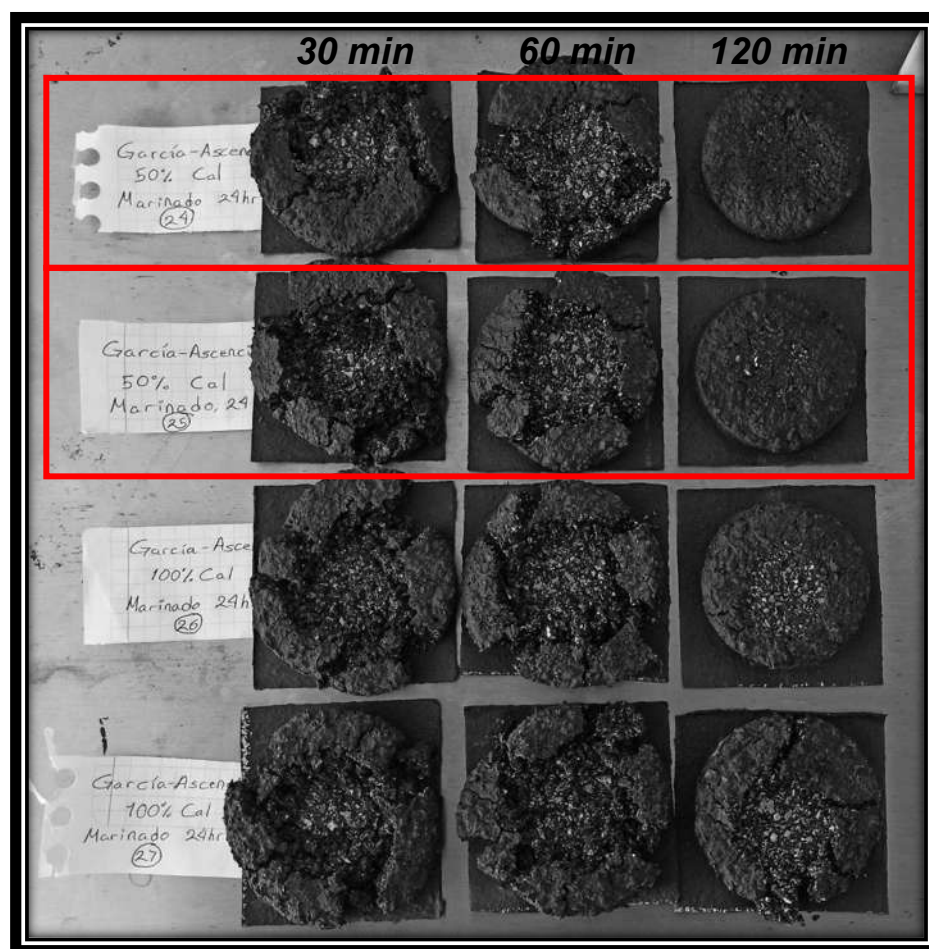


Fig. 65 Modos de ruptura García Ascencio del N°24 al 27
(Elaboración propia, 2023)

La fórmula de trabajo N°25 tuvo un comportamiento similar al anterior, con un modo de ruptura “N” a los 30 y 60 min debido al agrietamiento y desprendimiento de agregados, con valores de ruptura de 13 y 20 kg-cm respectivamente; a los 120 min logró

obtener una buena cohesión la mezcla, lo que le permitió mantener la forma al espécimen y solo sufrió unas cuantas fisuras apenas visibles, por ellos su modo de ruptura fue “S” y su valor de torque fue de 25 kg-cm.

En la tabla 23 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de Agremex.

Tabla 23 Resultados de cohesión agregado Agremex

Condición	Emulsificante (kg/ton)	Cohesión 30	Cohesión 60	Cohesión 120	ID
Agregado Natural (Sin Cal)	A – 510 (12)	16 N	20 S	25 SS	28
	A – 510 (12)	19 N	22 N	24 S	29
Agregado con 50% Cal, sin pretratamiento	A – 510 (12)	15 N	22 NS	22 S	30
	A – 510 (12)	17 N	21 NS	25 SS	31
	A – 510 (12)	16 N	22 NS	25 NS	32
Agregado con 100% Cal, sin pretratamiento	-				
Agregado con 50% Cal, pretratado 24 hr, 1% Agua	A – 510 (12)	16 N	19 N	22 S	33
	A – 510 (12)	16 N	20 NS	23 S	34
	A – 510 (12)	16 N	22 NS	25 NS	35
Agregado con 100% Cal, pretratado 24 hr, 1% Agua	-				

(Elaboración propia, 2023)

Se evaluaron 8 fórmulas de trabajo, de las cuales se seleccionaron 4, las cuales cumplieron con un comportamiento para una apertura rápida al tránsito, estas fueron la N° 28, 30, 31 y 34, tres de ellas obtuvieron un modo de ruptura “NS” a los 60 min, mientras que la N°28 alcanzó una “S”; a los 120 min la N° 30 y 34 lograron un modo de ruptura “S”, mientras que la N° 28 y 31 alcanzaron un modo de ruptura “SS”.

Como se puede observar en la tabla 23, los agregados con sustitución al 50% con hidróxido de calcio sin pretratar tuvieron resultados muy similares, inclusive mejores con

respecto a los que tuvieron un pretratamiento previo a realizar las mezclas de microaglomerado, por lo que para este caso el pretratamiento no proporcionó alguna mejora en el comportamiento de las mezclas ni mejoro la cohesión de maneja significativa.

La fórmula de trabajo que obtuvo el mejor comportamiento fue la N° 28, ya a los 60 min su valor de torque fue de 20 kg-cm y su modo de ruptura “S”, mientras que a los 120 min su valor de torque fue de 25 kg-cm y su modo de ruptura “SS”. Por otro lado, las fórmulas N°32 y 35 obtuvieron el peor comportamiento a los 120 min obteniendo un valor de 25 kg-cm con un modo de ruptura “NS”.

En la Fig. 67 y 68 se muestran las pastillas después de realizada la prueba, en ellas se puede apreciar el daño que sufrieron y la forma de su agrietamiento.

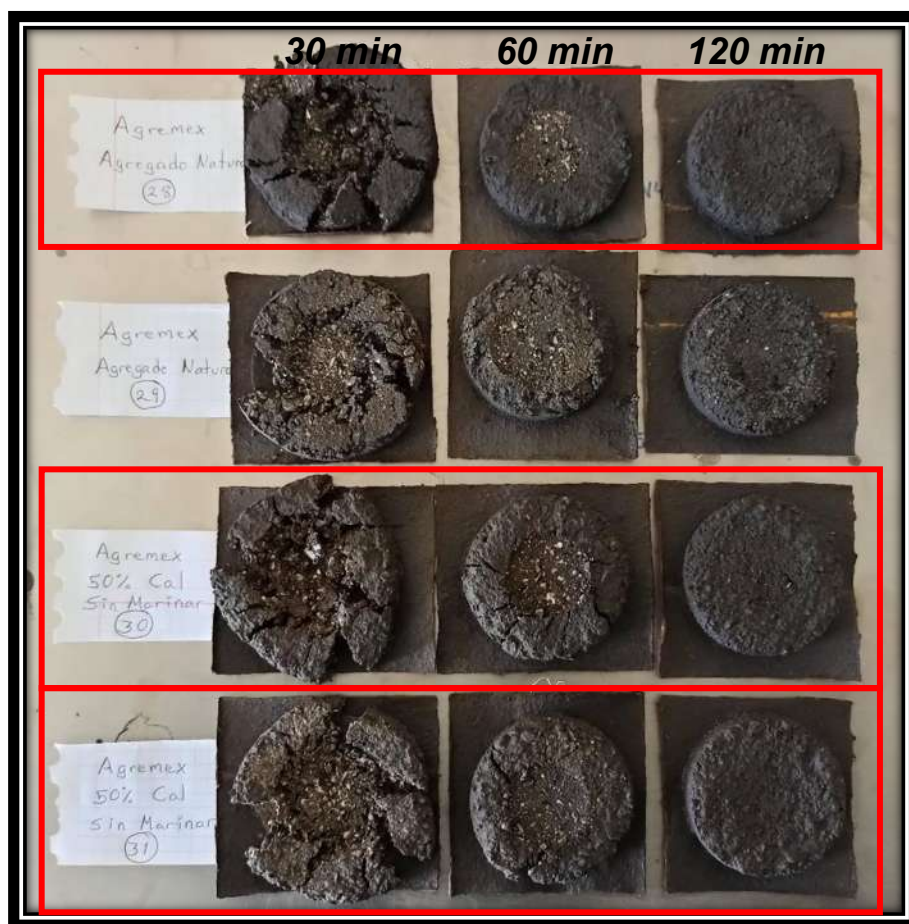


Fig. 66 Modos de ruptura Agremex del N°28 al 31
(Elaboración propia, 2023)

La fórmula de trabajo N°28 tuvo el mejor comportamiento de todas las fórmulas evaluadas, ya que a los 30 min comenzó a desarrollar un poco de cohesión, fragmentándose en 4 piezas alrededor del centro, un agrietamiento moderado, pero sin deformarse del todo el espécimen; a los 60 min la mezcla logró desarrollar una buena cohesión lo que le permitió no fragmentarse y solo tener 3 fisuras visibles muy pequeñas, en este tiempo la mezcla estaba apta para la apertura al tránsito sin problema; a los 120 min la mezcla estaba completamente curada y con una cohesión muy buena, no presentaba fisuras ni grietas, la forma se mantuvo intacta y no presentó ningún daño.

La fórmula N°29 a los 60 min casi alcanzó el modo de ruptura “NS” sin embargo no se le otorgó debido a que en uno de los extremos sufrió desprendimiento de agregados y una grieta grave, la mezcla en este punto era un poco frágil aún, por ello sufrió este daño; a los 120 min la mezcla alcanzó una buena cohesión, presentando únicamente dos ligeras fisuras en la parte del centro.

La fórmula N°30 a los 60 min tenía una buena cohesión, se le generaron dos grietas y algunas fisuras pequeñas, sin embargo, el espécimen mantuvo su forma y solo en el centro sufrió una deformación ligera; a los 120 min la cohesión que tenía la mezcla era buena, mantuvo su forma el espécimen y solo sufrió algunas fisuras al centro.

La fórmula N°31 a los 60 min su cohesión era buena, presentó dos grietas sin fragmentarse por completo el espécimen, logró mantener su forma, también tuvo ligeras fisuras al centro sin provocar mayor daño en la pieza; a los 120 min la mezcla se había curado por completo y su cohesión era muy buena, ya que no presentaba grietas ni fisuras, la forma del espécimen era buena y se mantuvo intacta.

La fórmula N°34 a los 60 min ya presentaba una cohesión moderada, con pocas grietas y ligeras fisuras, manteniendo la forma el espécimen; a los 120 min la mezcla alcanzó una buena cohesión, solo se generaron pequeñas fisuras al centro del espécimen y no presentó desprendimiento de asfalto o finos.

La fórmula N°32 a los 60 min tenía una cohesión moderada, presentó 3 grietas y algunas pequeñas fisuras, sin embargo, mantuvo su forma el espécimen; a los 120 min la cohesión resultó ser buena, presentando algunas fisuras del centro hacia los extremos, por ello su modo de ruptura se catalogó como “NS”.

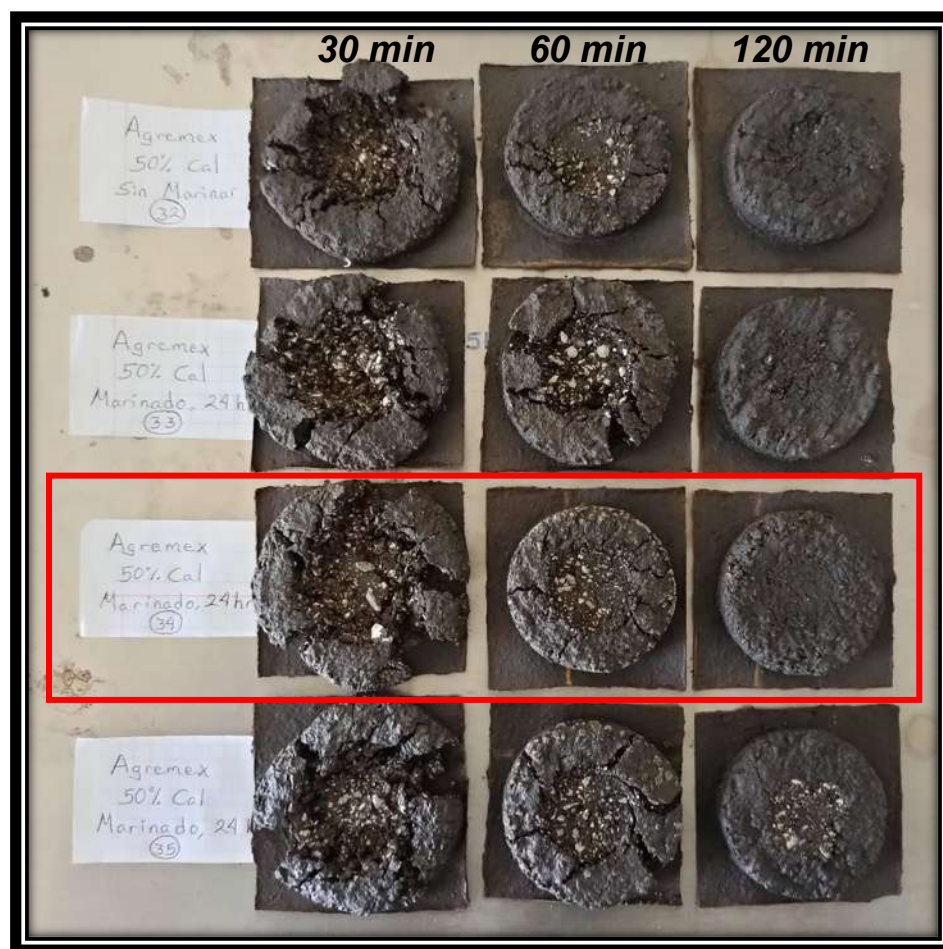


Fig. 67 Modos de ruptura Agremex del N°32 al 35
(Elaboración propia, 2023)

Las fórmulas N°33 y 35 a los 60 min presentaron un agrietamiento moderado, presentando más de 4 grietas visibles, así como cierta fragmentación de los especímenes; a los 120 min en N°33 sufrió fisuras al centro del espécimen, pero mantuvo su forma, sin desprendimientos considerables de finos, por su parte el N°35 sufrió dos fisuras del centro a los extremos de la pieza, pero manteniendo su forma, además presentó desprendimiento de asfalto y agregados fino en la parte central del espécimen.

En la tabla 24 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de La Roca.

Tabla 24 Resultados de cohesión agregado La Roca

Condición	Emulsificante (kg/ton)	Cohesión 30	Cohesión 60	Cohesión 120	ID
Agregado Natural (Sin Cal)	A – 510 (12)	23 N	28 NS	24 S	36
Agregado con 50% Cal, sin pretratamiento	–				
Agregado con 100% Cal, sin pretratamiento	–				
Agregado con 50% Cal, pretratado 24 hr, 1% Agua	–				
Agregado con 100% Cal, pretratado 24 hr, 1% Agua	–				

(Elaboración propia, 2023)

La única fórmula de trabajo que se pudo evaluar para este agregado tuvo un muy buen desempeño, ya que su evolución y curado cumple las características para una mezcla de microaglomerado de apertura rápida al tránsito. Ninguno de los agregados con sustituciones con hidróxido de calcio pudo evaluarse en esta prueba debido a que no cumplieron con los tiempos de mezclado, sin embargo recordemos que la formulación N°36 adiciona 0.3% de hidróxido de calcio como filler mineral, esto quiere decir que la cal si nos brinda un aporte en nuestras mezclas pero en cantidades más pequeñas, ya que al inicio alarga los tiempos de mezclado y después del tiempo de ruptura ayuda a generar la cohesión de la mezcla, permitiendo que tenga un buen comportamiento al realizar la prueba de torque y que estas cumplan con lo requerido.

La fórmula antes mencionada a los 30 min aún no desarrollaba demasiada cohesión, el espécimen se fragmento en varios pedazos, como se puede observar en la fig. 69 sin embargo su valor de torque fue bastante alto ya que alcanzó un valor de 23kg-cm; a los 60 min desarrollo una mejor cohesión, ya que el espécimen sufrió dos grietas considerables y varias fisuras, pero sin fragmentarse en varios pedazos y conservando

su forma, además su valor de torque siguió aumentando hasta 28 kg-cm; a los 120 min la mezcla estaba completamente curada y con buena cohesión, el espécimen solo sufrió el desplazamiento de algunos agregados dentro del espécimen sin desprenderse del mismo, así como pérdida de asfalto y finos en el centro, su valor de torque disminuyó a 24 kg-cm sin embargo la disminución de torque puede deberse a que el contacto entre el espécimen y la base de neopreno del equipo se vio afectada por la rugosidad del agregado.

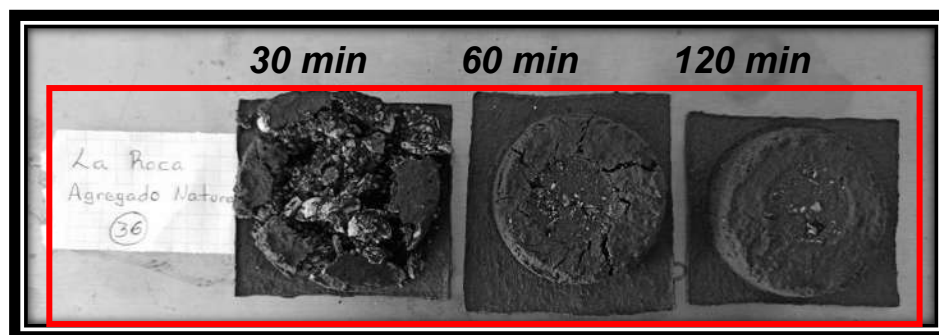


Fig. 68 Modos de ruptura La Roca N°36
(Elaboración propia, 2023)

A continuación, en la tabla 25 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de Buenavista.

Tabla 25 Resultados de cohesión agregado Buenavista

Condición	Emulsificante (kg/ton)	Cohesión 30	Cohesión 60	Cohesión 120	ID
Agregado Natural (Sin Cal)	A – 510 (12)	15N	19NS	23S	37
Agregado con 50% Cal, sin pretratamiento	–				
Agregado con 100% Cal, sin pretratamiento	–				
Agregado con 50% Cal, pretratado 24 hr, 1% Agua	–				
Agregado con 100% Cal, pretratado 24 hr, 1% Agua	–				

(Elaboración propia, 2023)

Al igual que el agregado de La Roca, para el agregado de Buenavista solamente se encontró una fórmula de trabajo que cumplió con el tiempo mínimo de mezclado; a la mezcla solamente fue necesario agregarle 0.5% de cal como filler mineral.

El desempeño de la mezcla fue bueno, ya que cumplió con los parámetros para ser un microaglomerado de rápida apertura al tránsito; a los 30 min desarrolló un valor de torque de 15 kg-cm y el espécimen sufrió de agrietamiento y fragmentación de varios pedazos y perdió su forma inicial; a los 60 min su cohesión mejoró, gracias a ello solamente se agrietó en dos zonas, sin sufrir fragmentación del espécimen y manteniendo su forma, el valor de torque fue de 19 kg-cm; a los 120 min la mezcla desarrolló buena cohesión, presentando solamente ligeras fisuras al centro del espécimen, el valor de torque generado fue de 23 kg-cm.

4.3.4 Prueba de Rueda Cargada (LWT)

Para esta prueba solamente se analizaron 8 fórmulas de trabajo, con la finalidad de analizar el comportamiento y la variación del porcentaje de asfalto entre una fórmula elaborada con agregado natural y otra con una sustitución al 50% con hidróxido de calcio; para los agregados de Aeropuerto, Agremex y García Ascencio se pudieron elaborar las pruebas para ambas condiciones, sin embargo, para el agregado de Buenavista y La Roca solo se realizó en el agregado natural, ya que como se mencionó en las pruebas anteriores, no se logró definir fórmulas de trabajo para las otras condiciones.

La emulsión asfáltica implementada en esta prueba para todas las fórmulas de trabajo evaluadas tenía un contenido de asfalto de 63.5%.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada fórmula de trabajo, en la tabla 26 y la Fig. 70 se observan los resultados para el agregado de Aeropuerto.

La fórmula de trabajo analizada con el agregado natural fue la N° 1, mientras que la fórmula con la sustitución al 50% se realizó con la fórmula N° 6; en los especímenes

evaluados con 7.9% de asfalto la adherencia de arena presentada fue la misma en ambos con 198.4 gr/m²; los que contenían 9.21% de asfalto, la adherencia de arena fue mayor en el agregado natural con 291 gr/m² respecto a los 277.8 gr/m² del agregado con hidróxido de calcio; por último los que contenían 10.5% de asfalto, en el espécimen de agregado natural se volvió a presentar mayor adherencia de asfalto con 449.7 gr/m² en comparación con los 330.7 gr/m² del agregado con hidróxido de calcio, con una diferencia de 119 gr/m².

Tabla 26 Resultados LWT agregado Aeropuerto

Agregado Natural						Peso seco (gr)		Diferencias	
#	Filler (%)	Aditivo (%)	Agua (%)	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Inicial	Final	gr	gr/m ²
1	-	0.3 SA	11.0	12.5	7.9	531.6	534.6	3.0	198.4
2	-	0.3 SA	10.0	14.5	9.2	495.3	499.7	4.4	291.0
3	-	0.3 SA	9.0	16.5	10.5	503.9	510.7	6.8	449.7
Sustitución con 50% Cal									
1	-	0.3 SA	13.0	12.5	7.9	510.9	513.9	3.0	198.4
2	-	0.3 SA	12.0	14.5	9.2	480.5	484.7	4.2	277.8
3	-	0.3 SA	11.0	16.5	10.5	465.1	470.1	5.0	330.7
								MÁX.	538.0

(Elaboración propia, 2023)

Esto nos indica que la fórmula de trabajo con la sustitución por hidróxido de calcio al 50% requiere más asfalto respecto a la elaborada con agregado natural, ya que una mayor adherencia de arena nos indica que el espécimen tiene mayor cantidad de asfalto en el cual la arena puede adherirse. En la fig. 71 podemos observar la tendencia de ambas curvas y como después de 9% de asfalto en la mezcla, las curvas se separan, teniendo una tendencia más elevada el agregado natural.

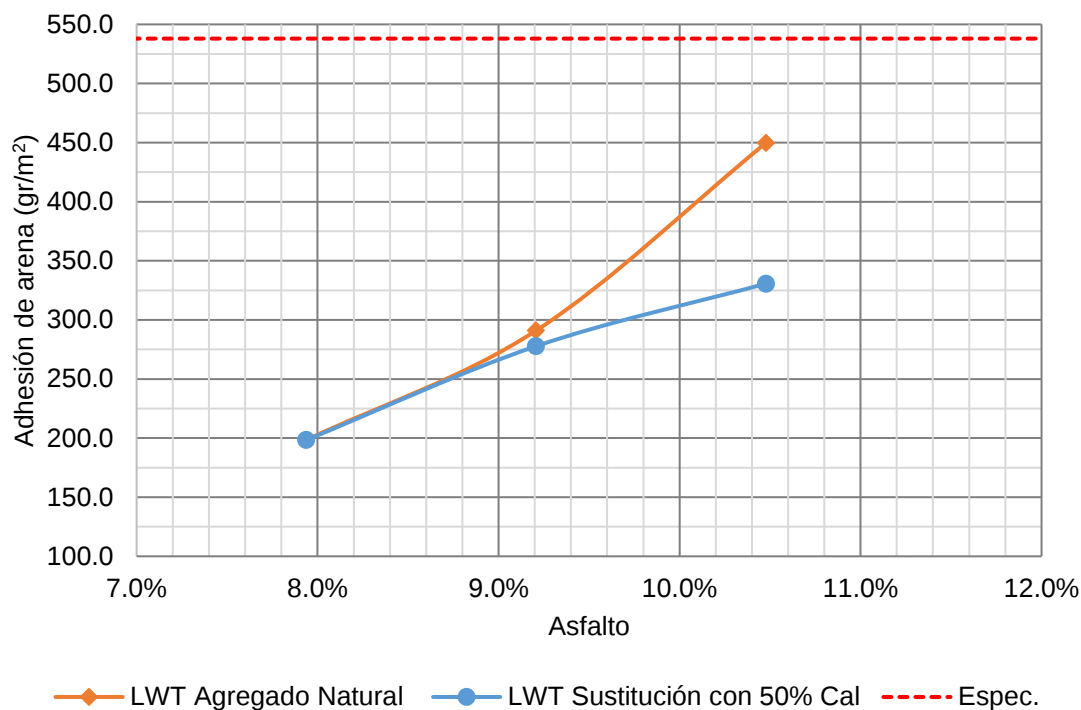


Fig. 69 Gráficas LWT agregado Aeropuerto
(Elaboración propia, 2023)

En la tabla 27 se muestran los resultados del agregado de García Ascencio. La fórmula de trabajo analizada con el agregado natural fue la N° 19, mientras que la fórmula con la sustitución al 50% se realizó con la fórmula N° 21; para los especímenes evaluados con 7.9% de asfalto la adherencia de arena presentada fue de 251.3 gr/m² para la fórmula con el agregado natural mientras que para la sustitución con 50% con hidróxido de calcio fue de 198.4 gr/m²; los que contenían 9.2% de asfalto, la adherencia de arena fue ligeramente mayor en el agregado natural con 297.6 gr/m² respecto a los 284.4 gr/m² del agregado con hidróxido de calcio; por último los que contenían 10.5% de asfalto, en el espécimen de agregado natural se volvió a presentar mayor adherencia de asfalto con 449.7 gr/m² en comparación con los 377.0 gr/m² del agregado con hidróxido de calcio, con una diferencia de 72.7 gr/m².

Tabla 27 Resultados LWT agregado García Ascencio

Agregado Natural						Peso seco (gr)		Diferencias	
#	Filler (%)	Aditivo (%)	Agua (%)	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Inicial	Final	gr	gr/m ²
1	0.5 Cal	0.5 SA	15.0	12.5	7.9	492.5	496.3	3.8	251.3
2	0.5 Cal	0.5 SA	14.0	14.5	9.2	466.3	470.8	4.5	297.6
3	0.5 Cal	0.5 SA	13.0	16.5	10.5	455.9	462.7	6.8	449.7
Sustitución con 50% Cal									
1	-	0.3 N480L	13.5	12.5	7.9	772.1	775.1	3.0	198.4
2	-	0.3 N480L	12.5	14.5	9.2	464.6	468.9	4.3	284.4
3	-	0.3 N480L	11.5	16.5	10.5	478.9	484.6	5.7	377.0
								MÁX.	538.0

(Elaboración propia, 2023)

De acuerdo con los resultados, la fórmula de trabajo con la sustitución por hidróxido de calcio al 50% requiere más asfalto respecto a la elaborada con agregado natural. En la fig. 71 podemos observar el comportamiento de ambas curvas, al inicio las curvas inician alejadas una de otra, teniendo mayor adhesión de arena la fórmula de trabajo con agregado natural, pero a los 9.2% tiene mayor adhesión la fórmula con la sustitución al 50% respecto a la anterior con lo que ambas curvas casi coinciden en este punto; sin embargo al llegar a los 10.5% de asfalto, las líneas vuelven a separarse de manera considerable, teniendo una mayor adherencia la fórmula con agregado natural.

En la Fig. 72 tenemos los especímenes que se fabricaron con el agregado natural, en ellos podemos observar que el que contiene 7.9 % de asfalto tiene una apariencia café claro, debido a la falta de asfalto en la mezcla; mientras que los otros dos especímenes tienen una apariencia de color negro, característica de una mezcla asfáltica.

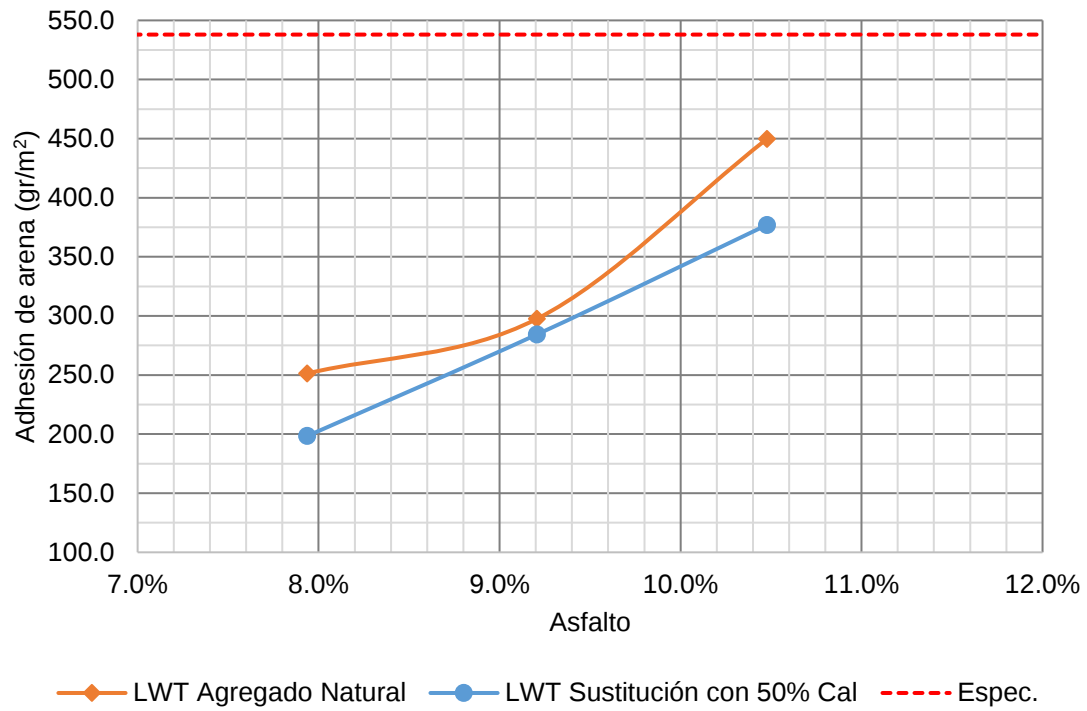


Fig. 70 Gráficas LWT agregado García Ascencio
(Elaboración propia, 2023)



Fig. 71 Especímenes para LWT García Ascencio
(Elaboración propia, 2023)

En la tabla 28 se muestran los resultados del agregado de Agremex. La fórmula de trabajo analizada con el agregado natural fue la N° 28, mientras que la fórmula con la sustitución al 50% se realizó con la fórmula N° 31; los especímenes evaluados con 8.9% de asfalto, la adherencia de arena presentada fue de 99.2 gr/m² para la fórmula con el agregado natural mientras que para la sustitución con 50% con hidróxido de calcio fue de 13.2 gr/m², con una diferencia de 86.0 gr/m²; los que contenían 10.2% de asfalto, la adherencia de arena fue nuevamente mayor en el agregado natural con 165.3 gr/m² respecto a los 33.1 gr/m² del agregado con hidróxido de calcio, con una diferencia de 132.2 gr/m²; por último los que contenían 11.4% de asfalto, el espécimen de agregado natural volvió a presentar mayor adherencia de asfalto con 211.6 gr/m² en comparación con los 52.9 gr/m² del agregado con hidróxido de calcio, con una diferencia de 158.7 gr/m².

Tabla 28 Resultados LWT agregado de Agremex

Agregado Natural						Peso seco (gr)		Diferencias	
#	Filler (%)	Aditivo (%)	Agua (%)	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Inicial	Final	gr	gr/m ²
1	0.3 Cal	-	10.5	14.0	8.9	502.4	503.9	1.5	99.2
2	0.3 Cal	-	9.5	16.0	10.2	506.8	509.3	2.5	165.3
3	0.3 Cal	-	8.5	18.0	11.4	514.2	517.4	3.2	211.6
Sustitución con 50% Cal									
1	-	0.3 SA	15.5	14.0	8.9	487.1	487.2	0.2	13.2
2	-	0.3 SA	14.5	16.0	10.2	634.3	634.8	0.5	33.1
3	-	0.3 SA	13.5	18.0	11.4	521.2	522.0	0.8	52.9
								MÁX.	538.0

(Elaboración propia, 2023)

En la fig. 73 se muestran las curvas graficadas con los resultados antes mencionados, el comportamiento de ambas es muy similar, teniendo una tendencia ascendente, pero con mayor adherencia por parte de los especímenes fabricados con agregado natural, esto quiere decir que requieren más asfalto los especímenes con 50% hidróxido de calcio.

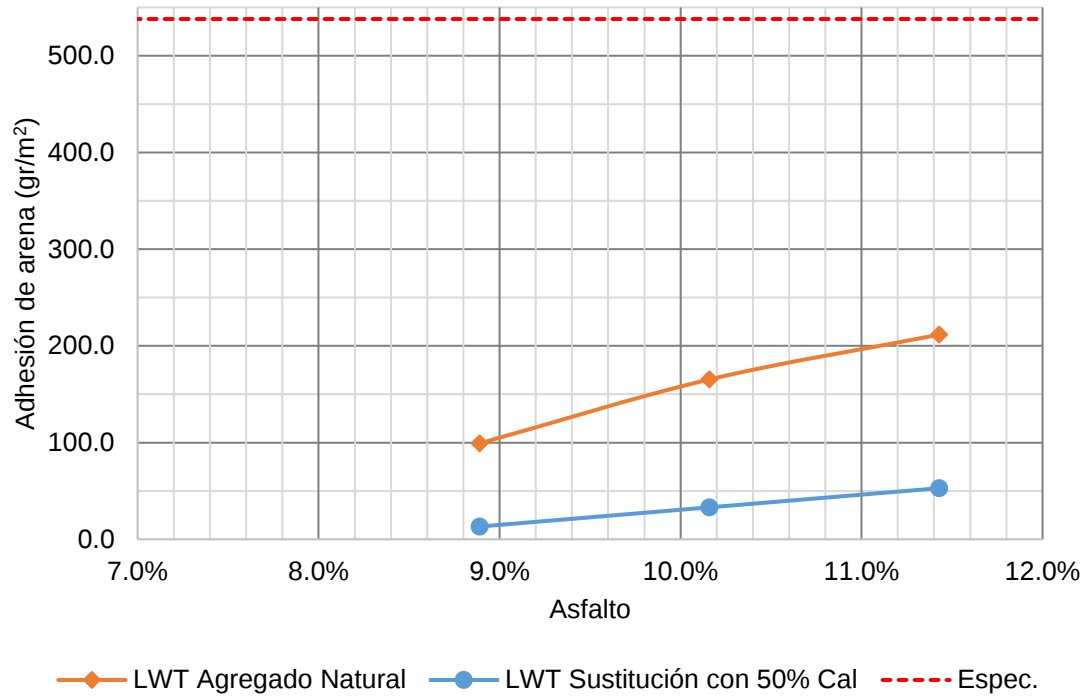


Fig. 72 Gráficas LWT agregado Agremex
(Elaboración propia, 2023)

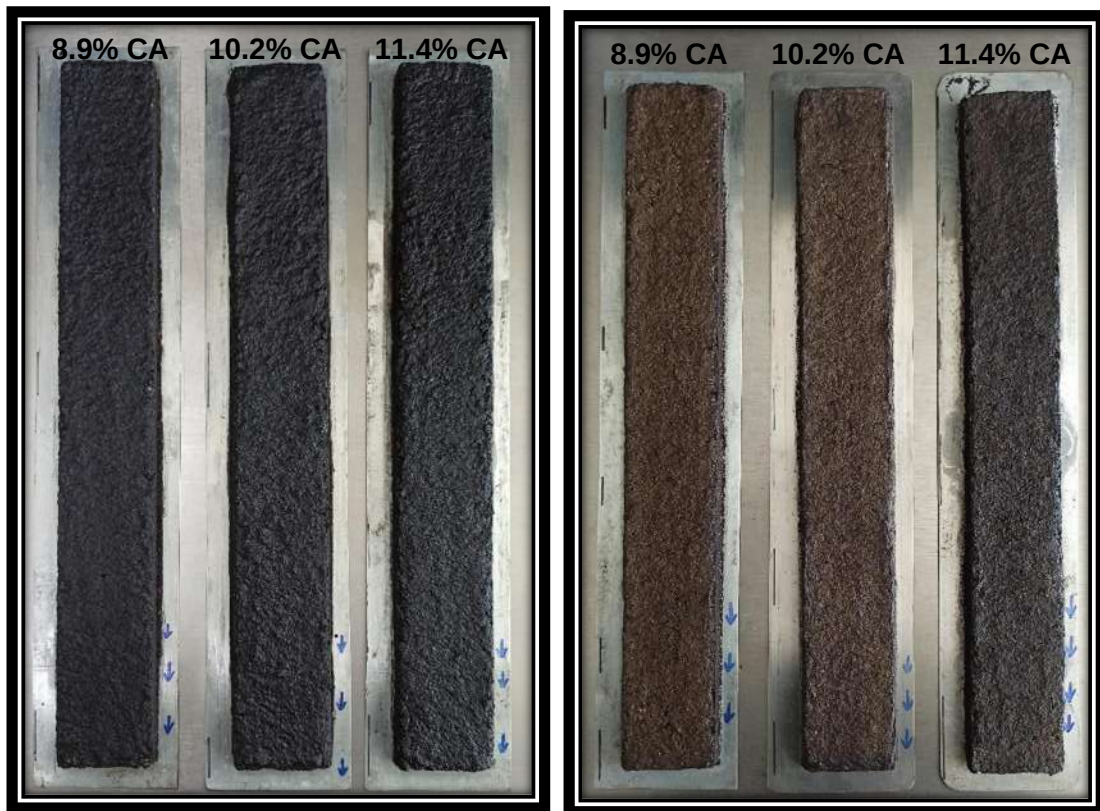


Fig. 73 Especímenes para LWT Agremex
(Elaboración propia, 2023)

En la fig. 74 podemos corroborar lo que se mencionó anteriormente respecto a las mezclas realizadas con agregado que tuvo una sustitución del 50% con hidróxido de calcio, las cuales requieren mayor porcentaje de asfalto respecto a las fabricadas con agregado natural, los especímenes con 8.9 y 10.2% de asfalto tienen un color café claro, debido a la incorporación del hidróxido de calcio, inclusive en el espécimen con 8.9% se logran apreciar algunas partes blancas de cal, las cuales no fueron cubiertas por completo por el asfalto, además se aprecian algunas grietas, producto de la falta de adherencia entre el agregado y el asfalto, debido a la falta del mismo. El espécimen con 11.4% de asfalto muestra una mejor apariencia y el color de este ya es café oscuro, casi negro.

En los especímenes de agregado natural, estos tienen un color negro, característico de las mezclas asfálticas, con una buena apariencia, sin agrietamientos.

En la fig. 75 se muestran los especímenes después de realizada la prueba de rueda cargada, en la imagen observamos la adherencia que tuvo cada uno de los especímenes, en los elaborados con agregado natural tenemos además de la mayor adhesión, muy buen comportamiento al desplazamiento lateral, ya que no presentaron este desplazamiento ni se rompieron debido a ello, únicamente presentaron una deformación permanente aceptable. Por otro lado, los especímenes con la sustitución con 50% de hidróxido de calcio además de la baja adhesión de arena, estos presentaron desplazamiento lateral, los especímenes con 8.9 y 10.2% de asfalto sufrieron una ruptura en la parte superior debido a esto; en cuanto a la deformación permanente que sufrieron, esta es aceptable.



Fig. 74 Especímenes Agremex con arena adherida
(Elaboración propia, 2023)

En la tabla 29 se muestran los resultados del agregado de La Roca. La fórmula de trabajo analizada fue la N°36, la cual se desarrolló con agregado natural; el espécimen evaluado con 9.2% de asfalto, tuvo una adherencia de arena de 185.2 gr/m²; el espécimen que contenía 10.5% de asfalto tuvo un adherencia de arena de 231.5 gr/m² y, por último, el espécimen que contenía 11.8% de asfalto, tuvo una adherencia de arena de 496.0 gr/m².

Tabla 29 Resultados LWT agregado La Roca

Agregado Natural						Peso seco (gr)		Diferencias	
#	Filler (%)	Aditivo (%)	Agua (%)	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Inicial	Final	gr	gr/m ²
1	0.3 Cal	-	13.0	14.5	9.2	588.0	590.8	2.8	185.2
2	0.3 Cal	-	12.0	16.5	10.5	844.6	848.1	3.5	231.5
3	0.3 Cal	-	11.0	18.5	11.8	529.2	536.7	7.5	496.0
								MÁX.	538.0

(Elaboración propia, 2023)

En la Fig. 76 observamos el comportamiento de la gráfica obtenida con los resultados de la prueba, en los puntos con 9.2 y 10.5% de asfalto se aprecia que la adherencia de arena no cambio mucho de un punto a otro, sin embargo, con 11.8% de asfalto, la adherencia que presentó la mezcla fue considerablemente mayor, siendo 2.14 veces mayor la adherencia con respecto al contenido de asfalto anterior.

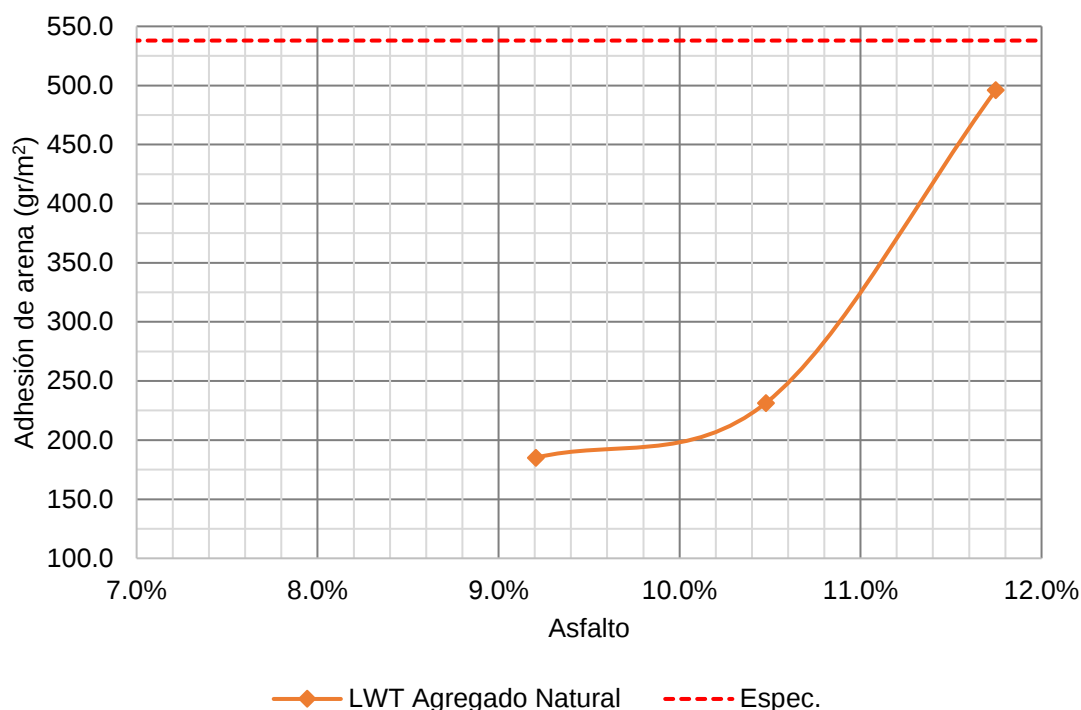


Fig. 75 Gráfica LWT agregado La Roca
(Elaboración propia, 2023)

En la fig. 77 se muestran los especímenes antes y después de la prueba, la apariencia de los 3 especímenes antes de la prueba era buena, con buena textura superficial, sin ninguna grieta y de color negro. Después de la prueba el espécimen con 9.2 y 11.8% sufrieron cierto desplazamiento lateral, siendo el de 11.8% el que sufrió mayor daño, ya que en la parte inferior además del desplazamiento lateral sufrió agrietamiento causado por el mismo desplazamiento excesivo. La deformación permanente en los 3 especímenes es aceptable.

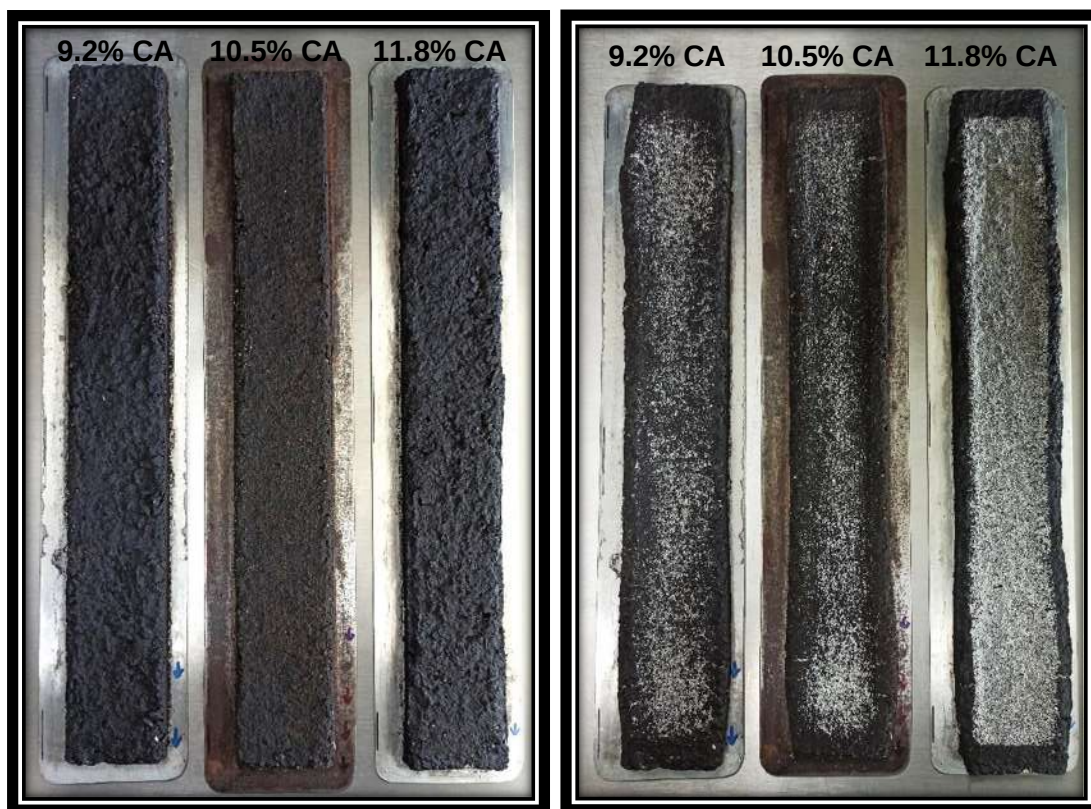


Fig. 76 Especímenes La Roca antes y después de LWT
(Elaboración propia, 2023)

En la tabla 30 se muestran los resultados del agregado de Buenavista. La fórmula de trabajo analizada fue la N°37, la cual se desarrolló con agregado natural; el espécimen evaluado con 8.9% de asfalto, tuvo una adherencia de arena de 13.2 gr/m^2 ; el espécimen que contenía 10.2% de asfalto tuvo un adherencia de arena de 26.5 gr/m^2 y, por último, el espécimen que contenía 11.4% de asfalto, tuvo una adherencia de arena de 39.7 gr/m^2 .

Estos especímenes presentaron muy poca adherencia de arena prácticamente fue nula la adherencia presentada.

Tabla 30 Resultados LWT agregado Buenavista

Agregado Natural						Peso seco (gr)		Diferencias	
#	Filler (%)	Aditivo (%)	Agua (%)	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Inicial	Final	gr	gr/m ²
1	0.5 Cal	-	15.0	14.0	8.9	393.8	394.0	0.2	13.2
2	0.5 Cal	-	14.0	16.0	10.2	571.4	571.8	0.4	26.5
3	0.5 Cal	-	13.0	18.0	11.4	453.9	454.5	0.6	39.7
								MÁX.	538.0

(Elaboración propia, 2023)

En la fig. 78 se muestra el comportamiento presentado de la curva graficada con los resultados obtenidos, en ella podemos observar que asciende ligeramente entre punto y punto, con una pendiente muy pequeña, debido a la escasa adhesión de arena que presentó.

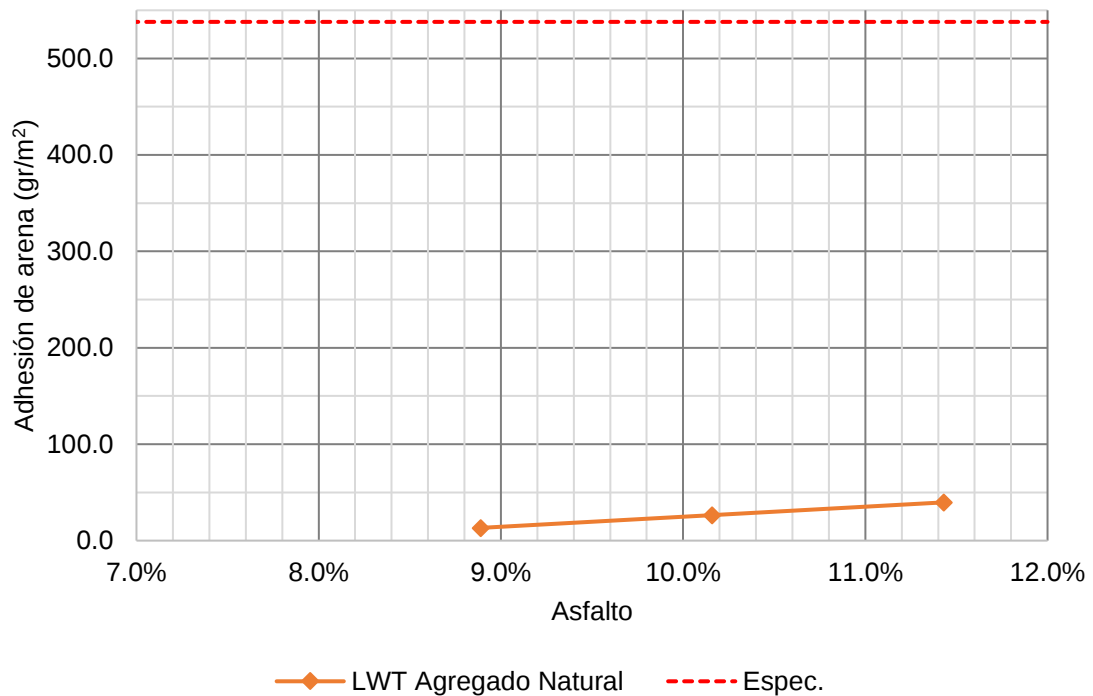
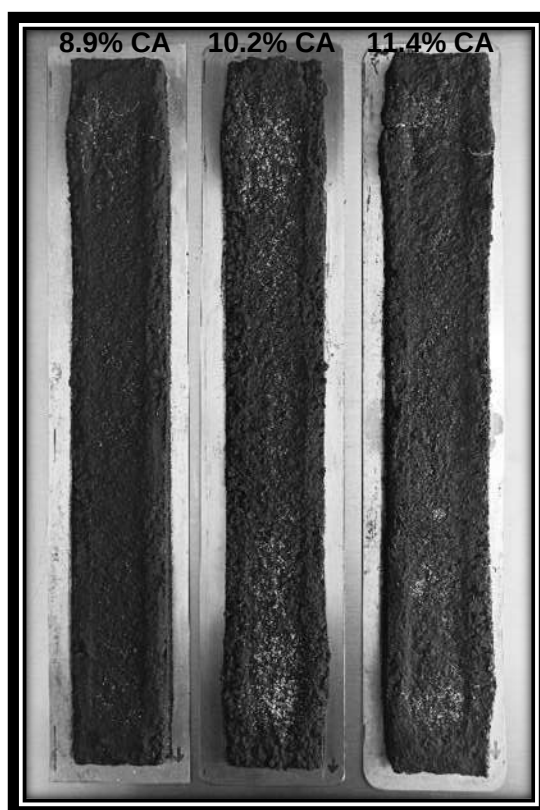


Fig. 77 Gráficas LWT agregado Buenavista
(Elaboración propia, 2023)

En la fig. 79 se muestran los especímenes después de la prueba, donde se aprecia la poca adhesión que presentaron las mezclas ensayadas, la mayor adhesión se presentó

en los extremos de los especímenes, mientras que en el centro es casi nula la adhesión; los tres presentaron desplazamientos laterales en los extremos, siendo el de 11.4% de asfalto el que sufrió mayor daño, ya que en la parte superior se presentó una grieta de lado a lado del espécimen. La deformación permanente que sufrieron los especímenes es aceptable.



*Fig. 78 Especímenes Buenavista con arena adherida
(Elaboración propia, 2023)*

4.3.5 Prueba de Abrasión en Vía Húmeda (WTAT)

Para esta prueba al igual que para la de rueda cargada se analizaron 8 fórmulas de trabajo, con la finalidad de analizar el comportamiento de desgaste conforme la variación del porcentaje de asfalto, entre una fórmula elaborada con agregado natural y otra con una sustitución al 50% con hidróxido de calcio. Además, esta prueba nos va a ayudar a realizar el cálculo de contenido óptimo de asfalto para cada fórmula de trabajo.

La emulsión asfáltica implementada en esta prueba para todas las fórmulas de trabajo evaluadas tenía un contenido de asfalto de 63.5%.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la prueba en cada uno de los agregados estudiados.

En la tabla 31 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de Aeropuerto. Para los especímenes evaluados con 7.9% de asfalto, la pérdida por abrasión presentada fue de 300.9 gr/m² para la fórmula con el agregado natural mientras que para la sustitución con 50% con hidróxido de calcio fue de 286.9 gr/m², con una diferencia de 14.0 gr/m²; los que contenían 9.2% de asfalto, la pérdida por abrasión fue mayor en el agregado con hidróxido de calcio con 213.4 gr/m² respecto a los 129.4 gr/m² del agregado natural, con una diferencia de 84.0 gr/m²; por último, los que contenían 10.5% de asfalto, el espécimen de agregado con hidróxido de calcio volvió a presentar mayor pérdida con 192.4 gr/m² en comparación con los 87.5 gr/m² del agregado natural, con una diferencia de 104.9 gr/m².

Tabla 31 Resultados WTAT agregado Aeropuerto

Agregado Natural						Peso seco (gr)		Diferencias	
#	Filler (%)	Aditivo (%)	Agua (%)	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Inicial	Final	gr	gr/m ²
1	-	0.3 SA	11.0	12.5	7.9	943.7	935.1	8.6	300.9
2	-	0.3 SA	10.0	14.5	9.2	921.3	917.6	3.7	129.4
3	-	0.3 SA	9.0	16.5	10.5	966.7	964.2	2.5	87.5
Sustitución con 50% Cal									
4	-	0.3 N480L	13.0	12.5	7.9	895.3	887.1	8.2	286.9
5	-	0.3 N480L	12.0	14.5	9.2	925.8	919.7	6.1	213.4
6	-	0.3 N480L	11.0	16.5	10.5	938.1	932.6	5.5	192.4
								MÁX.	538.0

(Elaboración propia, 2023)

En la Fig. 80 observamos el comportamiento de las curvas obtenida con los resultados de la prueba, en el punto con 7.9% de asfalto se aprecia que la pérdida por abrasión es muy similar en el agregado natural como para la sustitución con 50% de hidróxido de calcio, siendo ligeramente mayor este último; con 9.2% de asfalto el agregado natural tiene una pérdida mucho menor con respecto al punto anterior, mientras

que para la sustitución con hidróxido de calcio esta pérdida descende muy poco, debido a esto las curvas comienzan a separarse. En el tercer punto, con 10.5% de asfalto ambas mezclas presentan una menor pérdida por abrasión, pero no tan grande a comparación del punto anterior, por lo que la pendiente de ambas curvas se vuelve menos pronunciada.

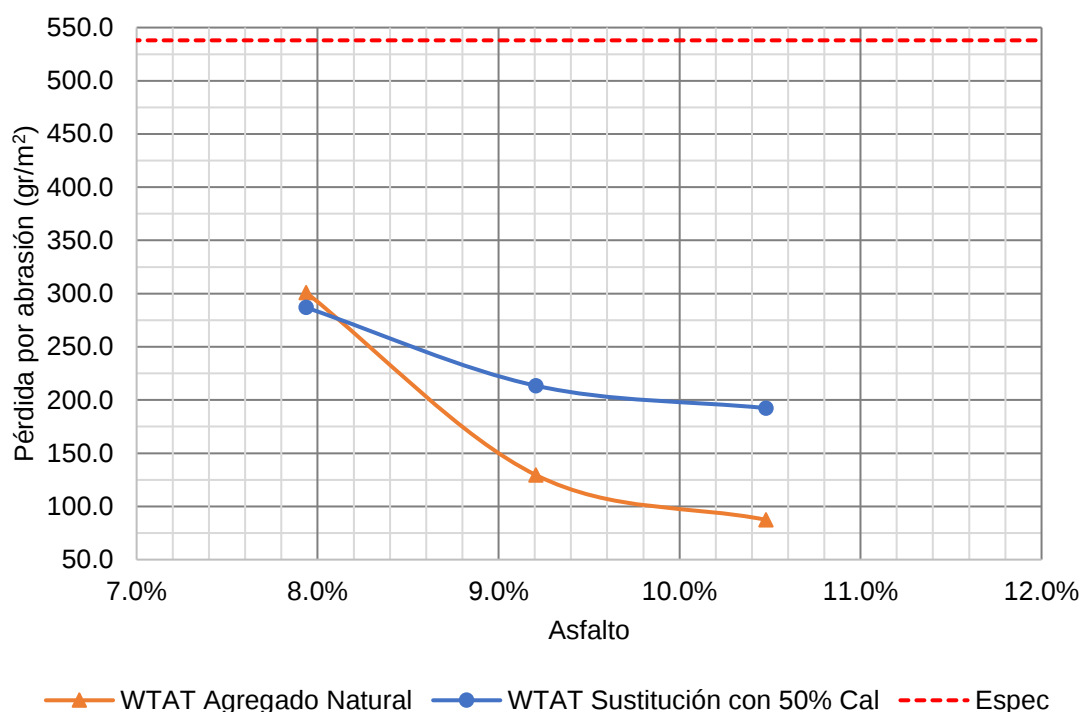


Fig. 79 Gráficas WTAT agregado Aeropuerto
(Elaboración propia, 2023)

En la tabla 32 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de García Ascencio. De los especímenes evaluados con 7.9% de asfalto, el que presentó mayor pérdida por abrasión fue el mezclado con agregado natural con 290.4 gr/m² mientras que para la sustitución con 50% con hidróxido de calcio fue de 262.4 gr/m², con una diferencia de 28.0 gr/m²; los que contenían 9.2% de asfalto, la pérdida por abrasión fue mayor en el espécimen con agregado natural con 213.4 gr/m² respecto a los 167.9 gr/m² del agregado con sustitución de hidróxido de calcio, con una diferencia de 45.5 gr/m²; por último, los que contenían 10.5% de asfalto, ambos especímenes tuvieron una pérdida de 143.4 gr/m².

Tabla 32 Resultados WTAT agregado García Ascencio

Agregado Natural						Peso seco (gr)		Diferencias	
#	Filler (%)	Aditivo (%)	Agua (%)	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Inicial	Final	gr	gr/m ²
1	0.5 Cal	0.5 SA	15.0	12.5	7.9	955.4	947.1	8.3	290.4
2	0.5 Cal	0.5 SA	14.0	14.5	9.2	960.8	954.7	6.1	213.4
3	0.5 Cal	0.5 SA	13.0	16.5	10.5	971.5	967.4	4.1	143.4
Sustitución con 50% Cal									
4	-	0.3 N480L	13.5	12.5	7.9	949.0	941.5	7.5	262.4
5	-	0.3 N480L	12.5	14.5	9.2	962.7	957.9	4.8	167.9
6	-	0.3 N480L	11.5	16.5	10.5	968.0	963.9	4.1	143.4
								MÁX.	538.0

(Elaboración propia, 2023)

En la fig. 81 se muestran las gráficas de los resultados obtenidos, la línea generada para las mezclas con agregado natural tiende a ser más una línea recta descendiente que una curva descendiente, la cual es el caso de las mezclas con sustitución por hidróxido de calcio, ambos gráficos con 7.9% de asfalto comienzan distantes una de otra, en 9.2% de asfalto esta diferencia se amplía y, por último, en 10.5% de asfalto, ambos gráficos terminan con la misma pérdida por abrasión.

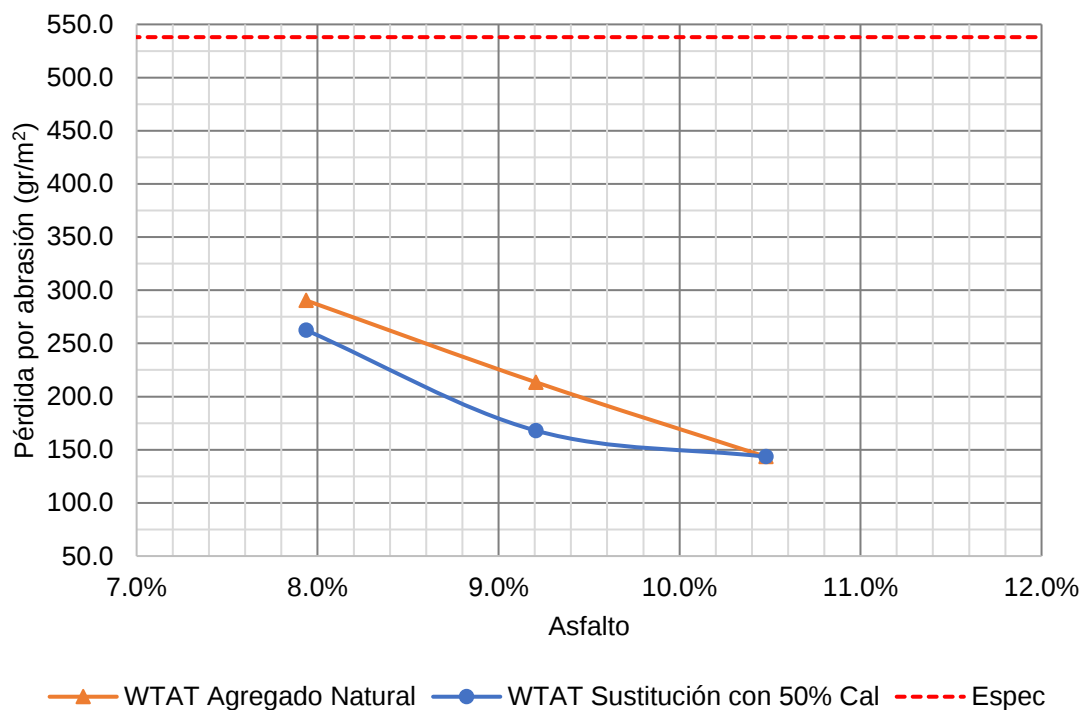
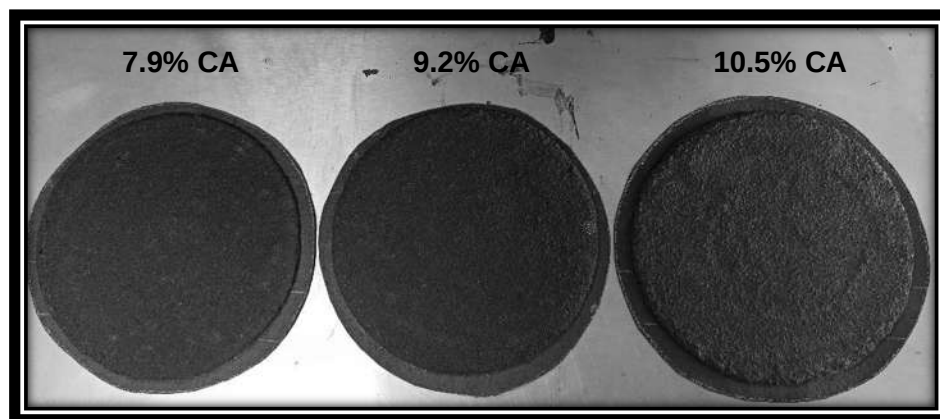


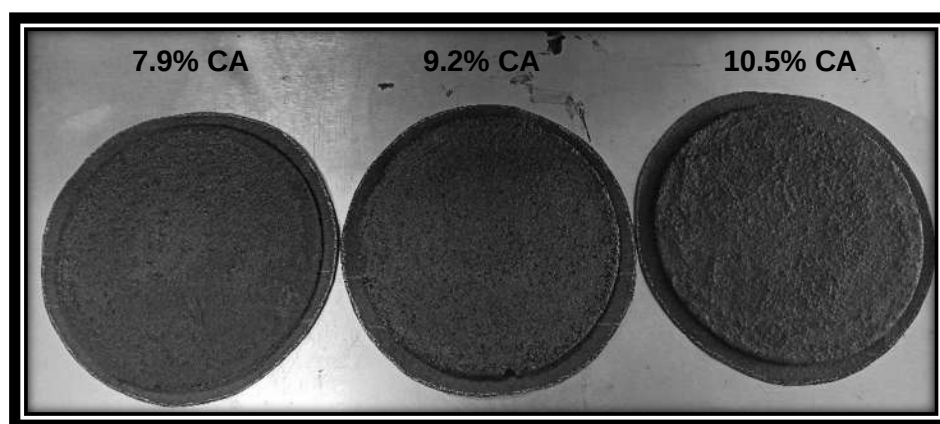
Fig. 80 Gráficas WTAT agregado García Ascencio
(Elaboración propia, 2023)

En la fig. 82 se muestran los especímenes fabricados con agregado natural, mientras que la fig. 83 muestra los especímenes con sustitución al 50% de hidróxido de calcio. Los primeros tenían buena apariencia, los 3 especímenes presentaron una coloración negra, lo cual indicaba que no tenían una deficiencia de asfalto.

Los especímenes con sustitución por hidróxido de calcio con 7.9 y 9.2% de asfalto tenían una coloración café algo normal debido al uso de hidróxido de calcio en porcentajes altos, sin embargo, es un indicativo de falta de asfalto en la mezcla y una superficie medianamente aceptable, el espécimen con 7,9% de asfalto presentó pequeñas grietas en algunas zonas. El espécimen con 10.5% de asfalto ya no presentó la coloración café si no un color negro, una buena apariencia y una textura en la superficie aceptable.



*Fig. 81 Especímenes para WTAT García Ascencio
(Elaboración propia, 2023)*



*Fig. 82 Especímenes para WTAT García Ascencio
(Elaboración propia, 2023)*

En la tabla 33 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de Agremex. De los especímenes evaluados con 8.9% de asfalto, el que presentó mayor pérdida por abrasión fue la mezcla con agregado sustituido con 50% por hidróxido de calcio con 402.3 gr/m² mientras que para el agregado natural fue de 251.9 gr/m², con una diferencia de 150.4 gr/m²; los que contenían 10.2% de asfalto, la pérdida por abrasión fue mayor en el espécimen con agregado natural con 237.9 gr/m² respecto a los 220.4 gr/m² del agregado con sustitución de hidróxido de calcio, con una diferencia de 17.5 gr/m²; por último, los que contenían 11.4% de asfalto, la mayor pérdida la presentó el espécimen con sustitución de hidróxido de calcio con 213.4 gr/m² respecto a los 267.9 gr/m² del agregado natural, con una diferencia de 45.5 gr/m².

Tabla 33 Resultados WTAT agregado de Agremex

Agregado Natural						Peso seco (gr)		Diferencias	
#	Filler (%)	Aditivo (%)	Agua (%)	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Inicial	Final	gr	gr/m ²
1	0.3 Cal	-	10.5	14.0	8.9	961.7	954.5	7.2	251.9
2	0.3 Cal	-	9.5	16.0	10.2	963.3	956.5	6.8	237.9
3	0.3 Cal	-	8.5	18.0	11.4	984.1	979.3	4.8	167.9
Sustitución con 50% Cal									
4	-	0.3 SA	15.5	14.0	8.9	962.3	950.8	11.5	402.3
5	-	0.3 SA	14.5	16.0	10.2	970.1	963.8	6.3	220.4
6	-	0.3 SA	13.5	18.0	11.4	966.6	960.5	6.1	213.4
								MÁX.	538.0

(Elaboración propia, 2023)

La fig. 84 muestra las gráficas de los resultados obtenidos para cada agregado con los diferentes porcentajes de asfalto. La curva generada para el agregado natural es una curva descendente, la cual en los primeros dos puntos desciende ligeramente, y para el tercer punto tiene un descenso mayor, lo que indica que el espécimen con 11.4% ya no presentó tanta pérdida como el de 10.2%.

En el agregado con sustitución por hidróxido de calcio la pérdida por abrasión que presentó con 10.2% respecto a los 8.9% de asfalto fue casi la mitad de la pérdida únicamente, esto pudo ser debido a que tenía una mejor adherencia entre el agregado y el asfalto ya que el porcentaje de asfalto era mayor. Por último, con 11.4% de asfalto, la pérdida fue muy similar entre los dos especímenes, solamente con una diferencia de 7 gr/m².

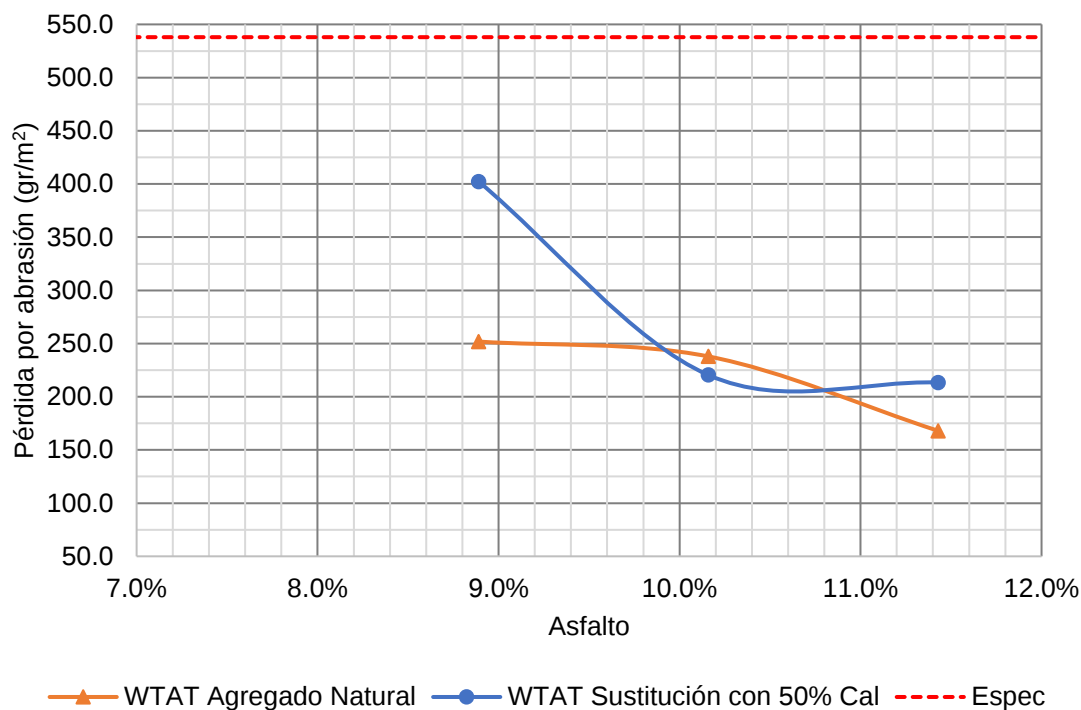
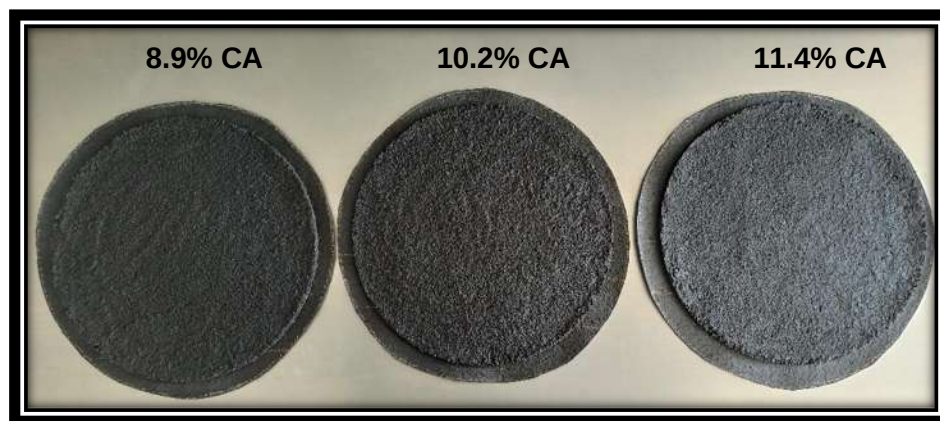


Fig. 83 Gráficas WTAT agregado Agremex
(Elaboración propia, 2023)

En la fig. 85 y 86 se muestran los especímenes antes de la prueba. Los especímenes elaborados con agregado natural tenían un color negro, característico de las mezclas asfálticas, con una buena apariencia y una textura superficial aceptable.

En cuanto a los fabricados con agregado que tenía una sustitución con hidróxido de calcio, los que contenían 8.9 y 10.2% presentaron un color café claro, debido al alto porcentaje de hidróxido de calcio implementado, una apariencia y textura superficial aceptable; y en la parte exterior se les formó una capa color blanco, producto del uso de hidróxido de calcio, sin embargo, esto no afectó el desempeño de los especímenes a la hora de la prueba. Cabe destacar que el espécimen con 8.9% era demasiado frágil, por lo que se tuvo que manipular con bastante cuidado debido a la baja cohesión que presentaba. El fabricado con 11.4% de asfalto tenía un color café oscuro, con buena apariencia y una textura superficial aceptable.



*Fig. 84 Especímenes para WTAT Agremex
(Elaboración propia, 2023)*



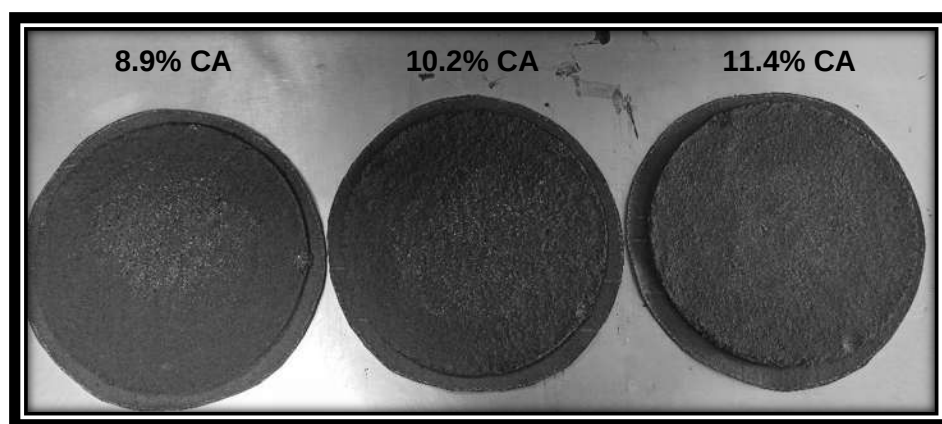
*Fig. 85 Especímenes para WTAT Agremex
(Elaboración propia, 2023)*

En las fig. 87 y 88 se muestra el desgaste y la pérdida por abrasión que sufrieron los especímenes después de realizada la prueba.

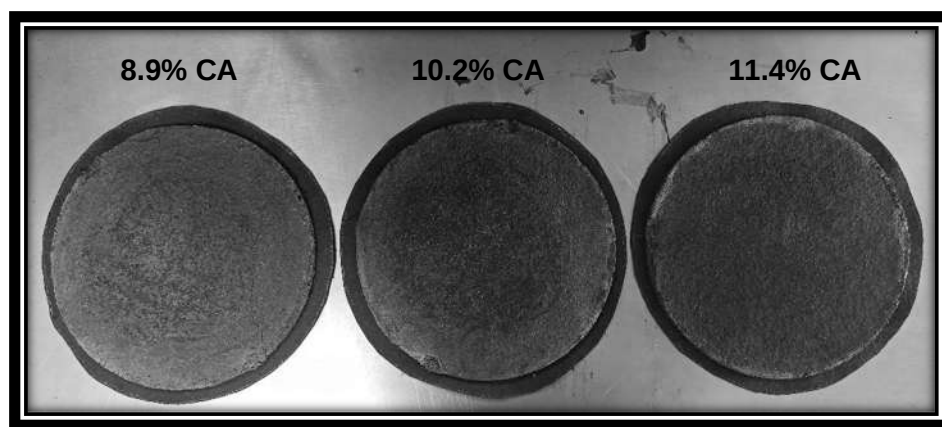
Los que fueron mezclados con agregado natural conservaron perfectamente su forma, únicamente sufrieron pérdidas en la parte superficial mayormente de agregado fino, algunas arenas de mayor tamaño y asfalto; se logra apreciar que la pérdida del espécimen con 11.4% de asfalto es mucho menor con respecto a los otros dos, ya que se nota casi intacto, solamente una ligera pérdida de finos con asfalto al centro del espécimen.

Respecto a los especímenes que fueron mezclados utilizando agregado con sustitución por hidróxido de calcio, en primer lugar, después de la prueba, la zona que fue sometida al paso del rodillo de manguera se tornó de un color más oscuro, lo cual

es completamente normal. El espécimen con 8.9% que fue el que tuvo la mayor pérdida, tuvo demasiado desprendimiento de agregados en la superficie, por lo que podría percibirse como el que tuvo menor desgaste, lo cual es incorrecto, ya que debido a estar pérdidas no se logró asentar la zona por la cual tuvo el pase del rodillo; la grieta que se aprecia en este espécimen se generó al momento de la manipulación para su secado después de la prueba, ya que como se mencionó anteriormente era demasiado frágil. Los dos especímenes restantes se pueden observar que tuvieron un desgaste muy similar y la pérdida que presentaron fue principalmente de finos y arenas.



*Fig. 86 Especímenes Agremex después de WTAT
(Elaboración propia, 2023)*



*Fig. 87 Especímenes Agremex después de WTAT
(Elaboración propia, 2023)*

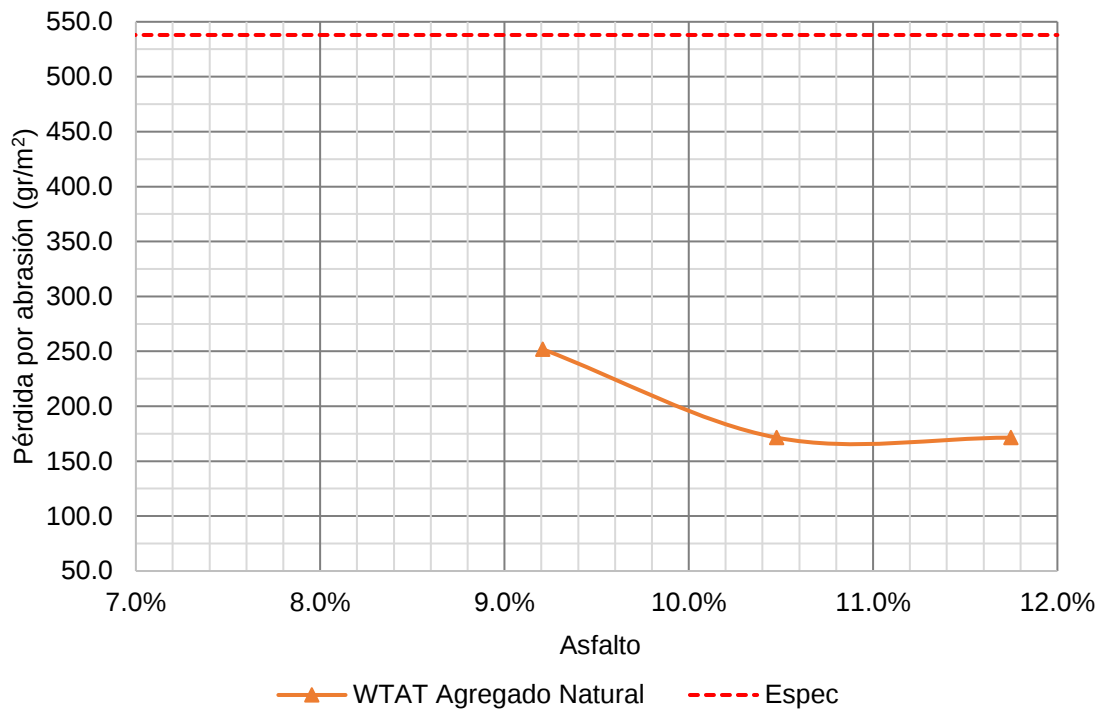
En la tabla 34 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de la Roca. El espécimen evaluado con 9.2% de asfalto presentó una pérdida por abrasión de 251.9 gr/m²; la mezcla con 10.5% de asfalto tuvo una la pérdida de 171.4 gr/m² con una diferencia de 90.5 gr/m² con respecto al anterior; por último, el que contenía 11.7% de asfalto presentó la misma pérdida que con 10.5% de asfalto, 171.4 gr/m².

Tabla 34 Resultados WTAT agregado La Roca

Agregado Natural						Peso seco (gr)		Diferencias	
#	Filler (%)	Aditivo (%)	Agua (%)	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Inicial	Final	gr	gr/m ²
1	0.3 Cal	-	13.0	14.5	9.2	967.0	959.8	7.2	251.9
2	0.3 Cal	-	12.0	16.5	10.5	961.6	956.7	4.9	171.4
3	0.3 Cal	-	11.0	18.5	11.7	980.3	975.4	4.9	171.4
								MÁX.	538.0

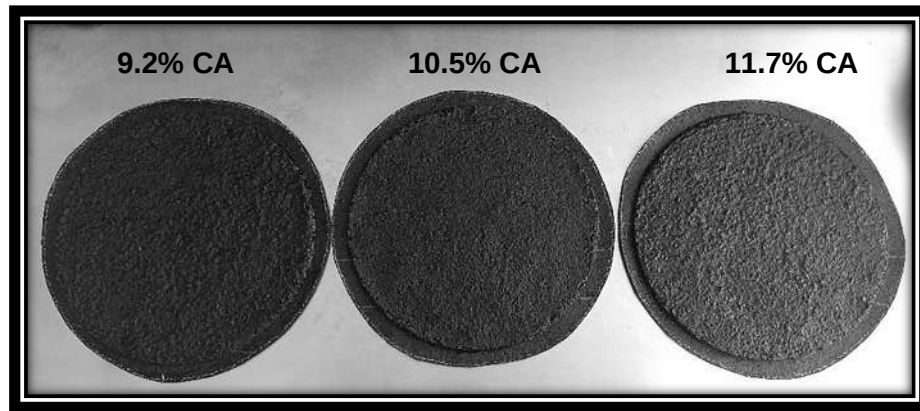
(Elaboración propia, 2023)

En la fig. 89 se muestra la gráfica de la curva de la prueba realizada a los 3 especímenes, donde se puede apreciar su comportamiento; del primer punto al segundo se tiene una disminución en la pérdida por abrasión bastante significativa, lo que quiere decir que tuvo una mejor cohesión la mezcla con 10.5% de asfalto con respecto a la de 9.2%. En el caso de la muestra con 11.7% de asfalto, como se mencionó anteriormente esta presentó un desempeño igual a la mezcla con 10.5%, lo que indica que no hubo algún cambio significativo en la cohesión de las mezclas con el aumento de asfalto.



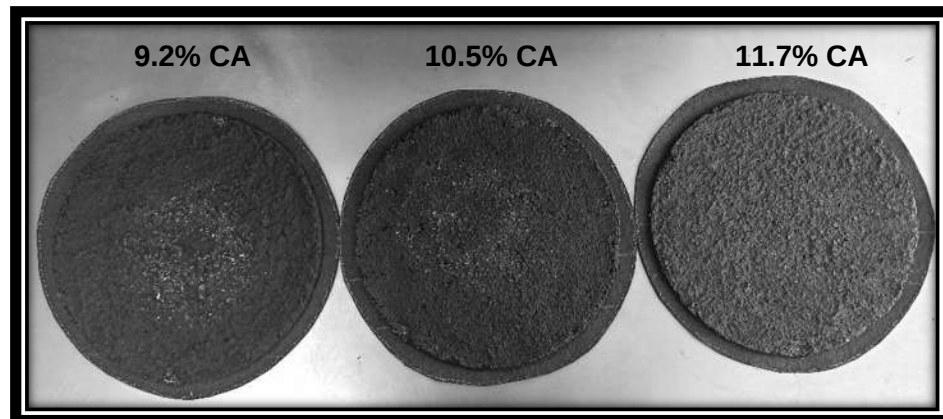
*Fig. 88 Gráfica WTAT agregado La Roca
(Elaboración propia, 2023)*

En la fig. 90 se aprecian los especímenes fabricados, antes de la prueba. Los 3 tienen una coloración negra consistente por lo que no es fácil diferenciar que porcentaje de asfalto contiene cada una, a diferencia de otros especímenes los cuales tenían coloraciones que permitían realizar esta distinción de manera más fácil; con un excelente aspecto y una muy buena textura superficial, no se aprecian grietas y la rigidez que desarrollaron fue muy buena, por lo que fue fácil su manipulación una vez que estuvieron completamente secos.



*Fig. 89 Especímenes para WTAT La Roca
(Elaboración propia, 2023)*

En la fig. 91 se muestran los especímenes después de realizada la prueba, se nota una mayor pérdida en el que contenía 9.2% de asfalto, teniendo pérdida de finos, asfalto y algunas arenas; respecto a los de 10.5% y 11.7% de asfalto, los cuales tuvieron la misma pérdida, los materiales que perdieron fueron diferentes, ya que el primero tuvo pérdida de finos y asfalto principalmente, mientras que las pérdidas del segundo fueron arenas principalmente acompañado de algunos finos y poco asfalto, debido a esto se nota un mayor desgaste a simple vista del espécimen con 10.5% de asfalto.



*Fig. 90 Especímenes La Roca después de WTAT
(Elaboración propia, 2023)*

En la tabla 35 se muestran los resultados obtenidos para el agregado de Buenavista. El espécimen evaluado con 8.9% de asfalto presentó una pérdida por abrasión de 160.9 gr/m²; la mezcla con 10.2% de asfalto tuvo una mayor pérdida con

171.4 gr/m² teniendo una diferencia de 10.5 gr/m² con respecto al anterior; por último, el que contenía 11.4% de asfalto presentó una mayor pérdida nuevamente con respecto a la de 10.2% de asfalto con 248.4 gr/m² teniendo una diferencia de 77.0 gr/m².

Tabla 35 Resultados WTAT agregado Buenavista

Agregado Natural						Peso seco (g)		Diferencias	
#	Filler (%)	Aditivo (%)	Agua (%)	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Inicial	Final	gr	gr/m ²
1	0.5 Cal	-	15.0	14.0	8.9	947.1	942.5	4.6	160.9
2	0.5 Cal	-	14.0	16.0	10.2	949.9	945.0	4.9	171.4
3	0.5 Cal	-	13.0	18.0	11.4	977.8	970.7	7.1	248.4
								MÁX.	538.0

(Elaboración propia, 2023)

En la fig. 92 se muestra el comportamiento que presentó la curva con los resultados obtenidos, para este caso podemos observar que la curva va ascendiendo conforme aumenta el porcentaje de asfalto en la mezcla, lo cual es un comportamiento anormal, ya que la pérdida por abrasión debería ir disminuyendo conforme aumenta el asfalto. Esto se pudo deber a la pérdida de materiales que tuvo cada uno de los especímenes, lo cual podemos corroborar al observar la fig. 93, en primera instancia se ve que el mayor desgaste lo tuvo la mezcla con 8.9% de asfalto, ya que la pérdida que tuvo fue principalmente finos y asfalto, sin embargo, la pérdida que presentó el espécimen con 10.2% fue una mezcla de finos, asfalto y arenas, por lo que el desgaste que se observa es menor que el anterior, pero con una pérdida mayor. Por último, el espécimen con 11.4% tuvo una pérdida principalmente de arenas y asfalto, por lo que no se nota un desgaste considerable y es la consecuencia de tener la mayor pérdida por abrasión.

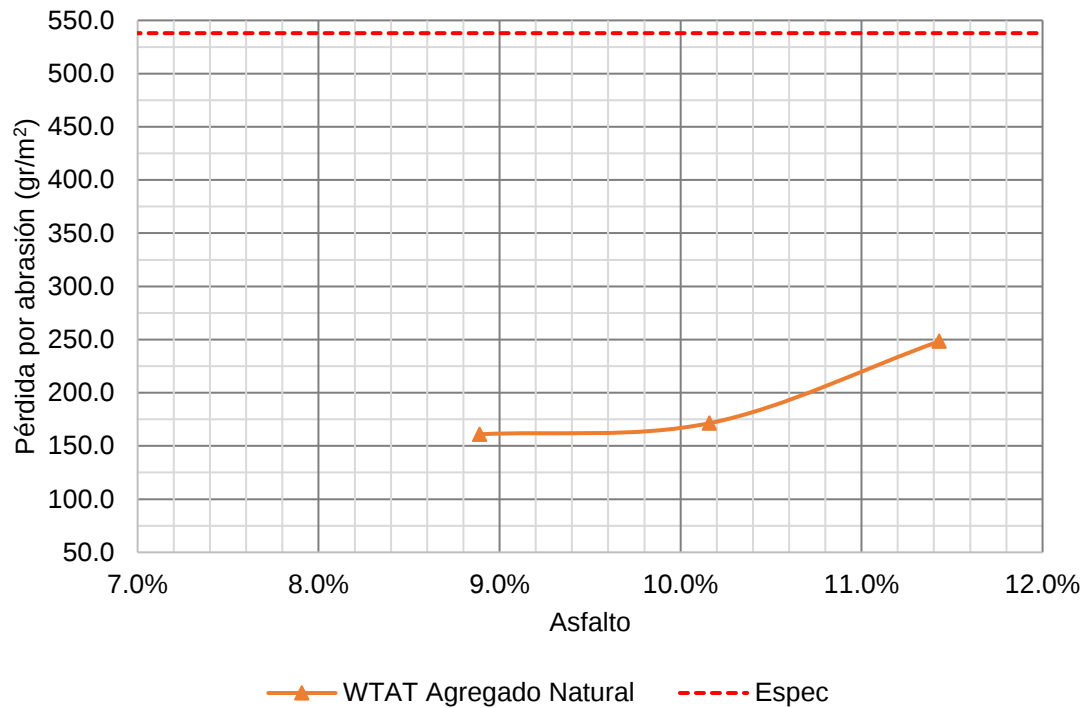


Fig. 91 Gráfica WTAT agregado Buenavista
(Elaboración propia, 2023)

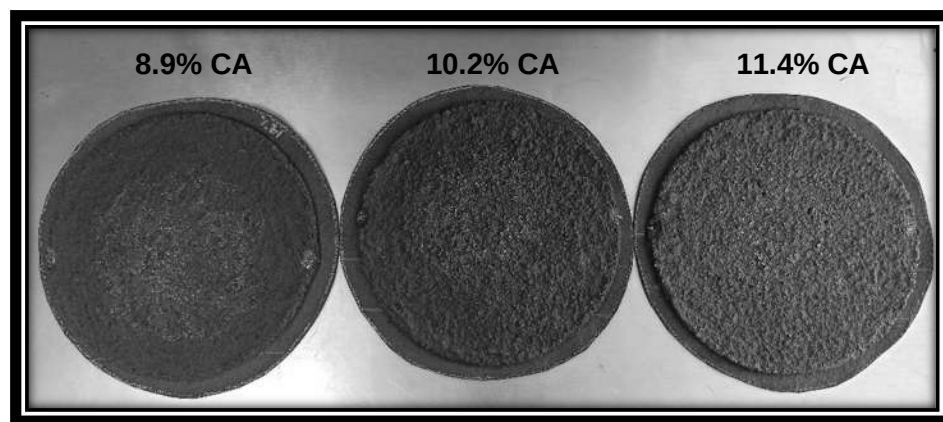


Fig. 92 Especímenes La Roca después de WTAT
(Elaboración propia, 2023)

4.3.6 Determinación del contenido óptimo de asfalto

Para la determinación del contenido óptimo de asfalto se utilizaron los resultados de las pruebas de rueda cargada y abrasión en húmedo, las cuales se mostraron en los apartados anteriores; lo que se realizó fue hacer un cruce de ambas gráficas y el punto de intersección de ambas curvas se considera el valor óptimo de asfalto para la fórmula

de trabajo en estudio. Sin embargo, de este valor obtenido se puede trabajar la mezcla con $\pm 1\%$ de asfalto, siempre y cuando no se rebase el límite de 538.0 gr/m².

En la fig. 94 se muestran las gráficas del agregado Aeropuerto con los dos agregados evaluados (natural y con sustitución por hidróxido de calcio).

De acuerdo con las gráficas, para el agregado natural el porcentaje de asfalto óptimo fue de $8.4 \pm 1\%$, comparado con el contenido de asfalto teórico de 9.2%, el cual fue el usado para realizar las pruebas anteriores, por lo que se tuvo una diferencia de 0.8%, quedando dentro de la tolerancia del contenido óptimo.

Para el agregado con sustitución al 50% por hidróxido de calcio se tuvo que el porcentaje de asfalto óptimo fue de 8.6%, teniendo una diferencia de 0.6% comparado con el asfalto teórico, el cual también quedo dentro de la tolerancia.

Comparando el porcentaje de asfalto óptimo entre el agregado natural y el agregado con sustitución con cal tenemos únicamente una diferencia de 0.2% de asfalto, requiriendo más asfalto el último mencionado.

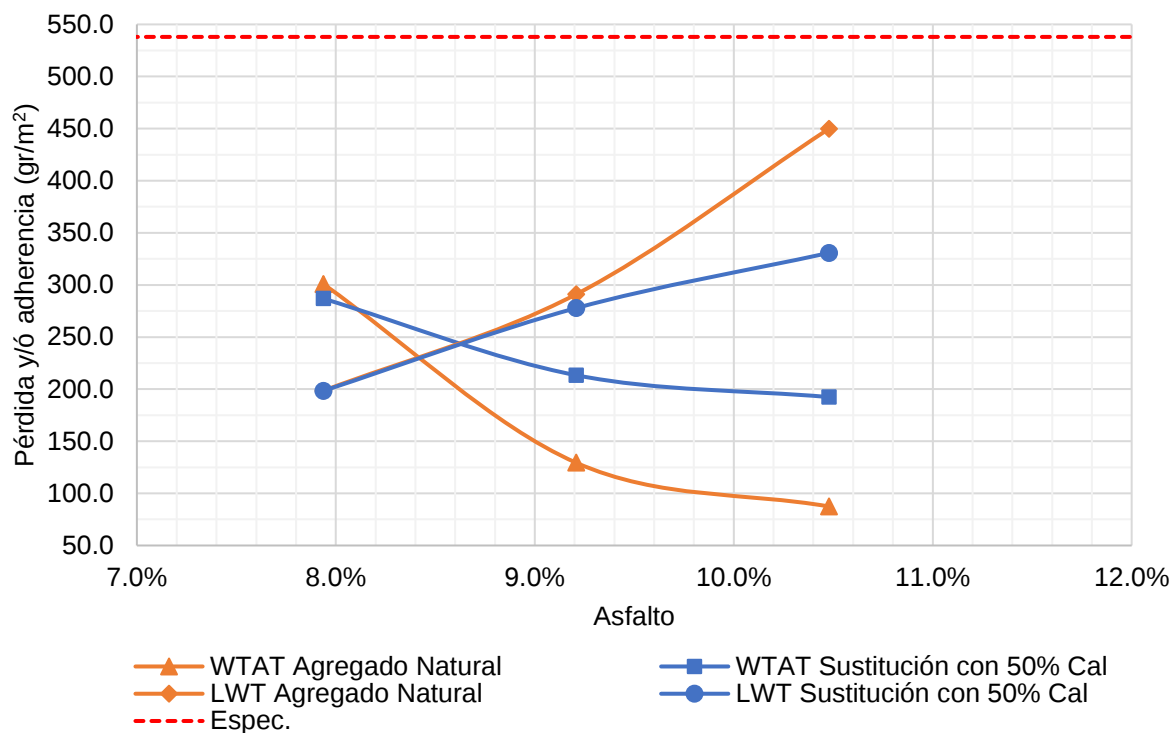


Fig. 93 Contenido óptimo agregado Aeropuerto
(Elaboración propia, 2023)

La fig. 95 muestra las gráficas del agregado de García Ascencio.

De acuerdo con las gráficas, para el agregado natural el porcentaje de asfalto óptimo fue de $8.4 \pm 1\%$, comparado con el contenido de asfalto teórico de 9.2%, por lo que se tuvo una diferencia de 0.8%, quedando dentro de la tolerancia del contenido óptimo.

Para el agregado con sustitución al 50% por hidróxido de calcio, este tuvo el mismo porcentaje de asfalto óptimo.

En el caso del agregado de este banco de material, la sustitución del agregado fino por hidróxido de calcio no tuvo repercusión en la cantidad de asfalto óptimo dentro de la mezcla, ya que ambos porcentajes fueron iguales.

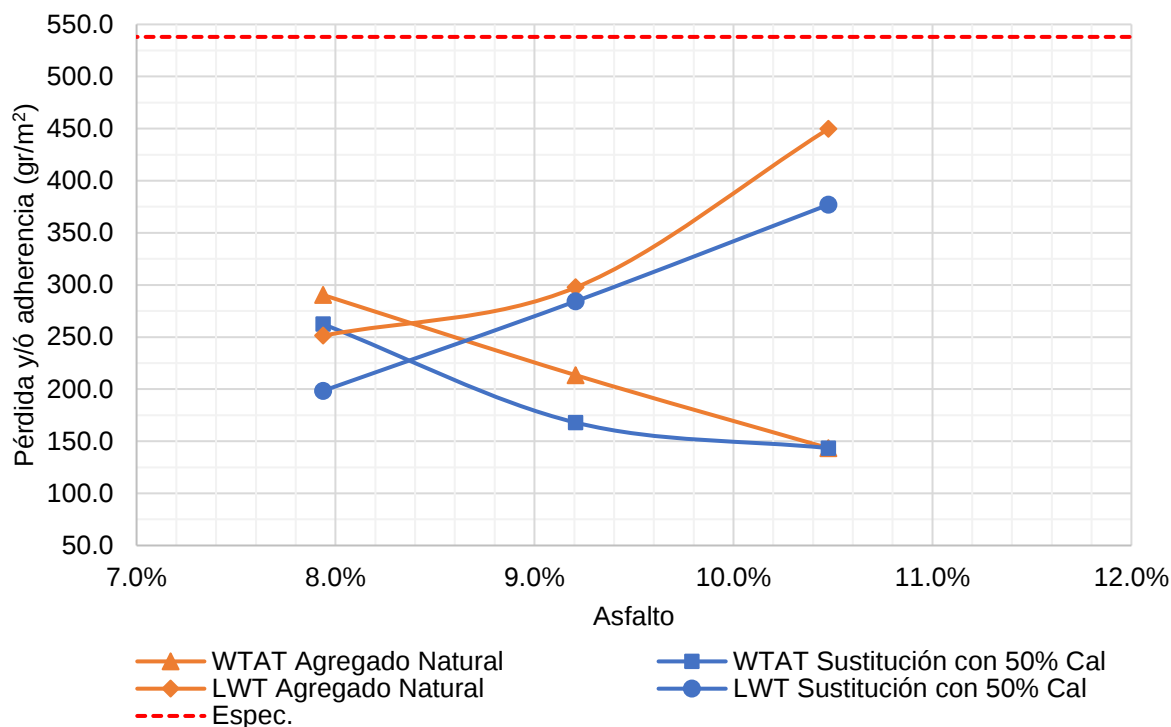


Fig. 94 Contenido óptimo agregado García Ascencio
(Elaboración propia, 2023)

La fig. 96 muestra las gráficas del agregado de Agremex.

De acuerdo con las gráficas, para el agregado natural el porcentaje de asfalto óptimo fue de $11.0 \pm 1\%$, comparado con el contenido de asfalto teórico de 10.0% , por lo que se tuvo una diferencia de 1.0% , quedando en el límite de la tolerancia del contenido óptimo.

Para el agregado con sustitución al 50% por hidróxido de calcio, no se pudo calcular el contenido óptimo, ya que las gráficas de las pruebas de LWT y WTAT no se cruzaron en ningún momento. Esto se pudo deber a un error en el desarrollo de las pruebas o era necesario probar con un porcentaje más elevado de asfalto, con el cual se hubiera logrado mayor adherencia de arena, y la curva de LWT habría ascendido hasta algún punto de cruce.

En el caso del agregado de este banco de material, no se pudo determinar si el agregado natural requería mayor o menor cantidad de asfalto respecto al agregado con sustitución por hidróxido de calcio, conforme al asfalto óptimo.

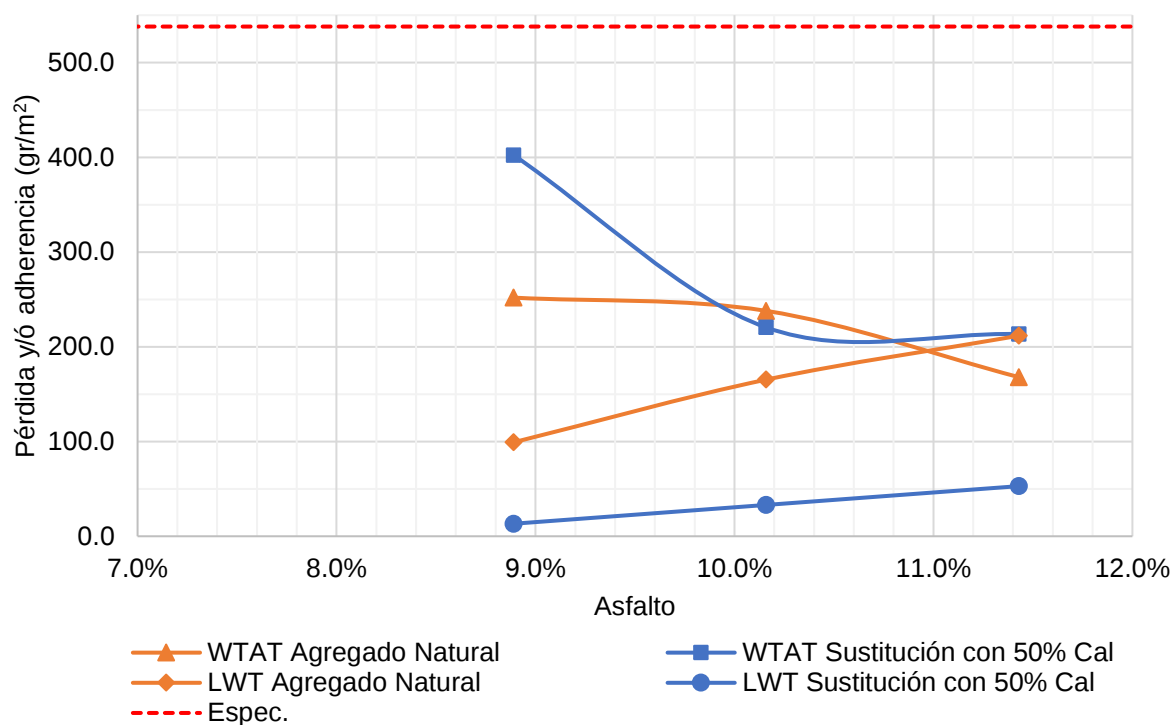
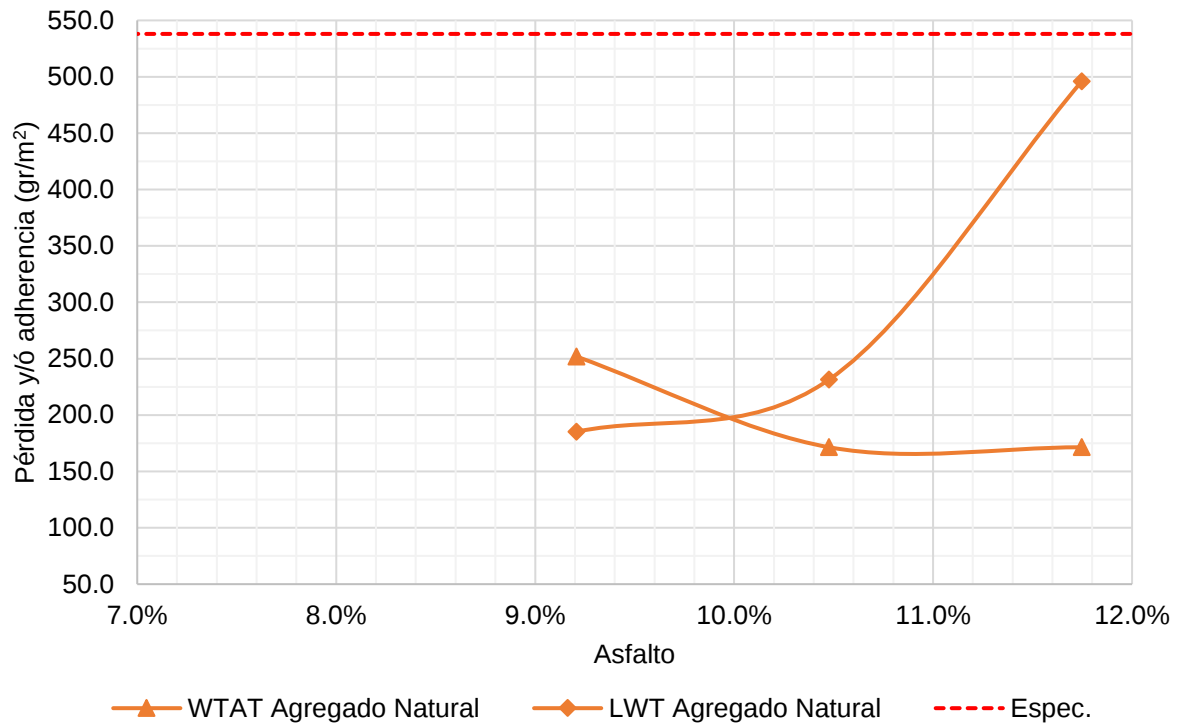


Fig. 95 Contenido óptimo agregado Agremex
(Elaboración propia, 2023)

La fig. 97 muestra las gráficas del agregado La Roca.

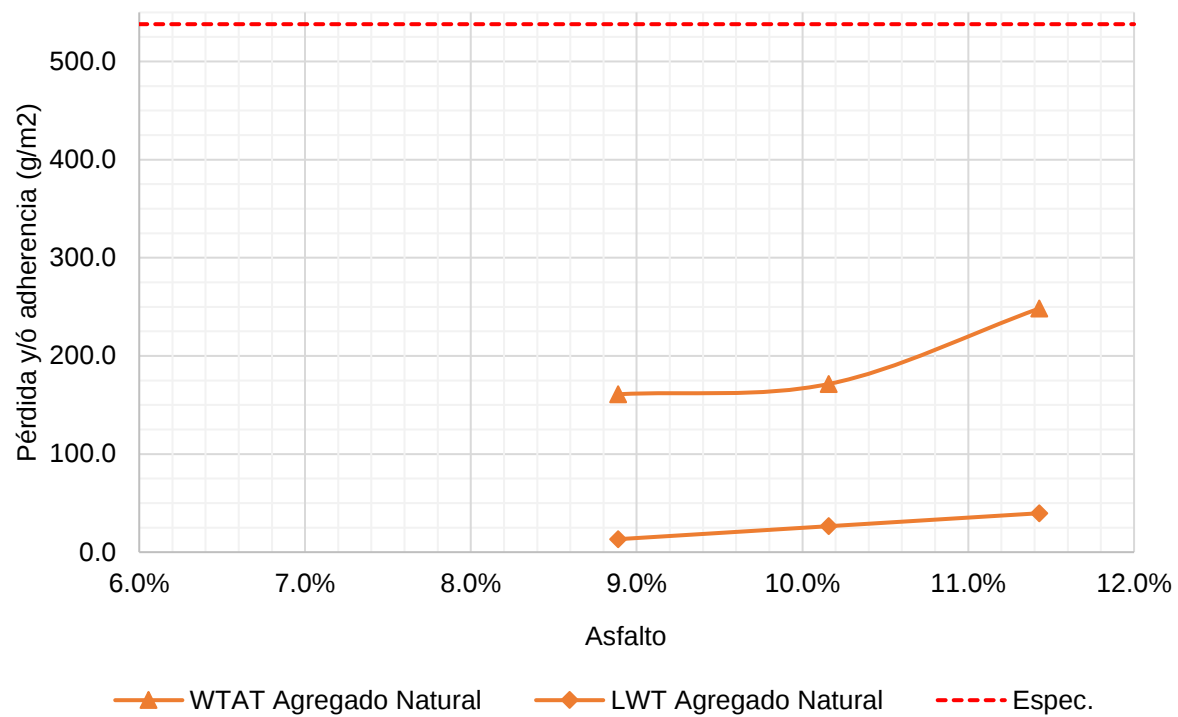
De acuerdo con las gráficas, para el agregado natural el porcentaje de asfalto óptimo fue de $10.0 \pm 1\%$, comparado con el contenido de asfalto teórico de 10.2%, por lo que se tuvo una diferencia de 0.2%, quedando dentro de la tolerancia del contenido óptimo y siendo casi el mismo porcentaje para ambos casos.



*Fig. 96 Contenido óptimo agregado La Roca
(Elaboración propia, 2023)*

La fig. 98 muestra las gráficas del agregado Buenavista.

De acuerdo con las gráficas, para el agregado natural el porcentaje de asfalto óptimo no se pudo calcular, ya que las gráficas de las pruebas de LWT y WTAT no se cruzaron en ningún momento.



*Fig. 97 Contenido óptimo agregado Buenavista
(Elaboración propia, 2023)*

Capítulo 5. Conclusiones

La infraestructura carretera es uno de los principales activos que impulsan el desarrollo socioeconómico de un país, por lo que es primordial contar con pavimentos que permitan una circulación segura, cómoda y con bajos costos de operación.

La conservación de carreteras es una actividad primordial para preservar el patrimonio de los países, al permitir recobrar las condiciones de funcionamiento óptimo, garantizando la seguridad y el confort de los usuarios y las cargas que se mueven a través de ellas. Hoy en día la implementación de tratamientos superficiales ha permitido mitigar el deterioro de los pavimentos y carreteras del país, mejorando las características de las capas de rodadura y alargando los tiempos de vida útil.

Un ejemplo de ellos son los microaglomerados, los cuales requieren de materiales de alta calidad. Sin embargo, no siempre se cuenta con bancos de material que logren cubrir todos los requisitos solicitados. Aunado a esto, es una tecnología de uso reciente en México. Todo esto ha provocado que se tengan malas experiencias en las aplicaciones y que sea considerado un tratamiento superficial difícil de manejar.

La falta de estudios sobre microaglomerados en México ha impedido que se determine la influencia que tienen cada característica del agregado pétreo en la mezcla. Una de las características que más ha tenido debate y causado discusiones es el alto grado de reactividad en un agregado pétreo, ya que este se relaciona con un índice indirecto de su potencialidad expansiva, por lo que se cree que esto puede ser perjudicial en los microaglomerados, ya que podría generar desprendimientos prematuros.

Por esta razón se tomó la decisión de realizar esta investigación, en la cual analizamos el comportamiento que podían presentar los microaglomerados dentro de la etapa de diseño en laboratorio al realizar sustituciones parciales o completas de agregado fino por hidróxido de calcio, en comparación con microaglomerados elaborados a partir de agregados pétreos en condiciones originales.

En este estudio se comprobó que es posible utilizar agregados pétreos con un alto grado de reactividad en condiciones originales, llevar a cabo diseños completos, obteniendo buenos resultados en las pruebas de cohesión, siendo superiores en la mayoría de los casos y no presentando desprendimientos excesivos en la prueba de abrasión en húmedo.

También se logró determinar que el uso de hidróxido de calcio en porcentajes dentro de los parámetros recomendados (entre 0.3 – 3.0%) nos permite controlar la reactividad del agregado, ampliando los tiempos de mezclado, sin comprometer su desempeño en las demás pruebas y otorgando una buena manejabilidad.

Por otra parte, el llevar a cabo sustituciones del 50% y 100% del agregado fino por hidróxido de calcio, no otorga un beneficio considerable que justifique realizarlo, ya que, si bien se pueden realizar diseños en laboratorio con estas sustituciones, en vez de facilitar los diseños, los vuelven más complicados y tardados, obteniendo resultados muy similares en comparación con el uso de un agregado en condición original o inclusive menor a este.

La elaboración de diseños con sustituciones parciales o totales del agregado fino por hidróxido de calcio se ven condicionadas por el porcentaje de finos que contenga el agregado, ya que en este estudio se pudieron llevar a cabo diseños con estas condiciones hasta con un máximo de 14% de material que pasa la malla N°200.

También, se pudo observar que, en los casos de análisis realizados, resultó ser más perjudicial tener un agregado que no cumple con el valor mínimo de equivalente de arena, que tener un agregado con un alto grado de reactividad, ya que se vuelve más difícil encontrar una fórmula de trabajo que cumpla con los tiempos de mezclado mínimo y su manejabilidad no es tan buena.

Finalmente, y de acuerdo con la investigación realizada, se concluye que, el llevar a cabo un pretratamiento del agregado, incorporando hidróxido de calcio como sustitución de la fracción fina, previo al mezclado con los otros componentes del microaglomerado, no generó una mejora sustancial en el desempeño de las mezclas en la mayoría de los casos comparado con los agregados que no fueron sometidos a este pretratamiento. De la misma forma, el incorporar porcentajes de 50% y 100% de hidróxido de calcio como sustituto de la parte fina del agregado no mejoró significativamente los resultados en comparación con los agregados que fueron usados en condición original. Además, estas incorporaciones se ven condicionadas y limitadas por el porcentaje de la misma fracción fina que contiene el agregado, para este estudio el límite fue de 14%. Debido a todo esto, se concluye que la mejor forma de lograr un beneficio importante con el uso de hidróxido de calcio es de acuerdo con los porcentajes recomendados por la ISSA, los cuales son adiciones máximas del 3% con respecto al peso seco del agregado.

Bibliografía

- ANCADE (Asociación Nacional de Cales y Derivados de España). (s.f.). *ANCADE Artículos*. Obtenido de CAL HIDRATADA Un aditivo probado para la durabilidad de los pavimentos asfálticos: <https://www.ancade.es/wp-content/uploads/2020/06/calhidratadaenasfaltos.pdf>
- Ateb. (s.f.). *DOCPLAYER*. Obtenido de TÉCNICAS EN FRÍO PARA CAPAS DE RODADURA: RIEGOS CON GRAVILLA, MEZCLAS EN FRÍO, LECHADAS Y MICROAGLOMERADOS EN FRÍO: <https://docplayer.es/26836885-Tecnicas-en-frio-para-capas-de-rodadura-riegos-con-gravilla-mezclas-en-frio-lechadas-y-microaglomerados-en-frio.html>
- BERGKAMP. (s.f.). *BERGKAMP*. Obtenido de Las Emulsiones de Asfalto: <https://www.bergkampinclatam.com/news/understanding-your-emulsions/las-emulsiones-de-asfalto/>
- Broughton, B., Lee, S.-J., & Kim, Y.-J. (2012). 30 Years of Microsurfacing: A Review. *International Scholarly Research Notices*, 2012, 7. Obtenido de <https://doi.org/10.5402/2012/279643>
- C. D, H., & D. A., O. (1993). Nine years of microsurfacing in Oklahoma. *Transportation Research Record*, no. 1392, 13-19.
- CEMEX. (19 de junio de 2019). *Artículos de Construcción*. Obtenido de Hablando de Cementos Portland: <https://www.cemex.com.pe/-/hablando-de-cementos-portland>
- Cordero, L., Serment, S., & de la Cruz, K. L. (s.f.). *ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL*.
- DOCPLAYER. (2019). *DOCPLAYER*. Obtenido de <https://docplayer.es/108365418-Capitulo-i-introduccion.html>
- Guerrero Aguilera, S., Herra Gómez, L. D., Loría Salazar, L. G., Salas Chaves, M., Sequeira Rojas, W., & Zúñiga López, A. (2019). *Aplicación de riego de liga*. San José.
- Gutiérrez Muñiz, Á. (1 de Enero de 2023). MECANISMO DE ROMPIMIENTO DE UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA. *ASFÁLTICA*, 73, 5-13. Obtenido de https://issuu.com/asfaltica/docs/asf_ltica_73
- ISSA. (2005). *TB No. 118 Surface Area Method of Slurry Seal Design*. Illinois.

- ISSA. (2010). *A143. Norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación*. Illinois.
- ISSA. (2012). *TB No. 100 Método de Ensayo para la Abrasión Húmeda de Sistemas de Superficies tipo Slurry*. Illinois.
- ISSA. (2012). *TB No. 113 Método de Ensayo para Determinar el Tiempo de Mezcla para Sistemas de Superficies Tipo Slurry*. Illinois.
- ISSA. (2012). *TB No. 139 Método de Ensayo para Determinar el Desarrollo del Endurecimiento y Curado de Sistemas de Superficies de Tipo Slurry mediante un Comprobador de Cohesión*. Illinois.
- ISSA. (2013). *TB No. 145 Método de Ensayo para Determinar el Valor de Azul de Metileno en Partículas Finas de Agregado Mineral*. Illinois.
- ISSA. (2018). *TB No. 109 Test Method for Measurement of Excess Asphalt in Bituminous Mixtures by Use of a Loaded Wheel Tester and Sand Adhesion*. Illinois.
- KAO. (2021). *Laboratorio de Investigación y Desarrollo*. El Salto.
- Kröger García, I. A., & Kröger García, S. (2020). *Tratamientos Superficiales de Alto Desempeño*. Kröger García, Ignacio Agustín.
- Ondarse Álvarez, D. (15 de julio de 2021). *concepto*. Obtenido de Emulsión Asfáltica: <https://concepto.de/emulsion-quimica/>
- Pradas Díaz, J. L., Lucas Ochoa, F. J., & Miranda Pérez, L. (14 de septiembre de 2020). *ATEB. Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas*. Obtenido de LAS EMULSIONES DE MUY ALTA ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO: https://www.ateb.es/pdf/13-LAS_EMULSIONES_DE_MUY_ALTA_ESTABILIDAD_AL_ALMACENAMIENTO.pdf
- RUBI ESPAÑA. (11 de Octubre de 2022). *RUBI BLOG*. Obtenido de Cemento Portland: ¿Qué es y cuáles son sus ventajas?: <https://www.rubi.com/es/blog/cemento-portland-que-es/>
- Sarsam, S., & Jlail, K. (Julio de 2015). *ResearchGate*. Obtenido de EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN Y LA SUSCEPTIBILIDAD A LA TEMPERATURA DEL CONCRETO ASFÁLTICO: https://www.researchgate.net/publication/290391547_ASSESSING_TENSILE_ST

RENGTH_AND_TEMPERATURE_SUSCEPTIBILITY_OF ASPHALT CONCRETE

- Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (7 de agosto de 2020). *Conservación de Carreteras Federales*. Obtenido de Conferencia sobre Programas del Bienestar: <https://www.gob.mx/stps/articulos/conservacion-de-carreteras-federales-conferencias-sobre-programas-del-bienestar?idiom=es>
- SFERB. (2010). emulsiones asfálticas. (AMAAC, Trad.) Gráfica, Creatividad y Diseño. (Trabajo original publicado en 1967).
- SICT. (2017). *N·CMT·4·04/17. Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Ciudad de México.
- SICT. (2020). *Dirección General de Servicios Técnicos*. Obtenido de Boletines: https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Boletines/DGST._Bolet%C3%ADn_T%C3%A9cnico_1.2020_Tratamientos_Superficiales.pdf
- WISE. (30 de mayo de 2023). *Blog vise*. Obtenido de ¿QUÉ INCIDE EN EL DETERIORO DE UNA CARPETA ASFÁLTICA?: <https://blog.wise.com.mx/-1>
- Watson, D., & Jared, D. (1998). Georgia department of Transportation's experience with microsurfacing. *Transportation Research Record*, no. 1616, 42-46.