



UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas con agregados de concreto reciclado mediante la metodología Marshall

Tesis que para obtener el grado de:
**MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA
RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

Presenta:

Ing. Carlos Uriel Espino González

Asesor:

Mtro. Wilfrido Martínez Molina

Morelia, Michoacán, Noviembre 2017





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

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS CON AGREGADOS DE CONCRETO
RECICLADO MEDIANTE LA METODOLOGÍA MARSHALL**

TESIS

Para obtener el título de:

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

NOVIEMBRE 2017

Presenta:

Ing. Carlos Uriel Espino González

ASESOR:

Mtro. Wilfrido Martínez Molina

Co Asesores:

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Dr. Luis Elías Chávez Valencia

~ ii ~



CONTENIDO

CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE IMÁGENES	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
AGRADECIMIENTOS.....	xi
DEDICATORIA.....	xii
<i>Resumen</i>	xiii
<i>Abstract</i>	xiv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Residuos de construcción y demolición de concreto.	2
1.2. Definiciones.....	4
1.3. Planteamiento del problema.	6
1.3.1. Enunciado del problema.....	6
1.3.2. Formulación del problema.....	7
1.4. Objetivos.	7
1.4.1. Objetivo general.	7
1.4.2. Objetivos específicos.	7
1.5. Hipótesis.....	8
1.6. Justificación práctica.	8
1.7. Delimitación.	8
CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE	9
2.1. Primeros Estudios.	9
2.2. Gestión de los residuos de construcción y demolición.	16
2.2.1. Recomendaciones sobre la gestión de los áridos reciclados.	19
2.3. Agregados RCD en carreteras.....	19
2.3.1. Introducción.....	19
2.3.2. RCD en la construcción de carreteras.	21
2.3.3. Aspectos Finales a considerar.....	22
CAPÍTULO III. PROGRAMA EXPERIMENTAL	25
3.1. Metodología.....	26
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS AGREGADOS NATURALES	29
4.1. Masa volumétrica seca suelta en gravas (MVSS).	29
4.2. Masa volumétrica seca varillada en gravas (MVSV).....	30

4.3. Humedad y absorción en gravas.	31
4.4 Densidad en gravas.	32
4.5. Desgaste de los Ángeles.	34
4.6. Granulometría del material pétreo.....	35
4.7. Partículas alargadas y lajeadas.....	40
4.8. Masa volumétrica seca suelta de la arena (M.V.S.S.).....	42
4.9. Masa volumétrica seca varillada de la arena (M.V.S.V.)	42
4.10. Densidad de la arena.....	43
4.11. Humedad superficial y absorción en arenas.	44
4.12. Equivalente de arena.	45
4.13. Resumen de pruebas realizadas para el agregado pétreo natural.	46
CAPÍTULO V. ANÁLISIS DEL AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (RCD).	48
5.1. Masa volumétrica seca suelta en reciclado (MVSS).....	48
5.2. Masa volumétrica seca varillada en agregado reciclado (MVSV).....	49
5.3. Humedad y absorción en agregado reciclado.	50
5.4. Densidad en agregado reciclado Gsa, Gsb y Gse.....	51
5.5. Determinación de la densidad efectiva (Gse) por medio de la prueba del método de ingenieros de EUA.....	54
5.5.1. Mezcla asfáltica con 10% de RCD.	54
5.5.2. Mezcla asfáltica con 20% de RCD.	54
5.5.3. Mezcla asfáltica con 30% RCD.	55
5.6. Desgaste de los Ángeles.	55
5.7. Partículas alargadas y lajeadas en agregado reciclado.	57
5.8. Resumen de pruebas realizadas para agregado pétreo RCD.	60
CAPÍTULO VI. CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO.....	61
Generalidades.	61
6.1. Ductilidad.	62
6.2. Penetración a 25 °C.....	63
6.3. Punto de ignición.	64
6.4. Punto de reblandecimiento.	64
6.5. Densidad del asfalto.....	65
6.6. Viscosidad rotacional del asfalto.....	66
6.7. Resumen de pruebas.....	68
CAPÍTULO VII. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ADICIÓN DE CONCRETO RECICLADO (RCD) COMO SUSTITUCIÓN DE AGREGADO NATURAL.	70

7.1. Mezclas asfálticas	70
7.2. Mezcla asfáltica en caliente.	72
7.2.1. Definiciones.	72
7.2.2. Método de diseño Marshall.....	74
7.3. Diseño Marshall con agregado pétreo 100% natural.....	76
7.3.1. Granulometría agregado pétreo 100% natural.....	76
7.3.2. Determinación del contenido mínimo de asfalto.	79
7.3.3. Prueba a los materiales.	81
7.3.4. Parámetros volumétricos.	82
7.3.5. Diseño del contenido óptimo de asfalto para agregado pétreo 100% natural.	83
7.3.6. Análisis de desprendimiento por fricción.	88
7.3.7. Análisis volumétrico y gravimétrico de la mezcla asfáltica compactada.	88
7.3.8. Análisis de los resultados del diseño 100% agregado pétreo natural.	89
7.4. Diseño Marshall con agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.....	89
7.4.1. Granulometría agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.	90
7.4.2. Determinación del contenido mínimo de asfalto.	91
7.4.3 Resumen de pruebas a los agregados pétreos 90% naturales y 10% reciclado.	92
7.4.4 Diseño óptimo de asfalto con agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.	93
7.4.5. Análisis de desprendimiento por fricción para mezcla con agregados pétreos 90% natural y 10% RCD.	98
7.4.6. Análisis volumétrico y gravimétrico de la mezcla asfáltica compactada.	99
7.4.7. Análisis de los resultados para diseño con agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.	99
7.5. Diseño Marshall con agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.....	100
7.5.1. Granulometría agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.	101
7.5.2. Determinación del contenido mínimo de asfalto.	102
7.5.3 Resumen de pruebas a los agregados con agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.....	103
7.5.4. Diseño óptimo de asfalto con agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.	104
7.5.5. Análisis de desprendimiento por fricción para mezcla con agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.	110
7.5.6. Análisis volumétrico y gravimétrico de la mezcla asfáltica compactada.	111
7.5.7. Análisis de los resultados para diseño de 80% de agregado pétreo natural y 20% RCD.	111
7.6 Diseño Marshall con agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.....	112
7.6.1. Granulometría agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.	112
7.6.2. Determinación del contenido mínimo de asfalto.	114
7.6.3. Resumen de pruebas a los agregados pétreos con 70% natural y 30% RCD.	115



7.6.4. Diseño óptimo de asfalto con agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.	116
7.4.5. Análisis de desprendimiento por fricción para mezcla con agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.	121
7.6.6. Análisis volumétrico y gravimétrico de la mezcla asfáltica compactada.	122
7.6.7. Análisis de los resultados para diseño con agregado pétreo para 70% natural y 30% RCD.	122
CAPÍTULO VIII. RESULTADOS	124
8.1. Comparaciones entre los diferentes diseños.	124
8.2. Análisis económico de cada diseño.	132
8.2.1. Costo/m ³ de mezcla asfáltica de ¾" prueba agregado pétreo 100% natural.	132
8.2.2. Costo/m ³ de mezcla asfáltica de ¾" prueba agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.	134
8.2.3. Costo/m ³ de mezcla asfáltica de ¾" prueba agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.	135
8.2.4. Costo/m ³ de mezcla asfáltica de ¾" prueba agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.	136
8.3. Comparaciones y conclusiones finales.	137
BIBLIOGRAFÍA	140

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.- RESUMEN DE CONCRETO RECICLADO RCD. FUENTE: (MARTINEZ MOLINA W., 2015).....	11
TABLA 2. FUENTE (PÉREZ IGNACIO, 2007).....	14
TABLA 3. FUENTE (PÉREZ, PASANDÍN, & MEDINA, 2016)	15
TABLA 4.- REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA PARA CUALQUIER VALOR DE EJES EQUIVALENTES. FUENTE (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008).....	29
TABLA 5.- MVSS DE LA GRAVA NATURAL.	30
TABLA 6.- MVSV DE LA GRAVA NATURAL.....	31
TABLA 7.- ABSORCIÓN Y HUMEDAD DEL AGREGADO NATURAL.	31
TABLA 8.- TIPO DE ABSORCIÓN.....	31
TABLA 9.- REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA (PARA CUALQUIER VALOR DE EJES EQUIVALENTES).FUENTE (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008)	32
TABLA 10.- CÁLCULO DE DENSIDADES.	32
TABLA 11.- CÁLCULO DE DENSIDAD EFECTIVA.....	33
TABLA 12.- TABLA PARA CÁLCULO DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES.	34
TABLA 13.- CÁLCULO DE DESGASTE.....	35
TABLA 14.- REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLA ASFÁLTICA DE GRANULOMETRÍA DENSA (PARA CUALQUIER VALOR DE EJES EQUIVALENTES). FUENTE (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008)	36
TABLA 15.- GRANULOMETRÍA DE LA GRAVA.....	36
TABLA 16.- CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA GRAVA.	37
TABLA 17.- GRANULOMETRÍA DE LA ARENA.....	37
TABLA 18.- CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA ARENA.	38
TABLA 19.- CURVA GRANULOMÉTRICA DEL SELLO.	38
TABLA 20.- CURVA GRANULOMÉTRICA DEL SELLO.	39
TABLA 21.- PORCENTAJES DE CADA MATERIAL REQUERIDO.	39
TABLA 22.- REQUISITOS DE CALIDAD DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA (PARA CUALQUIER VALOR DE EJES EQUIVALENTES). FUENTE (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008)	40
TABLA 23.- CÁLCULO DE LA MVSS DE LA ARENA	42
TABLA 24.- MVSV DE LA ARENA.....	43
TABLA 25.- DENSIDAD DE LA ARENA.....	43
TABLA 26.- HUMEDAD SUPERFICIAL Y ABSORCIÓN DE LA ARENA.....	44
TABLA 27.- CÁLCULO DE EQUIVALENTE DE ARENA.....	45
TABLA 28.- CÁLCULO DE LA MVSS DEL RECICLADO.....	48
TABLA 29.- PRUEBA DE MVSV PARA RCD.....	49
TABLA 30.- CÁLCULO DE LA HUMEDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO RECICLADO.....	50
TABLA 31.- TABLA DE TIPO DE ABSORCIÓN. FUENTE (ASTM)	51
TABLA 32.- REQUISITOS DE CALIDAD DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA (PARA CUALQUIER VALOR DE EJES EQUIVALENTES).FUENTE (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008)	53
TABLA 33.- TABLA DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES.....	56
TABLA 34.- REQUISITOS DE CALIDAD DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA(PARA CUALQUIER VALOR DE EJES EQUIVALENTES) (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008). 57	
TABLA 35.- REQUISITOS DE CALIDAD DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA(PARA CUALQUIER VALOR DE EJES EQUIVALENTES) (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008). 59	

TABLA 36.- CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL ASFALTO POR EL MÉTODO DE CUERPO DE INGENIEROS.....	65
TABLA 37.- TABLA DE CÁLCULOS DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO. FUENTE PROPIA.	66
TABLA 38.- TEMPERATURA DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN. FUENTE (S.A., 2013).....	67
TABLA 39.- REQUISITOS DE CALIDAD PARA CEMENTO ASFÁLTICO CLASIFICADO POR VISCOSIDAD DINÁMICA A 60°C.	69
TABLA 40.- REQUISITOS DE CALIDAD PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA, DISEÑADAS MEDIANTE MÉTODO MARSHALL.....	76
TABLA 41.- TABLA DE TAMAÑOS PARA CURVA GRANULOMÉTRICA.....	77
TABLA 42.-TIPO DE GRANULOMETRÍAS DEPENDIENDO DEL PROYECTO (S.A., 2013).	77
TABLA 43.- CARACTERÍSTICAS DE LOS DISTINTOS TIPOS DE GRANULOMETRÍA (S.A., 2013).	77
TABLA 44.- CURVA GRANULOMETRÍA PARA DISEÑO CON 100% AGREGADO PÉTREO NATURAL.....	78
TABLA 45.- TABLA DE PROPORCIONAMIENTO DE MATERIAL PÉTREO PARA 100% AGREGADO NATURAL.	79
TABLA 46.- CONSTANTE DE ÁREA.	80
TABLA 47.-ÍNDICE ASFALTICO.	81
TABLA 48.- CÁLCULO DE CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO.....	81
TABLA 49.- PROPORCIONAMIENTO CORREGIDO PARA LA ELABORACIÓN DE PASTILLAS CON AGREGADO 100% NATURAL.	83
TABLA 50.- RESUMEN DE CÁLCULOS PARA PASTILLAS MARSHALL CON 100% AGREGADO NATURAL.	84
TABLA 51. VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (VAM) PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA, DISEÑADAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL. FUENTE (SCT, CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CARRETERAS, 2008)	84
TABLA 52.- REQUISITOS DE CALIDAD PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA, DISEÑADA MEDIANTE MÉTODO MARSHALL. FUENTE (SCT, CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CARRETERAS, 2008)	84
TABLA 53.- DISEÑO CON ÓPTIMO DE ASFALTO CON 100% AGREGADO PÉTREO NATURAL.	84
TABLA 54.- CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL PÉTREO 90% NATURAL 10% RECICLADO.....	90
TABLA 55.- TABLA DE PROPORCIONAMIENTO PARA 90% AGREGADO PÉTREO NATURAL Y 10% DE RCD.	91
TABLA 56.- TABLA DE PROPORCIONAMIENTO DE PARA LA ELABORACIÓN DE LAS PASTILLAS MARSHALL.	94
TABLA 57.- TABLA RESUMEN DE PASTILLAS MARSHALL CON AGREGADO PÉTREO 90% NATURAL 10% RCD.	94
TABLA 58.- CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO PARA AGREGADO PÉTREO 90% NATURAL Y 10% RCD.	95
TABLA 59.- CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO PÉTREO 80% NATURAL 20% RCD.	102
TABLA 60.- PROPORCIONAMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE PASTILLAS MARSHALL CON AGREGADO PÉTREO 80% NATURAL 20% RCD.	104
TABLA 61.-TABLA RESUMEN DE LAS PASTILLAS MARSHALL CON AGREGADO PÉTREO 80% NATURAL 20% RCD.....	105
TABLA 62.-OPTIMO DE ASFALTO PARA AGREGADO PÉTREO 80% NATURAL Y 20% RCD.	106
TABLA 63.- CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL PÉTREO CON 70% NATURAL Y 30% RCD.....	113
TABLA 64.- TABLA DE PROPORCIONAMIENTO PARA AGREGADO PÉTREO 70% NATURAL Y 30% RCD.	114
TABLA 65.- PROPORCIONAMIENTO PARA PASTILLAS CON AGREGADO PÉTREO 70% NATURAL Y 30% RCD.	116
TABLA 66.- TABLA RESUMEN PARA PASTILLAS CON AGREGADO PÉTREO 70% NATURAL Y 30% RCD.	117
TABLA 67.- OPTIMO PORCENTAJE PARA AGREGADO PÉTREO 70% NATURAL Y 30% DE RCD.	117
TABLA 68. PROPORCIONAMIENTO PARA DISEÑO ÓPTIMO DE MUESTRA TESTIGO.....	133
TABLA 69. ANÁLISIS DE COSTO PARA DISEÑO DE MUESTRA TESTIGO.....	133
TABLA 70. PROPORCIONAMIENTO PARA DISEÑO ÓPTIMO DE 90% AGREGADO PÉTREO NATURAL Y 10% RCD.	134
TABLA 71. ANÁLISIS ECONÓMICO PARA DISEÑO OPTIMO CON AGREGADO PÉTREO 90% NATURAL Y 10% RCD.	134
TABLA 72. PROPORCIONAMIENTO PARA DISEÑO ÓPTIMO DE 80% AGREGADO PÉTREO NATURAL Y 20% RCD.	135
TABLA 73. ANÁLISIS ECONÓMICO PARA DISEÑO ÓPTIMO DE AGREGADO PÉTREO 80% NATURAL Y 20% RCD.	136
TABLA 74. PROPORCIONAMIENTO PARA DISEÑO ÓPTIMO CON 70% AGREGADO PÉTREO NATURAL Y 30% RCD.	136
TABLA 75. ANÁLISIS ECONÓMICO PARA DISEÑO ÓPTIMO DE 70% AGREGADO PÉTREO NATURAL Y 30% RCD.	137
TABLA 76. TABLA COMPARATIVA DE COSTO DE CADA DISEÑO ÓPTIMO.	137

ÍNDICE DE IMÁGENES

IMAGEN 1.- PRUEBA DE LAS MUESTRAS.	63
IMAGEN 2.- COLOCACIÓN DE LAS MUESTRAS A 25°C	63
IMAGEN 3.- VISCOSÍMETRO TRABAJANDO	68
IMAGEN 4.- PRUEBA DE VISCOSIDAD EN PROCESO.	68
IMAGEN 5.- PRUEBA DE VISCOSIDAD EN PROCESO.	68
IMAGEN 6.- TEMPERATURA DE TRABAJO DE LA PRUEBA.	68
IMAGEN 7.- DIAGRAMA GENERAL DE EL ACOMODO ASFALTO-AGREGADO. (S.A., 2013)	73
IMAGEN 8.- COMPARACIÓN DE LA MUESTRA ACONDICIONA VS. NO ACONDICIONADA.	88
IMAGEN 9.- MEZCLA SOMETIDA A FRICCIÓN POR EBULLICIÓN	88
IMAGEN 10.- PREPARACIÓN DE LA MEZCLA	88
IMAGEN 11.- OBSERVACIÓN DE LA MUESTRA DESPUÉS DE LA PRUEBA.	99
IMAGEN 12.- MUESTRA EN EBULLICIÓN	99
IMAGEN 13.- PRUEBA EN LA PRENSA MARSHALL.	105
IMAGEN 14.- ACONDICIONAMIENTO A 60°C	105
IMAGEN 15.- OBSERVACIÓN VISUAL DE LA MEZCLA PARA DETERMINAR EL % DE DESPRENDIMIENTO.....	110
IMAGEN 16.- MEZCLA CON AGREGADO PÉTREO 20% DE RCD EN EBULLICIÓN.....	110
IMAGEN 17.- OBSERVACIÓN DE LA MEZCLA DESPUÉS DEL PROCESO DE DESPRENDIMIENTO.....	121
IMAGEN 18.- OBSERVACIÓN DEL AGREGADO PÉTREO CON 70% NATURAL Y 30% RCD.	121
IMAGEN 19.- MAQUINA RUBBLE MASTER RM 760. FUENTE (RECICLADOS)	139

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CICLO DE VIDA DEL RCD.....	18
FIGURA 2. FUENTE (HTTPS://ES.SLIDESHARE.NET/YAMILETHGARCIA15/GENERALIDADES-DE-PAVIMENTOS-Y-VAS-DE-COMUNICACIN).....	20
FIGURA 3. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA A SEGUIR.	28
FIGURA 4.- GRÁFICA DE VISCOSIDAD.	67
FIGURA 5.-RECOMENDACIÓN PARA EL RANGO MÍNIMO DEL ESPESOR PARA MEZCLAS DE GRANULOMETRÍA DENSA. (S.A., 2013). 78	
FIGURA 6.- CURVA GRANULOMÉTRICA PARA DISEÑO 100% AGREGADO PÉTREO NATURAL.	79
FIGURA 7. DISTRIBUCIÓN VOLUMÉTRICA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA. FUENTE (ALAMILLA, LÓPEZ, & ANGUAS).....	82
FIGURA 8.- PESO ESPECÍFICO PARA AGREGADO PÉTREO 100% NATURAL.	85
FIGURA 9.- % DE VACÍOS PARA AGREGADO PÉTREO 100% NATURAL.	85
FIGURA 10.-% DE VAM PARA AGREGADO PÉTREO 100% NATURAL.	86
FIGURA 11.- % DE VFA PARA AGREGADO PÉTREO 100% NATURAL.....	86
FIGURA 12. –ESTABILIDAD PARA AGREGADO PÉTREO 100% NATURAL.	87
FIGURA 13.- FLUJO PARA AGREGADO PÉTREO 100% NATURAL.....	87
FIGURA 14.- CURVA GRANULOMÉTRICA 90% AGREGADO PÉTREO NATURAL Y 10% RCD.	91
FIGURA 15.- PESO ESPECÍFICO PARA AGREGADO PÉTREO 90% NATURAL 10% RCD.	95
FIGURA 16.- % DE VACÍOS EN MEZCLA PARA AGREGADO PÉTREO 90% NATURAL Y 10% RCD.....	96
FIGURA 17.- % DE VAM PARA AGREGADO PÉTREO 90% NATURAL Y 10% RCD.	96
FIGURA 18.-%VAF PARA AGREGADO PÉTREO 90% NATURAL Y 10% RCD.	97
FIGURA 19.- FLUJO PARA AGREGADO PÉTREO 90% NATURAL Y 10% RCD.	97
FIGURA 20.- ESTABILIDAD PARA AGREGADO PÉTREO 90% NATURAL Y 10% RCD.	98
FIGURA 21.- CURVA GRANULOMÉTRICA DE AGREGADO PÉTREO CON 80% NATURAL Y 20% RCD.	101
FIGURA 22.- PESO ESPECÍFICO PARA AGREGADO PÉTREO 80% NATURAL Y 20% RCD.	107
FIGURA 23.- % DE VACÍOS PARA AGREGADO PÉTREO 80% NATURAL Y 20% RCD.....	107
FIGURA 24.- % DE VAM PARA AGREGADO PÉTREO 80% NATURAL Y 20% RCD.	108
FIGURA 25.- % DE VAF PARA AGREGADO PÉTREO 80% NATURAL Y 20% RCD.	108
FIGURA 26.- ESTABILIDAD PARA AGREGADO PÉTREO 80% NATURAL Y 20% RCD.	109
FIGURA 27.- FLUJO PARA AGREGADO 80% NATURAL Y 20% RCD.	109
FIGURA 28.- CURVA GRANULOMÉTRICA PARA AGREGADO PÉTREO 70% NATURAL Y 30% RCD.	113
FIGURA 29.- PESO ESPECÍFICO PARA AGREGADO PÉTREO 70% NATURAL Y 30% DE RCD.....	118
FIGURA 30.- % DE VACÍOS PARA AGREGADO PÉTREO 70% NATURAL Y 30% RCD.	118
FIGURA 31.- % DE VAM PARA AGREGADO PÉTREO 70% NATURAL Y 30% DE RCD.....	119
FIGURA 32.-% DE VAF PARA AGREGADO PÉTREO 70% NATURAL Y 30% RCD.	119
FIGURA 33.- FLUJO PARA AGREGADO PÉTREO 70% NATURAL Y 30% RCD.	120
FIGURA 34.- ESTABILIDAD PARA AGREGADO PÉTREO 70% NATURAL Y 30% DE RCD.	120
FIGURA 35.- COMPARATIVAS DEL PESO ESPECÍFICO	124
FIGURA 36.- COMPARATIVA DEL % DE VACÍOS.	124
FIGURA 37.- COMPARATIVA DEL % DE VAF.....	125
FIGURA 38.- COMPARATIVA DEL % DE VAM.	125
FIGURA 39.- COMPARATIVA DEL FLUJO.	126
FIGURA 40.- COMPARATIVA DE ESTABILIDAD.....	126
FIGURA 41.- COMPARATIVA EN CANTIDAD DE MASA PARA CADA DISEÑO ÓPTIMO.	127
FIGURA 42.- COMPARATIVA DE % EN VOLUMEN DE MATERIAL OCUPADO EN CADA DISEÑO ÓPTIMO.	128
FIGURA 43. VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE ASFALTO CON EL PORCENTAJE DE RCD RECICLADO.....	129



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer Profundamente a mi director de Tesis y director de la facultad el Maestro Wilfrido Martínez Molina por las enseñanzas, el apoyo, el esfuerzo y las ganas para llevar a cabo este proyecto de investigación.

De igual manera quiero expresamente hacer mi más sincero agradecimiento a la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán por sus enseñanzas, paciencia y apoyo en todo momento para poder llevar a cabo este gran logro por su dedicación y colaboración durante la elaboración de este trabajo de tesis ya que fue una parte fundamental de los aportes hacia este trabajo.

Agradecer también al CONACYT por el apoyo económico mediante la beca otorgada, la UMSNH y el laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” donde se elaboró gran parte de este proyecto de investigación.

Agradecer a todos mis compañeros del laboratorio y profesores que fueron una parte importante para poder elaborar este proyecto de tesis, por mencionar algunos; Judith, Fidel, Marco, Dr. Hugo Chávez, Dr. Luis Elías Chávez, y todos los chicos de servicio social que colaboraron con el proyecto, gracias por todo.



DEDICATORIA

A Dios por darme la sabiduría y tantas bendiciones para permitirme llegar hasta aquí.

A mis Padres Carlos Miguel Espino Sandoval e Hilda González Pérez por siempre estar a mi lado apoyándome y tendiéndome la mano cada que lo ocupo incondicionalmente. Por ser un ejemplo a seguir, sin lugar a duda sin ellos no estaría hasta donde he llegado.

A mi hermana que ha estado a mi lado durante gran parte de mi vida, mi compañera de la infancia y que hasta ahora lo ha sido, con la que siempre hay algo de que reír o platicar sin lugar a dudas confidente y amiga.

A mis abuelos maternos Filemón González y Juana Pérez por ser siempre un ejemplo de vida por su ternura, consejos y apoyo incondicional.

A mis abuelos paternos Alejandro Espino y Blanca Estela Sandoval que siempre me impulsaban a seguir, tendiéndome la mano en cualquier momento, por su cariño y ternura que siempre me brindaron. Gracias a ellos hasta el cielo que sé que estarán muy orgullosos.

A mi familia en general que siempre me han apoyado en lo que han podido y por estar conmigo siempre por sus consejos, apoyo y amistad.

A mi novia, por su apoyo en todo momento, siendo una parte importante para este logro.

A mis amigos que son una parte importante para mí como persona por su amistad incondicional muchas gracias.

Resumen.

En la presente investigación se realizó primeramente, un estudio del estado del arte de la gestión y el uso de los residuos de construcción y demolición (RCD) y posteriormente la elaboración y el análisis detallado de distintos diseños de mezclas, mediante la metodología Marshall con agregados pétreos de residuos de construcción y demolición (RCD) siendo 10%, 20% y 30% de sustitución de RCD los diseños elaborados y analizados bajo la normativa mexicana establecida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y normativa internacional ASTM para el análisis de los materiales a utilizar. Al final se realiza un análisis comparativo de los diferentes diseños para así poder determinar cual es la mejor opción tanto de desempeño como económicamente hablando.

En el capítulo uno se hace referencia a un panorama general de lo que son los residuos de construcción y demolición (RCD) y como se han reincorporado en la industria de la construcción, así como distintas definiciones que se utilizaron durante la investigación, el planteamiento del problema que nos ha llevado a elaborar esta investigación, los objetivos para este trabajo y finalmente su justificación y delimitación.

El capítulo dos habla sobre el estado del arte en cuanto al uso del RCD en la reincorporación a la industria de la construcción, lo que son los residuos de construcción y demolición y las investigaciones y trabajos que se han realizado para tratar de reincorporarlos en la industria de la construcción aplicado principalmente en obras viales, especialmente como sustitución de agregados naturales para mezclas asfálticas.

En los capítulos número tres, cuatro, cinco, seis y siete, está descrita la metodología que se siguió para la elaboración del proyecto.

Y finalmente en el capítulo número ocho se realiza el análisis y discusión de los resultados obtenidos en cada una de las mezclas elaboradas así como un análisis de costos para cada mezcla y poder elegir cual será la mejor opción.

Algunos de los resultados más prominentes en esta investigación es el comportamiento muy similar y sin comprometer en mayor medida sus propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas diseñadas con agregados pétreos de concreto reciclado en 10%, 20% y 30% en sustitución del agregado natural contra las diseñadas con agregado pétreo 100% natural, además para la mezcla diseñada con 30% de RCD se observó un ahorro económico respecto a la 100% agregado pétreo natural. Por lo cual es la más recomendable a utilizar de los 3 porcentajes analizados, sin descuidar que la absorción de asfalto es alto por lo que hay que tomar medidas de conservaciones periódicas para evitar su temprana fatiga. Todos los diseños cumplen con estabilidad y flujo establecido por la normativa de la SCT para diseño de mezclas asfálticas, sin embargo, para el diseño con 30% de RCD no cumple con el VAM ni el VAF por lo que se tendrá que analizar más a fondo para tomar las medidas pertinentes.

Sin duda, hay un sin fin de ahorros que se pueden generar en relación al uso de RCD en pavimentos, desde su uso en capas inferiores como bases y sub-bases de lo cual existe ya documentación científica comprobada de la utilización exitosa de este tipo de agregado en la práctica, hasta en carpetas asfálticas como se desarrolló en este trabajo de investigación, lo cual es un avance científico significativo tanto para el hombre como para el medio ambiente.

En ocasiones puede ser costoso cuidar el medio ambiente pero sin duda será más costoso no hacerlo.

Palabras clave: Metodología Marshall, Mezcla Asfáltica, Ahorro, Medio Ambiente, RCD (Residuos de construcción y demolición)

Abstract

In the present investigation, a study of the state of the art in the management and use of construction and demolition waste (RCD) was carried out, followed by the elaboration and detailed analysis of different designs using the Marshall methodology with stone aggregates of waste from construction and demolition (RCD) being 10%, 20% and 30% substitution of RCD designs developed and analyzed under Mexican regulations established by the Ministry of Communications and Transportation and international ASTM standards for the analysis of materials to be used. At the end, a comparative analysis of the different designs was carried out in order to determine which is the best option, both, for performance and economically speaking.

In chapter one, reference was made to an overview of construction and demolition waste (RCD), and how it has been reincorporated into the construction industry, as well as different definitions that were used during the investigation, the approach of the problem that has led us to develop this research, the objectives for this work and finally its justification and delimitation.

Chapter two, talks about the state of the art regarding the use of the RCD in the reincorporation to the construction industry. The construction and demolition waste and the research and work done trying to reincorporate them in the industry of the construction especially for transportation works, focus in substitution of natural aggregates for asphalt mixtures.

In chapters number three, four, five, six and seven, the methodology followed for the elaboration of the project is contained.

Finally, in chapter number eight, the analyses and discussion of the results obtained in each of the elaborated mixtures were carried out, as well as a cost analysis for each mixture to choose which will be the best option.

Some of the most outstanding results in this research is the very similar behavior and without compromising to a greater extent its mechanical properties of the asphalt mixtures designed with stone aggregates of recycled concrete in 10%, 20% and 30% in substitution of the natural aggregate against the designed with 100% natural stone aggregate, in addition to the mix designed with 30% of RCD, an economic saving was observed with respect to 100% natural stone aggregate. Therefore it is the most recommended to use the 3 percentages analyzed, without neglecting that the absorption of asphalt is high so you have to take measures of periodic conservation to avoid early fatigue. All the designs comply with stability and flow established by the SCT regulations for the design of asphalt mixtures, however, for the design with 30% of RCD, it does not comply with the VAM nor the VAF, so it will have to be analyzed more thoroughly. to take the appropriate measures.

Undoubtedly, there are endless savings generated in relation to the use of RCD in pavements, from its use in lower layers as bases and sub-bases of which there is already proven scientific documentation of the use of this type of aggregate successfully. In practice, even in asphalt binders as developed in this research work, which is a significant scientific advance for both man and the environment.

Sometimes it could be expensive to take care of the environment but it will certainly be more expensive not to do it.

Keywords: Marshall Methodology, Asphalt Mixture, Saving, Environment, RCD (Construction and demolition waste)

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

Hoy en día en la industria de la construcción hay demasiada generación de residuos a nivel mundial con una generación aproximada de 900 millones de toneladas al año (Martinez Molina W., 2015), en México generan tan solo en el Distrito Federal alrededor de 12,000 t/día de residuos sólidos urbanos, de los cuales el 50% (6,000 t/día) son residuos de construcción y demolición (RCD) y solamente un porcentaje muy bajo es tratado (DANIEL, 2013); siendo muy poca la gestión de estos residuos, esto ocasiona que la mayor parte de los mismos acabe en la vía pública, en tiraderos clandestinos, a orillas de las carreteras esto con los problemas que eso implica, y lo peor de todo es el desaprovechamiento de la vida útil que aún les queda. Los RCD están formados por diferentes materiales de construcción, entre los que por su composición y porcentaje de generación (65 al 75% de los RCD) destacan los materiales de origen pétreo (concretos, morteros, ladrillos, azulejos, losetas, etc.), composición que los hace valorizables y por lo tanto adecuados para su retorno al ciclo de vida de la construcción.

El desarrollo sustentable en el sector de la construcción y en particular en la gestión de los RCD ha sido muy pobre en México, sin embargo es una necesidad que la sociedad demanda con una preocupación creciente sobre los sistemas tradicionales de eliminación de residuos y sus consecuencias para el medioambiente. Los objetivos principales medioambientales de la reducción, reutilización, reciclado y valorización de RCD se centran principalmente en la gestión de los RCD, donde el objetivo principal debe ser el minimizar su generación y en caso de existir, buscar su reciclaje o reaprovechamiento; siendo una etapa fundamental de este proceso de reciclaje la recogida selectiva, posteriormente adecuado proceso de transformación del residuo al agregado reciclado. Debido al gran impacto que la industria de la construcción genera a nivel mundial y al finalizar su vida útil no se le da un adecuado encausamiento a los RCD surge la necesidad de incorporar nuevas tendencias en la gestión de RCD, con un mayor respeto al medio ambiente, implementando técnicas de procesamiento, que ayuden a la reducción del volumen de desechos, en el número de rellenos sanitarios, explotación de recursos vírgenes, emisiones de CO₂ al ambiente, generando así posibilidades de crecimiento para la industria del reciclaje.

Actualmente el reciclaje de RCD en México, está en la línea de convertirse en una actividad con interesantes expectativas de crecimiento. El mantenimiento de esta tendencia depende en gran medida de ver de otra manera el reciclaje de estos residuos, no verlos como basura si no como un material con una nueva utilidad.

Por lo que se considera que en no mucho tiempo el empleo de estos residuos como productos sustitutos de los convencionales se vuelva una práctica común lo que generaría la aparición de actividades económicamente interesantes, además de contribuir a una reducción de la huella ecológica.

México un país que cuenta con poca experiencia para el manejo de los RCD tanto en su normatividad como en su gestión y aplicación en campo por esto es que surge la necesidad de implementar procesos para una adecuada finalidad de uso de residuos con lo que se pretende obtener mejoras tanto en el proceso de tratamiento del residuo como en la obtención de agregados reciclados (AR) de calidad. Son productos que pueden ser utilizados y reincorporados en la industria de la construcción de manera segura y eficiente, garantizando así una construcción sustentable.

Se debe de realizar una adecuada gestión de los RCD para obtener un material de calidad; queda claramente comprobado que la parte fundamental para conseguir su reutilización y extensión de vida útil, es a través de un adecuado tratamiento, donde el objetivo principal de este proceso es la obtención de agregados reciclados que cumplan con los requisitos exigidos por la normativa vigente.

1.1. Residuos de construcción y demolición de concreto.

Un concreto reciclado es aquel producto de construcciones y demoliciones ya sea de edificios, carreteras, y ciertas construcciones que su composición principal es la del concreto y que después de la demolición han llegado al final de su vida útil para lo que fueron diseñados, a este producto se le a denominado Residuos de construcción y demolición (RCD) el cual después de una correcta gestión y control de calidad puede ser reincorporado en construcciones como sustituto de agregado petreo natural.

En actuales investigaciones se a identificado que la utilización indiscriminada de recursos naturales constituye una de las tantas causas del deterioro constante y progresivo del medio ambiente. Lo cual nos ha llevado al motivo de esta línea de investigación que se enfoca principalmente a implementar mecanismos de reutilización de los residuos de construcción y demolición (RCD) en mezclas asfálticas principalmente.

En México con fecha de agosto de 2013 se publicó una normativa por parte de la SEMARNAT que indica que los constructores están obligados a cumplir con la formulación de un plan de manejo de residuos de construcción y demolición conforme a la norma NOM161-SEMARNAT-2011, la cual establece los principios de la gestión de estos residuos siendo así objetivos específicos su reducción, reutilización, reciclado y eliminación. Al igual se hace mención de que los residuos

de la construcción se clasifican como residuos de manejo especial, lo que obliga a realizar acciones para su reutilización y reciclaje o, en su caso, la correcta disposición.

La reutilización y el reciclado del concreto hidráulico se ha extendido ya por diversas partes del planeta principalmente en los países en desarrollo y las razones principales es su valorización comercial y el impacto medioambiental aunado a temas que están tomando mucho interés en la sociedad como la concienciación ciudadana en cuanto a la creciente necesidad del reciclado de productos y materiales que han cumplido con su vida útil.

Adentrándonos específicamente al tema de el reciclado del concreto hidráulico hay diversas ventajas y atractivos ya sea utilizarlo como remplazo parcial o total del agregado natural, fino o grueso, generados por diversas obras de infraestructura urbana o carreteras que han llegado al final de su vida útil y son demolidas.

Como ya se mencionó anteriormente la justificación del uso de agregados de concreto hidráulico reciclado nos proporcionará una mejor preservación del medioambiente, la conservación de los recursos naturales como son la explotación indiscriminada de bancos de materiales de agregado natural, la reducción de los costos y el aprovechamiento racional de la energía.

En México se generan anualmente grandes cantidades de volúmenes de residuos de construcción y demolición, y aunque no hay datos exactos de su producción, se estiman unas 30 millones de toneladas al año (Martínez Molina W., 2015). Actualmente existen muchas ideas sobre la reutilización de productos que han llegado al final de su vida útil, o que han cumplido su función principal durante su uso por lo que una vez que ya no cumplen dicha función pasan a ser materiales de desperdicio, por lo cual surgen ideas sobre el reciclaje.

La mayor parte de estos residuos se llevan a vertederos, tiraderos, lugares clandestinos, creando de esta forma un gran impacto visual y paisajístico, además de un impacto ecológico negativo al desechar materias primas que con un adecuado tratamiento, podrían ser recicladas. Por lo tanto será necesaria una adecuada gestión de estos agregados, de esta manera poder conseguir minimizar las cantidades de desechos y desperdicios que terminan en tiraderos y basureros y así poder reducir la contaminación visual y ecológica que se ocasiona actualmente.

En algunos países, como Dinamarca, Holanda o Bélgica, se está fomentando el reciclaje sobre otros destinos como el vertido, y alcanzan porcentajes de reciclaje superiores al 75%. Este hecho responde principalmente a la escasez de áridos

naturales y de espacios para la ubicación de vertederos. Uno de los métodos para conseguir estas elevadas tasas de reciclado ha sido el incremento del coste del vertido, o su prohibición en algunos casos como en Holanda o Dinamarca.

Otros países como Reino Unido o Austria, siguen esta tendencia aunque los porcentajes alcanzados son inferiores y se sitúan en torno al 40%.

Sin embargo aun hay países que reciclan pequeñas cantidades de residuos de construcción y demolición, destinando más de un 85% de los mismos a vertederos. Entre estos países se encuentra México (GARCÍA & YAÑEZ, 2004).

Se dice que la industria de la construcción así como el funcionamiento de edificios en el mundo generan 65.2% del consumo total de energía eléctrica; 36% de la energía primaria total; 50% de las emisiones de gases de efecto invernadero y 136 millones de toneladas de residuo de construcción y demolición (aproximadamente 1.3kg/persona/día), de los cuales el 90% podría ser reciclado en su totalidad (B.M., 2008) Se estima que 1m³ de volumen de obra, genera un volumen de residuo de 0.068 m³. Por cada m² de construcción, se generan 0.3 m³ de residuos, mientras que en la construcción de hoteles y hospitales se generan mayores cantidades; hasta 5m³ de materiales sueltos por cama respectivamente (Secretaría de Medio Ambiente, 2002). De acuerdo a lo planteado por (Arenas Cabello, 2007) la industria de la construcción debe considerar que se requiere más de 2 t de materias primas por cada m² de vivienda construida, la cantidad de energía requerida para la fabricación de los materiales que componen una vivienda puede equivaler aproximadamente, a un tercio del consumo energético de una familia durante un periodo de 50 años y la producción de residuos de construcción y demolición supera la tonelada anual por habitante.

1.2. Definiciones.

RCD: Es el árido reciclado aquel material producto de la demolición de construcciones y obras civiles que la mayor proporción están hechas de concreto hidráulico; y que con una adecuada gestión y control de calidad puede llegar a ser un árido reciclado con características similares a las de un árido natural y así poder ser reincorporado nuevamente a la industria de la construcción como un insumo de calidad.

En función de los residuos de origen, los áridos reciclados se pueden clasificar de distintas maneras, de acuerdo a su procedencia ya sea de hormigones de demoliciones de edificios, de pavimentos de concreto, de banquetas, etc., se les llama áridos mixtos cuando proceden de una mezcla de residuos de distinta naturaleza. En algunas ocasiones, las técnicas de demolición selectiva y procesamiento permiten obtener por separado áridos reciclados de demoliciones

de hormigón y de cerámicos, mientras que otras veces los áridos reciclados producidos en las plantas son mixtos. En este trabajo se hará referencia a un árido reciclado al agregado procedente de residuos de construcción y demolición (RCD) mientras que cuando el árido tenga otros elementos aparte del concreto le llamaremos mixtos.

Se entiende por concreto reciclado el concreto fabricado con árido reciclado o una mezcla de árido reciclado y árido natural. Los numerosos estudios realizados hasta el momento se han analizado la influencia del árido reciclado en el concreto pero en mezclas asfálticas hay muy poca información al respecto. La mayor parte de los estudios han concluido que la fracción fina empeora substancialmente las propiedades del concreto, por lo que para concreto estructural es recomendable limitar su uso y limitarse a utilizar solamente la fracción gruesa. Dentro de las posibilidades, la tendencia encontrada en los estudios es la sustitución de una parte del agregado de origen natural por árido reciclado, estableciendo porcentajes de árido grueso reciclado del 20%, 30%, 50% y 100%. Al igual que en la sustitución de este árido reciclado en concreto hidráulico se puede llevar acabo en pavimentos y mezclas asfálticas y es el tema principal que se probara en este trabajo de investigación.

Un pavimento es una estructura conformada por un conjunto de capas de materiales apropiados, comprendidas entre el nivel superior de las terracerías (subrasante) y la superficie de rodamiento, cuyas principales funciones son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiados, resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales; así como de transmitir adecuadamente los esfuerzos a la subrasante, de modo que esta no se deforme de manera perjudicial. (<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2944/Capitulo2.pdf>)

Pavimento flexible: Consiste de una superficie de desgaste o carpeta relativamente delgada construida sobre capas (base y sub-base), apoyándose este conjunto sobre la subrasante compactada, de manera que la sub-base, base y superficie de desgaste o carpeta son las componentes estructurales de este tipo de pavimento. (<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2944/Capitulo2.pdf>)

Hoy en día hay pocos países que dispongan de normativa para la incorporación de este tipo de árido en concreto nuevo o para capas en pavimentos y mezclas asfálticas. Por ejemplo, las recomendaciones que establece la Reliem, una de las primeras en elaborarse (y que han sido adoptadas por algunos países como Bélgica o Hong Kong) permiten la utilización de áridos reciclados con absorción máxima del 10% en concretos de categoría resistente hasta 50 N/mm², las

normas japonesas son más restrictivas, y fijan la absorción máxima en el 7% para concretos de la categoría resistente hasta 24 N/mm².

Es necesario también realizar un control de los áridos reciclados que actualmente producen las plantas de reciclado en nuestro país, no son muchas pero las pocas que hay deben de estar normadas por un control de calidad. Estos requisitos deben de ser compatibles con las técnicas de construcción más habituales.

1.3. Planteamiento del problema.

1.3.1. Enunciado del problema.

La industria de la construcción constituye un factor trascendental para el desarrollo para los países denominados economías emergentes, y por lo mismo la principal fuente generadora de residuos sólidos, pues durante sus procesos se utilizan en gran medida diversos materiales asociados a otras industrias, como cemento, acero, piedra, cartón, vidrio, madera, aluminio, plásticos, cerámicas, entre otros.

En países desarrollados la producción de residuos de construcción y demolición va de 520 hasta 760 kilogramos per cápita al año sin considerar guerras ni desastres naturales (Domínguez *et al*, 2004).

Los materiales pétreos y sus derivados como el concreto y las cerámicas son los que mayor peso tienen en la generación de residuos.

Buscar que requieran de poco combustible fósil para su fabricación, transporte y reciclado, lo que disminuya la energía necesaria para su re-uso.

La demanda de recursos naturales y la escasez de materias primas es importante; por ello, la necesidad de preservar y proteger el medio ambiente de un desequilibrio ecológico, hace que la técnica del concreto reciclado (Oikonomou, 2005), sea una actividad de gran importancia en la construcción (Aguilar *et al* 2005).

Se estima que, en el mundo, se fabrican alrededor de 25 billones de toneladas de concreto cada año. Esto representa más de 1.7 billones de cargas de camiones anuales, o cerca de 6.4 millones de cargas diarias, o más de 3.8 toneladas por persona en el mundo cada año ((CSI), 2009).

Debido a lo anterior es necesario emprender una acción de reciclaje de todo este producto de desperdicio.

1.3.2. Formulación del problema.

¿Cuáles son los beneficios de usar Concreto reciclado de construcción y Demolición?

¿Cuáles son las utilidades del concreto reciclado producto de construcciones y demoliciones?

¿Es sustentable con el medio ambiente?

¿Hay algún ahorro económico el usar agregados de concreto reciclado respecto al uso de agregados naturales?

¿Dónde se puede conseguir este tipo de agregado de concreto reciclado?

¿Cuál es el contenido óptimo de agregado de concreto reciclado para carpetas asfálticas?

¿Es adecuado el diseño de mezclas asfálticas con contenido de agregados de reciclado de concreto?

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo general.

El objetivo primordial de la tesis es analizar la alternativa de uso RCD como sustitución de agregado natural en un porcentaje que no afecte en la calidad de una mezcla asfáltica, considerando tanto aspectos tecnológicos como el impacto económico, propuesta como eco-material, contribución en la parte medioambiental, para el aprovechamiento en diferentes materiales utilizados en obras viales: como lo son los pavimentos flexibles.

1.4.2. Objetivos específicos.

1. Realizar un análisis comparativo de mezclas convencionales con agregado natural y mezclas con porcentaje de RCD entre:
 - a) las propiedades mecánicas.
 - b) los costos con respecto al uso de agregados naturales.
 - c) la preservación medioambiental al no extraer material de canteras.
2. Caracterizar el material producto de demoliciones de concreto hidráulico.
3. Evaluar las posibilidades de uso del material RCD, de algunas fracciones o su combinación con agregados naturales o el uso de aditivos, para elaborar concretos de pavimentos asfálticos.
4. Verificar experimentalmente los casos de mayor interés.

5. Analizar las ventajas y desventajas tecnológicas con respecto al uso de agregados naturales.
6. Proponer recomendaciones acerca de las alternativas de reciclado y aprovechamiento de pavimentos urbanos demolidos.

1.5. Hipótesis.

Es viable la elaboración de mezclas asfálticas con agregados de concreto reciclado siempre y cuando exista una gestión adecuada del agregado de concreto reciclado (RCD), un buen control de calidad de sus propiedades y un adecuado diseño de la mezcla asfáltica.

1.6. Justificación práctica.

El concreto es un material 100% reciclable, siempre que no esté contaminado.

La necesidad de reciclaje de los residuos de construcción concierne a todas las comunidades.

Independientemente del ahorro económico, es de mucho valor ético velar y preservar nuestros recursos naturales para generaciones futuras utilizando técnicas de reciclaje como estas.

Desde un enfoque ambiental es trascendente, pues evita la degradación de recursos naturales no renovables.

Si se mira desde el punto de vista económico, resulta atractivo cuando el producto es competitivo con otros materiales en relación al costo y calidad.

1.7. Delimitación.

La presente investigación se delimitara especialmente al análisis y el estudio del comportamiento de una carpeta asfáltica diseñada con un porcentaje de 10%,20% y 30% parte de agregado de concreto reciclado y otra de agregado natural.

Sin embargo se caracterizara el material de agregado de concreto reciclado el cual tiene diversos usos como diseñar un nuevo concreto, un pavimento rígido, un pavimento flexible, como material de bases y sub-bases granulares en pavimentos, etc.

CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE.

2.1. Primeros Estudios.

Los primeros estudios documentados sobre la caracterización de los materiales de construcción reciclados data de la posguerra en los años 40's del siglo XX, en esos tiempos Europa tenía grandes cantidades de escombros producto de los bombardeos, que comenzaron a usarse como materiales para reconstruir, con buenos resultados. Los países más devastados fueron el Reino Unido y Alemania, las publicaciones de la época, mayormente británicas, alemanas y rusas dan cuenta del uso de escombros para construcción de nuevas obras civiles, sólo que mucho de los escombros eran material cerámico (ladrillos, cerámicas de mobiliario de servicios sanitarios), material pétreo natural, plásticos y gomas (Hoffmann et al, 2012, Kulakowski et al, 2012) y concreto hidráulico; que posteriormente tuvieron adiciones como escorias, cenizas, humo de sílice (González-Fonteboa et al, 2009). El concreto hidráulico llegó a América a fines del siglo XIX (Torres et al, 2014), y los EEUU iniciaron también sus estudios en reciclado. El primer informe de concreto reciclado fue realizado en la entonces Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, por Gluzhge, P. en 1946, poco tiempo después de la 2a Guerra Mundial.

Uno de los primeros estudios realizados en EEUU, posteriores al estudio de Gluzhge, recomiendan como primera opción emplear concreto hidráulico proveniente de la infraestructura vial como son los pavimentos rígidos, y solo en segundo lugar el concreto reciclado proveniente de edificaciones como viviendas debido a que este último puede presentar diversos contaminantes como son los productos con azufre, dado que es utilizado en recubrimientos de yeso, y entonces podría ocasionarse un ataque por sulfato a la nueva mezcla con el agregado que se desea utilizar.

El concreto hidráulico reciclado se empleaba mayormente en mezclas de asfalto para pavimentos substituyendo a los agregados pétreos cuyo problema era la falta de afinidad eléctrica con los materiales asfálticos (Harek et al, 1971; Buck, A., 1972). Durante un largo periodo de tiempo se tuvo la idea de que los materiales pétreos naturales ácidos (base sílice: ignimbritas, dacitas, andesitas, plagioclasas, ortoclasas, cuarzo, critobalita, tridimita, etc.) presentaban cargas eléctricas superficiales negativas, mientras que los materiales pétreos básicos o alcalinos (los ferro magnesianos: basaltos) tenían cargas eléctricas superficiales positivas. En trabajos de investigación recientes ha quedado de manifiesto que todos los agregados pétreos naturales (volcánicos y triturados: areniscas, granitos,

mármoles, dacitas, andesitas, riolitas, calizas, dolomitas, cuarzo, basaltos) tienen cargas eléctricas negativas (Rodríguez Talavera et al, 2001).

Lo antes mencionado es pensado en hacer mezclas asfálticas con emulsiones aniónicas o catiónicas, donde es de vital importancia saber si habrá afinidad eléctrica.

Para el año 2002 se daba cuenta que la industria del concreto empleaba a nivel mundial aproximadamente 10 billones de toneladas de arena y roca natural, generando más de 1 billón de toneladas de residuos de construcción cada año (Metha, 2002). En el mismo sentido, en Estados Unidos se estimaba que dichos residuos alcanzan valores del orden de 250 a 300 millones de toneladas por año. Por su parte a comienzos de este siglo Japón generaba 85 millones de toneladas/año de residuos de construcción, de los cuales 40% eran desechos de concreto hidráulico (Kasai, 2004). En la comunidad Europea se estimaba que la generación de residuos de construcción era del orden de los 200 a 300 millones de toneladas anuales, lo cual equivale entre 0.5 a 1 tonelada per cápita al año. De la misma forma, aproximadamente el 28% de estos desechos fueron reciclados para la década del 90 (Lauritzen, 2004). Considerando datos del 2005 surge que en el caso de Alemania, los residuos de concreto ascienden a 88.6 millones de toneladas anuales de los cuales el 69% se reciclado y utilizado para la elaboración de materiales de construcción, y de ello, solo 1,9 millones de toneladas (3.1% aprox.) es empleado como agregado para concreto hidráulico (Müller, 2005). Holanda genera anualmente 20 millones de toneladas/año de residuos de concreto, equivalente a 1.25 toneladas por habitante, de los cuales más del 95% es reutilizado, mayormente para sub-bases de caminos y solo un 3,3% en la elaboración de nuevos concretos (Janssen y Put, 2005). En España la generación de residuos de construcción es de 38,5 millones de toneladas, y un 20% constituye a desechos de concreto hidráulico (Vazquez, 2005). Por otra parte en Israel la cantidad de residuos de construcción es del orden de 7,5 millones de toneladas anuales, equivalente a 1,1 toneladas per cápita al año; siendo la mayoría de ellos depositado como relleno en sitios tanto legales como ilegales (Katz et al, 2005). En cuanto a México tiene una generación de residuos de concreto de 30 millones de toneladas al año, lo que equivale a 0.25 toneladas per cápita (Martínez Molina W., 2015) como se muestra en la tabla no.1.

Tabla 1. Resumen de concreto reciclado. 1. Millones de Toneladas de concreto reciclado (CSI Recycling Concrete Full Report 2007); 2. Territorio del país en km²; 3. Habitantes en millones; 4. Relación de Concreto Reciclado en millones de toneladas por cápita y 5. Relación de Toneladas de concreto reciclado producidas por km² de territorio.

País	1	2	3	4	5
Alemania	120.00	357,121	80	1.5	336.02
Argentina	5.50	2 780 400	43	0.13	1.99
Australia	550.00	7,692,024	21.5	25.58	71.50
Austria	22.00	83,371	8.3	2.65	266.88
Bélgica	14.00	30,510	10.4	1.36	458.87
Brasil	50.00	8,500,000	200	0.25	5.88
China	200.00	9,600,000	1,300	0.15	20.83
Colombia	13.00	1,141,748	47.4	0.27	11.38
Costa Rica	0.50	51,100	5	0.10	9.78
Dinamarca	5.00	43,098	5.6	0.89	116.01
Estados Unidos	335.00	9,826,675	316	1.06	34.09
España	39.00	504,645	47.1	0.83	77.28
Finlandia	1.60	337,030	5.4	0.3	4.74
Francia	25.00	675,417	66	0.38	37.01
Holanda	26.00	41,526	16.8	1.55	626.11
Irlanda	17.00	84,421	6.2	2.74	201.37
Israel	7.50	22 145	8.6	0.87	3.39
Italia	40.00	301,338	59.4	0.67	132.74
Japón	77.00	377,835	126.7	0.61	203.79
Luxemburgo	2.70	2,586	0.54	5	1044.08
México	30.00	1,964,375	119	0.25	15.27
Portugal	4.00	92,391	10.6	0.38	43.29
Reino Unido	70.00	243,610	63.2	1.11	287.34
República Checa	9.00	78,866	10.5	0.86	114.12
Suiza	7.00	41,290	7.9	0.89	169.53
Suecia	1.20	449,964	9.6	0.13	2.67
Taiwán	67.00	35,980	23.1	2.9	1862.15
Tailandia	10.00	513,115	65.5	0.15	19.49
Mundial	900.00	150,386,640	7000	0.13	5.98

Tabla 1.- Resumen de concreto reciclado RCD. Fuente: (Martínez Molina W., 2015)

Por otro lado la sustentabilidad es en realidad “un proceso” que tiene por objetivo encontrar el equilibrio entre el medio ambiente y el uso de los recursos naturales. La humanidad en su paso por el planeta ha degradado los recursos naturales de tal forma que actualmente es necesario procurar y planear concienzudamente el consumo de los mismos para garantizar su existencia en las generaciones futuras.

El concreto es un material 100% reciclable, siempre que no esté contaminado.

Una investigación experimental en Estados Unidos, emprendida por Sobhan y Krizek (1999) consistió en probar la resistencia a la fatiga de un material utilizado para base de pavimento, compuesto por agregados reciclados, pequeñas cantidades de cemento Pórtland y cenizas volantes, reforzado con fibra de acero. Las muestras preparadas alcanzaron límites de resistencia comparables con los materiales típicos utilizados en pavimentos para autopistas. (Torres & Lepe, 2008)

También en la construcción de pavimentos flexibles a base de emulsiones como la reportada en España por Pérez et al (2007). Su trabajo consistió en la dosificación de mezclas bituminosas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. Encontraron que las propiedades mecánicas son parecidas a las de aquellas mezclas fabricadas con materiales naturales de cantera. Sin embargo, experimentaron una disminución de la resistencia por pérdida de cohesión debida a la acción del agua, atribuida a una mala selección de los materiales. (Torres & Lepe, 2008)

Otros autores han efectuado investigaciones que revelan poca diferencia entre las características físicas del agregado grueso natural y el obtenido con materiales reciclados. En España, Huete y Blandón (2004) se avocaron a la caracterización de material reciclado de residuos cerámicos de construcción, determinando que el material granular obtenido es apto para distintas aplicaciones en la industria de la construcción como sub-bases de carreteras, firmes de grava-cemento y áridos para empedrados y engravillados. (Torres & Lepe, 2008)

Puede utilizarse en muchas obras y estructuras diferentes cumpliendo con las especificaciones para los materiales agregados tradicionales.

Puede ser combinado con otros productos para estudiar su comportamiento y propiedades mecánicas.

Una investigación experimental en Estados Unidos, emprendida por Sobhan y Krizek (1999) consistió en probar la resistencia a la fatiga de un material utilizado para base de pavimento, compuesto por agregados reciclados, pequeñas cantidades de cemento Pórtland y cenizas volantes, reforzado con fibra de acero.

Las muestras preparadas alcanzaron límites de resistencia comparables con los materiales típicos utilizados en pavimentos para autopistas.

La dosificación de mezclas Asfálticas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. Encontraron que las propiedades mecánicas son parecidas a las de aquellas mezclas fabricadas con materiales naturales de cantera.

En Quintana Roo, México, un estudio realizado por Jiménez y Hernández (2007) tuvo como finalidad comprobar que es posible la elaboración de una mezcla asfáltica con material producto de los residuos de construcción y demolición, susceptible de ser empleada en la reparación o bacheo de pavimentos flexibles. (Jimenez, 2007)

Se sugiere evitar agregados excesivamente porosos, su densidad seca mínima deberá de ser de 1600 kg/m³ (ETXEBARRIA, 2004).

Según diversos estudios que se han realizado en Europa se ha observado que los agregados reciclados de concreto de tamaño mayor o igual a 4mm son potencialmente aptos para su utilización como sustitución de agregado natural (Pérez, Pasandín, & Medina, 2016).

Paranavithana y Mohajerani (2006) han encontrado que el uso de agregados gruesos provenientes de residuo de construcción disminuye algunas propiedades volumétricas pero que se encuentran dentro de los límites especificados.

Otros investigadores como Cerutti et al (2009) recomiendan el uso para bases asfálticas, estabilizados y como capa de rodadura para caminos de tránsito de medio a bajo.

Se recomienda usar como primera opción concreto hidráulico proveniente de la infraestructura vial como los pavimentos rígidos.

Las mezclas realizadas con árido natural presentan un comportamiento adecuado a la acción del agua, cumpliendo los requisitos establecidos para el ensayo de inmersión-compresión, mientras que las mezclas realizadas con un 50% de árido reciclado presentan una pérdida de resistencia excesiva (Pérez Ignacio, 2007).

En cuanto a las leyes de fatiga obtenidas, éstas son muy parecidas a las de otros autores. Los valores del módulo dinámico son razonables, siendo mayores en mezclas con árido reciclado al 50%. (Pérez Ignacio, 2007)

Se ha podido llevar a cabo una dosificación de mezclas bituminosas que contienen árido reciclado en un 50% de peso en todas las fracciones. Estas mezclas tienen

un contenido de betún superior al de las mezclas realizadas sólo con árido natural y además necesitan una mayor cantidad de filler, y sólo así se han podido cumplir los requisitos que el PG-3 establece para los parámetros obtenidos en el ensayo Marshall en carreteras de bajo tráfico. Por otro lado, no se ha podido realizar una dosificación de mezclas realizadas únicamente con árido reciclado. (Pérez Ignacio, 2007).

En conjunto, la mezcla reciclada cuesta un 14% menos que la mezcla tradicional a costo directo. (Torres Rodrigo, 2014)

(Pérez Ignacio, 2007) determinó que existe la posibilidad de uso de mezclas realizadas con árido reciclado en carreteras de bajo tráfico. No obstante, todavía hay que seguir investigando en las distintas soluciones que se pueden introducir para mejorar el comportamiento frente al agua. Así, se presenta una serie de alternativas para alcanzar resultados más favorables en el futuro, entre las que se destacan:

- Selección de áridos reciclados de mejor calidad.
- Disminución de la proporción de árido reciclado en la mezcla.
- Utilización de fillers de aportación como cal y cemento.
- Utilización de betunes más duros o modificados.

Algunos estudios encontrados sobre la caracterización del árido reciclado fueron por autores como Pérez, et al 2007 se muestran en la tabla no.2:

Tabla 2. Fuente (Pérez Ignacio, 2007)

Tabla 2 / Table 2
Características de los áridos
Aggregates characteristics

Ensayo / Test	100% AN / 100% NA		100% AR / 100% RA	50% AR + 50% AN / 50% RA + 50% NA	
	S-20	G-20	S-20	S-20	G-20
Índice de lajas / <i>Elongation index (%)</i>	17.2	19.4	16.2	17.1	18.3
Caras de fractura / <i>Fractured particles (%)</i>	100	100	100	100	100
Equivalente de arena / <i>Sand equivalent (%)</i>	75.4	70.1	87.2	85.4	88.1
Coefficiente de los Angeles / <i>Los Angeles Abrasion (%)</i>	19.4	22.1	39.65	25.6	24.8
Coefficiente de absorción de agua / <i>Water Absorption Coefficient (%)</i>	0.17	0.19	6.1	4.59	4.82
Densidad relativa en aceite de parafina / <i>Relative density in paraffin oil (g/cm³)</i>	2.69	2.69	2.58	2.66	2.66

Se puede observar la diferencia entre la caracterización del 100% árido natural con respecto al 100% árido reciclado, sin embargo cuando se hace la mezcla 50% árido natural con 50% árido reciclado la calidad del material incrementa y es

adecuado para ser utilizado en mezclas asfálticas según la normativa española PG-3.

En 2016 Ignacio Perez, Ana Ma. Rodriguez y Juan Gallego, llegaron a los siguientes resultados mostrados en la tabla no. 3, que muestran el comportamiento de varias mezclas asfálticas con áridos reciclados en sustitución de áridos naturales en 20%, 40% y 60% de la región de Coruña, España.

Tabla 3. Fuente (Pérez, Pasandín, & Medina, 2016)

Mezcla	AR (%)	Bo (%)	Ha (%)	Hm (%)	Def. (mm)	Est. (KN)	D (g/cm³)
AC22-0-E	0	4,5	14,5	50	2,3	10,5	2,36
AC22-20-E	20	5,0	15,5	5,0	2,4	11,0	2,33
AC22-40-E	40	5,5	17,0	5,0	2,4	11,0	2,27
AC22-60-E	60	5,5	17,0	5,5	2,6	12,2	2,26
AC22-20A-E	20	4,5	15,5	5,0	2,3	10,0	2,32
AC22-40A-E	40	4,5	15,0	5,5	2,5	10,0	2,33
AC22-0-C	0	4,0	14,0	5,0	2,3	10,2	2,45
AC22-20-C	20	4,3	15,0	5,0	2,4	11,2	2,39
AC22-40-C	40	4,5	16,5	7,0	2,7	11,2	2,30

En la tabla no.3 se muestran los resultados del estudio realizado por los investigadores ya citados, donde AC22-0-E, AC22-20-E, AC22-40-E y AC22-60-E corresponden a 0%, 20%, 40% y 60% de sustitución de Árido Reciclado con esquistos feldespáticos como agregado natural. La letra “A” significa que los áridos reciclados fueron sometidos a desgaste de los Ángeles para la eliminación de mortero adherido. Y finalmente las últimas tres mezclas son con agregado natural calizo.

Por consiguiente como conclusiones de estos resultados según (Pérez, Pasandín, & Medina, 2016) muestran que al eliminarse el mortero de cemento que contienen los AR se produce una disminución de la rigidez de las mezclas (Pérez, Pasandín, & Medina, 2016).

Las mezclas asfálticas elaboradas con AR parecen ser más rígidas que las que no tienen este tipo de áridos (Pérez, Pasandín, & Medina, 2016).

Los parámetros Marshall cumplen lo estipulado en el PG-3 para tráfico T3 (Pérez, Pasandín, & Medina, 2016).

2.2. Gestión de los residuos de construcción y demolición.

Para la gestión adecuada de estos materiales RCD se debe de analizar el tipo de residuo del que se trata por jerarquías desde el de mayor calidad hasta el de menor, si se trata de RCD seleccionado anteriormente o se trata de un material de residuo mixto, si contiene material contaminante que pueda reducir su calidad.

De acuerdo a estudios con anterioridad esta jerarquía se compone de 4 niveles que son: la prevención, reutilización, reciclaje y eliminación.

Es decir una correcta gestión consiste en hacer una adecuada selección de los residuos de construcción separando los materiales aprovechables de residuos peligrosos y materias indeseables para la calidad del RCD y así recuperar al máximo el mayor volumen posible. Hoy en día en México es necesario poner especial atención en este tema ya que la gestión es deficiente lo que ha ocasionado que este recurso no sea atractivo ni aprovechable en la industria de la construcción. Para que en México y a nivel mundial este material sea atractivo para la industria de la construcción debe de dejarse de ver y llamar como “residuo” para dejar pasó a un significado más impactante en la sociedad y considerarse como un “recurso”. En este sentido, hay diversos planes de trabajo para el reciclaje de los RCD a nivel mundial, uno de ellos es España donde mencionan que la principal problemática de la gestión actual, puede resumirse en los siguientes puntos: 1.- volumen de generación muy elevado, 2.- Casi nula clasificación de origen, 3.-baja captación en las plantas de tratamiento e importante flujo de vertido no controlado, 4.- Déficit de instalaciones de valorización y 5.-Problemas en la comercialización de los áridos reciclados.

Por tal motivo lo que se ha dicho anteriormente el principal problema de la gestión adecuada y correcta reside en la falta de infraestructura, que en la peligrosidad de sus componentes.

Hay muchas y diversas causas de la baja captación de RCD en las plantas de tratamiento como son la concienciación en las empresas constructoras sobre el vertido en lugares establecidos para su correcta gestión, básicamente debido a unas menores exigencias legales o a precios más bajos de vertido en las zonas limítrofes. También en la misma sociedad y culpa a la vez de las autoridades encargadas del sector de la construcción la mayoría de los constructores tienen cierta desconfianza en la utilización de estos áridos ya sea por desconocimiento de sus propiedades o por simple desconfianza a pesar de que haya estudios certificados que acreditan que los áridos reciclados acreditan con las especificaciones necesarias (en algunas ocasiones algunos materiales reciclados han presentado dificultades para cumplir las especificaciones establecidas en la

normativa mexicana para la construcción de carreteras). Esta situación genera desconfianza en el sector e impide el correcto desarrollo del mercado de los áridos reciclados. En general en relación a los áridos naturales los áridos reciclados pueden ser competitivos en costo del mercado. Ya dicho todo lo anterior presenta diversas dificultades la inclusión en el sector de la construcción, es una cuestión de convencimiento de los diversos sectores, desde los constructores hasta los diseñadores deben estar convencidos en que la utilización de estos materiales secundarios no afectara a las prestaciones que debe dar la obra. En conclusión, una condición previa para conseguir la utilización amplia de los materiales reciclados en la industria de la construcción es una adecuada interacción entre los promotores, los diseñadores, los contratistas, la industria de suministro de materiales y los suministradores de materiales secundarios.

Algunos de los planes de trabajo que se deben de adaptar y seguir según el Plan Nacional de Residuos de construcción en España y que se pueden adaptar a un plan nacional en México son los siguientes:

- 1.- Redacción de planes de prevención de RCD en obras y proyectos que contengan herramientas e indicadores para la cuantificación y caracterización de los RCD.
- 2.- Redacción y publicación de guías prácticas para la prevención de RCD en obras.
- 3.- Impulso y apoyo a través de diversos programas de apoyo para el desarrollo de tecnologías de clasificación de residuos de construcción y demolición susceptibles de implantación en diversas obras.
- 4.- Obligación de elaborar planes empresariales de prevención de RCD a los promotores de las obras.
- 5.- Redacción de programas de formación a profesionales del sector de la construcción en materia de prevención y gestión de RCD en la política de compras de las compañías. Incorporación de prescripciones, con este mismo fin, en los pliegos de condiciones de las obras de iniciativa pública.
- 6.- Implantación de sistemas certificados de gestión ambiental.
- 7.- Incorporación de criterios ecológicos sobre los residuos en la elaboración de proyectos, basados en consideraciones como el impacto ambiental global, los ciclos de vida, el ahorro de recursos y el desarrollo sostenible.

8.- Realización de campañas de concienciación social sobre el uso de los RCD, con la implantación de sistemas de recogida de los residuos de construcción y demolición en puntos limpios y con la información pertinente a la sociedad de la ubicación de estos puntos.

9.- Impulso a la mejora de tecnología en materia de gestión de RCD.

10.- Implantación de sistemas de depósito, devolución y retorno en determinados productos utilizados en la construcción.

11.- Análisis ecológico sobre de posibles incentivos al aumentar el rendimiento y eficiencia de estas plantas de valorización de los RCD.

12.- Introducción en los pliegos de prescripciones la utilización de los RCD en el porcentaje que se considere adecuado y obligar a cumplir ese estatuto.

13.- Penalizaciones cuando se utilice 100% material virgen cuando haya la posibilidad de utilizar RCD con similares características a las del árido natural y para la elaboración del proyecto.

14. Estudio de las posibles ventajas ecológicas, técnicas y económicas de un posible gravamen ambiental a la extracción de áridos naturales.

En el siguiente organigrama se muestra un análisis muy general de ciclo de vida del material residuo de construcción y demolición figura no.1.

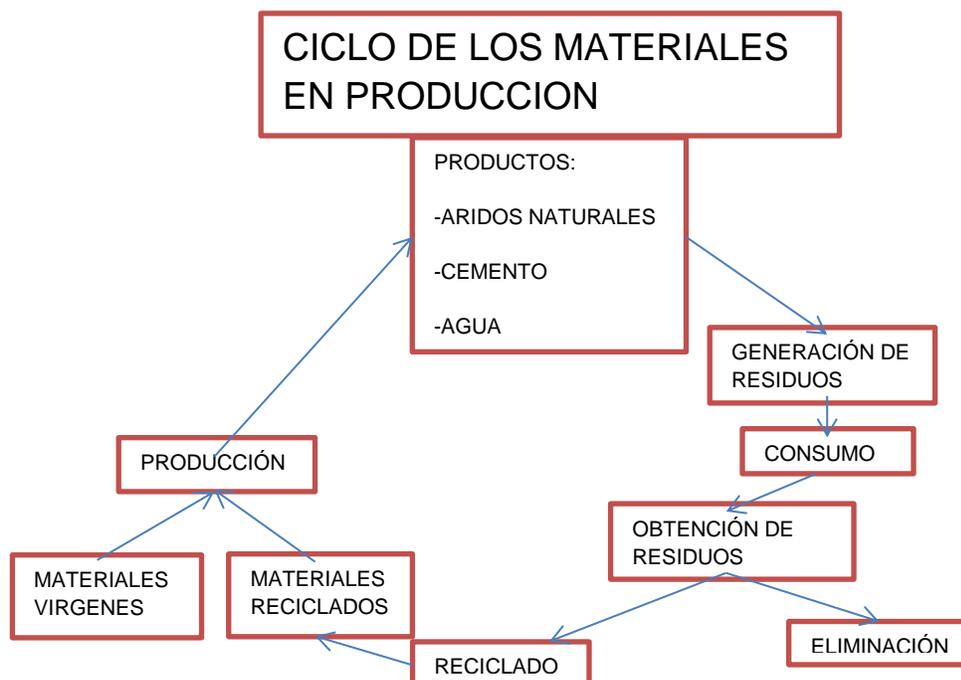


Figura 1. Ciclo de vida del RCD.

2.2.1. Recomendaciones sobre la gestión de los áridos reciclados.

El árido reciclado residuo de construcción y demolición en conclusión ocupa una adecuada gestión, planes de manejo especial, guías de obtención, demolición y uso por lo cual es prescindible seguir investigando más a fondo sobre el tema. Sin embargo debido a diversas investigaciones que se han hecho podemos dar ciertas recomendaciones.

1.- Debido a que los áridos reciclados son de distintas y muy variadas procedencias su composición generalmente será heterogénea por lo que dependiendo de la procedencia pueden ser las características del mismo lo cual se deberá de tener cuidado en seleccionar el agregado más apto para reincorporación a carreteras y seguir las normativas y guías de obtención y manejo. (REVUELTA, 2010)

2.-Se recomienda según estudios realizados una adecuada trituración o procesos de trituración seguidos para la eliminación del mortero que es uno de los precursores de la absorción y mala adhesión de asfalto-agregado. (REVUELTA, 2010)

3.-La procedencia del árido es importante generalmente se recomienda que la procedencia sea de demoliciones con contenido de concreto puro que no esté contaminado de agentes externos en general.

4.- Se recomienda utilizar RCD del tamaño de partícula retenido en la malla de 4.75 mm hacia arriba, es decir, tamaño de partícula solo como grava, ya que un RCD que pasa la malla de 4.75mm es considerado un material más fino el cual debido a su área superficial tendrá más absorción de asfalto, al igual también se han realizado estudios que han comprobado que el utilizar el agregado reciclado en partículas más fina atrae más problemas a la mezcla asfáltica. (Mendoza-Escobedo, 2006)

5.- Se recomienda hacer una selección previa y durante la trituración para eliminar agentes externos que sean perjudiciales a la mezcla. (REVUELTA, 2010)

2.3. Agregados RCD en carreteras.

2.3.1. Introducción.

La presencia de los agregados en carreteras especialmente conforma aproximadamente el 90% de las capas de la estructura lo que nos lleva a confirmar que el uso de áridos en carreteras es elevado y por lo tanto el insumo de

agregados naturales es de gran volumen no importa si se trata de una construcción nueva o de una rehabilitación. Por lo tanto las características químicas, físicas, mecánicas, etc. Definirán el comportamiento de la estructura.

Un pavimento se define como una estructura conformada por un conjunto de capas de materiales apropiados, comprendidas entre el nivel superior de las terracerías (sub-rasante) y la superficie de rodamiento, cuyas principales funciones son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiados, resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales; así como de transmitir adecuadamente los esfuerzos a la sub-rasante, de modo que esta no se deforme de manera perjudicial. (<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2944/Capitulo2.pdf>)

A grandes rasgos los pavimentos se dividen en 4 tipos: (1) flexible, (2) semiflexibles, (3) semirrígidos y (4) rígidos. Para fines de esta investigación solo se acotara al estudio en mezclas asfálticas específicamente de pavimentos flexibles, al igual también se caracterizara todo el material reciclado el cual puede servir como información de las propiedades de este árido en otras aplicaciones.

Pavimento flexible: Consiste de una superficie de desgaste o carpeta relativamente delgada construida sobre capas (base y sub-base), apoyándose este conjunto sobre la sub-rasante compactada, de manera que la sub-base, base y superficie de desgaste o carpeta son las componentes estructurales de este tipo de pavimento. (<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2944/Capitulo2.pdf>).



Figura 2. Fuente (<https://es.slideshare.net/yamilethgarcia15/generalidades-de-pavimentos-y-vas-de-comunicacin>)

La carpeta asfáltica a su vez está constituida por una combinación de áridos (incluyendo el filler), ligantes hidrocarbonados y, en ocasiones, aditivos, la función del ligante es crear una película asfáltica que cubra completamente a todo el árido sea que se trate de una mezcla asfáltica en caliente, mezcla asfáltica en frío, riegos de impregnación y riegos de curado).

Los factores que al final definirán el tipo de material que se requiere y los espesores estarán definidos por la intensidad del tránsito, el clima, el tipo de terracerías que se tenga y el proyecto de vida útil de la estructura.

Para determinar este parámetro de diseño de durabilidad de la estructura sin falla dependerá mucho del proyecto del que se trate, el diseñador establecerá los materiales, procedimientos constructivos, espesores de las capas y demás variables para el correcto funcionamiento hasta el final de su vida útil de diseño.

En el ámbito de carreteras es un escenario excepcional para la utilización de este tipo de áridos, así como a la gran cantidad que requiere dicha estructura, como por la variabilidad de tipologías presentes y necesidades para los áridos.

Existen dos grandes vertientes en relación a este tema de reciclado, por una parte la introducción de áridos reciclados, procedentes de residuos de construcción y demolición, constituidas por áridos de origen natural y un cementante hidráulico. Este tipo de situación únicamente requiere una fuente de áridos a reciclar, los mencionados RCD, y que estos posean una calidad de acuerdo a la normativa mexicana vigente para la construcción de carreteras. De esta manera podrían construirse bases y subbases con áridos reciclados, ya sea parcialmente o en su totalidad.

La otra vertiente es muy diferente y atañe a la recuperación de la carpeta asfáltica mediante el fresado de la misma y reincorporarlos a nuevas capas de rodadura, en este caso podríamos hablar no de reciclado si no de reutilización. Este proceso consiste en el fresado de la capa de rodadura y su reutilización para constituir la parte granular y también, en cierta cantidad la parte hidrocarbonada de la nueva capa de rodadura. Este es un proceso que lleva décadas llevándose a cabo en numerosos países (comenzó en los años 70s en Estados Unidos), y recibe el nombre de reciclado de pavimentos asfálticos (recycled asphalt pavement RAP en inglés). En este caso la testificación de la viabilidad se realiza mediante ensayos a las mezclas asfálticas.

2.3.2. RCD en la construcción de carreteras.

Uno de los factores fundamentales en la construcción de carreteras es el árido ya que constituye el 90% de la estructura en general de un pavimento. Las características tanto físicas, químicas y mecánicas es fundamental para el buen comportamiento de una base, una sub-base o una carpeta asfáltica, durante la vida útil de la obra, estudiar la resistencia de los materiales es imprescindible mediante el ensayo de Los Ángeles. Por otro lado el estudio mineralógico de los materiales permitirá detectar la presencia de elementos negativos en nuestro material, así como también los elementos benéficos para la causa. Un aspecto de

índole primordial en carreteras es también su mantenimiento, el cual se incrementara notablemente si no se toman en cuenta características del agregado como su porosidad, permeabilidad o absorción, que juegan un papel importante ante las heladas y de gran importancia en zonas geográficas con importantes cambios de temperatura.

En los áridos empleados para mezclas asfálticas presentan una notable influencia en las propiedades de las mismas, como son la adherencia a los neumáticos, impermeabilidad, durabilidad, etc. Y al igual que para bases y sub-bases es de vital importancia realizar los ensayos pertinentes para el análisis adecuado de la mezcla asfáltica con adición de RCD y si es viable o aceptable la inclusión de los mismos.

2.3.3. Aspectos Finales a considerar.

Varios aspectos deben ser considerados con respecto a la falta de especificaciones para el uso de RCD como agregados en las mezclas asfálticas en caliente. Por un lado, la mayoría de los estudios utilizan un diseño de Marshall. Cabe mencionar que ese método podría dar lugar a una subestimación de las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente Debido a la descomposición de las partículas durante la compactación. Por otro lado, la mayoría de los estudios utilizan los requisitos nacionales para mezclas convencionales. Por estas razones se requieren nuevas especificaciones para tener en cuenta el uso de RCD. La especificación para este tipo de agregados debe identificar el tipo de las categorías de tráfico pesado por carretera y apropiado para el uso de RCD en mezclas asfálticas en caliente.

Se ha observado en distintas investigaciones que el uso de RCD en la construcción de carreteras es viable siguiendo ciertas especificaciones de gestión de estos residuos y un control de calidad adecuado; en consecuencia reduce la contaminación medio ambiental generada por estos residuos de construcción y minimizando la explotación de ecosistemas para la extracción de agregados naturales de canteras, reincorporándolos de nuevo al ciclo de la construcción.

Se ha comprobado científicamente que el mortero adherido al agregado reduce la resistencia del agregado y es causante de mayor porosidad y absorción lo que puede ser perjudicial para la mezcla asfáltica. Esta condición puede minimizarse dándole una adecuada gestión a los RCD, incluso pasando por tratamientos de eliminación de mortero hasta donde sea posible (REVUELTA, 2010).

Algunos estudios han comprobado que el problema generado por el mortero adherido en el agregado es el causante de una adherencia más baja del agregado

con el asfalto, pero esto se puede corregir con aditivos mejoradores de adhesión impuestos en el mercado (REVUELTA, 2010).

Varias investigaciones han comprobado que el uso de RCD en la elaboración de pavimentos flexibles ha cumplido satisfactoriamente con las distintas normativas de control de calidad de países como España (REVUELTA, 2010).

Algunos de los puntos que deben de seguir investigándose en el futuro son el costo de manufacturación de los RCD y propuestas de más especificaciones para el uso de los RCD en carreteras.

Uno de los aspectos a considerar es que los RCD se ha observado que consumen más asfalto que una mezcla convencional, pero se debe de considerar también el impacto ambiental que puede generar la utilización del RCD.

Aunque hay un aumento de gastos causados por el aumento del consumo de aglutinante, la reducción de los costos ambientales debe ser también considerada (es decir, reducción del consumo de materiales naturales, menor volumen de RCD en los vertederos, etc.). Como lo mencionado por Petrarca y Galdiero (W. & A., 1984), una menor densidad de la mezcla asfáltica en caliente significa una menor utilización de masa para obtener el mismo espesor que con los agregados convencionales.

Por otra parte en términos de áreas de investigación clave, parece haber un crecimiento en el interés de entender mejor el comportamiento macroscópico de los suelos tratados a través de los procesos físicos y químicos que ocurren a nivel microscópico. Herramientas analíticas y de investigación, como lo son la difracción de rayos-X, la termo gravimetría, la microscopia electrónica o incluso MRI, son sin duda factores que contribuyen en el avance para la comprensión de estos procesos.

El progreso continuará, eventualmente, contribuyendo sobre todo a la optimización del manejo de recursos. Se debe prestar particular atención al monitoreo de los tratamientos en sitio, como aseguramiento de la durabilidad de las estructuras que se construyen.

En general, hay muy poca o nula posibilidad de exportar o importar estos tipos de materiales. Sin embargo, esto no considera las importaciones no reguladas que siempre son difíciles de cuantificar. Solamente Panamá declara importar ciertos materiales de residuo o sub-productos de los Estados Unidos y Japón. Por lo que la aplicación de estos materiales es de acuerdo a la cercanía de los sitios de producción, ya que raramente son transportados largas distancias por el alto costo de transportación en que caerían comparados con el valor inherente del material.

Las razones por las que un país empieza a experimentar un incremento en el manejo de estos materiales son:

- Disminución de materiales naturales de alta calidad.
- Necesidad por conservar los recursos naturales
- Prohibición y limitación del número de sitios para la disposición de sitios de rellenos.
- Las políticas a ser implementadas generalizadas a programas de Desarrollo Sustentable.
- El bajo costo de estos materiales comparado con el de los materiales naturales es el mayor factor en Polonia, y en un menor grado en Italia, esto explica el por qué se ha incrementado el uso de residuos y sub-productos industriales para la construcción de terraplenes en estos países. (LOPEZ DOMINGUEZ MARIA GUADALUPE, 2014)

Así mismo de acuerdo a lo estudiado podemos observar gran área de oportunidad para mejorar la práctica del país se está desarrollando con el diagnóstico, como el presente trabajo, para fomentar su práctica en los proyectos de carreteras. Se trata del empleo de sub-productos de la construcción y de demolición, utilizando pruebas de caracterización geotécnica de los materiales, para predecir comportamientos estructurales. Desde una perspectiva de ingeniería de pavimentos, los materiales recuperados deben ser utilizados de una manera tal que el rendimiento esperado del pavimento no se vea comprometido. Los residuos y subproductos, sin embargo, son materiales muy diferentes y también sus propiedades y, por lo tanto, también dónde pueden ser utilizados dentro de los pavimentos.

La experiencia y el conocimiento sobre el uso de estos materiales varían de un material a otro, así como de un lugar a otro (país, estado, región). Para recuperar estos materiales para su uso potencial, ingenieros, investigadores, generadores y reguladores deben estar al tanto de las propiedades de los materiales, la forma en que se pueden utilizar y cuáles limitaciones pueden ser asociadas con su uso. (LOPEZ DOMINGUEZ MARIA GUADALUPE, 2014)

CAPÍTULO III. PROGRAMA EXPERIMENTAL.

En este caso en específico será un diseño experimental que es una técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental. En un diseño experimental se manipulan deliberadamente una o más variables, vinculadas a las causas, para medir el efecto que tienen en otra variable de interés. El diseño experimental prescribe una serie de pautas relativas qué variables hay que manipular, de qué manera, cuántas veces hay que repetir el experimento y en qué orden para poder establecer con un grado de confianza predefinido la necesidad de una presunta relación de causa-efecto (FRANCOISE PAROT, 1998, 2007).

La experimentación fue realizada en base a los agregados y materiales disponibles en la región de Morelia, Michoacán.

Los agregados naturales fueron obtenidos del banco de material llamado la Roka ubicado en la carretera Morelia - Uriangato 634, Cuto del Porvenir, Mich., México los cuales son producto de la trituración de las canteras cercanas del banco es material 100% triturado tanto la grava, sello y arena.

Los agregados de concreto reciclado o llamados RCD (residuos de construcción y demolición) fue una recopilación mixta de diferentes obras y construcciones, desde materiales productos de trituración de pavimentos de concreto hidráulico y edificaciones hasta residuos producto de cilindros de concreto en el laboratorio de materiales "Ing. Luis Silva Ruelas". El material fue recopilado y triturado en tamaños deseables para la experimentación, para nuestro caso se trituró en un tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ " o 19mm. Que es el usualmente utilizado para espesores de carpetas asfálticas de 5 cm a 15 cm.

Considerando que el principal objetivo de este trabajo de investigación de tesis es evaluar los diferentes porcentajes de residuos de concreto reciclado con los que se puede elaborar una mezcla asfáltica para su aprovechamiento y sustitución por el agregado natural, se procedió a la obtención de diferentes fracciones de material grueso específicamente de RCD y realizando varios diseños específicos para explorar su uso y remplazo de agregados naturales por los RCD en la elaboración de carpetas asfálticas.

Este estudio experimental será llevado a cabo en 3 etapas para su completa evaluación. La primera consistió en la recopilación de la información existente

sobre el tema a investigar todo el estado del arte. La segunda en la recopilación de todas las propiedades físico-mecánicas de los agregados naturales y de los áridos reciclados las cuales fueron comparadas y evaluadas para su utilización en carpetas asfálticas según la normativa mexicana para carreteras, propiedades como granulometría, índice de lajas, índice de caras fracturadas, densidad, absorción, desgaste de los ángeles, entre otras.

En la tercera etapa se planteó el uso de los agregados de concreto reciclado en un porcentaje de 10%, 20% y 30% respectivamente en peso del agregado, para evaluar las diferentes propiedades volumétricas, de estabilidad y flujo que tienen con cada porcentaje para una carpeta asfáltica. Se realizó el diseño de cada uno de los porcentajes de sustitución y claro de la prueba testigo que era con los agregados 100% de origen natural mediante la metodología Marshall. Se analizaron parámetros volumétricos (densidad, densidad máxima teórica, vacíos, VAM, VAF) y parámetros mecánicos lo que fue estabilidad y fluencia Marshall a fin de obtener los correspondientes porcentajes óptimos de asfalto. Una vez obtenidos todos estos parámetros mediante diseño Marshall se analizaron, compararon y discutirán los resultados para así llegar a las conclusiones más adecuadas.

3.1. Metodología.

Se Realizara una investigación a fondo del estado del arte respecto a este tema en específico tanto documental como histórica.

Una vez obtenida toda la información se procede a realizar la experimentación. Primeramente:

- METODOLOGÍA DE ENSAYOS
 1. Caracterización de agregados gruesos.
 2. Caracterización de agregados finos.
 3. Caracterización del asfalto.
 4. Diseño de las Mezclas Asfálticas con agregados RCD.

- La realización del programa experimental consta de 2 etapas:
 1. **Primera etapa:** Obtención y estudio de las propiedades físico-mecánicas de los agregados reciclados, que serán comparadas con las de los

agregados naturales seleccionados para realizar las diversas experimentaciones.

2. **Segunda etapa:** Se planteara el uso de gruesos y finos en la composición de una mezcla asfáltica densa para carpeta de rodadura con la adición de un porcentaje controlado de árido reciclado. Así como el diseño volumétrico para la obtención del contenido óptimo de asfalto para cada uno de los porcentajes, la prueba testigo, con 10% de agregado reciclado, 20% y 30% mediante la metodología Marshall.

Se recomienda para futuras investigaciones evaluar la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica con agregado reciclado, ya que es importante determinar este parámetro que es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través del concreto asfáltico. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, y por tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento. (GARNICA ANGUAS, 2005).

Por otra parte también se recomienda ensayar la mezcla asfáltica si se desea obtener mayor cantidad de datos por ejemplo la susceptibilidad a la deformación permanente que se suele realizar para tramos de tráfico más pesados en carreteras mayores a un millón de ejes equivalentes. Este ensayo es un parámetro importante para la determinación de la formación de roderas y que consiste en analizar la respuesta de la mezcla asfáltica en estado sólido, bajo las condiciones más desfavorables a las que puede estar sometida y bajo una carga de tránsito elevada. Los ensayos para determinar la susceptibilidad a la deformación permanente son variados.

En la siguiente tabla se muestra un diagrama de flujo de la metodología a seguir de manera general. Figura no.3



Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología a seguir.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS AGREGADOS NATURALES.

En este apartado se hará un análisis minucioso de los agregados pétreos de origen natural que compondrán nuestra mezcla asfáltica, utilizando normativa nacional como lo son la normativa de la secretaria de comunicaciones y transporte (SCT) y uso también de normativas con estándares internacionales como son las normas ASTM. Los resultados se contrastaran con los parámetros exigidos por la normativa y así averiguar el cumplimiento del material en estudio.

El material en estudio es proveniente de la región de Morelia, Michoacán estos agregados naturales fueron obtenidos del banco de material llamado la Roka ubicado en la carretera Morelia - Uriangato 634, Cuto del Porvenir, Mich., México los cuales son producto de la trituración de las canteras cercanas del banco es material 100% triturado tanto la grava, sello y arena.

El material en estudio es con tamaño nominal máximo de $\frac{3}{4}$ " el cual deberá de cumplir con los siguientes requisitos para su adecuado comportamiento en mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa para más de un millón de ejes equivalentes y hasta 10 millones.

Tabla 4.- Requisitos de calidad de material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa para cualquier valor de ejes equivalentes. Fuente (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008)

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de Los Ángeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

4.1. Masa volumétrica seca suelta en gravas (MVSS).

Es la relación de la masa de agregado en estudio en estado seco y suelto entre el volumen del mismo.

Objetivo

Determinar la masa por unidad de volumen cuando la grava se encuentra en estado natural seco y suelto.

Cálculos.

Se realizaron 3 pruebas para obtener un resultado confiable.

Tabla 5.- MVSS de la grava natural.

PRUEBA NO.	Masa del recipiente(gr)	Volumen del recipiente (cm ³)	Masa del recipiente con el material (gr)	Masa de la grava(gr)	M.V.S.S. (gr/cm ³)
1	2885	10800	17945	15060	1.39
2	2885	10800	18175	15290	1.42
3	2885	10800	18105	15220	1.41

Media

$$M.V.S.S. = \frac{\text{Masa de la grava}}{\text{Volumen de la grava}} = 1.41 \text{ gr/cm}^3$$

4.2. Masa volumétrica seca varillada en gravas (MVSV)

Se refiere a la masa por unidad de volumen de la grava cuando esta es sometida a cierto grado de compactación

Objetivo.

Obtener la masa por unidad de volumen de la grava cuando esta es sometida a cierto grado de compactación.

Normativa.

IMT- M-MMP-1-08/03

Cálculos.

Se realizaron 2 pruebas para obtener un resultado confiable.

Tabla 6.- MVSV de la grava natural.

PRUEBA NO.	Masa del recipiente(gr)	Volumen del recipiente (cm3)	Masa del recipiente con el material (gr)	Masa de la grava(gr)	M.V.S.S. (gr/cm3)
1	2885	10800	19470	16565	1.54
2	2885	10800	19465	16580	1.53

Media.

$$M.V.S.V. = \frac{\text{Masa de la grava}}{\text{Volumen de la grava}} = 1.53 \text{ gr/cm}^3$$

4.3. Humedad y absorción en gravas.

Se refiere a la capacidad máxima de absorción de una grava expresándola en porcentaje respecto a su peso seco.

Objetivo.

Determinar la capacidad máxima de absorción de una grava expresándola en porcentaje respecto a su peso seco.

Cálculos.

Se realizaron 3 pruebas para obtener un resultado confiable.

Tabla 7.- Absorción y humedad del agregado natural.

PRUEBA NO.	Masa del Húmeda (Mh) (gr)	Masa Seca (Ms)(gr)	Porcentaje de absorción (%)	TIPO DE ABSORCIÓN
1	332	325	2.15%	MEDIA
2	305	300	1.22%	BAJA
3	333	329	1.66%	BAJA

Media.

$$\% H. ABSORCIÓN = \frac{Ms - Mh}{Ms} * 100 = 1.68\% , \text{ por lo tanto la absorción es baja.}$$

Especificaciones.

Tabla 8.- Tipo de absorción.

TIPO DE ABSORCIÓN	% H. ABSORCIÓN
BAJA	MENOS DEL 2%
MEDIA	ENTRE 2% Y 4%
ALTA	MAS DEL 4%

Referencia.

NORMA ASTM C127

Recomendaciones.

Se recomienda que la absorción para agregados pétreos en elaboración de mezclas asfálticas sea siempre menor al 4%; por lo que este material cumple satisfactoriamente.

4.4 Densidad en gravas.

Objetivo.

Determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en masa por unidad de volumen, la densidad bruta (Gsb), la densidad aparente (Gsa) y la densidad efectiva (Gse).

De acuerdo a la normativa de la SCT debe de cumplir con las siguientes características de densidad el material pétreo.

Tabla 9.- Requisitos de calidad de material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ejes equivalentes). Fuente (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008)

Característica	Valor
Densidad relativa mínimo	2.4
Desgaste de Los Ángeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

Cálculo densidad bruta, aparente y efectiva.

Se realizaron 2 pruebas para obtener un resultado confiable.

Tabla 10.- Cálculo de densidades.

Prueba	Masa seca (gr) (A)	Masa húmeda (gr) (B)	Peso en agua (gr) (C)	Densidad bruta (Gsb) (gr/cm ³)	Densidad aparente (Gsa)	Densidad efectiva (Gse)
1	291	296.5	187.5	2.67	2.81	2.70
2	384.9	392.5	249.1	2.68	2.83	2.74

Fórmulas.

$$DensidadGsb = \frac{A}{B - C}$$

$$DensidadGsa = \frac{A}{A - C}$$

$$DensidadGse = Gsb + 0.8 * (Gsa - Gsb)$$

Media.

$$DensidadGse = \frac{M}{V} = 2.72 \text{ gr/cm}^3$$

Referencia.

ASTM C127

Método de cuerpo de ingenieros para determinación de la densidad efectiva del agregado 100% natural.

Tabla 11.- Cálculo de densidad efectiva.

DESCRIPCIÓN	RECIPIENTE		
	1	2	3
PESO BOTE+VARILLA+ALAMBRE EN AIRE(g)	-----	-----	-----
PESO BOTE+VARILLA+ALAMBRE EN AGUA(g)	-----	-----	-----
VOLUMEN BOTE + VARILLA + ALAMBRE (cm³)	-----	-----	-----
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA EN AIRE (g)	1,123.00	1,127.40	1,020.80
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA EN AGUA (g)	312.30	288.50	282.70
VOLUMEN BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA (cm³)	810.70	838.90	738.10
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA + PETREOS EN AIRE (g)	2,311.30	2,327.10	2,094.50
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA + PETREOS EN AGUA (g)	1,065.80	1,047.50	961.50
VOLUMEN BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA + PETREOS (cm³)	1,245.50	1,279.60	1,133.00
PESO PETREOS (g)	1,188.30	1,199.70	1,073.70
VOLUMEN PETREOS (cm³)	434.80	440.70	394.90
DENSIDAD PETREOS	2.73	2.72	2.72
DENSIDAD PROMEDIO	2.72		

Observaciones.

Con esta prueba se puede determinar lo que es el Gsa y el Gsb del agregado que es la densidad específica aparente y densidad específica bruta respectivamente. En lo que respecta al cálculo de Gsb se emplea una fórmula empírica primeramente que nos da un valor aproximado, pero para determinar con exactitud este valor se determinó mediante la prueba del método de cuerpo de ingenieros para mayor exactitud y veracidad de los resultados, posterior a la realización de la prueba se observó que coincide la densidad determinada mediante la fórmula empírica con la resultante de la prueba por lo que se toma ese valor de 2.72 gr/cm³ para el Gsb.

Finalmente por lo que se puede observar el material cumple satisfactoriamente con la densidad estipulada por la normativa de la secretaria de comunicaciones y transportes tabla no.9 por lo que en este sentido es apto para su utilización en mezclas asfálticas.

4.5. Desgaste de los Ángeles.

Objetivo.

El objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas.

Para la realización de pavimentos y en especial de mezclas asfálticas esta prueba es de vital importancia ya que mecánicamente podemos medir la resistencia del material al desgaste y fractura mediante una sucesión de impactos dentro de un cilindro de ensayo llamado de Los Ángeles.

Tabla 12.- Tabla para cálculo de desgaste de los Ángeles.

Fuente (SCT, Desgaste mediante la prueba de Los Ángeles de los materiales Pétreos para mezclas asfálticas, 2002)

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva		
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total g	
A	37,5 - 25	1 ½" - 1"	1 250 ± 25	12	5 000 ± 25	
	25 - 19	1" - ¾"	1 250 ± 25			
	19 - 12,5	¾" - ½"	1 250 ± 10			
	12,5 - 9,5	½" - ¾"	1 250 ± 10			
	Masa total de la muestra de prueba					5 000 ± 10
B	19 - 12,5	¾" - ½"	2 500 ± 10	11	4 584 ± 25	
	12,5 - 9,5	½" - ¾"	2 500 ± 10			
	Masa total de la muestra de prueba					5 000 ± 10
	9,5 - 6,3	½" - ¼"	2 500 ± 10			
C	6,3 - 4,75	¼" - N°4	2 500 ± 10	8	3 330 ± 20	
	Masa total de la muestra de prueba					5 000 ± 10
	4,75 - 2	N°4 - N°10	5 000 ± 10			6

Cálculos.

Tabla 13.- Cálculo de desgaste.

PRUEBA NO.	Masa Inicial (Pi) (gr)	Masa Final (Pf)(gr)	% de desgaste
1	5000	4292	14.16%
2	5000	4150	17%
3	5000	4140	17.2%
		Media	16.12%

$$Pa = \frac{Pi - Pf}{Pi} * 100$$

Referencia.

M-MMP-4-04-006/02

Observaciones.

El material pétreo de procedencia 100% natural cumple satisfactoriamente este parámetro según las especificaciones de la secretaria de comunicaciones y transportes la cual exige un máximo de 30% de desgaste para tráfico de más de un millón de ejes equivalentes y hasta diez millones por lo cual es apto para su utilización en mezclas asfálticas.

4.6. Granulometría del material pétreo

En este apartado se analizó la granulometría del material pétreo tal cual como fue extraído del banco de material, lo que fue la porción de grava, la parte del sello y finalmente la arena y se determinó su granulometría por separado, posteriormente se realizó la combinación de las tres granulometrías para ajustar la curva granulométrica a lo exigido por la normativa de la secretaria de comunicaciones y transporte (tabla no.14) que para nuestro caso de estudio será para un tamaño nominal de ¾" la cual se muestra a continuación.

Tabla 14.- Requisitos de granulometría del material pétreo para mezcla asfáltica de granulometría densa (para cualquier valor de ejes equivalentes). Fuente (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008)

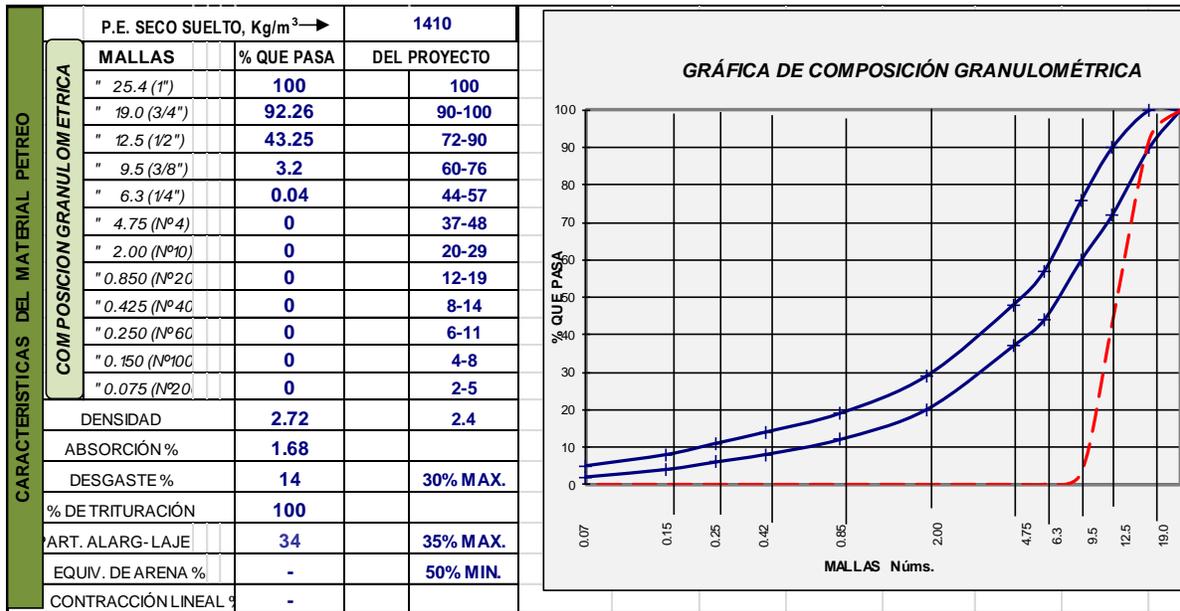
Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 (3/8)	12,5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37,5 (1 1/2)
		Porcentaje que pasa				
50	2"	--	--	--	--	100
37,5	1 1/2"	--	--	--	100	90 - 100
25	1"	--	--	100	90 - 100	74 - 90
19	3/4"	--	100	90 - 100	79 - 90	62 - 79
12,5	1/2"	100	90 - 100	72 - 90	58 - 71	46 - 60
9,5	3/8"	90 - 100	76 - 90	60 - 76	47 - 60	39 - 50
6,3	1/4"	70 - 81	56 - 69	44 - 57	36 - 46	30 - 39
4,75	Nº4	56 - 69	45 - 59	37 - 48	30 - 39	25 - 34
2	Nº10	28 - 42	25 - 35	20 - 29	17 - 24	13 - 21
0,85	Nº20	18 - 27	15 - 22	12 - 19	9 - 16	6 - 13
0,425	Nº40	13 - 20	11 - 16	8 - 14	5 - 11	3 - 9
0,25	Nº60	10 - 15	8 - 13	6 - 11	4 - 9	2 - 7
0,15	Nº100	6 - 12	5 - 10	4 - 8	2 - 7	1 - 5
0,075	Nº200	2 - 7	2 - 6	2 - 5	1 - 4	0 - 3

Granulometría de la grava.

Tabla 15.- Granulometría de la grava.

Malla	Masa Retenida (gr)	%Retenido	%Acumulativo	%que pasa
1"	0	0	0	100
3/4"	1189	7.74	7.74	92.26
1/2"	7530	49.01	56.75	43.25
3/8"	6154	40.05	96.80	3.2
Ret. No.4(4.75mm)	485	3.16	99.96	.04
Pasa no.4(4.75mm)	6	.039	100	0
TOTAL	15364			

Tabla 16.- Curva granulométrica de la grava.

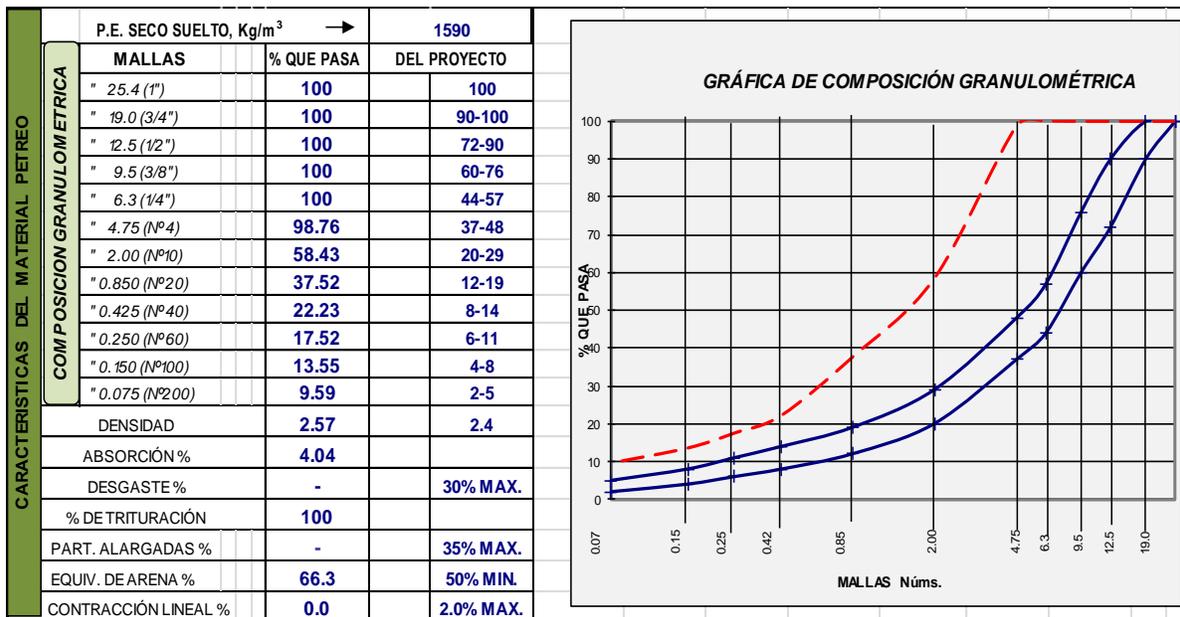


Granulometría de la arena.

Tabla 17.- Granulometría de la arena.

Malla	Masa Retenida (gr)	%Retenido	%Acumulativo	%que pasa
No.4(4.75mm)	15	1.23	1.23	98.76
No.10(2mm)	488	40.33	41.57	58.43
No.20(0.85mm)	253	20.91	62.48	37.52
No.40(0.425mm)	185	15.29	77.77	22.23
No.60(0.25mm)	57	4.7	82.48	17.52
No.100(0.15mm)	48	3.97	86.45	13.55
No.200(0.075mm)	48	3.97	90.41	9.59
Pasa No.200	116	9.59	100	0

Tabla 18.- Curva granulométrica de la arena.

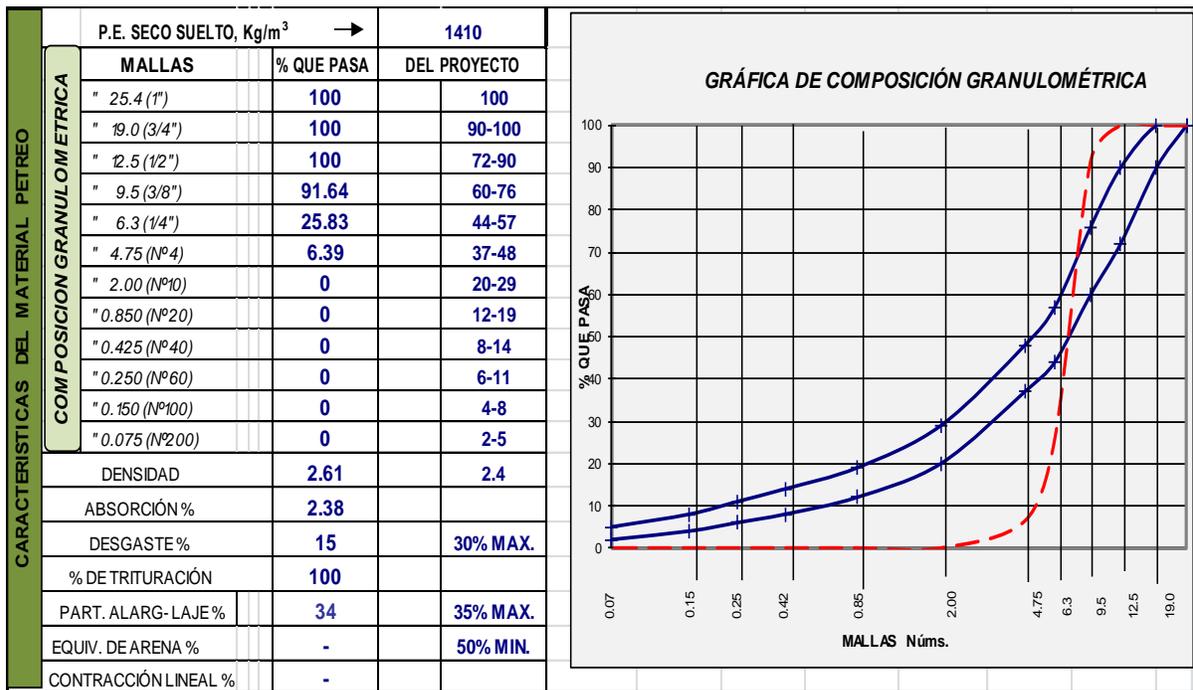


Granulometría del sello.

Tabla 19.- Curva granulométrica del sello.

Malla	Masa Retenida (gr)	%Retenido	%Acumulativo	%que pasa
1"	0	0	0	100
3/4"	0	0	0	100
1/2"	0	0	0	100
3/8"	245.5	8.36	8.36	91.64
1/4"	1932.8	65.81	74.17	25.83
4	816.5	27.8	93.61	6.39
10	187.7	6.39	100	0
TOTAL	2937			

Tabla 20.- Curva granulométrica del sello.



Ajuste de la curva granulométrica.

Tabla 21.- Porcentajes de cada material requerido.

		CANTIDAD DE MATERIAL REQUERIDO												
		MALLAS	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	4	10	20	40	60	100	200
% QUE PASA	GRAVA	100	92.26	43.25	3.2	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0
	SELLO	100	100	100	91.64	25.83	6.39	0	0	0	0	0	0	0
	ARENA	100	100	100	100	100	98.76	58.43	37.52	22.23	17.52	13.55	9.59	
GRAVA	30	30	28	13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SELLO	27	27	27	27	25	7	2	0	0	0	0	0	0	0
ARENA	43	43	43	43	43	43	42	25	16	10	8	6	4	4
SUMA		100	98	83	69	50	44	25	16	10	8	6	4	4
		100	100	90-100	72-90	60-76	44-57	37-48	20-29	12-19	8-14	6-11	4-8	2-5

Se ajustó la curva granulométrica de acuerdo a la granulometría de cada muestra recopilada en el banco de material, ya que en dicho banco se proporciona el agregado por separado como porción de grava, arena y sello. Una vez obtenida la granulometría, se ajustó en una sola curva para que cumpliera con los límites establecidos en la normativa de la SCT (tabla no.14). Cabe mencionar que se utilizó como tamaño máximo 3/4" de pulgada para el diseño de la mezcla asfáltica.

Los parámetros de cumplimiento según la normativa de la SCT están marcados con rojo. Se observa claramente que de acuerdo a la combinación de los porcentajes del material pre analizados granulométricamente cumple con lo establecido para elaboración de mezclas asfálticas.

4.7. Partículas alargadas y lajeadas.

Objetivo.

Esta prueba permite determinar el contenido de partículas de formas alargada y lajeada presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en separar el retenido en la malla N°4 de una muestra de materiales pétreos, para determinar la forma de cada partícula, empleando calibradores de espesor y de longitud.

Esta prueba es de vital importancia también su cumplimiento de acuerdo a la normativa ya que si tenemos un material superior al especificado podemos tener problemas de estabilidad y deformación en la mezcla asfáltica, ya que al tener partículas muy alargadas o lajeadas puede provocar la prematura fractura del mismo, al igual también dejando muchos huecos internos en la mezcla por el deficiente acomodo de las partículas por ser muy largas y poco cúbicas.

A continuación se muestra el parámetro de cumplimiento según la normativa.

Tabla 22.- Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ejes equivalentes). Fuente (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008)

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de Los Ángeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

Cálculos.

TAMAÑOS	PESO DEL MATERIAL POR MALLA (g)	PESO PARTICULAS ALARGADAS (g)
PASA 2" - RET. 1 1/2"		
PASA 1 1/2" - RET. 1"		
PASA 1" - RET- 3/4"	353	0
PASA 3/4" - RET. 1/2"	1624	261
PASA 1/2" - RET. 3/8"	702	203.0
PASA 3/8" - RET. 1/4"	31	27.0
SUMA	2710	491.0
% PARTICULAS ALARGADAS		18.12%

TAMAÑOS	PESO DEL MATERIAL POR MALLA (g)	PESO PARTICULAS LAJEADAS (g)
PASA 2" - RET. 1 1/2"		
PASA 1 1/2" - RET. 1"		
PASA 1" - RET- 3/4"	353	76
PASA 3/4" - RET. 1/2"	1624	308
PASA 1/2" - RET. 3/8"	702	121
PASA 3/8" - RET. 1/4"	31	6
SUMA	2710	435
% PARTICULAS LAJEADAS		16.05%

$$m_a = 491 \text{ gr}$$

$$m_e = 435 \text{ gr}$$

$$M_1 = 2710 \text{ gr}$$

$$c_a = \frac{m_a}{M_1} * 100 = 18.2\%$$

$$c_p = \frac{m_e}{M_1} * 100 = 16.05\%$$

Dónde:

Ca= Por ciento en masa de partículas con forma alargada, (%)

Cp= por ciento en masa de las partículas en forma de laja, (%)

m_a = Masa de las partículas en forma alargada en gr.

m_e= Masa de partículas en forma de laja en gr.

Referencias.

NORMA ASTM D 4791-05, M-MMP-4-04-005/08.

Observaciones.

De acuerdo a la normativa establecida nos marca que debe de cumplir con un 35% máximo de partículas alargadas y lajeadas, por lo que los resultados experimentales nos arrojan que si cumplen con el parámetro para mezclas asfálticas (tabla no.22).

4.8. Masa volumétrica seca suelta de la arena (M.V.S.S.)

Objetivo.

Determinar la masa por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es de forma libre y natural.

Cálculos.

Se realizaron 2 pruebas para obtener un resultado confiable.

Tabla 23.- Cálculo de la MVSS de la arena

PRUEBA NO.	Masa del recipiente(gr)	Volumen del recipiente (cm3)	Masa del recipiente con el material (gr)	Masa de la arena(gr)	M.V.S.S. (gr/cm3)
1	1900	2759	6285	4385	1.59
2	1900	2759	6289	4389	1.59

Media.

$$M.V.S.S. = \frac{\text{Masa de la arena}}{\text{Volumen de la arena}} = 1.59 \text{ gr/cm}^3$$

Referencia.

NMX-C-073-ONNCCE-2004

4.9. Masa volumétrica seca varillada de la arena (M.V.S.V.)

Objetivo.

Determinar la masa por unidad de volumen de una arena cuando el material tiene una cierta compactación.

Cálculos.

Se realizaron 2 pruebas para obtener un resultado confiable.

Tabla 24.- MVSV de la arena.

PRUEBA NO.	Masa del recipiente(gr)	Volumen del recipiente (cm3)	Masa del recipiente con el material (gr)	Masa de la arena(gr)	M.V.S.V. (gr/cm3)
1	1900	2759	6735	4835	1.75
2	1900	2759	6743	4843	1.75

Media.

$$M.V.S.V. = \frac{\text{Masa de la arena}}{\text{Volumen de la arena}} = 1.75 \text{ gr/cm}^3$$

Referencia.

NMX-C-073-ONNCCE-2004

4.10. Densidad de la arena.

Objetivo.

Determinar el volumen obstáculo de las partículas de arena, es decir, el volumen efectivo excluyendo los vacíos que se forman entre las partículas de arena cuando se acomodan una sobre la otra.

Cálculos.

Se realizaron 2 pruebas para obtener un resultado confiable.

Tabla 25.- Densidad de la arena.

PRUEBA NO.	Masa de la arena saturada superficialmente seca Ma(gr)	Volumen Inicial Vi(cm3)	Volumen final Vf (cm3)	Densidad (gr/cm3)
1	300	112	228	2.59
2	205	120	201	2.53
3	200	112	189	2.60

Media.

$$Densidad = \frac{Ma}{Vf - Vi} = 2.57 \text{ gr} / \text{cm}^3$$

4.11. Humedad superficial y absorción en arenas.

Objetivo.

Determinar la capacidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje.

Cálculos.

Se realizaron 3 pruebas para obtener un resultado confiable.

Tabla 26.- Humedad superficial y absorción de la arena.

PRUEBA NO.	Masa de la arena saturada superficialmente seca Mh(gr)	Masa seca Ms(gr)	% de absorción
1	300	387	4.52
2	300	388	4.17
3	300	290	3.44

Media

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100 = 4.04\%$$

Referencia.

NMX-C-165-ONNCCE-2004, ASTM C128

Observaciones.

La absorción de la arena se considera de absorción media, pero es adecuada para la construcción de mezclas asfálticas, un estudio complementario será el equivalente de arena que es el que se desarrolla a continuación.

4.12. Equivalente de arena.

Objetivo.

Determinar las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos plásticos que contiene, empleando un procedimiento que amplifica el volumen de los materiales finos plásticos.

Este es un procedimiento rápido para conocer la calidad de los materiales que se emplean como: sub base, base, carpeta asfáltica y arena para concreto.

¿Por qué es importante este estudio?

Este ensayo al igual que todos los demás que se ha tratado es de vital importancia ya que determina la cantidad de material orgánico contenido en el material pétreo que se va a utilizar, esta materia orgánica por encima de los límites establecidos provocara un mal comportamiento en la mezcla asfáltica ocasionando expansión y contracción o presentar huecos excesivos cuando reacciona al contacto del agua. Cabe mencionar que dependiendo de la temporada del año al tomar la muestra del material se tendrán que tomar las consideraciones pertinentes por parte del constructor, ya que si la muestra se toma en época de secas generalmente el agregado se presenta menos contaminado, que si se toma una muestra del mismo en época de lluvias cuando estará más contaminado. Así que la recomendación será que si el muestreo se hace en época de secas considerar no quedar sobre el límite establecido por la normativa.

Procedimiento.

Se utilizara el procedimiento descrito en la norma propuesta por la SCT M-MMP-4-04-004-02

Cálculos.

Se realizaron 3 pruebas para obtener un resultado confiable.

Tabla 27.- Cálculo de equivalente de arena.

PRUEBA NO.	Lectura de la arena	Lectura de la arcilla	Equivalente de arena
1	3.18	4.94	64.56
2	3.125	6	52.08
3	3.30	4.88	67.96

Media.

$$\text{Equivalente de Arena} = \frac{\text{Lectura de Arena}}{\text{Lectura de Arcilla}} * 100 = 61.53\%$$

Referencia.

SCT- M-MMP-4-04-004-02, ASTM D2419

Observaciones.

Como se menciona desde el inicio del apartado de análisis de materiales, se tomaron las muestras procedentes del banco de material la Roka, el cual ofrece distintos tipos de arena, una arena con más contenidos de fino, y una arena con menos porcentaje de finos; se analizaron las dos tipos de arena mediante equivalente de arena lo cual nos brindó datos importantes para la selección de cual tipo de arena era la más viable para utilizar; la arena con más finos presentaba un equivalente de arena al límite de lo establecido por la normativa (tabla no.22) que debe de ser 50% o mayor, por lo tanto se decidió analizar la arena con menos presencia de finos que nos arrojó resultados más favorables en cuanto a equivalente de arena con un promedio de 62% y la granulometría también cumple perfectamente.

4.13. Resumen de pruebas realizadas para el agregado pétreo natural.

Prueba.	Resultado.	Limites normados.	Normativa.
MVSS grava.	1.41 gr/cm ³	-----	IMT- M-MMP-1-08/03
MVSV grava.	1.53 gr/cm ³	-----	IMT- M-MMP-1-08/03
Humedad y absorción en grava.	1.68%	-----	ASTM C127
Densidad en gravas.	2.72 gr/cm ³	2.4gr/cm ³ mínimo	ASTM C127
Desgaste de los Ángeles.	16.12%	30% máximo	M-MMP-4-04-006/02 SCT
Granulometría del agregado pétreo.	Se ajusta a la curva granulométrica	Límites de curva granulométrica	N-CMT-4-04/08 SCT

	de la normativa	establecida.	
Partículas alargadas y lajeadas.	Alargadas 18.12% Lajeadas 16.02%	35% Máximo	ASTM D 4791-05, M-MMP-4-04- 005/08.
MVSS arena.	1.59 gr/cm ³	-----	NMX-C-073- ONNCCE-2004
MVSV arena.	1.75%	-----	NMX-C-073- ONNCCE-2004
Densidad de la arena.	2.57gr/cm ³	2.4 gr/cm ³ mínimo	NMX-C-165- ONNCCE-2004, ASTM C128
Humedad y absorción de la arena.	4.04%	-----	NMX-C-165- ONNCCE-2004, ASTM C128
Equivalente de arena.	61.53%	50% mínimo	SCT- M-MMP-4-04- 004-02, ASTM D2419

CAPÍTULO V. ANÁLISIS DEL AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (RCD).

Es un árido obtenido de residuos de concreto de construcción y demolición que han llegado al final de su vida útil (RCD) el cual primero tiene que pasar por una gestión adecuada la cual ya se ha explicado brevemente con anterioridad, llevando a cabo una adecuada gestión será posible que los residuos de construcción y demolición puedan ser aprovechables y con características similares a las de un agregado natural virgen y así poder utilizarlo en pavimentos asfálticos (REVUELTA, 2010).

Este material de estudio fue obtenido de la recolección de residuos de concreto de la torre del IMSS la cual fue demolida en años anteriores, también el material está integrado por residuos de concreto que ha sido utilizado en el laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas”. Finalmente el material Residuo de construcción y demolición RCD que se utilizara será una combinación de estos residuos mencionados anteriormente y de los cuales se hacen las siguientes pruebas experimentales:

5.1. Masa volumétrica seca suelta en reciclado (MVSS)

Objetivo.

Determinar la masa por unidad de volumen cuando la grava se encuentra en estado natural seco y suelto.

Cálculos.

Se realizaron 2 pruebas para obtener un resultado confiable.

Tabla 28.- Cálculo de la MVSS del reciclado.

PRUEBA NO.	Masa del recipiente(gr)	Volumen del recipiente (cm ³)	Masa del recipiente con el material (gr)	Masa de la grava(gr)	M.V.S.S. (gr/cm ³)
1	2885	10800	14330	11445	1.06
2	2885	10800	1446	11575	1.072

Media.

$$M.V.S.S. = \frac{\text{Masa de la grava}}{\text{Volumen de la grava}} = 1.066 \text{ gr/cm}^3$$

Referencias.

IMT M-MMP-1-08/03

Observaciones.

Se puede observar claramente y contrastar que el P.E.S.S. bajo considerablemente en relación a los materiales de origen natural.

5.2. Masa volumétrica seca varillada en agregado reciclado (MVSV)

Objetivo.

Obtener la masa por unidad de volumen de la grava cuando esta es sometida a cierto grado de compactación.

Cálculos.

Se realizaron 2 pruebas para obtener un resultado confiable.

Tabla 29.- Prueba de MVSV para RCD.

PRUEBA NO.	Masa del recipiente(gr)	Volumen del recipiente (cm3)	Masa del recipiente con el material (gr)	Masa de la grava(gr)	M.V.S.V. (gr/cm3)
1	2885	10800	15500	12620	1.17
2	2885	10800	15450	12565	1.16

Media.

$$M.V.S.V. = \frac{\text{Masa de la grava}}{\text{Volumen de la grava}} = 1.17 \text{ gr/cm}^3$$

Referencias.

IMT M-MMP-1-08/03

5.3. Humedad y absorción en agregado reciclado.

En cuanto a absorción se trata es esta una de las principales características que marca diferencia un árido natural a un árido reciclado.

Tomándose en cuenta las pruebas realizadas en este apartado en todos los casos la absorción es mayor a la del árido natural, esto es debido a la elevada absorción que provoca el mortero adherido al agregados; se dice que la absorción de árido natural generalmente oscila entre 0-4% mientras que la del mortero alcanza valores hasta del 16-17%. (JUAN & GUTIÉRREZ, 2006)

En estudios realizados por el CEDEX sobre RCD mencionan que los valores según la bibliografía encontrada oscilan entre el 8%-13%. Que son valores que se muestran en el estudio del material de esta investigación.

Objetivo.

Determinar la capacidad máxima de absorción de una grava reciclada expresándola en porcentaje respecto a su peso seco.

Cálculos.

Se realizaron 2 pruebas para obtener un resultado confiable.

Tabla 30.- Cálculo de la humedad y absorción del agregado reciclado.

PRUEBA NO.	Masa del Húmeda (Mh) (gr)	Masa Seca (Ms)(gr)	Porcentaje de absorción (%)	TIPO DE ABSORCIÓN
1	301	273	10.25%	ALTA
2	307	278	10.43%	ALTA

Media.

$\%H.ABSORCIÓN = \frac{Ms - Mh}{Ms} * 100 = 10.34\%$, por lo tanto la absorción es alta para este material.

Especificaciones.

Tabla 31.- Tabla de tipo de absorción. Fuente (ASTM)

TIPO DE ABSORCIÓN	% H. ABSORCIÓN
BAJA	MENOS DEL 2%
MEDIA	ENTRE 2% Y 4%
ALTA	MAS DEL 4%

Referencia.

NORMA ASTM C127

Observaciones.

Este tipo de RCD según los estudios realizados es de alta absorción esto es debido al contenido de mortero adherido en las paredes del agregado, esto se puede minimizar un poco según los estudios realizados por el CEDEX mediante el procesamiento del árido reciclado realizando varios procesos sucesivos de trituración ya que esto contribuye a la eliminación del mortero adherido.

También respecto al tipo de trituradora empleada, algunos estudios han obtenido valores ligeramente superiores cuando se emplea trituradora de impacto o mandíbula (JUAN & GUTIÉRREZ, 2006).

De acuerdo a numerosos estudios los residuos obtenidos de un concreto de alta resistencia suele tener menos absorción (JUAN & GUTIÉRREZ, 2006)

5.4. Densidad en agregado reciclado Gsa, Gsb y Gse.

En general la densidad del RCD es más baja que la de un árido de procedencia natural debido primeramente a la concentración de materiales como el cemento, y a ciertas impurezas que puede contener por la mezcla con algún otro agente extraño de densidades inferiores lo que modifica también su densidad.

Según diversos estudios el rango total para la densidad se sitúa en 2.07-2.65 kg/dm³, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2.10-2.64 kg/dm³.

Objetivo.

Determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en masa por unidad de volumen.

Cálculos.

Se realizaron 2 pruebas por cada porcentaje para obtener un resultado confiable.

Prueba	Masa seca (gr) (A)	Masa húmeda (gr) (B)	Peso en agua (gr) (C)	Densidad bruta (Gsb) (gr/cm ³)	Densidad aparente (Gsa)	Densidad efectiva (Gse)
1(10%)	321.9	332.7	203.5	2.49	2.72	2.67
2(10%)	318.4	329.8	202.5	2.50	2.75	2.70
3(20%)	310.8	327.2	192	2.30	2.62	2.56
4(20%)	345.4	369.2	211.6	2.34	2.58	2.53
5(30%)	311.2	328.7	187.5	2.20	2.52	2.46
6(30%)	292.6	304.5	171.5	2.20	2.42	2.38

Fórmulas.

$$DensidadGsb = \frac{A}{B - C}$$

$$DensidadGsa = \frac{A}{A - C}$$

$$DensidadGse = Gsb + 0.8 * (Gsa - Gsb)$$

Media para cada porcentaje.

$$DensidadGse10\% = \frac{M}{V} = 2.68 \text{ gr} / \text{cm}^3$$

$$DensidadGse20\% = \frac{M}{V} = 2.52 \text{ gr} / \text{cm}^3$$

$$DensidadGse30\% = \frac{M}{V} = 2.40 \text{ gr} / \text{cm}^3$$

Normativa.

Tabla 32.- Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ejes equivalentes).Fuente (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008)

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de Los Angeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

Referencia.

M-MMP-4-04-003/2 DE LA SCT

Observaciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos el material reciclado en estudio está dentro del rango de resultados obtenidos en diversos estudios, aunque no cumple con el rango establecido por la SCT (tabla no.32) hay que recordar que este material solo será un cierto porcentaje para la mezcla lo cual en combinación aumentara la densidad final.

Aun así en todos los casos se puede considerar al árido reciclado como árido de peso normal, ya que su densidad está comprendida entre 2kg/dm³- 3kg/dm³.

Se observa que lógicamente mientras el porcentaje de RCD va aumentando en la mezcla la densidad va disminuyendo. Cabe resaltar que la determinación del Gse es una formula empírica y es solo una estimación de lo que realmente vale el Gse. Esta propiedad se determina con la prueba que se muestra a continuación.

5.5. Determinación de la densidad efectiva (Gse) por medio de la prueba del método de ingenieros de EUA.

5.5.1. Mezcla asfáltica con 10% de RCD.

DESCRIPCIÓN	RECIPIENTE		
	1	2	3
PESO BOTE+VARILLA+ALAMBRE EN AIRE(g)	-----	-----	-----
PESO BOTE+VARILLA+ALAMBRE EN AGUA(g)	-----	-----	-----
VOLUMEN BOTE + VARILLA + ALAMBRE (cm ³)	-----	-----	-----
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA EN AIRE (g)	1,106.30	1,053.70	1,316.40
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA EN AGUA (g)	248.90	274.40	366.30
VOLUMEN BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA (cm ³)	857.40	779.30	950.10
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA + PETREOS EN AIRE (g)	2,131.10	2,085.40	2,340.20
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA + PETREOS EN AGUA (g)	886.00	915.00	1,002.00
VOLUMEN BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA + PETREOS (cm ³)	1,245.10	1,170.40	1,338.20
PESO PETREOS (g)	1,024.80	1,031.70	1,023.80
VOLUMEN PETREOS (cm ³)	387.70	391.10	388.10
DENSIDAD PETREOS	2.64	2.64	2.64
DENSIDAD PROMEDIO	2.64		

5.5.2. Mezcla asfáltica con 20% de RCD.

DESCRIPCIÓN	RECIPIENTE		
	1	2	3
PESO BOTE+VARILLA+ALAMBRE EN AIRE(g)	-----	-----	-----
PESO BOTE+VARILLA+ALAMBRE EN AGUA(g)	-----	-----	-----
VOLUMEN BOTE + VARILLA + ALAMBRE (cm ³)	-----	-----	-----
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA EN AIRE (g)	1,106.30	1,053.70	1,316.40
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA EN AGUA (g)	248.90	274.40	366.30
VOLUMEN BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA (cm ³)	857.40	779.30	950.10
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA + PETREOS EN AIRE (g)	2,255.30	2,093.60	2,350.00
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA + PETREOS EN AGUA (g)	946.60	907.30	996.00
VOLUMEN BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA + PETREOS (cm ³)	1,308.70	1,186.30	1,354.00
PESO PETREOS (g)	1,149.00	1,039.90	1,033.60
VOLUMEN PETREOS (cm ³)	451.30	407.00	403.90
DENSIDAD PETREOS	2.55	2.56	2.56
DENSIDAD PROMEDIO	2.55		

5.5.3. Mezcla asfáltica con 30% RCD.

DESCRIPCIÓN	RECIPIENTE		
	1	2	3
PESO BOTE+VARILLA+ALAMBRE EN AIRE(g)	-----	-----	-----
PESO BOTE+VARILLA+ALAMBRE EN AGUA(g)	-----	-----	-----
VOLUMEN BOTE + VARILLA + ALAMBRE (cm ³)	-----	-----	-----
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA EN AIRE (g)	1,106.30	1,053.70	1,316.40
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA EN AGUA (g)	248.90	274.40	366.30
VOLUMEN BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA (cm ³)	857.40	779.30	950.10
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA + PETREOS EN AIRE (g)	2,111.50	2,060.30	2,319.40
PESO BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA + PETREOS EN AGUA (g)	843.00	870.30	959.90
VOLUMEN BOTE + VARILLA + ALAMBRE + CA + PETREOS (cm ³)	1,268.50	1,190.00	1,359.50
PESO PETREOS (g)	1,005.20	1,006.60	1,003.00
VOLUMEN PETREOS (cm ³)	411.10	410.70	409.40
DENSIDAD PETREOS	2.45	2.45	2.45
DENSIDAD PROMEDIO	2.45		

Los valores presentados en esta prueba serán los valores reales de Gse para diseño para cada porcentaje de RCD en cual se observa que varía y va disminuyendo conforme aumenta el contenido de RCD. Sin embargo cumple con los valores mínimos de densidad estipulados por la normativa de la SCT (tabla no.32).

5.6. Desgaste de los Ángeles.

Generalidades.

El ensayo de desgaste de los Ángeles para RCD será elevado ya que se desintegrara todo el mortero adherido en el agregado.

Según diversos estudios generalmente los resultados de desgaste para este tipo de agregado andarán entre 12% y 43%. Si bien es cierto que es muy amplio el rango se espera que cumpla con lo mínimo establecido en la normativa mexicana de la SCT. Que es el 30% máximo para tráficos mayores a un millón de ejes equivalentes.

Objetivo.

El objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas.

Tabla 33.- Tabla de desgaste de los Ángeles.

Fuente (SCT, Desgaste mediante la prueba de Los Ángeles de los materiales Pétreos para mezclas asfálticas, 2002)

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva	
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	37,5 - 25	1 ½" - 1"	1 250 ± 25	12	5 000 ± 25
	25 - 19	1" - ¾"	1 250 ± 25		
	19 - 12,5	¾" - ½"	1 250 ± 10		
	12,5 - 9,5	½" - ¾"	1 250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
B	19 - 12,5	¾" - ½"	2 500 ± 10	11	4 584 ± 25
	12,5 - 9,5	½" - ¾"	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
C	9,5 - 6,3	¾" - ½"	2 500 ± 10	8	3 330 ± 20
	6,3 - 4,75	½" - N°4	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
D	4,75 - 2	N°4 - N°10	5 000 ± 10	6	2 500 ± 15

Cálculos.

Mezcla con 10% de RCD.

TIPO DE COMPOSICION DE LA MUESTRA :	B	N° DE ESFERAS	11	CARGA ABRASIVA (g)	
				4,584 ± 25	
PESO INICIAL (gr)	PESO RETENIDO EN LA MALLA N°12 (gr)	PESO QUE PASA LA MALLA N°12 (gr)	DESGASTE EN %		
5,000.00	4192	808.00	16.2%		
PESO INICIAL (gr)	PESO RETENIDO EN LA MALLA N°12 (gr)	PESO QUE PASA LA MALLA N°12 (gr)	DESGASTE EN %		
5,000.00	4181	819.00	16.4%		
DESGASTE PROMEDIO:				16%	

Mezcla con 20% de RCD.

TIPO DE COMPOSICION DE LA MUESTRA :	B	N° DE ESFERAS	11	CARGA ABRASIVA (g)	
				4,584 ± 25	
PESO INICIAL (gr)	PESO RETENIDO EN LA MALLA N°12 (gr)	PESO QUE PASA LA MALLA N°12 (gr)	DESGASTE EN %		
5,000.00	4114	886.00	17.7%		
PESO INICIAL (gr)	PESO RETENIDO EN LA MALLA N°12 (gr)	PESO QUE PASA LA MALLA N°12 (gr)	DESGASTE EN %		
5,000.00	4121	879.00	17.6%		
DESGASTE PROMEDIO:				18%	

Mezcla con 30% de RCD.

TIPO DE COMPOSICION DE LA MUESTRA :	B	N° DE ESFERAS	11	CARGA ABRASIVA (g)
				4,584 ± 25
PESO INICIAL (gr)	PESO RETENIDO EN LA MALLA N°12 (gr)		PESO QUE PASA LA MALLA N°12 (gr)	DESGASTE EN %
5,000.00	4049		951.00	19.0%
PESO INICIAL (gr)	PESO RETENIDO EN LA MALLA N°12 (gr)		PESO QUE PASA LA MALLA N°12 (gr)	DESGASTE EN %
5,000.00	4062		938.00	18.8%
DESGASTE PROMEDIO:				19%

$$Pa = \frac{Pi - Pf}{Pi} * 100$$

Referencia.

M-MMP-4-04-006/02

Tabla 34.- Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa(para cualquier valor de ejes equivalentes) (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008)

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de Los Angeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

Observaciones.

El árido RCD para este ensayo, por lo que se observa que va aumentando el desgaste conforme va aumentando el contenido de RCD, sin embargo, la sustitución de 30% que sería la más desfavorable para esta prueba cumple satisfactoriamente con el mínimo requerido estipulado en la normativa de la SCT (tabla no.34). Para tránsitos mayores a un millón de ejes equivalentes y menores a 10 millones.

5.7. Partículas alargadas y lajeadas en agregado reciclado.

Objetivo.

Esta prueba permite determinar el contenido de partículas de formas alargada y lajeada presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en separar el retenido en la malla N°4 de una muestra de

materiales pétreos, para determinar la forma de cada partícula, empleando calibradores de espesor y de longitud.

Cálculos.

TAMAÑOS	PESO DEL MATERIAL POR MALLA (g)	PESO PARTICULAS ALARGADAS (g)
PASA 2" - RET. 1 1/2"		
PASA 1 1/2" - RET. 1"		
PASA 1" - RET- 3/4"	756	20
PASA 3/4" - RET. 1/2"	718	161
PASA 1/2" - RET. 3/8"	33	25.0
PASA 3/8" - RET. 1/4"	165	84.0
SUMA	1672	290.0

% PARTICULAS ALARGADAS	17.34%
-------------------------------	---------------

TAMAÑOS	PESO DEL MATERIAL POR MALLA (g)	PESO PARTICULAS LAJEADAS (g)
PASA 2" - RET. 1 1/2"		
PASA 1 1/2" - RET. 1"		
PASA 1" - RET- 3/4"	756	94
PASA 3/4" - RET. 1/2"	718	97
PASA 1/2" - RET. 3/8"	33	4
PASA 3/8" - RET. 1/4"	165	51
SUMA	1672	246

% PARTICULAS LAJEADAS	14.71%
TOTAL	32.06%

$$m_a = 290 \text{ gr}$$

$$m_e = 246 \text{ gr}$$

$$M_1 = 1672 \text{ gr}$$

$$c_a = \frac{m_a}{M_1} * 100 = 17.34\%$$

$$c_p = \frac{m_e}{M_1} * 100 = 14.71\%$$

Dónde:

Ca= Por ciento en masa de partículas con forma alargada, (%)

Cp= por ciento en masa de las partículas en forma de laja, (%)

m_a = Masa de las partículas en forma alargada en gr.

m_e= Masa de partículas en forma de laja en gr.

Referencias.

NORMA ASTM D 4791-05, M-MMP-4-04-005/08.

Tabla 35.- Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa(para cualquier valor de ejes equivalentes) (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008)

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de Los Ángeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

Observaciones.

En esta prueba a diferencia de las de densidad, porcentaje de absorción, desgaste de los Ángeles, arroja la prueba resultados con mejores características que las del árido natural con menos partículas alargadas y lajeadas. La diferencia puede ser notable a simple vista. Esta propiedad es de utilidad para generar una buena cohesión entre los agregados ya que una forma más cubica, mas rugosa y con más aristas confieren más estabilidad a la mezcla y por ende un mejor comportamiento ante la acción de las cargas.

5.8. Resumen de pruebas realizadas para agregado pétreo RCD.

Prueba.	Resultado obtenido.	Límites de normativa.	Normativa.
MVSS en grava.	1.066 gr/cm ³	-----	IMT M-MMP-1-08/03
MVSV en grava.	1.17 gr/cm ³	-----	IMT M-MMP-1-08/03
Humedad y absorción.	10.34%	Se recomienda absorciones menor de 4%	ASTM C127
Densidad efectiva con 10% de RCD.	2.64 gr/cm ³	2.4 gr/cm ³ mínimo.	M-MMP-4-04-003/2 DE LA SCT
Densidad efectiva con 20% de RCD.	2.55 gr/cm ³	2.4 gr/cm ³ mínimo.	M-MMP-4-04-003/2 DE LA SCT
Densidad efectiva con 30% de RCD.	2.45 gr/cm ³	2.4 gr/cm ³ mínimo.	M-MMP-4-04-003/2 DE LA SCT
Desgaste de los Ángeles con 10% de RCD.	16%	30% máximo.	M-MMP-4-04-006/02
Desgaste de los Ángeles con 20% de RCD.	18%	30% máximo.	M-MMP-4-04-006/02
Desgaste de los Ángeles con 30% de RCD.	19%	30% máximo.	M-MMP-4-04-006/02
Partículas alargadas y lajeadas con RCD.	Alargadas 17.34% Lajeadas 14.71%	35% máximo.	ASTM D 4791-05, M-MMP-4-04-005/08.

CAPÍTULO VI. CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO.

Generalidades.

El cemento asfáltico artificial es el residuo del procesamiento y destilación del petróleo, contiene sustancias sólidas naturales o sintéticas, líquidas viscosas que constituyen una mezcla conformada por hidrocarburos que son productos de polimerización, de oxidación y de derivados oxigenados, azufrados y nitrogenados. Los cementos asfálticos se utilizan ampliamente en: construcción de caminos, impermeabilización de cubiertas, preparación del cartón asfaltado, elaboración de pastas, pegamentos y lacas (VALENCIA, RAMIREZ, & BARRIGA, 2005).

La caracterización del cemento asfáltico es de suma importancia en cualquier elaboración de diseños para pavimentos flexibles, ya que es el aglutinante o el cementante que dará la unión y consistencia de la mezcla de los áridos con el cemento asfáltico.

También es importante resaltar que el asfalto al ser un material orgánico este envejece con el tiempo y las condiciones climáticas. Se han realizado estudios de las propiedades mecánicas que puede conferir el cemento asfáltico a las mezclas asfálticas y se han llegado a las conclusiones que el envejecimiento del asfalto le confiere más resistencia a la deformación y mayor estabilidad, ya que el asfalto envejecido hace que la mezcla se vaya rigidizando con el tiempo; cabe señalar que hasta cierto punto es bueno disminuir la deformación y mejorar la estabilidad, pero llega un cierto punto del envejecimiento que hace que la mezcla asfáltica sea muy rígida lo que puede ocasionar que sea más susceptible a la fractura; y esto es algo que no es adecuado para mezclas asfálticas. (ORTIZ, DICIEMBRE 2008)

Hoy en día hay diversos métodos para la caracterización del asfalto y en principal factor es en base a su viscosidad. Hay métodos actuales para su caracterización como los establecidos por el método SUPERPAVE. Y otros un poco menos actuales y más sencillos pero que sin embargo son utilizados en gran parte del mundo y que han dado buenos resultados para un diseño adecuado de carreteras hasta en la actualidad. Una de las primeras formas de clasificación del asfalto que surgieron fue mediante su penetración que es la determinación de su dureza dicha prueba está regida por la norma ASTM D946 o por la normativa mexicana SCT M-MMP-4-05-006/00, otra de las formas de caracterización es mediante su viscosidad que es determinada mediante la Norma ASTM D3381 y la más actual

que es en base a su grado de desempeño o PG regido por la norma AASHTO MP-1, ASTM D6373 o la normativa mexicana N-CMT-4-05-001.

El asfalto de estudio se trata de un asfalto proveniente de la refinería de salamanca llamada “Ing. Antonio M. Amor”, ubicada en Salamanca, Guanajuato. Esta refinería aproximadamente genera 217,000 barriles por día con un manejo del 15% que facilita la obtención de productos de mayor calidad y vida útil en la planta de procesos (PEMEX)

6.1. Ductilidad.

Objetivo.

Esta prueba permite determinar la capacidad para deformarse sin romperse, de los cementos asfálticos, del residuo de la prueba de película delgada y de los residuos asfálticos obtenidos por destilación de emulsiones. La prueba consiste en medir la máxima distancia a la cual una briqueta de dichos materiales, de geometría y bajo condiciones de temperatura y velocidad de deformación específicas, puede ser estirada sin romperse.

Procedimiento.

Se seguirá el procedimiento descrito en el manual para determinar la ductilidad de un cemento asfáltico propuesto por la SCT. M-MMP-4-05-011-07.

Cálculos.

PRUEBA N°1

NO. PASTILLA	Ductilidad (cm)
1	68
2	69
3	90
PROMEDIO	75.66

PRUEBA N°2

NO. PASTILLA	Ductilidad (cm)
1	108.5
2	85
3	101
PROMEDIO	98.17

Referencias.

N-CMT-4-05-001/06, M-MMP-4-05-011-07 de la SCT.

Reporte fotográfico.



Imagen 2.- Colocación de las muestras a 25°C



Imagen 1.- Prueba de las muestras.

6.2. Penetración a 25 °C

Esta prueba es una de las primeras y principales para la clasificación del tipo de cemento asfáltico que se trata y mide la consistencia del cemento asfáltico.

Objetivo.

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, así como de los residuos por destilación de las emulsiones y asfaltos rebajados, mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra de prueba de dichos materiales bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura.

Procedimiento de la prueba.

Se seguirá el procedimiento descrito en el manual establecido por la SCT M-MMP-4-05-006/00

Cálculos y resultados.

N° de penetración	Profundidad (decimas de milímetro)
1	57
2	55
3	54
4	54
Promedio	55

Referencias.

N·CMT·4·05·001/06, M·MMP·4·05·006/00

6.3. Punto de ignición.

Objetivo.

Esta prueba permite determinar la temperatura mínima a la que el asfalto produce flamas instantáneas al estar en contacto con el fuego directo, así como aquella en que inicia su combustión.

La prueba consiste en colocar una muestra de asfalto en una copa abierta de Cleveland, en donde se incrementa paulatinamente su temperatura hasta lograr que al pasar una flama por la superficie de la muestra se produzcan en ella flamas instantáneas, la temperatura correspondiente se denomina punto de inflamación. Si se continúa elevando la temperatura de la muestra se llega al punto en que se inicia la combustión del material, la temperatura correspondiente se denomina punto de combustión.

Procedimiento de la prueba.

Se utilizara el procedimiento descrito por la normativa de la SCT M·MMP·4·05·007/00

Cálculos y resultados.

N° de muestra	Punto de ignición(°C)	Punto de combustión (°C)
1	240	325
2	235	330

Referencias.

N·CMT·4·05·001/06, M·MMP·4·05·007/0

6.4. Punto de reblandecimiento.

Objetivo.

Esta prueba permite estimar la consistencia de los cementos asfálticos y se basan en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25mm, en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal, que se calienta gradualmente dentro de un baño de agua o glicerina.

Procedimiento de la prueba.

Se seguirá el procedimiento descrito en el manual establecido por la SCT para esta prueba M-MMP-4-05-009/00

Cálculos y resultados.

N° de Esfera	Punto de reblandecimiento(°C)
1	56
2	54
Promedio	55

Referencias.

N.CMT.4.05.001/06, MMP-4-05-009/00.

6.5. Densidad del asfalto.

La densidad del asfalto es un parámetro importante para la obtención de los proporcionamientos en el diseño de la mezcla asfáltica.

Se determinó la densidad de asfalto mediante el método de cuerpo de ingenieros como sigue:

Tabla 36.- Cálculo de la densidad del asfalto por el método de cuerpo de ingenieros.

CARACTERISTICA	MUESTRA		
	1	2	3
PESO RECIPIENTE+VARILLA+ALAMBRE EN AIRE(g)	333.70	305.80	300.20
PESO RECIPIENTE+VARILLA+ALAMBRE EN AGUA(g)	290.20	265.70	259.50
VOLUMEN RECIPIENTE+VARILLA+ALAMBRE (cm ³)	43.50	40.10	40.70
PESO RECIPIENTE+VARILLA+ALAMBRE+C.A. EN AIRE (g)	1123.00	1127.40	1020.80
PESO RECIPIENTE+VARILLA+ALAMBRE+C.A. EN AGUA (g)	312.30	288.50	282.70
VOLUMEN RECIPIENTE+VARILLA+ALAMBRE+C.A. (cm ³)	810.70	838.90	738.10
PESO DEL CEMENTO ASFALTICO (g)	789.30	821.60	720.60
VOLUMEN DEL CEMENTO ASFALTICO (cm ³)	767.20	798.80	697.40
DESIDAD DEL CEMENTO ASFALTICO (g/cm ³)	1.0288	1.0285	1.0333
PROMEDIO	1.030		

6.6. Viscosidad rotacional del asfalto.

La viscosidad es una propiedad física y reológica del asfalto que nos permite determinar la consistencia necesaria para su utilización a los fines que más convenga, por ejemplo para la elaboración de mezclas asfálticas se requiere que tenga una consistencia adecuada para su mezclado con los agregados ya que el asfalto servirá como aglutinante y requerirá de cierta temperatura para logra este cometido.

El ensayo en cuestión tiene como base la normativa mexicana de la SCT M-MMP-4-05-005-02 y la norma ASTM D4402-06.

Objetivo.

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, en un rango de 38 a 260 °C, mediante la determinación de la resistencia que ofrece una muestra de prueba a la deformación. La prueba consiste en determinar el par de torsión que es necesario aplicar en un eje rotacional, en el seno de una muestra de prueba colocada dentro de un contenedor, bajo condiciones controladas de temperatura, para que gire a una cierta velocidad. (SCT, Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos, 2002).

Cálculos.

Tabla 37.- Tabla de cálculos de la viscosidad del asfalto. Fuente propia.

AC20		Pa*s			
Temperatura	rpm	Viscosidad	Promedio	Torque	%
130	6	0.651	0.651	55.80	65.10
		0.651		55.80	65.10
		0.651		55.90	65.10
140	6	0.432	0.431	19.80	26.40
		0.431		19.80	26.40
		0.431		19.90	26.53
150	6	0.264	0.262	43.20	57.60
		0.261		43.10	57.46
		0.261		43.00	57.33
160	6	0.168	0.168	22.40	29.86
		0.168		22.40	29.86
		0.168		22.30	29.73
170	6	0.119	0.119	12.30	16.40
		0.119		12.20	16.26
		0.119		12.20	16.26
180	6	0.082	0.082	7.90	10.53
		0.082		7.90	10.53
		0.082		7.89	10.52

Tabla 38.- Temperatura de mezclado y compactación. Fuente (S.A., 2013)

	x	y
AC20		
	TEMPERATURA	Rango
TEMPERATURA MEZCLADO (0.15)	165.00	0.150
TEMPERATURA MEZCLADO (0.19)	159.00	0.190
TEMPERATURA COMPACTADO (0.25)	152.30	0.250
TEMPERATURA COMPACTADO (0.31)	147.00	0.310

Gráfica.

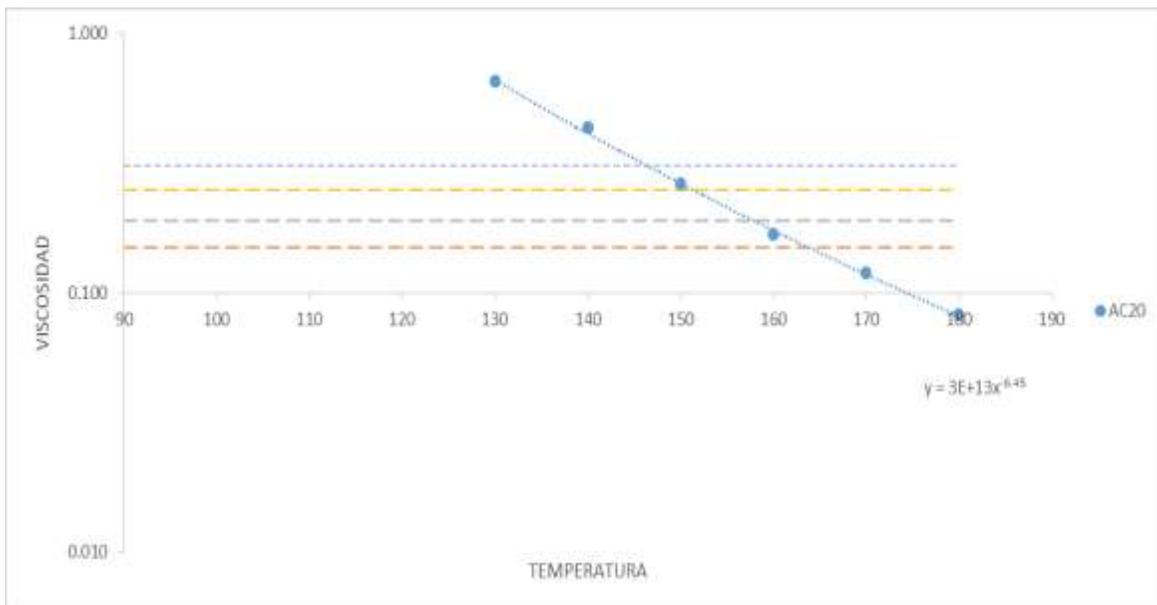


Figura 4.- Gráfica de viscosidad.

De acuerdo a la gráfica se puede determinar la viscosidad cinemática del cemento asfáltico dividiendo la viscosidad dinámica a 135 °C entre la densidad del asfalto que es de 1.03gr/cm³.

Viscosidad dinámica a 135°C= 0.550 Pa*s

Viscosidad cinemática a 135°C=(0.550 kg/(m*s))/(1.03gr/cm³)

Viscosidad cinem. 135°C=533.98 mm²/s

Observaciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta prueba se determina que la temperatura de mezclado será en el rango de temperatura de 165-159°C que corresponde a una viscosidad de 0.190 – 0.150 Pa*s y una temperatura de

compactación de 152-147°C que corresponde a una viscosidad de 0.250- 0.310 Pa*s. Es importante determinar estos parámetros ya que para asegurar un adecuado mezclado y una buena compactación es necesario hacerlo a estas temperaturas.

Por otra parte se determinó la viscosidad cinemática a 135°C para su clasificación.



Imagen 3.- Viscosímetro trabajando



Imagen 4.- Prueba de viscosidad en proceso.



Imagen 6.- Temperatura de trabajo de la prueba.



Imagen 5.- Prueba de viscosidad en proceso.

Referencias.

ASTM D-4402, M-MMP-4-05-005-02.

En la siguiente tabla se muestra de acuerdo a los resultados obtenidos en cada una de las pruebas al material asfáltico en que valores entra cada resultado.

6.7. Resumen de pruebas.

No	Prueba	Valor obtenido	Límite de normativa	Normativa.
1	Ductilidad	86.92 cm	50 cm mínimo	N-CMT-4-05-001/06, M-MMP-4-05-011-07 de la SCT
2	Penetración a 25°C	5.5 mm	6mm mínimo.	N-CMT-4-05-001/06, M-MMP-4-05-006/00

3	Punto de ignición	237.5°C	232°C mínimo.	N-CMT-4-05-001/06, M-MMP-4-05-007/0
4	Punto de reblandecimiento	55°C	48°C-56°C	N-CMT-4-05-001/06, MMP-4-05-009/00
5	Densidad del asfalto	1.03 gr/cm ³	-----	ASTM D71-94 AASHTO T 229-97
6	Viscosidad dinámica a 135°C	0.550 Pa*s	-----	N-CMT-4-05-001/06
7	Viscosidad cinemática a 135°C	533.98 mm ² /s	300 mm ² /s mínimo.	N-CMT-4-05-001/06

Tabla 39.- Requisitos de calidad para cemento asfáltico clasificado por viscosidad dinámica a 60°C.

Fuente (SCT, Calidad de los materiales asfálticos, 2006)

Características	Clasificación			
	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Del cemento asfáltico original:				
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s (P ^[1])	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1 000 ± 200)	200 ± 40 (2 000 ± 400)	300 ± 60 (3 000 ± 600)
Viscosidad cinemática a 135°C; mm ² /s, mínimo (1 mm ² /s = 1 centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad; %, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandecimiento; °C	37 - 43	45 - 52	48 - 56	50 - 58
Del residuo de la prueba de la película delgada:				
Pérdida por calentamiento; %, máximo	1	0,5	0,5	0,5
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s (P ^[1]), máximo	200 (2 000)	400 (4 000)	800 (8 000)	1 200 (12 000)
Ductilidad a 25°C y 5 cm/min; cm, mínimo	100	75	50	40
Penetración retenida a 25 °C; %, mínimo	46	50	54	58

[1] Poises

De acuerdo a los resultados obtenidos hasta este punto de la caracterización del asfalto y a la siguiente tabla de clasificación se puede concluir que se trata de un asfalto AC-20.

CAPÍTULO VII. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ADICIÓN DE CONCRETO RECICLADO (RCD) COMO SUSTITUCIÓN DE AGREGADO NATURAL.

7.1. Mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de pavimentos, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a las capas inferiores para que sean soportadas por ésta. Se tienen que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de un pavimento: (Rodríguez, 2004)

1. La Función Resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción. (Rodríguez, 2004)

2. La Finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del firme, para que resulten seguras y confortables. A estas capas superiores se le denomina pavimento. Las tipologías de los pavimentos de acuerdo a su comportamiento y respuesta se pueden dividir en los siguientes tipos:

a) Pavimentos Flexibles. (Base Granular). Constituidos por capas de sub-base y base de material granular, y por un tratamiento superficial o por una capa de mezcla asfáltica de espesores muy delgados que pueden ir hasta los 10 cm. regularmente, las capas granulares resisten fundamentalmente la acción del tráfico, la capa de rodadura sirve para impermeabilizar el firme, resistir los efectos abrasivos del tráfico y proporcionar una rodadura cómoda y segura.

b) Pavimentos Flexibles. (Base Asfáltica).

Compuesto por una base y un pavimento asfáltico y el cual está constituido por una capa intermedia y otra de rodadura, la sub-base puede ser granular o bien tratada con un ligante hidráulico o hidrocarbonado. (Rodríguez, 2004)

c) Pavimentos Semi-rígidos. (Base tratada con ligantes hidráulicos). Constituido por una capa de base tratada con ligantes hidráulicos, o de concreto, la sub-base suele ser de material granular, pudiendo ser estabilizada, el pavimento está formado por una o dos capas de mezcla asfáltica (rodadura e intermedia). (Rodríguez, 2004)

d) Pavimentos Rígidos. (Pavimentos de concreto hidráulico). Están formados por una losa de hormigón colocada directamente sobre la explanada, o sobre una capa de base granular o estabilizada o un hormigón pobre, la losa de hormigón actúa como capa de rodadura (Rodríguez, 2004).

Para la elaboración de mezclas asfálticas de granulometría densa existen varios métodos uno de ellos es el método SUPERPAVE y el más utilizado en México es la metodología Marshall que será la utilizada para esta investigación, por lo cual a continuación se presentan las diferencias de un método a otro:

La compactación giratoria de probetas de 101mm de diámetro, produce densidades que no difieren significativamente de la mezcla asfáltica compactada con el martillo Marshall, ya que en todos los casos las densidades difieren en menos de 20 kg/m³. (Rosa Zuñiga C., 2006)

El contenido óptimo de asfalto con la metodología SUPERPAVE resultó mayor en promedio 31% con respecto al obtenido por Marshall. Esto es para probetas de 101mm de diámetro y 63mm de altura. Por otro lado, al analizar los porcentajes de asfalto utilizando como criterio sólo el contenido de vacíos, las diferencias bajan drásticamente, aunque siempre manteniéndose la tendencia de SUPERPAVE a entregar mayores porcentajes. (Rosa Zuñiga C., 2006)

Para la mezcla de agregado estudiada, el porcentaje óptimo de cemento asfáltico obtenido por el método SUPERPAVE, es superior al obtenido mediante el método Marshall. Si se fija un porcentaje de vacíos de aire, se tiene como diferencia un porcentaje de cemento asfáltico prácticamente constante para todos los asfaltos, lo que indicaría que esta diferencia se debe principalmente a la granulometría del agregado. (Rosa Zuñiga C., 2006)

Se ha investigado que las probetas elaboradas por la metodología Marshall mostraron valores de TSR menores que las elaboradas en el compactador giratorio, lo que indica que mediante el compactador giratorio se consiguen mezclas con mejor cohesión. (Rosa Zuñiga C., 2006)

Existe un aspecto que se debe considerar al comparar ambos métodos, y es el hecho de que al diseñar con SUPERPAVE, la mezcla permanece en un horno a 135°C durante 2 horas, lo cual produce envejecimiento. Es por esto que se está realizando pruebas para comparar la influencia de este factor en los resultados. (Rosa Zuñiga C., 2006)

El compactador giratorio (método SUPERPAVE) tiene una mayor versatilidad que el martillo Marshall, ya que permite fabricar probetas asfálticas con diferentes relaciones de altura-dimensión, lo que permite realizar más pruebas mecánicas. Por otro lado, una ventaja del método Marshall es la facilidad que presenta para llevar a cabo acciones de control de calidad en terreno. (Rosa Zuñiga C., 2006)

7.2. Mezcla asfáltica en caliente.

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente. Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los pavimentos. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 8% de asfalto en volumen de agregados pétreos.

7.2.1. Definiciones.

Gravedad específica bruta (Gsb). Se determina midiendo la masa seca y el volumen bruto de una muestra de agregado (ASTM C-127 o ASTM C-128). El volumen bruto incluye el volumen del sólido del agregado más el volumen de agua contenida en los poros superficiales. El volumen bruto se mide para la condición del agregado saturado y superficialmente seco. (S.A., 2013)

Gravedad específica aparente (Gsa). Se obtiene midiendo la masa seca y el volumen aparente de la muestra del agregado (ASTM C-127 o ASTM C-128). El volumen aparente solo incluye el volumen del sólido del agregado y no incluye el volumen de los poros de la superficie. (S.A., 2013)

Gravedad específica efectiva (Gse). Se calcula usando la masa seca y el volumen efectivo del agregado. El volumen efectivo incluye el volumen de los

sólidos del agregado y el volumen de los poros de superficie llenos de agua pero no con asfalto. (S.A., 2013)

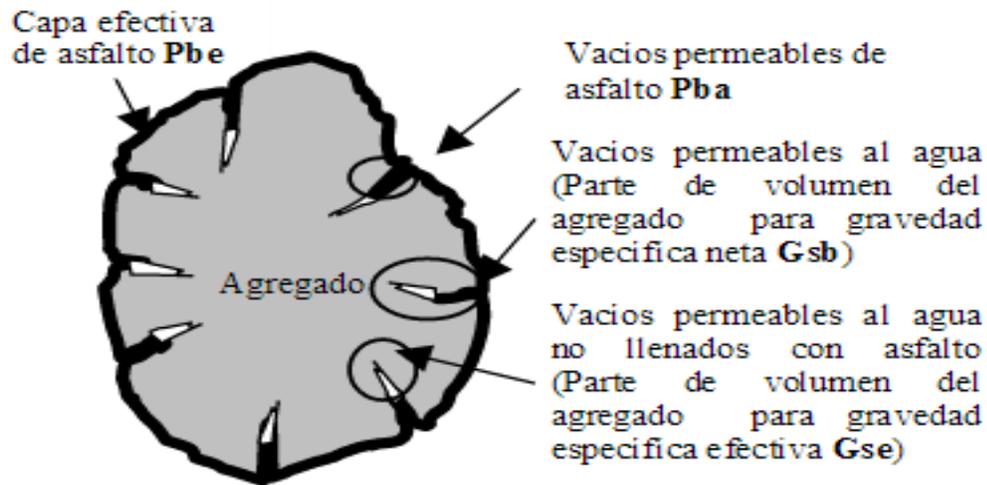


Imagen 7.- Diagrama general de el acomodo asfalto-agregado. (S.A., 2013)

Gravedad específica del cemento asfáltico (G_b). Es la relación entre la masa de un volumen dado de cemento asfáltico y el peso de igual volumen de agua (ASTM D-70). Generalmente los valores varían entre 1.015 y 1.050. (S.A., 2013)

Gravedad específica bruta de la mezcla compactada (G_{mb}). Como el modelo está compuesto de distintos materiales, la gravedad específica de la muestra compactada se llama gravedad específica bruta y corresponde a la densidad de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D1188 o D-2726). (S.A., 2013)

Gravedad específica teórica máxima (G_{mm}). Para un contenido de asfalto dado, la gravedad específica teórica máxima (G_{mm}) es la masa del agregado más asfalto, dividido por el volumen de ambos componentes, sin incluir el volumen de los vacíos de aire. La gravedad específica teórica máxima es una propiedad muy útil porque se emplea como referencia para calcular otras importantes propiedades como el contenido de vacíos (V_a). (S.A., 2013)

Contenido de asfalto efectivo (P_{be}). Es la cantidad de masa de cemento asfáltico no absorbido. (S.A., 2013)

Contenido de asfalto absorbido (P_{ba}). Es la concentración de masa del cemento asfáltico absorbido por el agregado. Normalmente se expresa como porcentaje de la masa del agregado. (S.A., 2013)

Contenido de vacíos de aire (Va). Es la concentración. En volumen, del aire en la muestra de mezcla asfáltica compactada. Los vacíos de aire se expresan siempre como un porcentaje del volumen total de la mezcla. (S.A., 2013)

Vacíos del agregado mineral (VAM). Es el espacio intergranular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla asfáltica compactada y se expresa como porcentaje del volumen total. Generalmente, no se considera como parte del VAM, el volumen de asfalto absorbido. El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen de asfalto efectivo (Pbe) y el volumen necesarios de aire en la mezcla. Valores mínimos de VAM son necesarios para asegurar un adecuado espesor de película de asfalto que contribuye a la durabilidad de la mezcla. (S.A., 2013)

Vacíos llenos con asfalto (VFA). Es el porcentaje de VAM que contiene asfalto. El concepto de VFA es utilizado para asegurar que el porcentaje de asfalto efectivo (Pbe) no sea demasiado pequeño como para producir una mezcla poco durable, o demasiado alto como para obtener una mezcla demasiado inestable. El rango aceptable de VFA depende del nivel del tránsito. Altos niveles de tránsito requieren menores porcentajes de VFA, debido a que en estas condiciones la resistencia y estabilidad de las mezclas son la mayor preocupación. Bajos niveles de tránsito requieren porcentajes de VFA mayores para garantizar la durabilidad de la mezcla asfáltica. Si los porcentajes de VFA son demasiado altos, la mezcla asfáltica se vuelve susceptible a presentar deformaciones plásticas. (S.A., 2013).

7.2.2. Método de diseño Marshall.

La metodología Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulada por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrollo un criterio de diseño de mezclas. (Anguas, Alamilla, & Sandoval, 2005)

El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38 mm (1.5"). Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar. (Anguas, Alamilla, & Sandoval, 2005)

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64mm (2 ½”) y 102 mm (4”) de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado.(ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. Las características que debe de cumplir de acuerdo a la normativa propuesta por la SCT se muestra en la tabla no.40.

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100”) que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

El análisis de densidad y vacíos se hace sobre las mezclas compactadas y con las relaciones volumétricas y gravimétricas que se conocen para determinación de la cantidad de asfalto, agregados y porcentaje de vacíos como lo son los vacíos en el agregado (VAM) en la mezcla asfáltica (Va), los vacíos llenos de asfalto (VAF), al igual también se determina las densidades de la mezcla asfáltica.

Finalmente con estos parámetros analizados se determina el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla en estudio de acuerdo a los requisitos de calidad de la normativa de la secretaria.

Es necesario señalar que esta metodología es adecuada para medir la capacidad estructural de la mezcla como es la estabilidad que es necesario cumplir con los parámetros establecido para evitar fenómenos como el ahuellamiento y la deformación o el flujo que es necesario el cumplimiento para asegurar la resistencia ante las cargas vehiculares sin presentar fractura o falla; sin embargo, para futuras investigaciones será necesario realizar ensayos como el TSR para asegurar también su funcionalidad de una manera más amplia.

A continuación en la tabla no.40 se presentan los requisitos de calidad que debe cumplir el diseño de la mezcla asfáltica.

Tabla 40.- Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante método Marshall.

Fuente (SCT, CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CARRETERAS, 2008)

Características	Número de ejes equivalentes de diseño ΣL [1]	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$10^6 < \Sigma L \leq 10^7$ [2]
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lb.), mínimo	5 340 (1 200)	8 000 (1 800)
Flujo; mm (10^{-2} in)	2 - 4 (8 - 16)	2 - 3,5 (8 - 14)
Vacios en la mezcla asfáltica (VMC); %	3 - 5	3 - 5
Vacios ocupados por el asfalto (VFA); %	65 - 78	65 - 75

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Para tráficos mayores de 10^7 ejes equivalentes de 8,2 t, se requiere un diseño especial de la mezcla.

7.3. Diseño Marshall con agregado pétreo 100% natural.

Para este primer diseño de control o prueba testigo se diseñara para un tráfico de más de un millón de ejes equivalentes y hasta diez millones de ejes equivalentes el cual tiene que diseñarse para las especificaciones marcadas por la normativa de la SCT por el método de diseño Marshall.

El material en estudio es proveniente de la región de Morelia, Michoacán con un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ "; estos agregados pétreos naturales fueron obtenidos del banco de material llamado la Roka ubicado en la carretera Morelia - Uriangato 634, Cuto del Porvenir, Mich, México los cuales son producto de la trituración de las canteras cercanas del banco es material 100% triturado tanto la grava, sello y arena.

7.3.1. Granulometría agregado pétreo 100% natural.

La granulometría establecida para esta metodología tendrá que cumplir con las especificaciones para granulometría densa especificada por la normativa de la SCT, en la cual la ordenada se encuentra el porcentaje que pasa por cierta malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica.

La elección de la curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada, está en función de dos parámetros: que es el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control que es la superior e inferior estas líneas son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. A continuación se presentan los valores establecidos por la SCT para una mezcla asfáltica densa con tamaño nominal de 19mm o $\frac{3}{4}$ ".

Tabla 41.- Tabla de tamaños para curva granulométrica.

Fuente (SCT, MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS, 2008)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (In)				
Abertura mm	Designación	9,5 (¾)	12,5 (½)	19 (¾)	25 (1)	37,5 (1½)
Porcentaje que pasa						
50	2"	---	---	---	---	100
37,5	1½"	---	---	---	100	90 - 100
25	1"	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	¾"	---	100	90 - 100	79 - 90	62 - 79
12,5	½"	100	90 - 100	72 - 90	58 - 71	46 - 60
9,5	¾"	90 - 100	76 - 90	60 - 76	47 - 60	39 - 50
5,3	¾"	70 - 81	56 - 69	44 - 57	35 - 46	30 - 39
4,75	Nº4	56 - 69	45 - 59	37 - 48	30 - 39	25 - 34
2	Nº10	28 - 42	25 - 36	20 - 28	17 - 24	13 - 21
0,86	Nº20	18 - 27	16 - 22	12 - 19	8 - 16	6 - 13
0,425	Nº40	13 - 20	11 - 16	8 - 14	5 - 11	3 - 9
0,25	Nº60	10 - 15	8 - 13	6 - 11	4 - 9	2 - 7
0,15	Nº100	5 - 12	5 - 10	4 - 8	2 - 7	1 - 5
0,075	Nº200	2 - 7	2 - 6	2 - 5	1 - 4	0 - 3

En las tablas 42, 43 y figura 5, se enlistan algunas recomendaciones para la elección del tipo de granulometría. Para nuestro caso será una granulometría gruesa de tamaño de 19mm ya que será para fines estructurales.

Tabla 42.-Tipo de granulometrías dependiendo del proyecto (S.A., 2013).

Tamaño de mezcla	Granulometría fina	Granulometría gruesa
37,5 mm (1 ½")	< 47% Pasando malla de 9,5	> 47% Pasando malla de 9,5
25,0 mm (1")	< 40% Pasando malla de 4,75	> 40% Pasando malla de 4,75
19,0 mm (¾")	< 47% Pasando malla de 4,75	> 47% Pasando malla de 4,75
12,5 mm (½")	< 39% Pasando malla de 2,36	> 39% Pasando malla de 2,36
9,5 mm (¾")	< 47% Pasando malla de 2,36	> 47% Pasando malla de 2,36
4,75 mm (Malla número 4)	N/A (granulometría no estándar)	

Tabla 43.- Características de los distintos tipos de granulometría (S.A., 2013).

Granulometría fina	Granulometría gruesa
Menor permeabilidad	Permite elevaciones de espesor (<25 mm TN)
Trabajabilidad (<25 mm TN)	Incrementa la macrotextura (<25 mm TN)
Espesores delgados (<25 mm TN)	Mejor estructura interna (friccionante)
Mayor durabilidad en carreteras de tránsito bajo a medio	Elevada durabilidad en todos los tipos de proyecto
Textura lisa (<25 mm TN)	

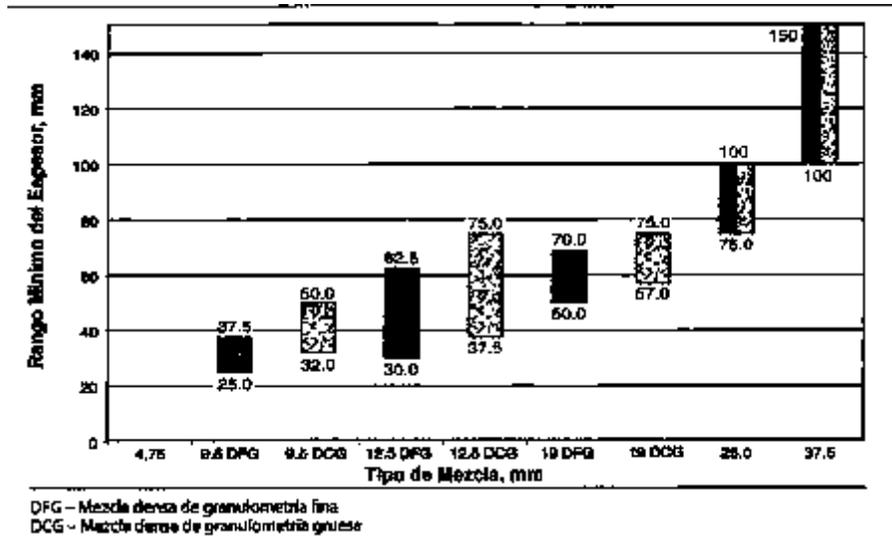


Figura 5.-Recomendación para el rango mínimo del espesor para mezclas de granulometría densa. (S.A., 2013)

Para la elección del tamaño nominal de la mezcla asfáltica se debe de seguir la recomendación de acuerdo al espesor que necesitemos de la carpeta. Como se muestra en la figura 5.

Se realizó la prueba mediante diseño Marshall con agregado pétreo 100% natural el cual nos arrojó los siguientes resultados.

El proporcionamiento de agregado está dentro de la granulometría densa que establece la normativa.

Tabla 44.- Curva granulometría para diseño con 100% agregado pétreo natural.

MALLAS	% QUE PASA	DEL PROYECTO
" 25.4 (1")	100	100
" 19.0 (3/4")	98	90-100
" 12.5 (1/2")	83	72-90
" 9.5 (3/8")	69	60-76
" 6.3 (1/4")	50	44-57
" 4.75 (Nº 4)	44	37-48
" 2.00 (Nº 10)	25	20-29
" 0.850 (Nº 20)	16	12-19
" 0.425 (Nº 40)	10	8-14
" 0.250 (Nº 60)	8	6-11
" 0.150 (Nº 100)	6	4-8
" 0.075 (Nº 200)	4	2-5

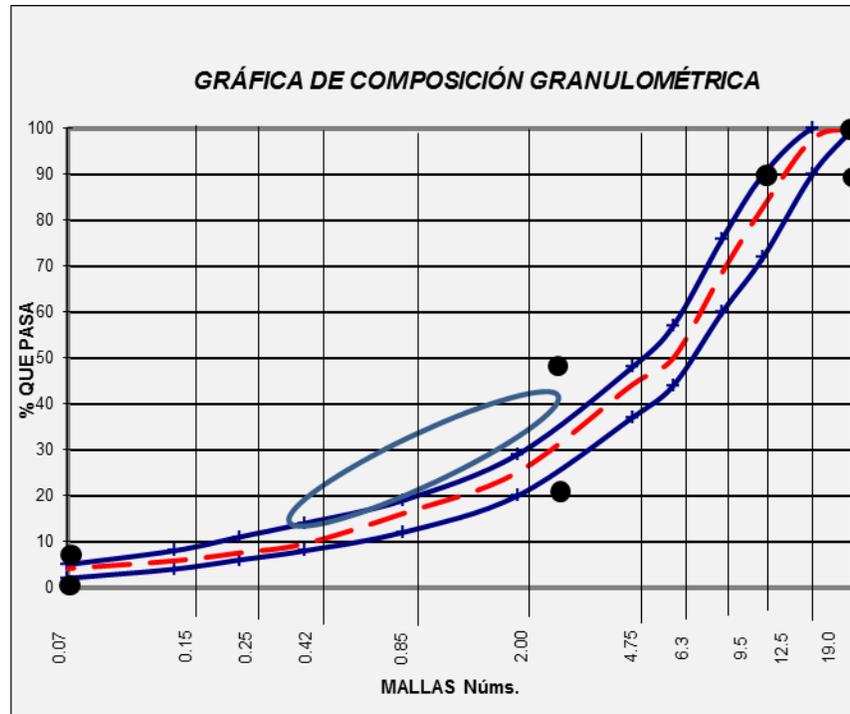


Figura 6.- Curva granulométrica para diseño 100% agregado pétreo natural.

Tabla 45.- Tabla de proporcionamiento de material pétreo para 100% agregado natural.

		CANTIDAD DE MATERIAL REQUERIDO												
		MALLAS	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	4	10	20	40	60	100	200
% QUE PASA	GRAVA	100	92.26	43.25	3.2	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0
	SELLO	100	100	100	91.64	25.83	6.39	0	0	0	0	0	0	0
	ARENA	100	100	100	100	100	100	98.76	58.43	37.52	22.23	17.52	13.55	9.59
	SUMA	100	98	83	69	50	44	25	16	10	8	6	4	2-5
		100	100	90-100	72-90	60-76	44-57	37-48	20-29	12-19	8-14	6-11	4-8	2-5

Se puede observar que con un porcentaje en masa del 30% de grava, 27% de sello y 43% de arena es la proporción óptima para que nuestra curva granulométrica entre en el límite establecido por la normativa mexicana.

7.3.2. Determinación del contenido mínimo de asfalto.

Para la elaboración del diseño se elaboran probetas de dimensiones de 106mm de diámetro por 64 mm de alto en diferentes porcentajes de asfalto para obtener el contenido óptimo de asfalto. Para esto primeramente se deberá conocer el

porcentaje mínimo de asfalto para tener un punto de partida. A continuación se muestra el procedimiento a seguir.

Existen dos procedimientos para la determinación del contenido óptimo. Uno que llamado superficie específica y el otro es la fórmula analítica de la SCT. Para nuestro caso se utilizara el método de la superficie específica.

El método se basa en la estimación aproximada de la superficie total del agregado pétreo en función de la granulometría. Conocida el área total para un kilogramo de material, se obtendrá el contenido mínimo de asfalto multiplicando dicho valor por el índice asfáltico. Para calcular la superficie total del agregado se emplearan las constantes de área que se darán en la tabla no. 46, las cuales están expresadas en metros cuadrados de superficie por kilogramo de material pétreo.

Procedimiento:

- La determinación del porcentaje de asfalto se hará calculando los contenidos parciales por los tamaños seleccionados en la tabla 48, multiplicando el porcentaje del material de cada tamaño por la constante de área correspondiente, y este producto a su vez se multiplicara por el índice asfáltico que deberá aplicarse a cada una de las fracciones.
- La suma de los contenidos parciales dará el contenido total de la muestra.
- El valor de índice asfáltico varía con la rugosidad y porosidad del agregado pétreo, aplicándose los valores medios que se dan en la tabla 47.
- Estos valores estarán dados en kilogramos de cemento asfáltico por m² de superficie de agregado pétreo.

Tabla 46.- Constante de área.

Material	Se retiene en malla	Constante de área (m ² /kg)
1 1/2"	3/4"	0.27
3/4"	No.4	0.41
No.4	No.40	2.05
No.40	No.200	15.38
No.200		53.30

Tabla 47.-Índice asfáltico.

MATERIAL	Índice asfáltico
Gravas o arenas de río o materiales redondeados de baja absorción.	0.0055
Gravas angulosas o redondeadas, trituradas de baja absorción.	0.0060
Gravas angulosas o redondeadas de alta absorción y rocas trituradas de media absorción.	0.0070
Rocas trituradas de alta absorción.	0.0080

Tabla 48.- Cálculo de contenido mínimo de asfalto.

FRACCION	% QUE PASA (A)	CONSTANTE DE AREA (B)	SUPERFICIE (C) ((A/100)*B)	INDICE ASFALTICO (D)	CONTENIDO PARCIAL DE ASFALTO % (E) (C*D)*100
3/4" - No. 4	55.81	0.41	0.2288	0.0075	0.17160929
No.4 - No.40	34.63	2.05	0.7100	0.0075	0.53248545
No.40 - No. 200	5.44	15.38	0.8359	0.0075	0.62695032
PASA No. 200	4.12	53.30	2.1979	0.0075	1.64844908
TOTAL	100.00		3.9727		2.98

% MINIMO DE CEMENTO ASFALTICO	2.98
% MINIMO DE CEMENTO ASFALTICO + 25%	3.72

Por lo tanto el contenido mínimo de asfalto será de 3.72%

7.3.3. Prueba a los materiales.

No.	Prueba.	Valor obtenido.
1	PVSS grava.	1.41 gr/cm ³
2	PVSS arena.	1.59 gr/cm ³
3	Densidad específica efectiva.	2.72 gr/cm ³
4	Densidad específica bruta.	2.67gr/cm ³
5	Absorción.	1.68%
6	Desgaste de los Ángeles.	15%
7	Partículas alargadas y lajeadas.	34%
8	Equivalente de arena.	66.3%

9	Densidad del asfalto.	1.03 gr/cm ³
10	Viscosidad cinemática a 135 °C.	533.98 m ² /s
11	Viscosidad (temperatura de compactación y mezclado).	165°C-159°C (mezclado) 152°C-147°C (compactación).
12	Determinación del contenido mínimo de asfalto.	3.72% C.A. respecto al peso del agregado.

7.3.4. Parámetros volumétricos.

Las propiedades volumétricas en la mezcla asfáltica son una propiedad fundamental para un diseño adecuado con contenido óptimo de asfalto. Los parámetros más importantes son: los vacíos en la mezcla (V_a), vacíos en el agregado mineral (VAM), vacíos llenados con asfalto (VFA), y el contenido de asfalto efectivo (P_{be}), estos parámetros nos pueden dar un indicativo de como funcionara la mezcla asfáltica.

A continuación se muestra un esquema de las relaciones volumétricas en una mezcla asfáltica compactada.

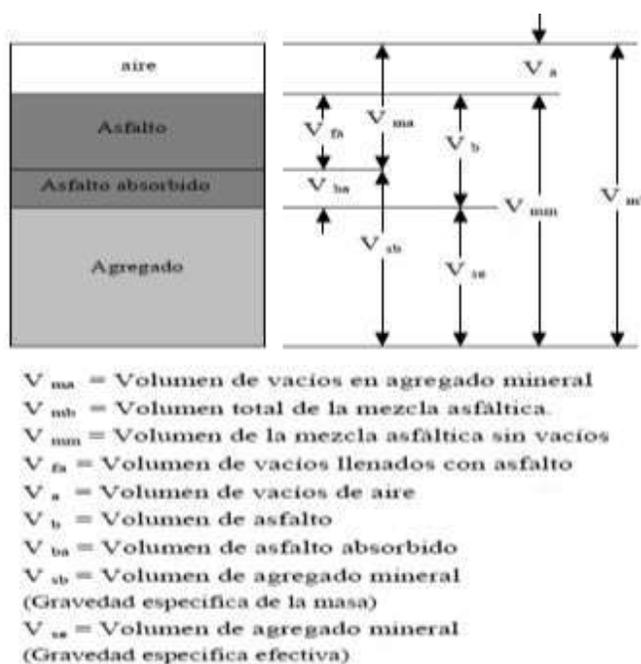


Figura 7. Distribución volumétrica de una mezcla asfáltica. Fuente (ALAMILLA, LÓPEZ, & ANGUAS)

7.3.5. Diseño del contenido óptimo de asfalto para agregado pétreo 100% natural.

Se procede a elaborar las probetas para la determinación del contenido óptimo de asfalto, como el porcentaje mínimo de asfalto fue de 3.7% se procederá a empezar a partir de 5% de asfalto respecto al peso del agregado.

Se elaboraron 3 pastillas por porcentaje empezando por 5% a continuación se presenta la tabla del proporcionamiento de material para la elaboración de las pastillas.

Se realizó la corrección por altura ya que el peso inicial para cada pastilla que recomienda el manual de la metodología es de 1200gr, pero esa cantidad de material produce pastillas más altas que las marcadas en el manual así que se procedió a hacer la corrección quedando como cantidad de material de 1070gr por pastilla.

Tabla 49.- Proporcionamiento corregido para la elaboración de pastillas con agregado 100% natural.

MALLAS	PESO POR MALLA(gr)	ACUM. POR MALLA (gr)
1"	0	0
3/4"	24.85	24.85
1/2"	157.32	182.17
3/8"	152.71	334.88
1/4"	200.27	535.15
No. 4	62.00	597.14
No. 10	204.02	801.16
No. 20	96.21	897.37
No. 40	70.35	967.72
No. 60	21.67	989.39
No. 100	18.27	1007.66
No. 200	18.22	1025.88
CHAROLA	44.12	1070.00
TOTAL	1070	0

A continuación se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos para cada porcentaje, cabe señalar que el resultado mostrado en la tabla es el promedio de las tres pastillas de cada porcentaje para cada rubro.

Tabla 50.- Resumen de cálculos para pastillas Marshall con 100% agregado natural.

%C.A. respecto al agregado	PE (Kg/m3)	%VA	%VAM	%VAF	ESTAB.(kg)	FLUJO (mm)	CEMENTO ASFALTICO %	MATERIAL PETREO %	%ASF. EFECTIVO	%ASF. ABSORBIDO
5	2259.41	10.44	19.41	46.19	608	5.08	10.45	79.11	8.96	1.48
5.5	2270.83	9.37	19.38	51.71	790	3.85	11.49	79.13	10.01	1.48
6	2314.59	7.00	18.22	61.62	775	3.30	12.72	80.28	11.22	1.50
6.5	2328.48	5.82	18.11	67.90	794	3.30	13.80	80.38	12.29	1.51
7	2382.57	3.00	16.60	81.92	831	3.18	15.13	81.86	13.60	1.53

Una vez evaluados los resultados se llegó al contenido óptimo de asfalto; el contenido óptimo será aquel contenido de asfalto que cumpla con los requerimientos establecidos por la normativa de la SCT para su adecuado comportamiento. Los requisitos se muestran en la tabla no.52.

Tabla 52.- Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñada mediante método Marshall. Fuente (SCT, CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CARRETERAS, 2008)

Características	Número de ejes equivalentes de diseño ΣL [1]	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$10^6 < \Sigma L \leq 10^7$ [2]
Compactación: número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad: N (lb.), mínimo	5 340 (1 200)	8 000 (1 800)
Flujo: mm (10 ⁻² in)	2 - 4 (8 - 16)	2 - 3.5 (8 - 14)
Vacios en la mezcla asfáltica (VMC): %	3 - 5	3 - 5
Vacios ocupados por el asfalto (VFA): %	65 - 78	65 - 75

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento.
 [2] Para tránsito mayores de 10⁷ ejes equivalentes de 8,2 t, se requiere un diseño especial de la mezcla.

Tabla 51. Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall. Fuente (SCT, CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CARRETERAS,

Tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla [1]		Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC) de diseño %		
		3	4	5
mm	Designación	Vacíos en el agregado mineral (VAM) %, mínimo		
9,5	3/4"	14	15	16
12,5	1/2"	13	14	15
19	3/4"	12	13	14
25	1"	11	12	13
37,5	1 1/2"	10	11	12

[1] El tamaño nominal corresponde al indicado en la Cláusula D. de la Norma NCMT-404, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, para el tipo y granulometría del material pétreo utilizado en la mezcla.

En la tabla No. 53 se muestra el resumen para el contenido óptimo de asfalto.

Tabla 53.- Diseño con óptimo de asfalto con 100% agregado pétreo natural.

CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA	ESPECIFICACIONES	
	OBTENIDOS	PARTICULARES
CONTENIDO OPTIMO DE C.A. (%)	6.66	-
PESO ESPECIFICO (kg/cm³)	2,347	-
ESTABILIDAD, Kg.	809	816 MIN
VACIOS %	4.80	3-5
FLUJO	3.24	2-3.5
V.A.M. %	17.6	14 MIN
V.A.F. %	72.7	65 - 75
ESPECIMEN COMPACTADO CON 75 GOLPES DEL PISON POR CARA A LA TEMPERATURA DE	160 °C	

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a cada rubro de análisis necesario para el adecuado funcionamiento de la carpeta asfáltica para un tránsito mayor a un millón de ejes equivalentes y hasta diez millones.

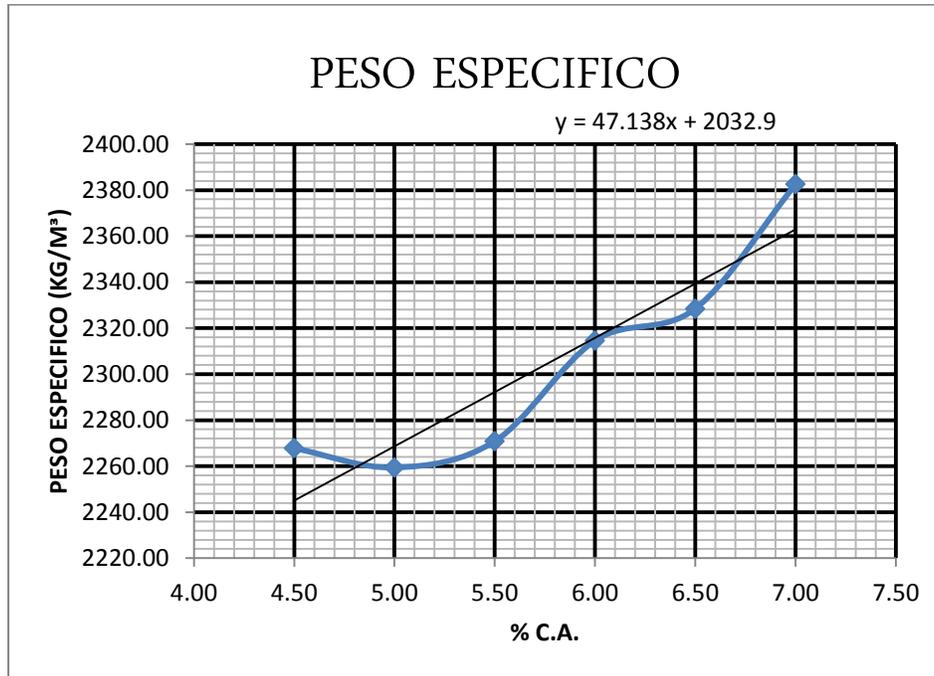


Figura 8.- Peso específico para agregado pétreo 100% natural.

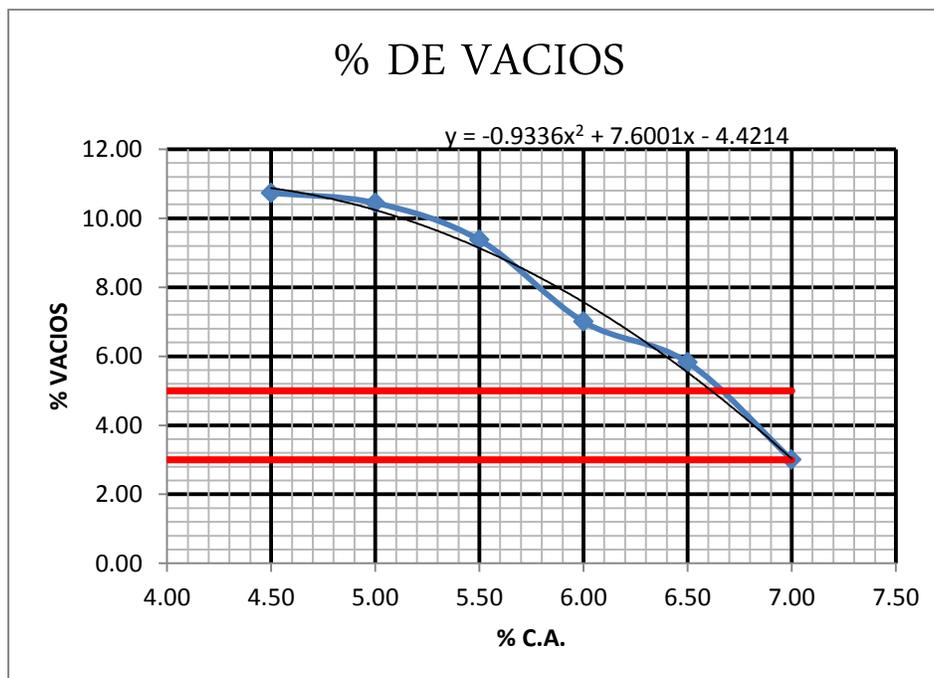


Figura 9.- % de vacíos para agregado pétreo 100% natural.

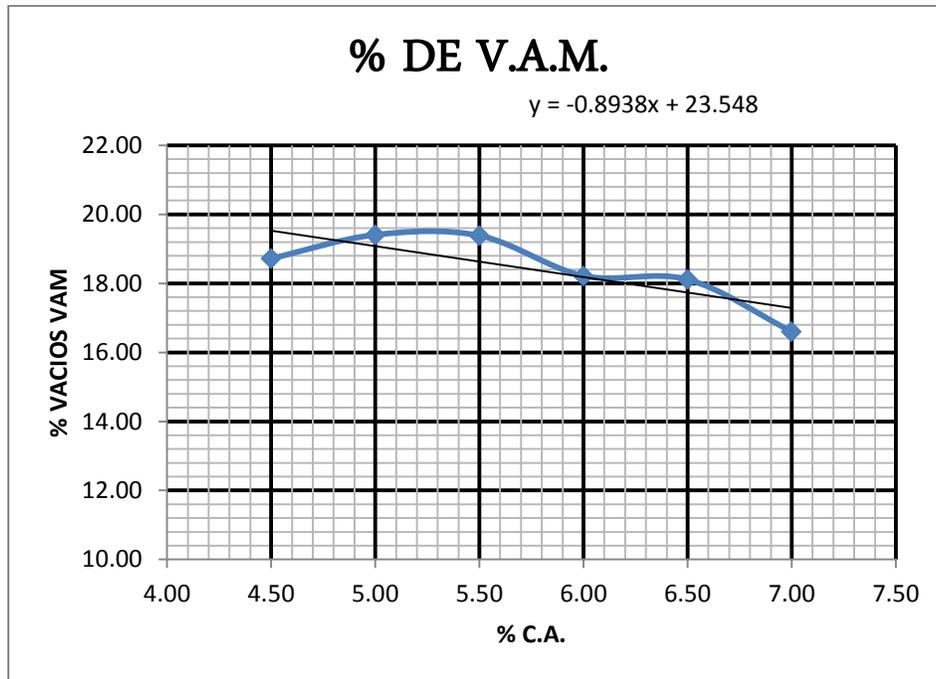


Figura 10.-% de VAM para agregado pétreo 100% natural.

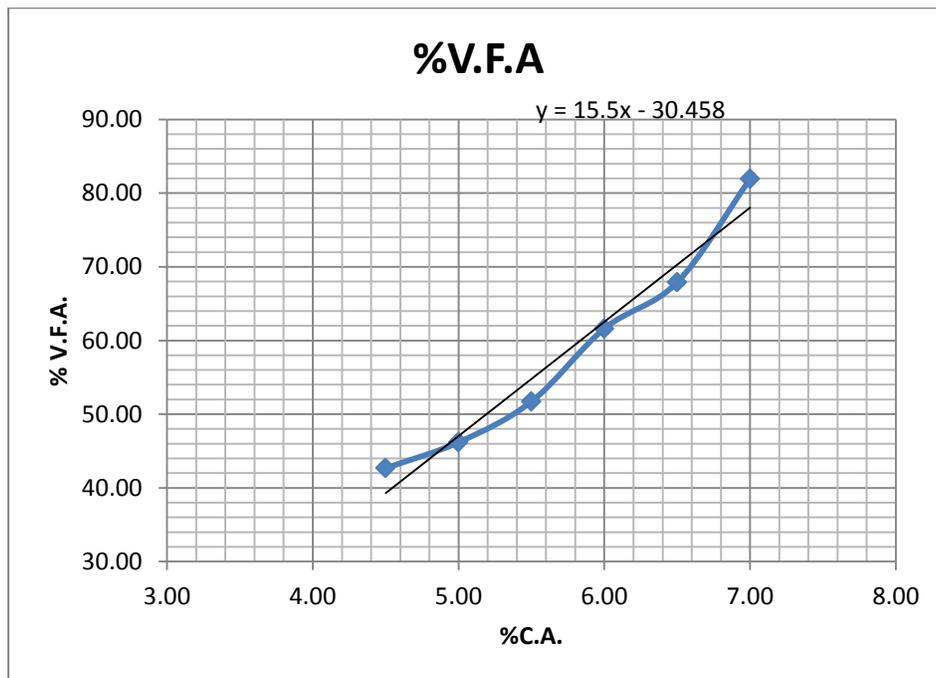


Figura 11.- % de VFA para agregado pétreo 100% natural.

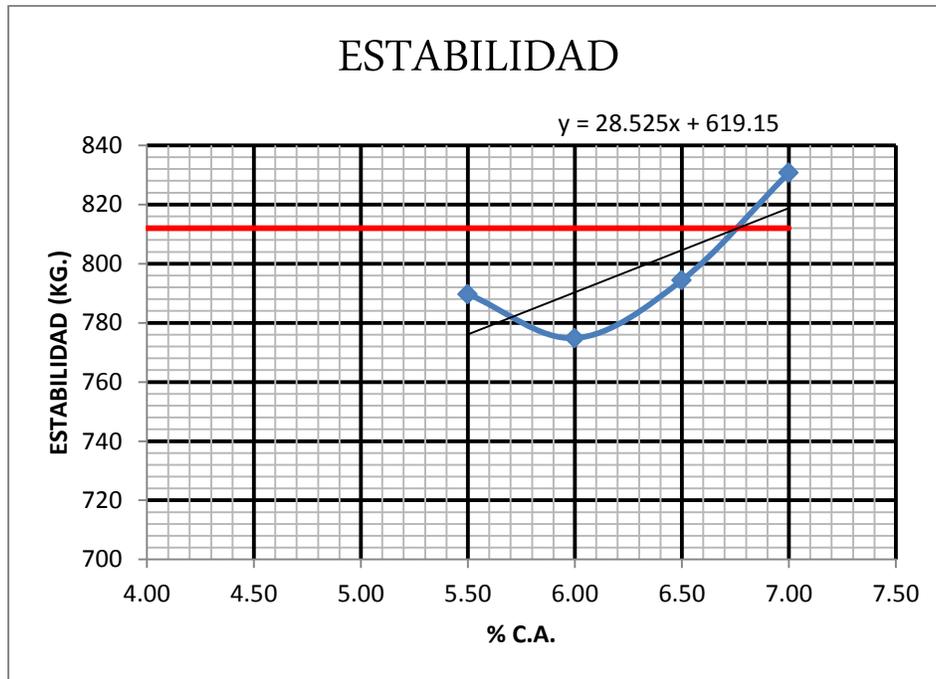


Figura 12. -Estabilidad para agregado pétreo 100% natural.

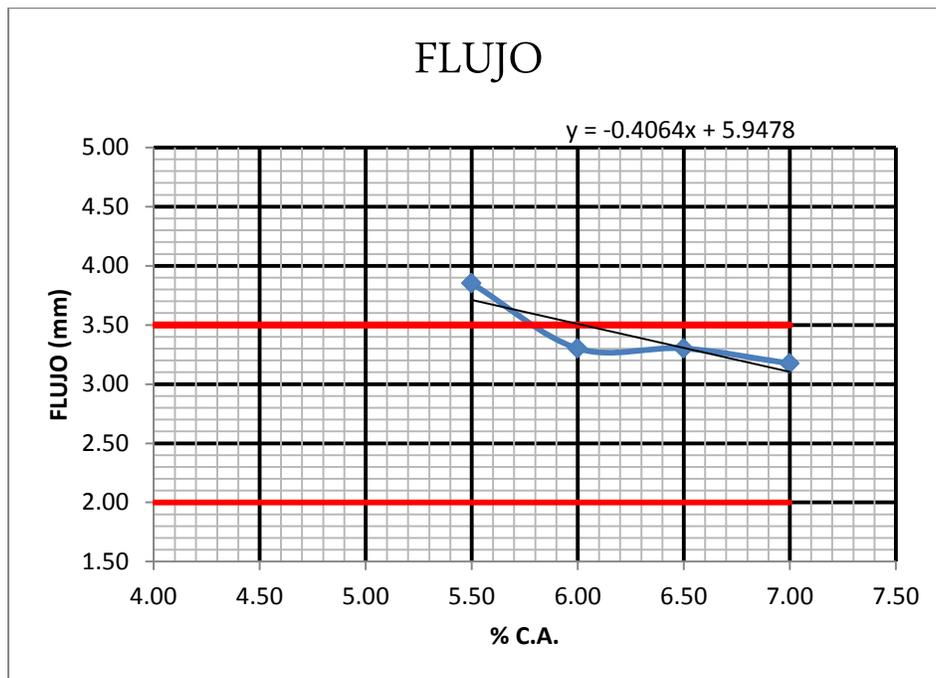


Figura 13.- Flujo para agregado pétreo 100% natural.

7.3.6. Análisis de desprendimiento por fricción.

Objetivo.

Determinar el porcentaje de pérdida de capa de asfalto en el agregado sometiendo la mezcla asfáltica a condiciones críticas en agua en ebullición durante 15 min según la normativa ASTM D3625.

Resultados.

Después de la inmersión de la mezcla asfáltica en el agua en ebullición durante 15 minutos se observó como se muestra en las siguientes fotos que no presenta desprendimiento de la capa de asfalto de agregado por lo que podemos concluir que hay buena afinidad de asfalto agregado.



Imagen 10.- Preparación de la mezcla

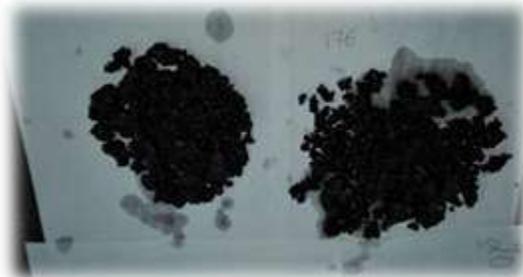


Imagen 8.- Comparación de la muestra acondiciona vs. No acondicionada.



Imagen 9.- Mezcla sometida a fricción por ebullición

7.3.7. Análisis volumétrico y gravimétrico de la mezcla asfáltica compactada para agregado pétreo 100% natural.

$G_{mb}=2.347\text{gr/cm}^3$

VAM 17.6%	4.89%	Aire		
	12.73%	Asfalto efectivo	0.131gr	0.146gr
		$G_b=1.03\text{gr/cm}^3$		
	1.49%	Asfalto absorbido	0.0153gr	
	80.9%	Agregado	2.20gr	
		$G_{sb}=2.67\text{gr/cm}^3$		
		$G_{se}=2.72\text{ gr/cm}^3$		

Lo más significativo a resaltar es el consumo de asfalto para este diseño que será de 146 kg de asfalto por metro cubico de mezcla asfáltica compactada y 2200 kg por metro cubico de mezcla de agregado; datos que nos servirá como punto de comparación para las mezclas con agregados reciclados.

7.3.8. Análisis de los resultados del diseño 100% agregado pétreo natural.

- De acuerdo a los resultados obtenidos en las gráficas podemos observar que cumple con todos los parámetros establecidos por la normativa de la SCT para el adecuado funcionamiento de la carpeta asfáltica.
- Si bien los vacíos en la mezcla están un poco en el límite superior pero cumple con lo marcado en la norma. Si se quisiera llegar a un 4% de vacíos se tendría que incrementar el porcentaje de asfalto pero esto también podría ser perjudicial si es en exceso ya que posiblemente rebasaría los vacíos llenos de asfalto lo que podría causar comportamiento anómalo en la mezcla como formación de roderas.
- Por otra parte la estabilidad de la mezcla está un poco en el límite esto se puede deber también a que el agregado tiene muy pocos poros y es poco rugoso por tratarse de un material triturado para generar ese engranaje entre asfalto-agregado reflejándose en baja estabilidad y mayor fluencia ante las cargas. Esto aunado a que el porcentaje de material aplanado y lajeado está casi en el límite lo que pudiera provocar este comportamiento.
- Al igual el flujo da dentro de lo establecido por la normativa mexicana lo cual significa que en cuanto a deformación cumplirá bien porque el agregado es resistente a la compresión generada por los vehículos sobre la mezcla asfáltica.

Este diseño será nuestra muestra control y servirá como punto de comparación con las mezclas con porcentajes de agregado reciclado.

7.4. Diseño Marshall con agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.

Este será un diseño con material RCD en 10% en masa del total del agregado y 90% de agregado natural. El árido reciclado (RCD) es un árido obtenido de residuos de concreto de construcción y demolición que han llegado al final de su vida útil el cual primero tiene que pasar por una gestión adecuada la cual ya se ha explicado brevemente con anterioridad, llevando a cabo una adecuada gestión será posible que los residuos de construcción y demolición puedan ser aprovechables y con características similares a las de un agregado natural virgen y así poder utilizarlo en pavimentos asfálticos (REVUELTA, 2010).

Este material de estudio fue obtenido de la recolección de residuos de concreto de la torre del IMSS la cual fue demolida en años anteriores, también el material está integrado por residuos de concreto que ha sido utilizado en el laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas”.

El tamaño nominal utilizado será de $\frac{3}{4}$ " o 19mm del reciclado en combinación con el material natural.

La mezcla será diseñada con los mismos parámetros de granulometría gruesa y con función estructural como se diseñó para la muestra de control la única variante será la sustitución del agregado RCD en 10% del total de la masa. Para esta prueba se sustituyó solamente grava por RCD esto debido a las experiencias y estudios realizados anteriormente los cuales indican que el agregado RCD que pasa la malla no.4 presenta más inconsistencias y ya no es adecuado para la elaboración de mezclas asfálticas.

7.4.1. Granulometría agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.

La granulometría para este agregado tendrá que cumplir con todas las especificaciones estipuladas por la curva granulométrica propuesta por la SCT para carreteras con tamaño nominal de 19mm.

Tabla 54.- Características del material pétreo 90% natural 10% reciclado.

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL PÉTREO	COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA	MALLAS	% QUE PASA	DEL PROYECTO	
		" 25.4 (1")	100		100
		" 19.0 (3/4")	95		90-100
		" 12.5 (1/2")	81		72-90
		" 9.5 (3/8")	69		60-76
		" 6.3 (1/4")	50		44-57
		" 4.75 (Nº4)	44		37-48
		" 2.00 (Nº10)	25		20-29
		" 0.850 (Nº20)	16		12-19
		" 0.425 (Nº40)	10		8-14
		" 0.250 (Nº60)	8		6-11
		" 0.150 (Nº100)	6		4-8
		" 0.075 (Nº200)	4		2-5
DENSIDAD	2.64		2.5 MIN.		
ABSORCIÓN %	4.08				
DESGASTE %	16		30 MAX.		
% DE TRITURACIÓN	100		100 MIN.		
PART. ALARGADAS Y/O LAJADAS %	34		35 MAX.		
EQUIV. DE ARENA %	66.0		65 MIN.		
CONTRACCIÓN LINEAL %	0.0		2 MAX.		

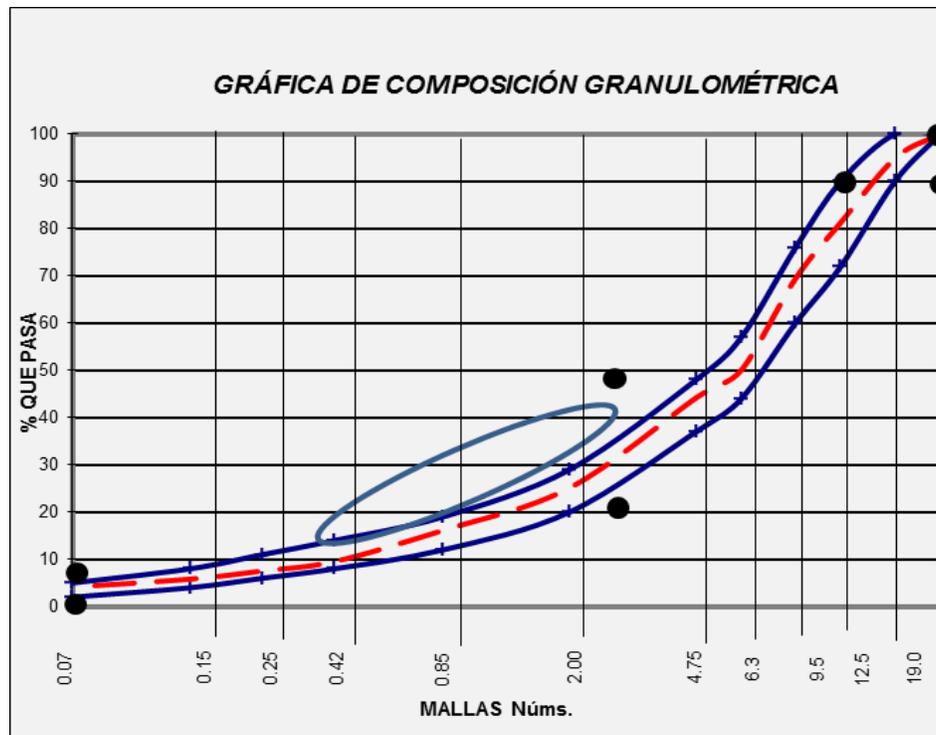


Figura 14.- Curva granulométrica 90% agregado pétreo natural y 10% RCD.

Tabla 55.- Tabla de proporcionamiento para 90% agregado pétreo natural y 10% de RCD.

		CANTIDAD DE MATERIAL REQUERIDO											
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	4	10	20	40	60	100	200
% QUE PASA	MALLAS	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	GRAVA	100	92.26	43.25	3.2	0.04	0	0	0	0	0	0	0
	SELLO	100	100	100	91.54	25.83	6.39	0	0	0	0	0	0
	RECICLADO	100	64.21	26.41	10.66	1	0	0	0	0	0	0	0
	ARENA	100	100	100	100	100	98.76	88.43	37.52	22.23	17.52	13.56	9.59
GRAVA	20	20	18	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	SELLO	27	27	27	25	7	2	0	0	0	0	0	0
	RECICL	10	10	6	3	1	0.10	0	0	0	0	0	0
	ARENA	43	43	43	43	43	42	25	15	10	5	6	4
	SUMA	100	95	81	69	50	44	25	16	10	8	6	4
	100	100	90-100	72-90	60-76	44-57	37-48	20-29	12-19	8-14	6-11	4-8	2-5

Como se observa en las gráfica de la figura no.14 y la tabla no.55 se hace la sustitución del agregado RCD por la grava solamente, así obteniendo un porcentaje de 10% de RCD, 20% de grava, 27% de sello y 43% de arena. También podemos observar en la figura 14 que cumple perfectamente con la curva estipulada por la SCT para mezclas asfálticas.

7.4.2. Determinación del contenido mínimo de asfalto.

Se realiza de la misma forma que está estipulada en el apartado 7.3.2 donde se explica el procedimiento para determinar el contenido mínimo de asfalto.

A continuación se muestra la tabla de cálculo siguiendo lo especificado en el apartado 7.3.2.

FRACCION	% QUE PASA	CONSTANTE DE AREA	SUPERFICIE	INDICE ASFALTICO	CONTENIDO PARCIAL DE ASFALTO %
3/4" - No. 4	55.81	0.41	0.2288	0.008	0.18304991
No.4 - No.40	34.63	2.05	0.7100	0.0075	0.53248545
No.40 - No. 200	5.44	15.38	0.8359	0.0075	0.62695032
PASA No. 200	4.12	53.30	2.1979	0.0075	1.64844908
TOTAL	100.00		3.9727		2.99

% MINIMO DE CEMENTO ASFALTICO	2.99
% MINIMO DE CEMENTO ASFALTICO + 25%	3.74

El contenido mínimo es muy parecido al del agregado 100% natural, varia por dos centésimas lo cual es prácticamente lo mismo. Por lo tanto se tomó la determinación de comenzar en 5%.

7.4.3 Resumen de pruebas a los agregados pétreos 90% naturales y 10% reciclado.

No.	Prueba.	Valor obtenido.
1	PVSS RCD.	1.066 gr/cm ³
2	PVSS natural.	1.41 gr/cm ³
3	PVSS arena.	1.59 gr/cm ³
4	Densidad específica efectiva.	2.64 gr/cm ³
5	Densidad específica bruta.	2.50gr/cm ³
6	Absorción.	4.08%
7	Desgaste de los Ángeles.	16.3%
8	Partículas alargadas y lajeadas.	34%

9	Equivalente de arena.	66.3%
10	Densidad del asfalto.	1.03 gr/cm ³
11	Viscosidad cinemática a 135 °C.	533.98 m ² /s
12	Viscosidad (temperatura de compactación y mezclado).	165°C-159°C (mezclado) 152°C-147°C (compactación).
13	Determinación del contenido mínimo de asfalto.	3.74% C.A. respecto al peso del agregado.

7.4.4 Diseño óptimo de asfalto con agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.

Se procede a elaborar las probetas para la determinación del contenido óptimo de asfalto, como el porcentaje mínimo de asfalto fue de 3.7% se procederá a empezar a partir de 5% de asfalto respecto al peso del agregado.

Se elaboraron 3 pastillas por porcentaje empezando por 5% hasta completar mínimo 6 diferentes porcentajes en forma ascendente; a continuación se presenta la tabla del proporcionamiento de material para la elaboración de las pastillas.

Se realizó la corrección por altura ya que el peso inicial para cada pastilla que recomienda el manual de la metodología es de 1200gr, pero esa cantidad de material produce pastillas más altas que las marcadas en el manual así que se procedió a hacer la corrección quedando como cantidad de material de 1040gr por pastilla.

Tabla 56.- Tabla de proporcionamiento de para la elaboración de las pastillas Marshall.

MALLAS	PESO DEL RECICLADO	PESO DE GRAVA	PESO POR MALLA
1"	0	0	0
3/4"	37.2216	16.0992	53.3208
1/2"	39.312	101.9408	141.2528
3/8"	16.38	106.77888	123.15888
1/4"	10.0464	191.36728	201.41368
No. 4	1.04	60.216	61.256
No. 10	0	0	198.29888
No. 20	0	0	93.50952
No. 40	0	0	68.37688
No. 60	0	0	21.06312
No. 100	0	0	17.75384
No. 200	0	0	17.70912
CHAROLA	0	0	42.88648
TOTAL			1040

A continuación en la tabla 57 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada porcentaje, cabe señalar que el resultado mostrado en la tabla es el promedio de las tres pastillas de cada porcentaje para cada rubro.

Tabla 57.- Tabla resumen de pastillas Marshall con agregado pétreo 90% natural 10% RCD.

%C.A. respecto al agregado	PE (Kg/m3)	%VA	%VAM	%VAF	ESTAB.(kg)	FLUJO (mm)	CEMENTO ASFALTICO %	MATERIAL PETREO %	%ASF. EFECTIVO	%ASF. ABSORBIDO
5.5	2222.82	8.94	15.72	43.13	686.83	3.98	11.25	79.81	6.78	4.47
6	2236.41	7.79	15.61	50.13	870.73	3.39	12.29	79.92	7.81	4.48
6.5	2258.43	6.29	15.18	58.66	796.90	3.56	13.38	80.33	8.88	4.50
7	2256.66	5.78	15.64	63.09	894.56	3.47	14.33	79.89	9.86	4.47
7.5	2247.00	5.60	16.39	65.87	863.48	3.89	15.22	79.18	10.79	4.43

Una vez evaluados los resultados se llegó al contenido óptimo de asfalto; el contenido óptimo será aquel contenido de asfalto que cumpla con los requerimientos establecidos por la normativa de la SCT para su adecuado comportamiento. En la siguiente tabla se muestra el resumen para el contenido óptimo de asfalto.

Tabla 58.- Contenido óptimo de asfalto para agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.

CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA	ESPECIFICACIONES	
	OBTENIDOS	PARTICULARES
CONTENIDO OPTIMO DE C.A. (%)	7.60	-
PESO ESPECIFICO (kg/cm³)	2,259	-
ESTABILIDAD, Kg.	905	816 MIN
VACIOS %	4.97	3-5
FLUJO	3.64	2-3.5
V.A.M. %	16.0	14 MIN
V.A.F. %	69.0	65 - 75
ESPECIMEN COMPACTADO CON 75 GOLPES DEL PISON POR CARA A LA TEMPERATURA DE	160 °C	

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a cada rubro de análisis necesario para el adecuado funcionamiento de la carpeta asfáltica para un tránsito mayor a un millón de ejes equivalentes y hasta diez millones.

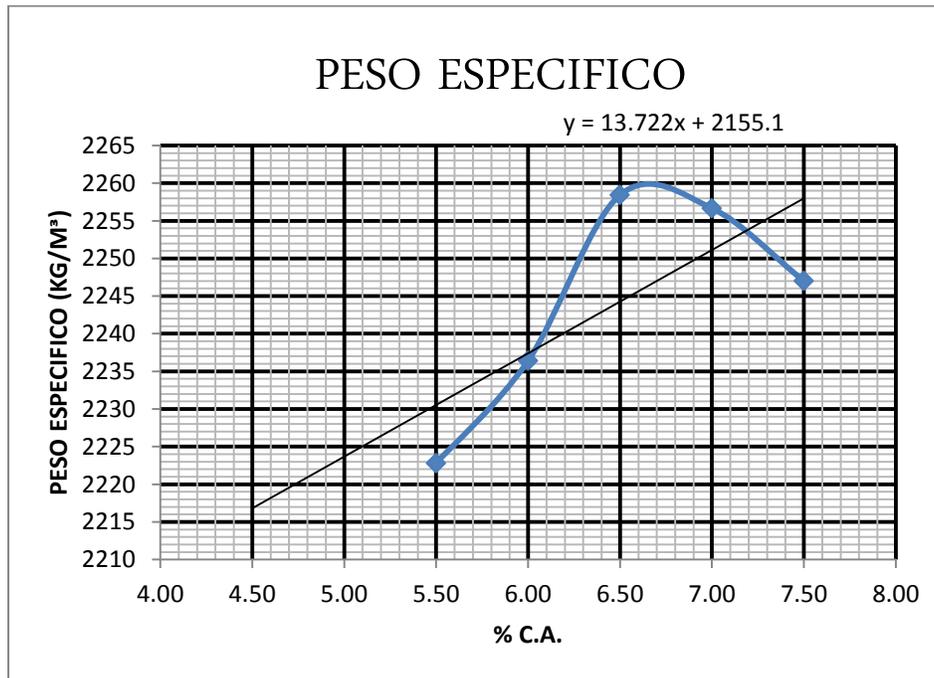


Figura 15.- Peso específico para agregado pétreo 90% natural 10% RCD.

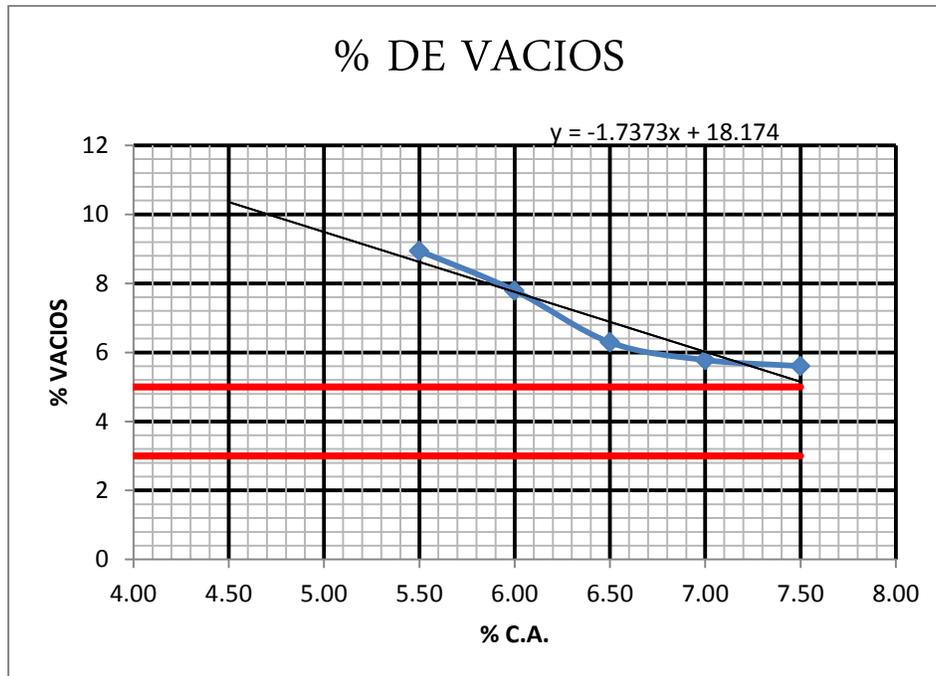


Figura 16.- % de vacíos en mezcla para agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.

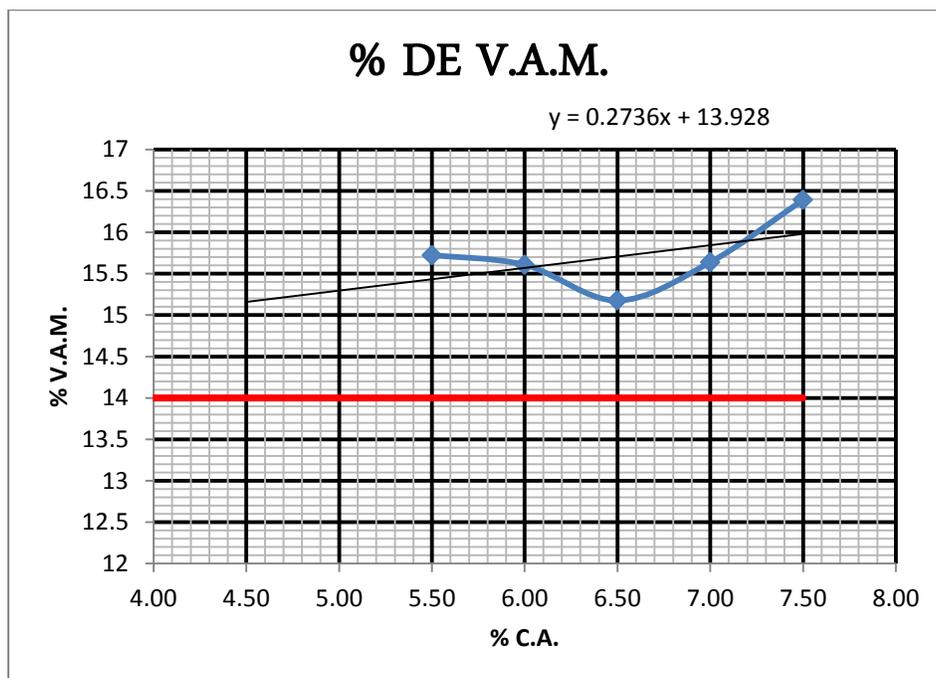


Figura 17.- % de VAM para agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.

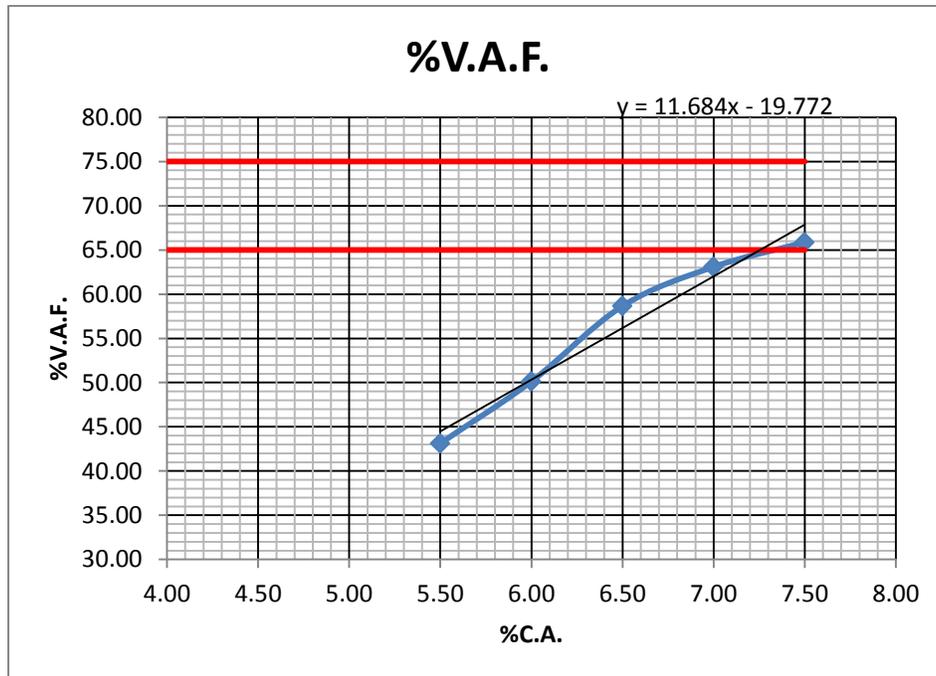


Figura 18.-%VAF para agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.

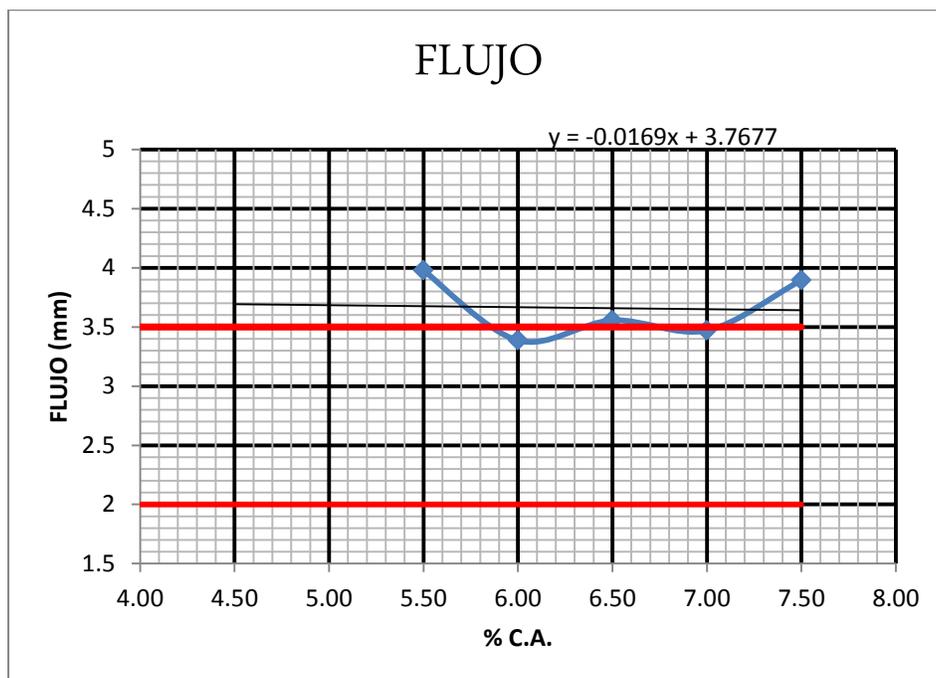


Figura 19.- Flujo para agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.

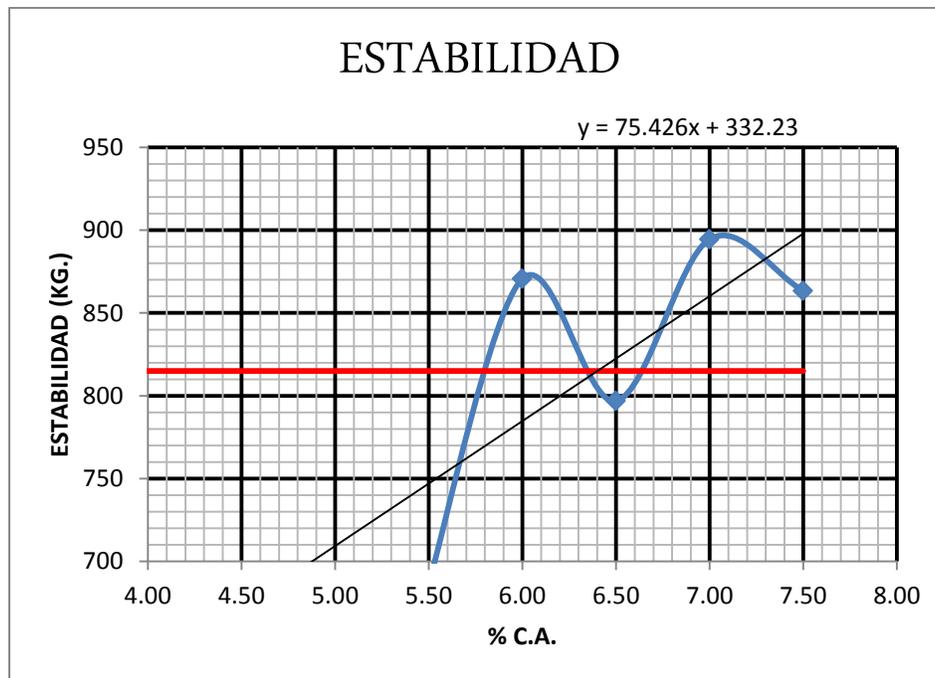


Figura 20.- Estabilidad para agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.

7.4.5. Análisis de desprendimiento por fricción para mezcla con agregados pétreos 90% natural y 10% RCD.

Objetivo.

Determinar el porcentaje de pérdida de capa de asfalto en el agregado sometiendo la mezcla asfáltica a condiciones críticas en agua en ebullición durante 15 min según la normativa ASTM D3625.

Resultados.

Después de la inmersión de la mezcla asfáltica en el agua en ebullición durante 15 minutos se observó como se muestra en las siguientes fotos que prácticamente no presenta desprendimiento de la capa de asfalto de agregado, quizá como numero podríamos decir que será 1% de desprendimiento de asfalto por mucho, por lo que podemos concluir que hay buena afinidad de asfalto agregado.

Reporte fotográfico.



Imagen 12.- Muestra en ebullición



Imagen 11.- Observación de la muestra después de la prueba.

7.4.6. Análisis volumétrico y gravimétrico de la mezcla asfáltica compactada.

$G_{mb}=2.259\text{gr/cm}^3$

VAM 16.02%	4.98%	Aire		
	11.04%	Asfalto efectivo	113.7kg	159.50kg
		$G_b=1.03\text{gr/cm}^3$		
	4.45%	Asfalto absorbido	45.8kg	
	79.52%	Agregado	2099.5kg	
		$G_{sb}=2.50\text{gr/cm}^3$		
		$G_{se}=2.67\text{gr/cm}^3$		

Lo más significativo a resaltar es el consumo de asfalto para este diseño que será de 159.5 kg de asfalto por metro cubico de mezcla asfáltica compactada y 2099.5 kg de agregado por metro cubico de mezcla; estos datos nos servirá como punto de comparación para las mezclas con agregados naturales. Los resultados y comparaciones detalladas se presentaran en el capítulo 8.

7.4.7. Análisis de los resultados para diseño con agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.

- En esta prueba de sustitución del 10% de RCD la diferencia más prominente es la del contenido de asfalto.

- Se analizó porque sucedía este salto y es debido a que al cambiar un 10% de material de origen natural por RCD este material contiene más poros y por lo tanto más absorción de asfalto aunado a que el material natural tiene muchos poros que no son penetrables por el asfalto debido a que son muy pequeños también se requiere un poco de más asfalto para cumplir con el porcentaje de vacíos estipulado por la SCT para este diseño el porcentaje de vacíos está muy en el límite superior pero cumple perfectamente todos los parámetros como se ve en la tabla 58 donde se muestra el vaciado de los valores de estabilidad, flujo, V_a , VAM, VFA y densidad de la mezcla compactada de vacíos.
- También es de interés señalar que el flujo está en el límite de deformación estipulada por la SCT, esto debido a que el asfalto es una cantidad mayor respecto a una mezcla convencional, esto para cumplir con los vacíos, sin embargo se puede utilizar este diseño perfectamente para caminos de bajo tránsito para menos de un millón de ejes equivalentes.
- Otro aspecto importante que se observa es que ya con la inclusión del agregado reciclado la cantidad de masa de agregado por metro cubico disminuye lo que puede significar un pequeño ahorro, esta disminución es debida a la densidad del material ya que el material reciclado es menor por lo tanto es necesaria menos masa de material por metro cubico de carpeta asfáltica compactada para llegar a los espesores estipulados.

7.5. Diseño Marshall con agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.

En este ensayo se analizó mediante el método Marshall en sustitución con el 20% de RCD de material grueso solamente. El tamaño nominal es de 19mm igual que la muestra testigo.

La mezcla será diseñada con los mismos parámetros de granulometría gruesa y con función estructural como se diseñó para la muestra de control la única variante será la sustitución del agregado RCD en 20% del total de la masa. Para esta prueba se sustituyó solamente grava por RCD esto debido a las experiencias y estudios realizados anteriormente de que el agregado RCD que pasa la malla no.4 presenta más inconsistencias y ya no es adecuado para la elaboración de mezclas asfálticas.

7.5.1. Granulometría agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.

La granulometría para este agregado tendrá que cumplir con todas las especificaciones estipuladas por la curva granulométrica propuesta por la SCT para carreteras con tamaño nominal de 19mm.

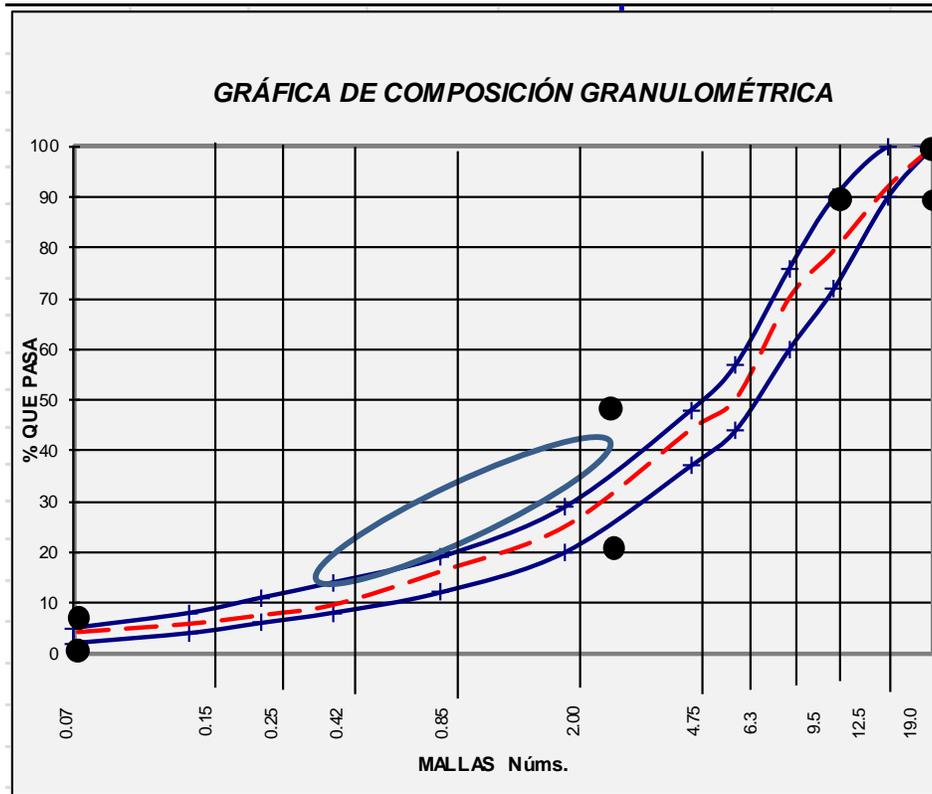


Figura 21.- Curva granulométrica de agregado pétreo con 80% natural y 20% RCD.

Se puede observar que la curva se pega a un poco al límite inferior lo que significa que la granulometría para este diseño será ligeramente con material más grueso, pero hay que señalar que a pesar de esto sigue estando dentro de los rangos establecidos.

Tabla 59.- Características del agregado pétreo 80% natural 20% RCD.

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL PÉTREO	COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA	MALLAS	% QUE PASA	DEL PROYECTO
		" 25.4 (1")	100	100
		" 19.0 (3/4")	92	90-100
		" 12.5 (1/2")	80	72-90
		" 9.5 (3/8")	70	60-76
		" 6.3 (1/4")	50	44-57
		" 4.75 (Nº4)	44	37-48
		" 2.00 (Nº10)	25	20-29
		" 0.850 (Nº20)	16	12-19
		" 0.425 (Nº40)	10	8-14
		" 0.250 (Nº60)	8	6-11
		" 0.150 (Nº100)	6	4-8
		" 0.075 (Nº200)	4	2-5
		DENSIDAD	2.56	2.5 MIN.
		ABSORCIÓN %	6.88	
DESGASTE %	18	30 MAX.		
% DE TRITURACIÓN PART. ALARGADAS Y/O LAJADAS %	100	100 MIN.		
EQUIV. DE ARENA %	66.3	65 MIN.		
CONTRACCIÓN LINEAL	0.0	2 MAX.		

		CANTIDAD DE MATERIAL REQUERIDO											
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	4	10	20	40	60	100	200
% QUE PASA	MALLAS	100	92.26	80	70	50	44	25	16	10	6	4	
	GRAVA	100	92.26	43.25	3.2	0.04	0	0	0	0	0	0	0
	SELLO	100	100	100	91.64	25.83	6.38	0	0	0	0	0	0
	RECICLADO	100	64.21	26.41	10.66	1	0	0	0	0	0	0	0
	ARENA	100	100	100	100	100	96.76	58.43	37.52	22.23	17.52	13.55	9.56
GRAVA	GRAVA	10	10	9	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	SELLO	27	27	27	27	25	7	2	0	0	0	0	0
	RECICL	20	20	13	5	2	0.20	0	0	0	0	0	0
	ARENA	43	43	43	43	43	43	42	25	16	10	6	4
	SUMA	100	92	80	70	50	44	25	16	10	6	4	
		100	100	90-100	72-90	60-76	44-57	37-48	20-29	12-19	8-14	6-11	4-8

Como se observa en la figura no.21 y tabla no.59 se hace la sustitución del agregado RCD por la grava solamente, así obteniendo un porcentaje de 20% de RCD, 10% de grava, 27% de sello y 43% de arena. También podemos observar en la figura 21 que cumple perfectamente con la curva estipulada por la SCT para mezclas asfálticas.

7.5.2. Determinación del contenido mínimo de asfalto.

Se realiza de la misma forma que está estipulada en el apartado 7.3.2 donde se explica el procedimiento para determinar el contenido mínimo de asfalto.

A continuación se muestra la tabla de cálculo siguiendo lo especificado en el apartado 7.3.2.

FRACCION	% QUE PASA	CONSTANTE DE AREA	SUPERFICIE	INDICE ASFALTICO	CONTENIDO PARCIAL DE ASFALTO %
3/4" - No. 4	55.81	0.41	0.2288	0.008	0.18304991
No.4 - No.40	34.63	2.05	0.7100	0.0075	0.53248545
No.40 - No. 200	5.44	15.38	0.8359	0.0075	0.62695032
PASA No. 200	4.12	53.30	2.1979	0.0075	1.64844908
TOTAL	100.00		3.9727		2.99

% MINIMO DE CEMENTO ASFALTICO	2.99
% MINIMO DE CEMENTO ASFALTICO + 25%	3.74

El contenido mínimo es muy parecido al del agregado 100% natural, varia por dos centésimas lo cual es prácticamente lo mismo. Por lo tanto se tomó la determinación de comenzar en 5%.

7.5.3 Resumen de pruebas a los agregados con agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.

No.	Prueba.	Valor obtenido.
1	PVSS RCD	1.066 gr/cm ³
2	PVSS grava	1.41gr/cm
3	PVSS arena	1.59gr/cm ³
4	Densidad específica efectiva.	2.55 gr/cm ³
5	Densidad específica bruta.	2.32gr/cm ³
6	Absorción.	6.88%
7	Desgaste de los Ángeles.	17.6%
8	Partículas alargadas y lajeadas.	33.7%
9	Equivalente de arena.	66.3%
10	Densidad del	1.03 gr/cm ³

	asfalto.	
11	Viscosidad cinemática a 135 °C.	533.98 m ² /s
12	Viscosidad (temperatura de compactación y mezclado).	165°C-159°C (mezclado) 152°C-147°C (compactación).
13	Determinación del contenido mínimo de asfalto.	3.74% C.A. respecto al peso del agregado.

7.5.4. Diseño óptimo de asfalto con agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.

Se procede a elaborar las probetas para la determinación del contenido óptimo de asfalto, como el porcentaje mínimo de asfalto fue de 3.7% se recomienda aumentar en un porciento el contenido mínimo de acuerdo a experiencias profesionales, se procederá empezar a partir de 5% de asfalto respecto al peso del agregado.

Se elaboraron 3 pastillas por porcentaje empezando por 5% hasta completar mínimo 6 diferentes porcentajes en forma ascendente; a continuación se presenta la tabla del proporcionamiento de material para la elaboración de las pastillas.

Se realizó la corrección por altura ya que el peso inicial para cada pastilla que recomienda el manual de la metodología es de 1200gr, pero esa cantidad de material produce pastillas más altas que las marcadas en el manual así que se procedió a hacer la corrección quedando como cantidad de material de 1040gr por pastilla.

Tabla 60.- Proporcionamiento para la elaboración de pastillas Marshall con agregado pétreo 80% natural 20% RCD.

MALLAS	PESO DEL RECICLADO	PESO DE GRAVA	PESO POR MALLA
1"	0	0	0
3/4"	37.2216	16.0992	53.3208
1/2"	39.312	101.9408	141.2528
3/8"	16.38	106.77888	123.15888

1/4"	10.0464	191.36728	201.41368
No. 4	1.04	60.216	61.256
No. 10	0	0	198.29888
No. 20	0	0	93.50952
No. 40	0	0	68.37688
No. 60	0	0	21.06312
No. 100	0	0	17.75384
No. 200	0	0	17.70912
CHAROLA	0	0	42.88648
TOTAL			1040

El procedimiento para la elaboración, volumetrías y prueba en la prensa Marshall de las pastillas se realizó de acuerdo a lo descrito en el manual propuesto por el Asphalt Institute llamado "Marshall Mix Design" y la normativa española NLT-159/00.

A continuación se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos para cada porcentaje, cabe señalar que el resultado mostrado en la tabla es el promedio de las tres pastillas de cada porcentaje para cada rubro.

Tabla 61.-Tabla resumen de las pastillas Marshall con agregado pétreo 80% natural 20% RCD.

%C.A. respecto al agregado	PE (Kg/m3)	%VA	%VAM	%VAF	ESTAB.(kg)	FLUJO (mm)	CEMENTO ASFALTICO %	MATERIAL PETREO %	%ASF. EFECTIVO	%ASF. ABSORBIDO
5	2167.57	9.02	11.02	18.11	864.4	2.75	10.02	80.96	2.00	8.03
5.5	2187.73	7.61	10.62	28.36	840.5	3.47	11.07	81.32	3.01	8.06
6	2186.55	7.09	11.09	36.05	752.4	3.56	12.02	80.89	4.00	8.02
6.5	2199.95	5.96	10.96	45.67	790.9	3.34	13.04	81.01	5.00	8.03
7	2179.34	6.28	12.48	47.38	856.9	3.49	13.80	79.62	5.91	7.89



Imagen 14.- acondicionamiento a 60°C



Imagen 13.- Prueba en la prensa Marshall.

Una vez evaluados los resultados se llegó al contenido óptimo de asfalto; el contenido óptimo será aquel contenido de asfalto que cumpla con los requerimientos establecidos por la normativa de la SCT para su adecuado comportamiento. En la siguiente tabla se muestra el resumen para el contenido óptimo de asfalto.

Tabla 62.-Optimo de asfalto para agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.

CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA	ESPECIFICACIONES	
	OBTENIDOS	PARTICULARES
CONTENIDO OPTIMO DE C.A. (%)	7.61	-
PESO ESPECIFICO (kg/cm ³)	2,196	-
ESTABILIDAD, Kg.	983	815 MIN
VACIOS %	4.90	3-5
FLUJO	3.76	2-3.5
V.A.M. %	12.3	13 MIN
V.A.F. %	59.5	65 - 75
ESPECIMEN COMPACTADO CON 75 GOLPES DEL PISON POR CARA A LA TEMPERATURA DE	160 °C	

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a cada rubro de análisis necesario para el adecuado funcionamiento de la carpeta asfáltica para un tránsito mayor a un millón de ejes equivalentes y hasta diez millones.

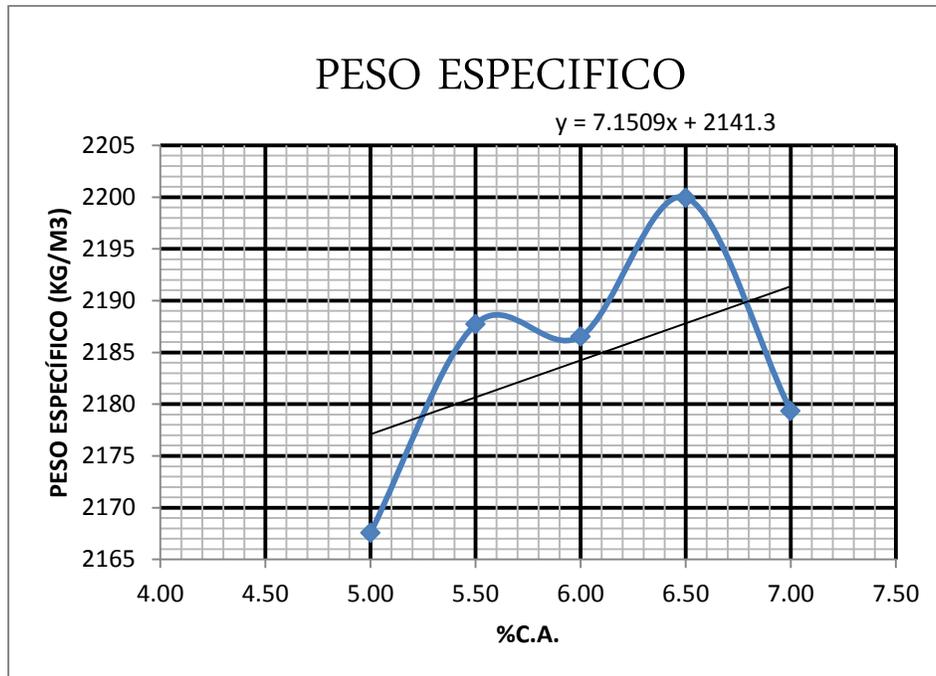


Figura 22.- Peso específico para agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.

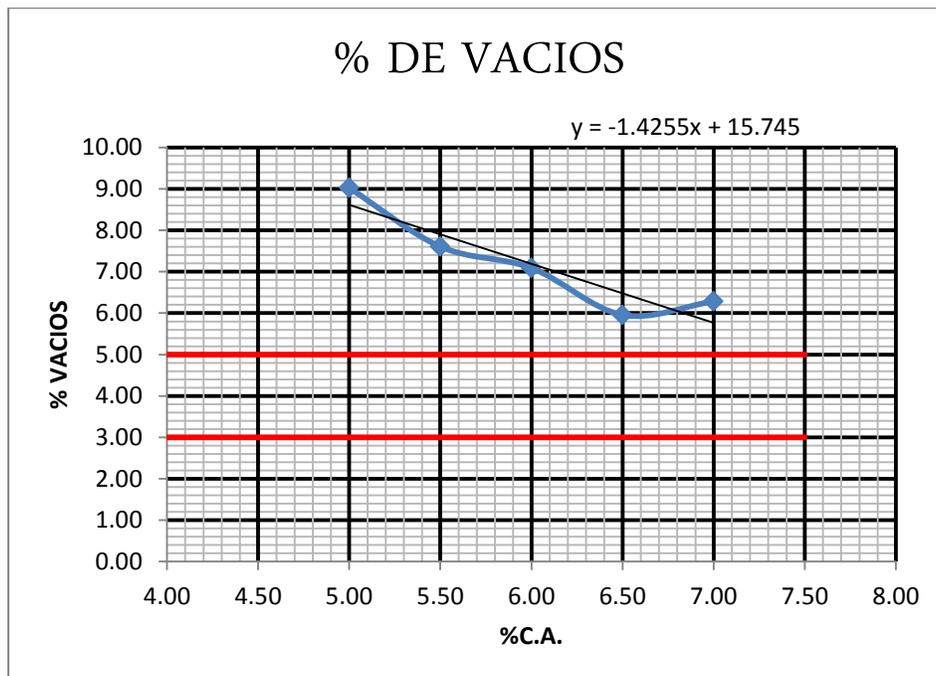


Figura 23.- % De vacíos para agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.

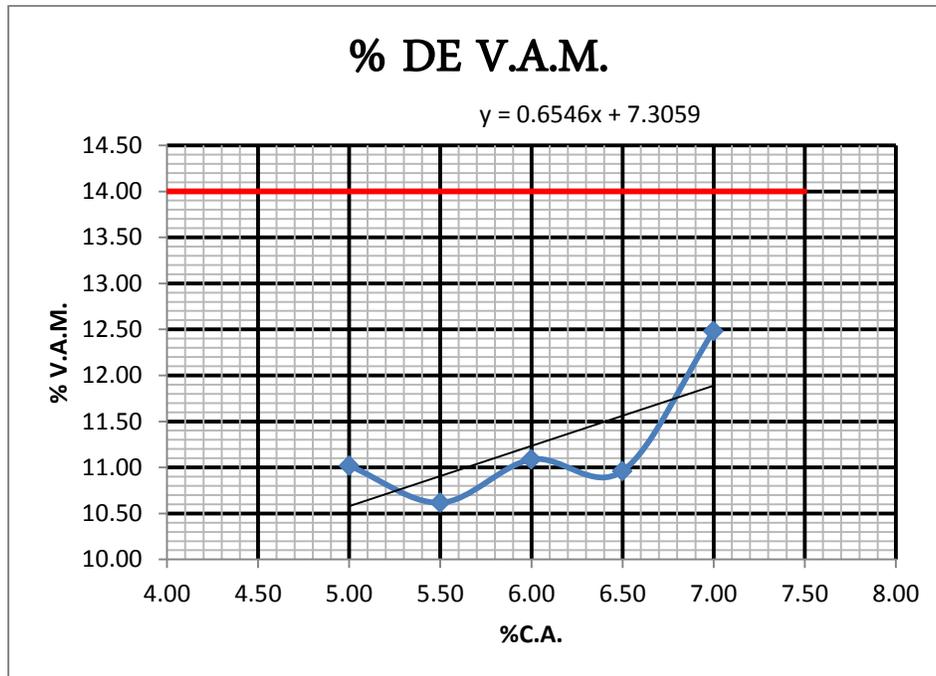


Figura 24.- % DE VAM para agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.

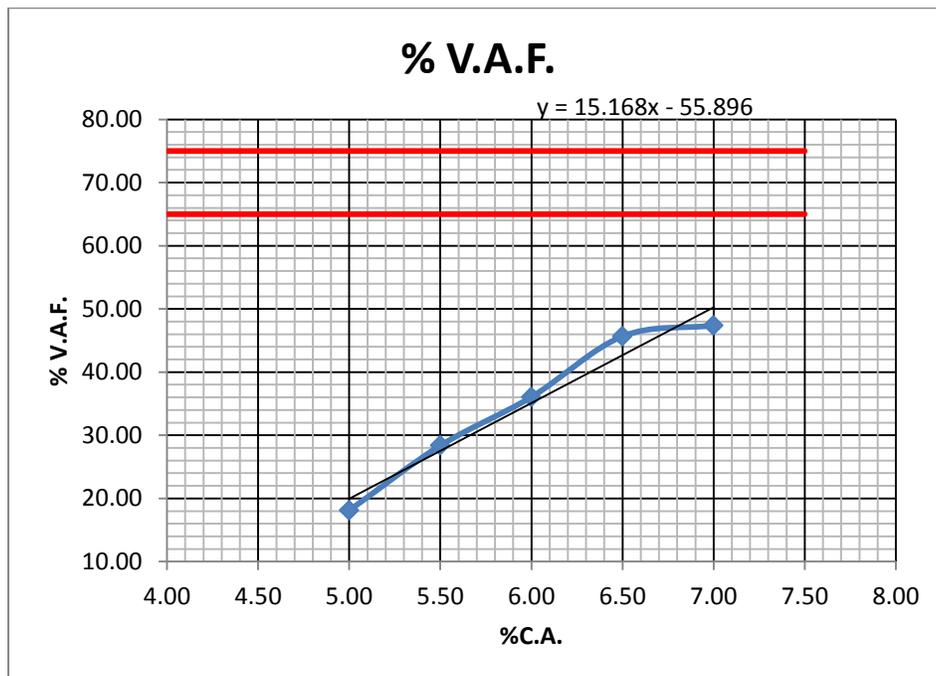


Figura 25.- % de VAF para agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.

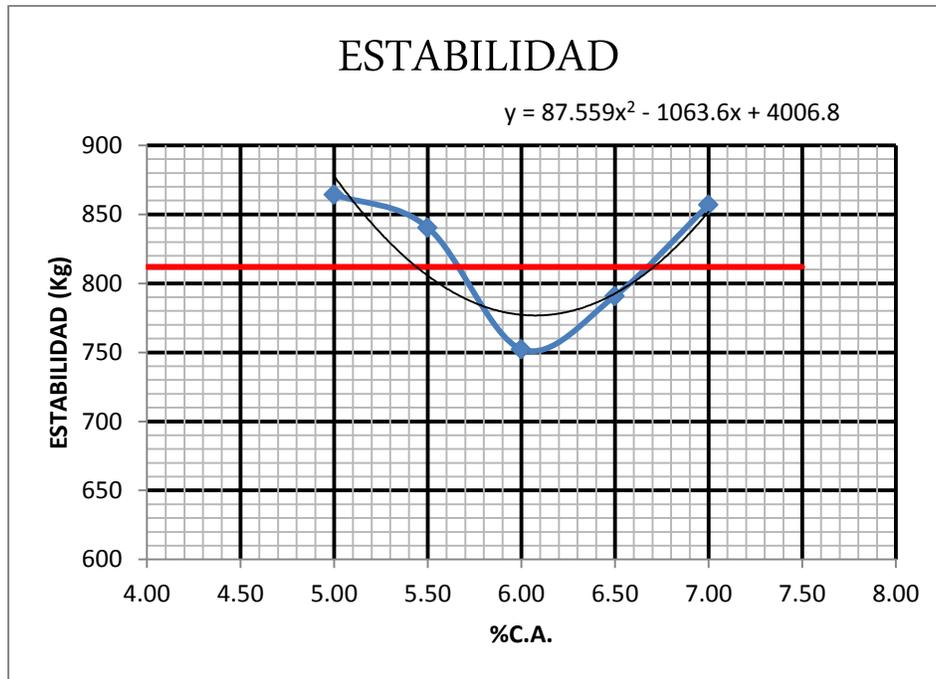


Figura 26.- Estabilidad para agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.

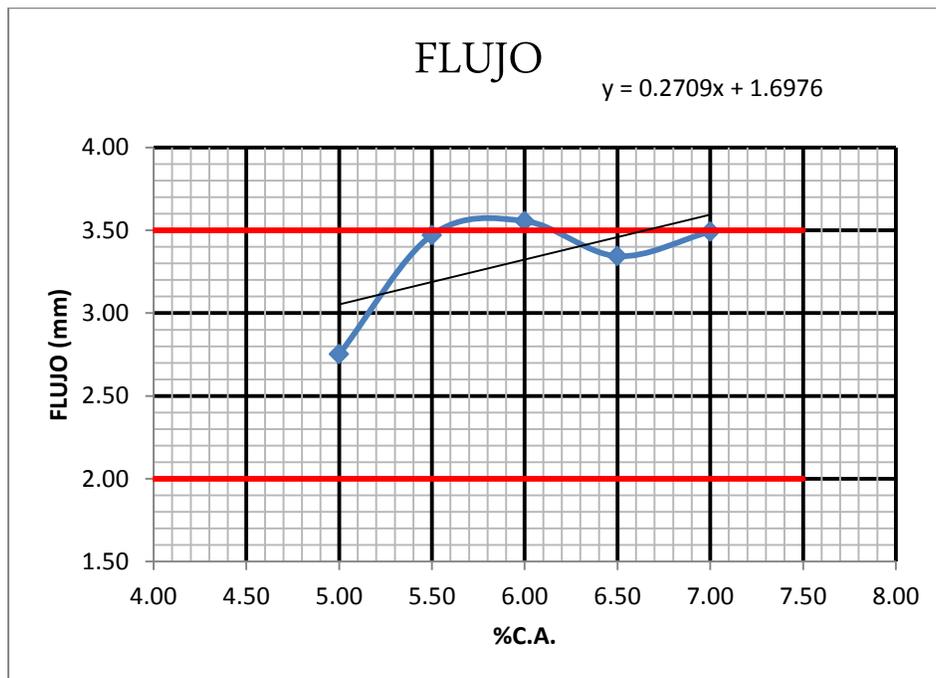


Figura 27.- Flujo para agregado 80% natural y 20% RCD.

7.5.5. Análisis de desprendimiento por fricción para mezcla con agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.

Objetivo.

Determinar el porcentaje de pérdida de capa de asfalto en el agregado sometiendo la mezcla asfáltica a condiciones críticas en agua en ebullición durante 15 min según la normativa ASTM D3625.

Resultados.

Después de la inmersión de la mezcla asfáltica en el agua en ebullición durante 15 minutos se observó como se muestra en las siguientes fotos que el desprendimiento que presenta de la capa de asfalto de agregado no es muy significativa ni pone en riesgo la durabilidad de la capa de mezcla asfáltica, sin embargo, hay que mencionar que a medida que aumenta el material RCD aumenta el desprendimiento poco a poco, quizá para esta prueba podríamos decir que el desprendimiento es de 3% en base a lo observado visualmente en los agregados, por lo que podemos concluir que hay buena afinidad de asfalto agregado.

Reporte fotográfico.



Imagen 16.- Mezcla con agregado pétreo 20% de RCD en ebullición



Imagen 15.- Observación visual de la mezcla para determinar el % de desprendimiento

7.5.6. Análisis volumétrico y gravimétrico de la mezcla asfáltica compactada.

$G_{mb}=2.196\text{gr/cm}^3$

VAM 12.04%	4.90%	Aire		
	7.14%	Asfalto efectivo	73.62kg	155.30kg
		$G_b=1.03\text{gr/cm}^3$		
	7.93%	Asfalto absorbido	81.68kg	
	80.03%	Agregado	2040.74kg	
		$G_{sb}=2.32\text{gr/cm}^3$		
		$G_{se}=2.55\text{gr/cm}^3$		

Lo más significativo a resaltar es el consumo de asfalto para este diseño que será de 155.30 kg de asfalto por metro cubico de mezcla asfáltica compactada y 2040.74 kg de agregado por metro cubico de mezcla, por otra parte el VAM va disminuyendo conforme va aumentando el RCD; estos datos nos servirá como punto de comparación para las mezclas con agregados naturales. Los resultados finales y comparaciones del diseño se presentan en el capítulo 8.

7.5.7. Análisis de los resultados para diseño de 80% de agregado pétreo natural y 20% RCD.

- En este diseño de sustitución del 20% de RCD la diferencia más prominente es la del contenido de asfalto y el contenido en masa del agregado por metro cubico de mezcla asfáltica compacta.
- Como se puede observar en el análisis volumétrico y gravimétrico de la figura anterior, se tiene una ligera disminución en el consumo de asfalto por m³ de mezcla compactada en relación al diseño con 10% de RCD, esto debido a que el espacio en volumen ocupado por el agregado aumenta ya que como se venía mencionando anteriormente al ser menos denso el agregado reciclado con menos masa puede cubrir el espacio y ya que la cantidad o el porcentaje de asfalto está calculado en base a la masa del agregado es por eso que el asfalto al ir aumentando el RCD disminuye ligeramente.
- También se destaca que al tener más RCD el asfalto absorbido va aumentando, dejando así menos capa de asfalto efectivo, lo que significa que el VAM disminuye para este diseño al límite mínimo permitido por la

normativa de la SCT, aunque se debe de considerar que es un diseño para una capa estructural donde es prioridad la resistencia de la capa, este problema puede desaparecer si se considera que después se le colocara encima de la capa estructural una capa de rodamiento.

- Por otra parte en cuanto al comportamiento mecánico se refiere podemos observar que el comportamiento para estabilidad es adecuado, mientras que para flujo está un poco fuera del límite superior lo que la hace un poco susceptible a deformaciones permanentes o roderas, pero aun así es adecuado el diseño para caminos de bajo tránsito en donde el diseño Marshall permite flujo hasta 4mm del límite establecido en la SCT y siendo que para este diseño tiene un flujo de 3.76.
- En cuanto a los vacíos se refiere el VAM está ligeramente abajo del límite permitido esto debido a la cantidad de asfalto absorbido por el agregado RCD y por lo tanto los vacíos llenos de asfalto también estarán por debajo del límite permitido, pero como ya se mencionó esto no es problema sustancial si se utiliza la mezcla como capa estructural y encima se le coloca una capa de rodadura, incluso se pueden utilizar aditivos para minimizar este problema y tenga un funcionamiento adecuado totalmente.

7.6 Diseño Marshall con agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.

En este ensayo se analizó mediante el método Marshall en sustitución con el 30% de RCD de material grueso solamente. El tamaño nominal es de 19mm igual que la muestra testigo.

La mezcla será diseñada con los mismos parámetros de granulometría gruesa y con función estructural como se diseñó para la muestra de control la única variante será la sustitución del agregado RCD en 30% del total de la masa. Para esta prueba se sustituyó solamente grava por RCD esto debido a las experiencias y estudios realizados anteriormente de que el agregado RCD que pasa la malla no.4 presenta más inconsistencias y ya no es adecuado para la elaboración de mezclas asfálticas.

7.6.1. Granulometría agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.

La granulometría para este agregado tendrá que cumplir con todas las especificaciones estipuladas por la curva granulométrica propuesta por la SCT para carreteras con tamaño nominal de 19mm.

Tabla 63.- Características del material pétreo con 70% natural y 30% RCD.

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL PÉTREO	COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA		
	MALLAS	% QUE PASA	DEL PROYECTO
	" 25.4 (1")	100	100
	" 19.0 (3/4")	89	90-100
	" 12.5 (1/2")	78	72-90
	" 9.5 (3/8")	71	60-76
	" 6.3 (1/4")	50	44-57
	" 4.75 (Nº4)	44	37-48
	" 2.00 (Nº10)	25	20-29
	" 0.850 (Nº20)	16	12-19
	" 0.425 (Nº40)	10	8-14
	" 0.250 (Nº60)	8	6-11
" 0.150 (Nº100)	6	4-8	
" 0.075 (Nº200)	4	2-5	
DENSIDAD	2.45	2.5 MIN.	
ABSORCIÓN %	7.67		
DESGASTE %	19	30 MAX.	
% DE TRITURACIÓN PART. ALARGADAS Y/O LAJADAS %	100	100 MIN.	
EQUIV. DE ARENA %	66.3	65 MIN.	
CONTRACCIÓN LINEA	0.0	2 MAX.	

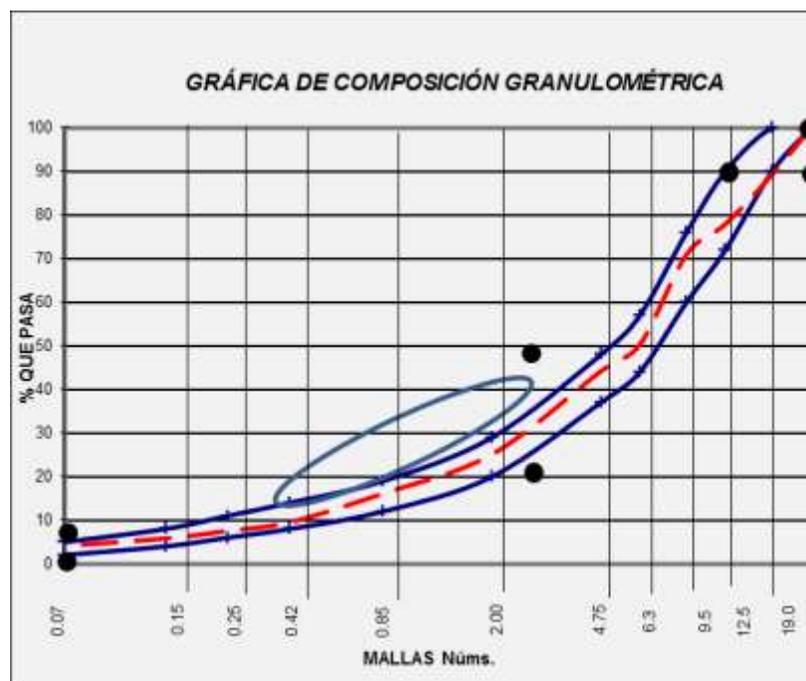


Figura 28.- Curva granulométrica para agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.

Se puede observar que la curva se pega a un poco al límite inferior aún más que en el diseño para 20% con RCD lo que significa que la granulometría para este diseño será ligeramente con material más grueso, pero hay que señalar que a pesar de esto sigue estando dentro de los rangos establecidos.

Tabla 64.- Tabla de proporcionamiento para agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.

		CANTIDAD DE MATERIAL REQUERIDO												
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	4	10	20	40	60	100	200	
% QUE PASA	MALLAS	100	92.26	43.25	3.2	0.04	0	0	0	0	0	0	0	
	GRAVA	100	100	100	91.64	25.83	5.39	0	0	0	0	0	0	
	SELLO	100	100	100	100	100	100	98.76	58.43	37.52	22.23	17.52	13.55	9.59
	RECICLADO	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	ARENA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
GRAVA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SELLO	27	27	27	27	25	7	2	0	0	0	0	0	0	
RECICL	30	30	19	8	3	0.30	0	0	0	0	0	0	0	
ARENA	43	43	43	43	43	43	42	25	16	10	8	6	4	
	SUMA	100	89	78	71	50	44	25	16	10	8	6	4	
		100	100	90-100	72-90	60-76	44-57	37-48	20-29	12-19	8-14	6-11	4-8	2-5

Como se observa en la tabla no.64 se hace la sustitución del agregado RCD por la grava solamente, así obteniendo un porcentaje de 30% de RCD, 27% de sello y 43% de arena. También podemos observar en la Figura 28 que cumple perfectamente con la curva estipulada por la SCT para mezclas asfálticas.

7.6.2. Determinación del contenido mínimo de asfalto.

Se realiza de la misma forma que está estipulada en el apartado 7.3.2 donde se explica el procedimiento para determinar el contenido mínimo de asfalto.

A continuación se muestra la tabla de cálculo siguiendo lo especificado en el apartado 7.3.2.

FRACCION	% QUE PASA	CONSTANTE DE AREA	SUPERFICIE	INDICE ASFALTICO	CONTENIDO PARCIAL DE ASFALTO %
3/4" - No. 4	55.81	0.41	0.2288	0.008	0.18304991
No.4 - No.40	34.63	2.05	0.7100	0.0075	0.53248545
No.40 - No. 200	5.44	15.38	0.8359	0.0075	0.62695032
PASA No. 200	4.12	53.30	2.1979	0.0075	1.64844908
TOTAL	100.00		3.9727		2.99

% MINIMO DE CEMENTO ASFALTICO	2.99
% MINIMO DE CEMENTO ASFALTICO + 25%	3.74

El contenido mínimo es muy parecido al del agregado 100% natural, varía por dos centésimas lo cual es prácticamente lo mismo. Por lo tanto se tomó la determinación de comenzar en 5%.

7.6.3. Resumen de pruebas a los agregados pétreos con 70% natural y 30% RCD.

No.	Prueba.	Valor obtenido.
1	PVSS RCD.	1.066 gr/cm ³
2	PVSS grava.	1.41gr/cm ³
3	PVSS arena.	1.59gr/cm ³
4	Densidad específica efectiva.	2.45 gr/cm ³
5	Densidad específica bruta.	2.20gr/cm ³
6	Absorción	7.67%
7	Desgaste de los Ángeles.	18.9%
8	Partículas alargadas y lajeadas.	33.5%
9	Equivalente de arena.	66.3%
10	Densidad del asfalto.	1.03 gr/cm ³
11	Viscosidad cinemática a 135 °C.	533.98 m ² /s
12	Viscosidad (temperatura de compactación y mezclado).	165°C-159°C (mezclado) 152°C-147°C (compactación)
13	Determinación del contenido mínimo de asfalto.	3.74% C.A. respecto al peso del agregado

7.6.4. Diseño óptimo de asfalto con agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.

Se procede a elaborar las probetas para la determinación del contenido óptimo de asfalto, como el porcentaje mínimo de asfalto fue de 3.7% se recomienda aumentar en un por ciento el contenido mínimo de acuerdo a experiencias profesionales, se procederá empezar a partir de 5% de asfalto respecto al peso del agregado.

Se elaboraron 3 pastillas por porcentaje empezando por 5% hasta completar mínimo 6 diferentes porcentajes en forma ascendente; a continuación se presenta la tabla del proporcionamiento de material para la elaboración de las pastillas.

Se realizó la corrección por altura ya que el peso inicial para cada pastilla que recomienda el manual de la metodología es de 1200gr, pero esa cantidad de material produce probetas de mayor altura que las marcadas en el manual así que se procedió a hacer la corrección quedando como cantidad de material de 1040gr por probeta.

Tabla 65.- Proporcionamiento para pastillas con agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.

MALLAS	PESO DEL RECICLADO	PESO DE GRAVA	PESO POR MALLA
1"	0.00	0.00	0.00
3/4"	111.66	0.00	111.66
1/2"	117.94	0.00	117.94
3/8"	49.14	23.47	72.61
1/4"	30.14	184.79	214.93
No. 4	3.12	60.13	63.25
No. 10	0.00	0.00	198.30
No. 20	0.00	0.00	93.51
No. 40	0.00	0.00	68.38
No. 60	0.00	0.00	21.06
No. 100	0.00	0.00	17.75
No. 200	0.00	0.00	17.71
CHAROLA	0.00	0.00	42.89
TOTAL			1040

El procedimiento para la elaboración, volumetrías y prueba en la prensa Marshall de las pastillas se realizó de acuerdo a lo descrito en el manual propuesto por el Asphalt Institute llamado "Marshall Mix Design" y la normativa española NLT-159/00.

A continuación se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos para cada porcentaje, cabe señalar que el resultado mostrado en la tabla es el promedio de las tres pastillas de cada porcentaje para cada rubro.

Tabla 66.- Tabla resumen para pastillas con agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.

%C.A. respecto al agregado	PE (Kg/m3)	%VA	%VAM	%VAF	ESTAB.(kg)	FLUJO (mm)	CEMENTO ASFALTICO %	MATERIAL PETREO %	%ASF. EFECTIVO	%ASF. ABSORBIDO
5	2077.9	9.62	10.05	4.26	857.8	3.18	9.61	80.78	0.43	9.18
5.5	2084.1	8.82	10.21	13.58	854.4	3.47	10.55	80.63	1.39	9.16
6	2117.6	6.82	9.20	25.81	755.6	3.49	11.64	81.54	2.37	9.27
6.5	2135.4	5.51	8.86	38.31	908.3	3.60	12.65	81.84	3.35	9.30
7	2132.5	5.11	9.41	45.72	909.1	3.34	13.54	81.35	4.30	9.24

Una vez evaluados los resultados se llegó al contenido óptimo de asfalto; el contenido óptimo será aquel contenido de asfalto que cumpla con los requerimientos establecidos por la normativa de la SCT para su adecuado comportamiento. En la siguiente tabla se muestra el resumen para el contenido óptimo de asfalto.

Tabla 67.- Optimo porcentaje para agregado pétreo 70% natural y 30% de RCD.

CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA	ESPECIFICACIONES	
	OBTENIDOS	PARTICULARES
CONTENIDO OPTIMO DE C.A. (%)	6.96	-
PESO ESPECIFICO (kg/cm³)	2,140	-
ESTABILIDAD, Kg.	887	816 MIN
VACIOS %	4.80	3-5
FLUJO	3.51	2-3.5
V.A.M. %	9.0	14 MIN
V.A.F. %	46.3	65 - 75
ESPECIMEN COMPACTADO CON 75 GOLPES DEL PISON POR CARA A LA TEMPERATURA DE	160 °C	

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a cada rubro de análisis necesario para el adecuado funcionamiento de la carpeta asfáltica para un tránsito mayor a un millón de ejes equivalentes y hasta diez millones.

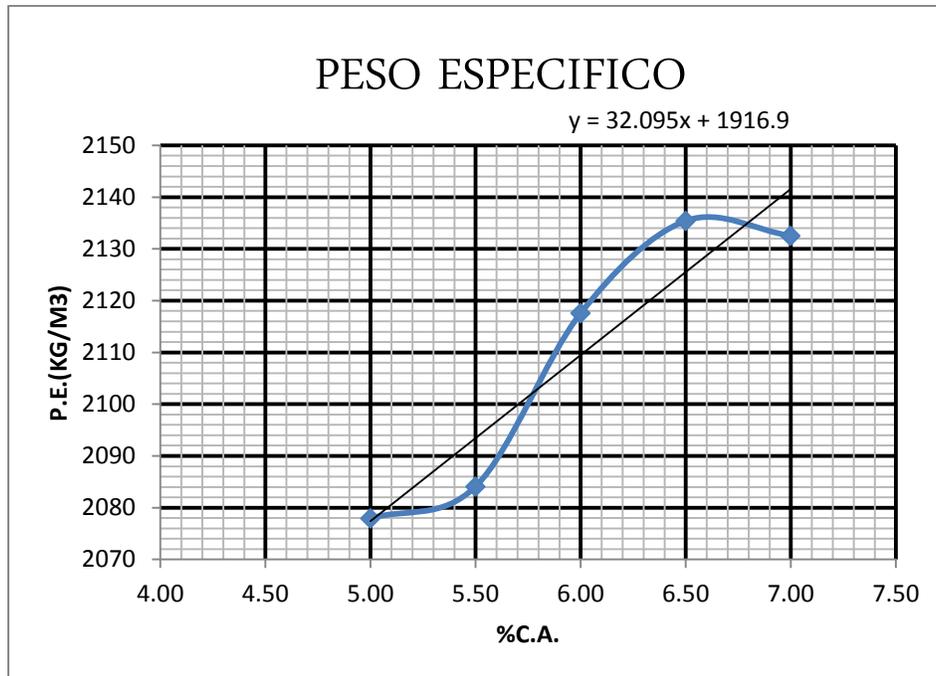


Figura 29.- Peso específico para agregado pétreo 70% natural y 30% de RCD.

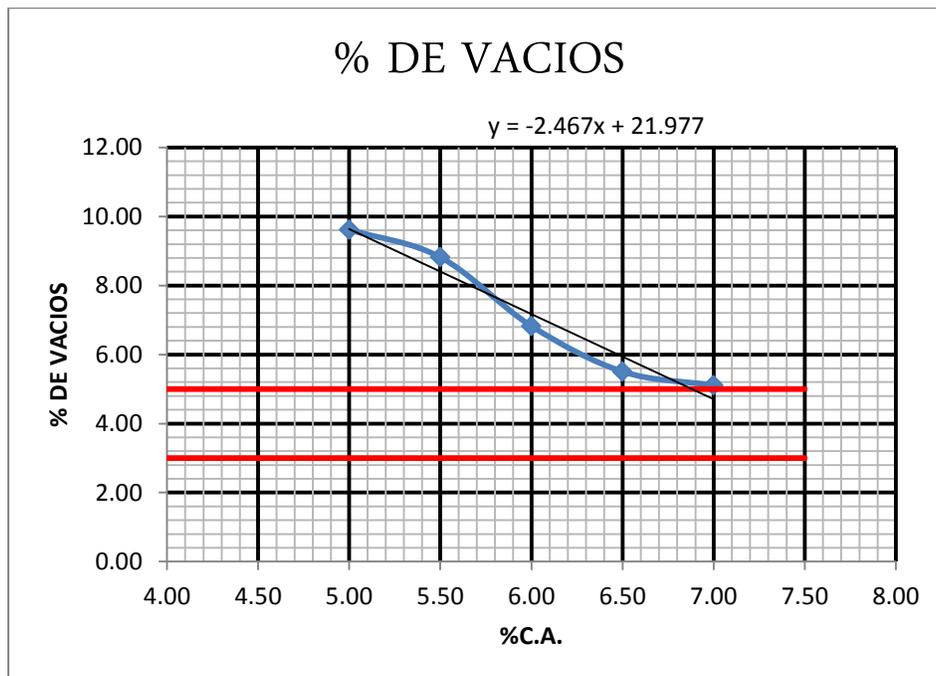


Figura 30.- % de vacíos para agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.

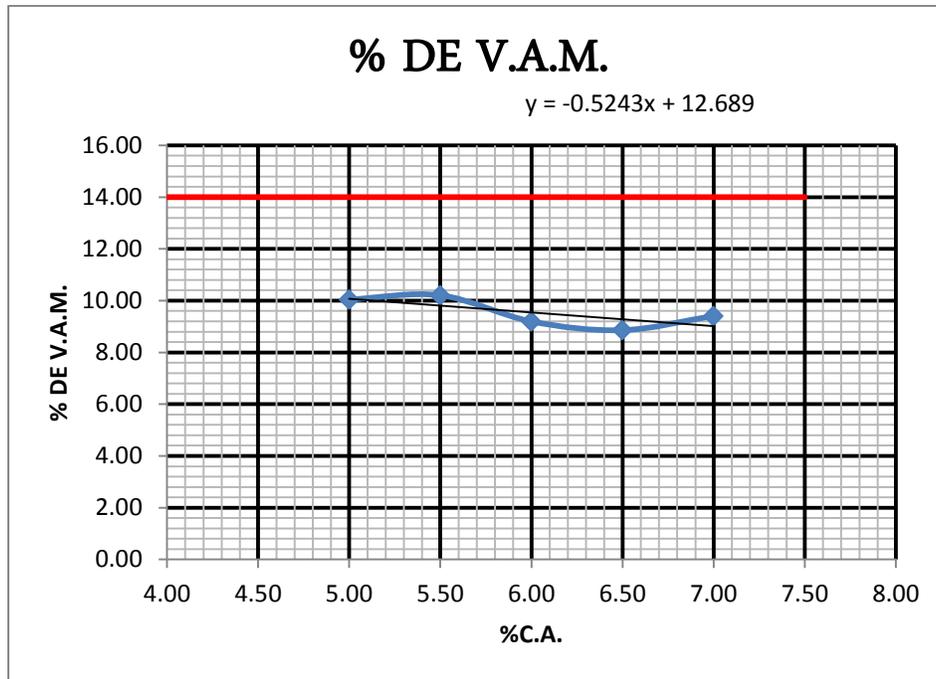


Figura 31.- % de VAM para agregado pétreo 70% natural y 30% de RCD.

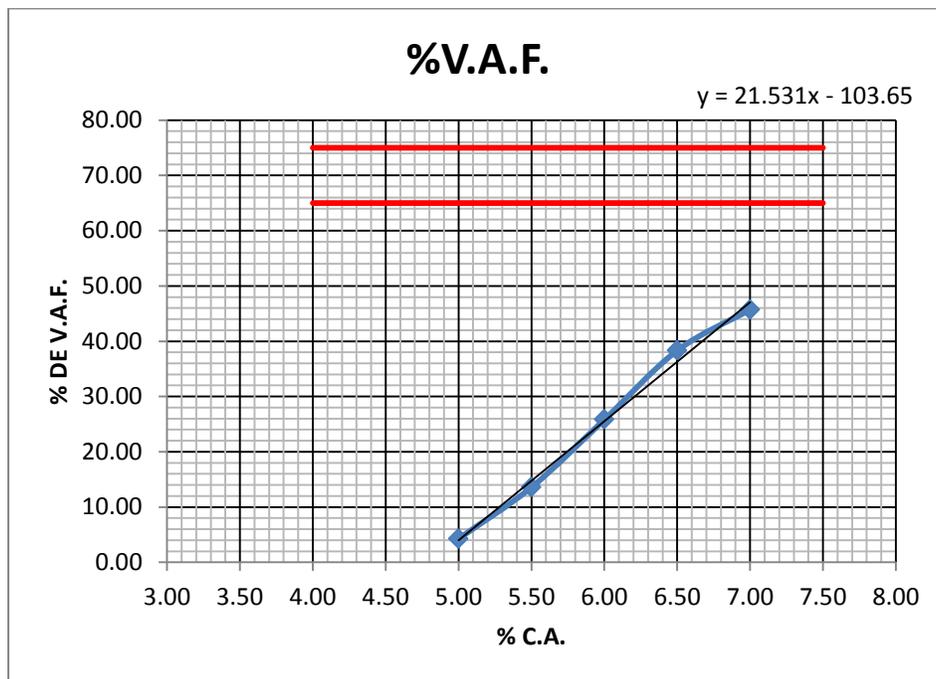


Figura 32.-% de VAF para agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.

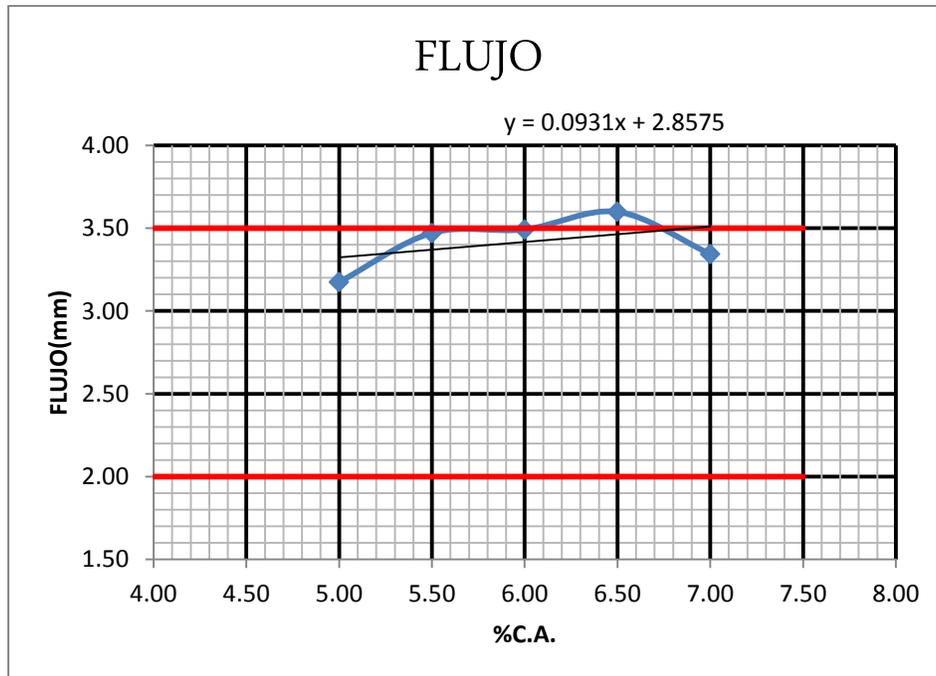


Figura 33.- Flujo para agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.

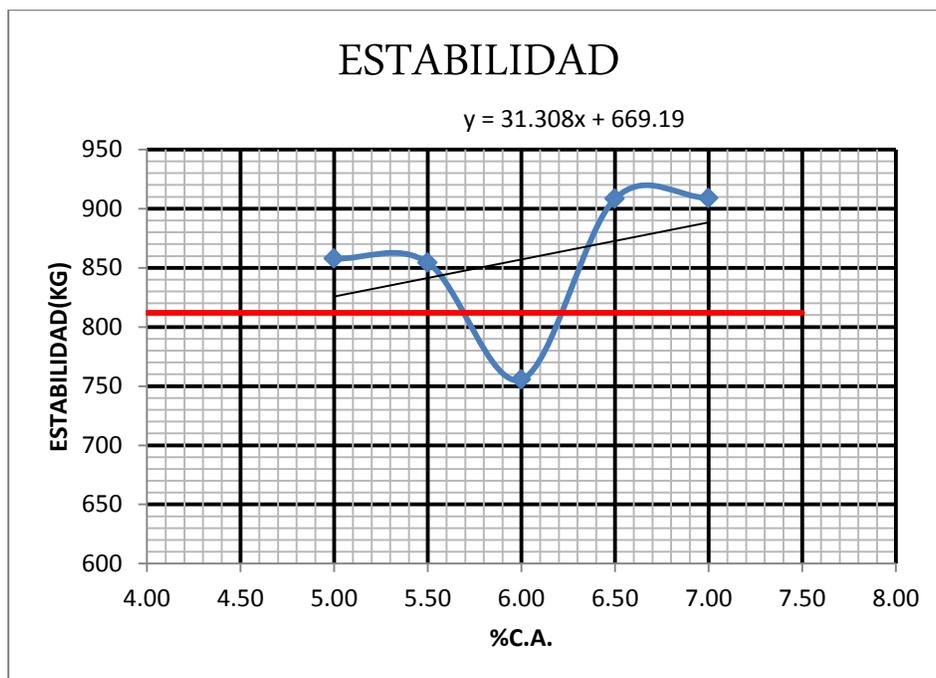


Figura 34.- Estabilidad para agregado pétreo 70% natural y 30% de RCD.

7.4.5. Análisis de desprendimiento por fricción para mezcla con agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.

Objetivo.

Determinar el porcentaje de pérdida de capa de asfalto en el agregado sometiendo la mezcla asfáltica a condiciones críticas en agua en ebullición durante 15 min según la normativa ASTM D3625.

Resultados.

Después de la inmersión de la mezcla asfáltica en el agua en ebullición durante 15 minutos se observó como se muestra en las siguientes fotos que el desprendimiento que presenta de la capa de asfalto de agregado no es muy significativa ni pone en riesgo la durabilidad de la capa de mezcla asfáltica, sin embargo, hay que mencionar que a medida que aumenta el material RCD aumenta el desprendimiento poco a poco, quizá para esta prueba podríamos decir que el desprendimiento es de 8% en base a lo observado visualmente en los agregados, por lo que podemos concluir que hay buena afinidad de asfalto agregado.

Por otra parte es recomendable para este proporcionamiento de 30% RCD y 70% agregado natural utilizar un aditivo mejorador de adherencia para evitar totalmente este desprendimiento y así mejorar la durabilidad de la mezcla.

Reporte fotográfico.



Imagen 17.- Observación de la mezcla después del proceso de desprendimiento



Imagen 18.- Observación del agregado pétreo con 70% natural y 30% RCD.

7.6.6. Análisis volumétrico y gravimétrico de la mezcla asfáltica compactada.

Gmb=2.140gr/cm³

VAM 9.89%	4.82%	Aire		
	5.06%	Asfalto efectivo Gb=1.03gr/cm ³	52.12kg	139.31kg
	8.46%	Asfalto absorbido	87.138kg	
	81.66%	Agregado Gsb=2.20gr/cm ³ Gse=2.45gr/cm ³	2000.69kg	

7.6.7. Análisis de los resultados para diseño con agregado pétreo para 70% natural y 30% RCD.

- Para esta prueba con 30% de sustitución RCD, una de las diferencias más significativas es la reducción de asfalto respecto a los diseños con 10% y 20% de agregado reciclado y el diseño con agregado natural. Ya que como se observa en el análisis volumétrico y gravimétrico el consumo total de asfalto por m³ es de 139.31kg para este diseño de 30% con RCD mientras que para 20% con RCD es de 155.30kg por m³, para 10% con RCD es de 159.50kg y para la muestra de control con 100% de agregado natural es de 146kg por m³.
- En conclusión el diseño con 30% de RCD es el que menos consumo de asfalto tiene respecto a todos los demás diseños, esto es debido a que como ya se había mencionado anteriormente, que al momento de irse aumentando el porcentaje de RCD el peso por metro cubico del agregado iba disminuyendo por su baja densidad y esto es lo que ocasiona la disminución del asfalto.
- También que el porcentaje de asfalto requerido se calcula en base a la masa del agregado, entonces por lo tanto el espacio ocupado por la masa del agregado es mayor dejando así menor cantidad de espacio para el asfalto y los vacíos requeridos por lo que también se observa una disminución en los vacíos en la mezcla debido a este fenómeno.
- Por otra parte el flujo y la estabilidad cumplen perfectamente con los valores establecidos por la normativa de la SCT para tráfico de más de un

millón de ejes equivalentes y hasta 10 millones; Es otra de las cosas a destacar que se observó que entre más aumenta el RCD la estabilidad va mejorando y el flujo también.

- En cuanto al VAM y el VAF es la parte que habrá que tener cuidado ya que al tener más porcentaje de RCD la cantidad de asfalto absorbido aumenta respecto a los demás diseños lo que ocasiona que el VAM disminuya considerablemente incluso por debajo de lo marcado por la normativa de la SCT, esto se debe a que el VAM solo es el espacio intergranular del agregado donde se acomoda el asfalto sin considerar el asfalto absorbido más los vacíos de la mezcla por lo tanto el VAF también disminuye por debajo de la normativa ya que tiene una relación directa con el VAM. Esto podría perjudicar en la durabilidad de la mezcla pero para probar esto habría que hacer estudios complementarios a este diseño de mezcla como lo es la susceptibilidad a la humedad y Fatiga. Una solución para este problema es que la mezcla sea requerida solo como capa estructural y encima de ella colocar una capa de rodadura y posteriormente con sus respectivos tratamientos superficiales para mantener la calidad de la mezcla mínimo durante el periodo de diseño de proyecto; Incluso existen aditivos mejoradores de adherencia para minimizar este problema de la cantidad baja del VAM.

CAPÍTULO VIII. RESULTADOS.

A continuación se presentan las diferentes gráficas de resultados, conclusiones finales, así como recomendaciones.

8.1. Comparaciones entre los diferentes diseños.

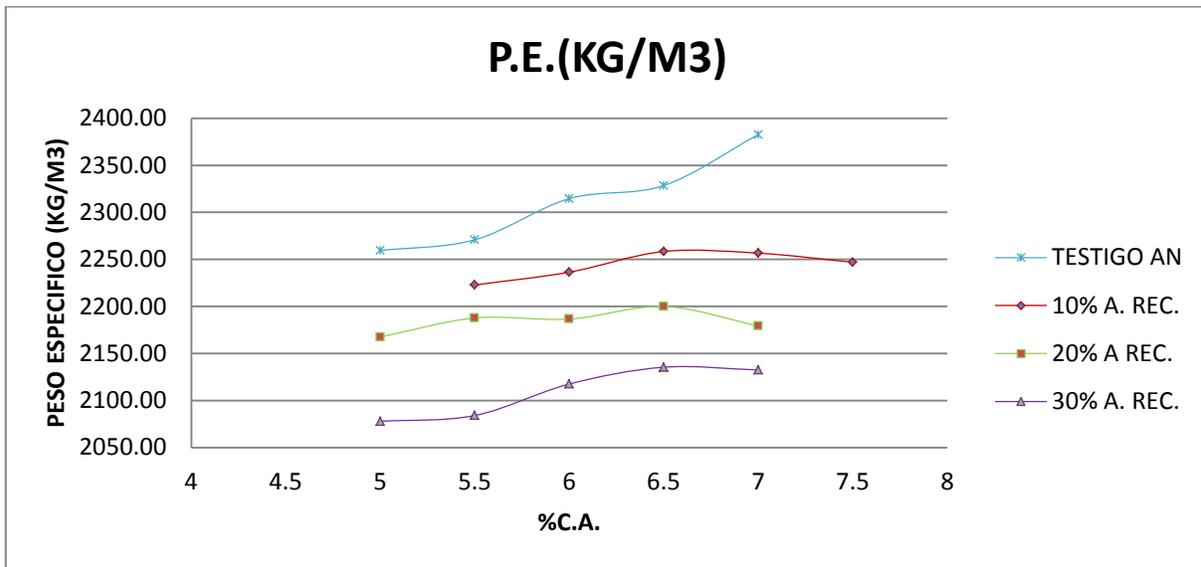


Figura 35.- Comparativas del Peso Específico

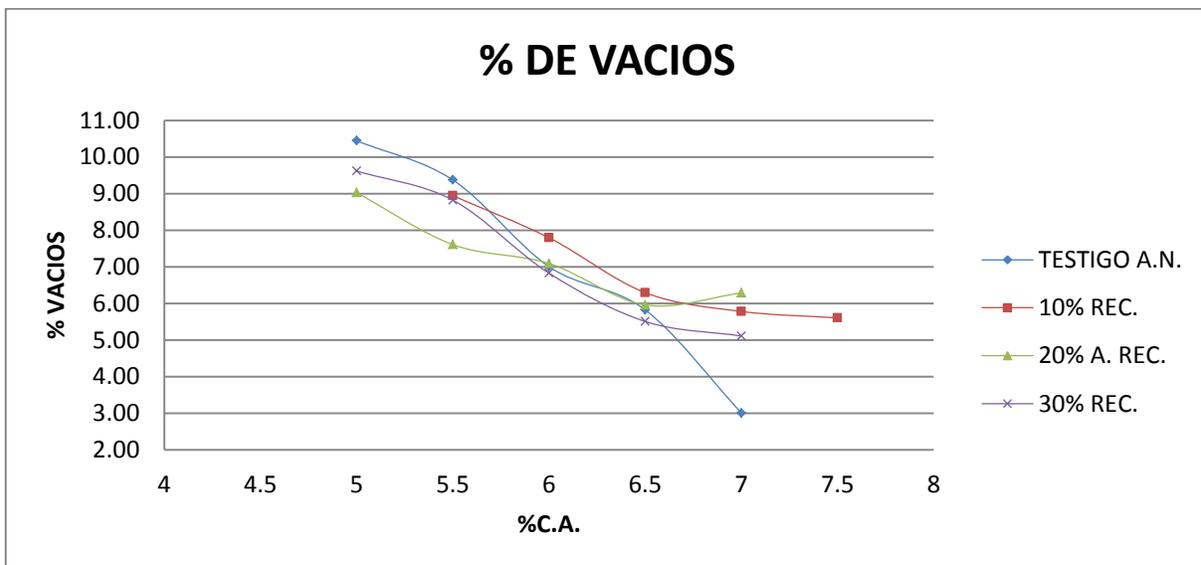


Figura 36.- Comparativa del % de vacíos.

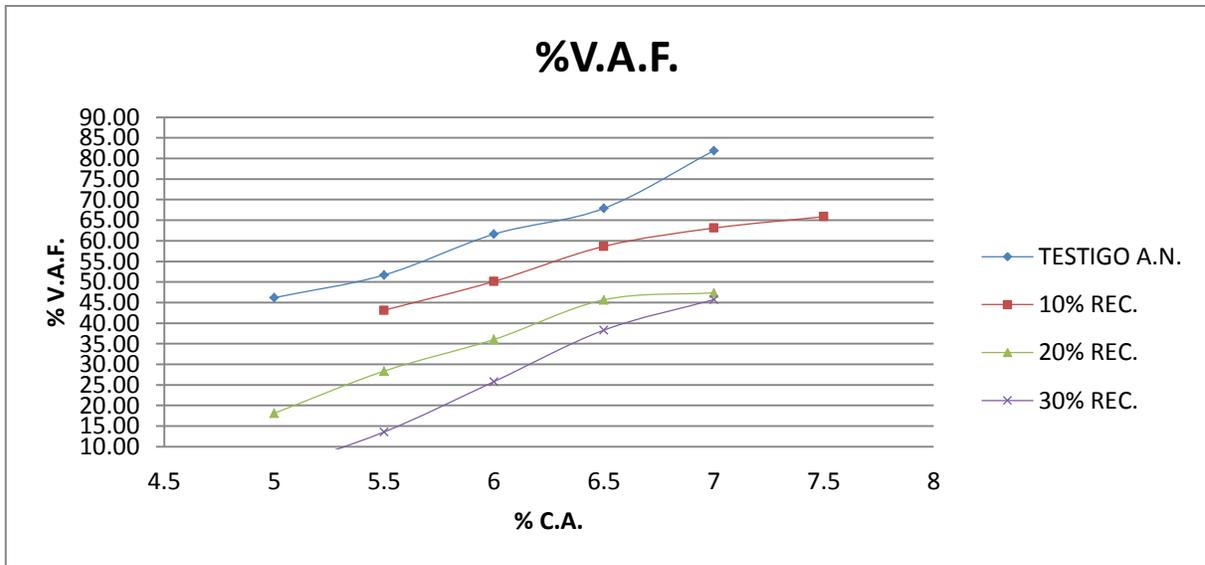


Figura 37.- Comparativa del % de VAF.

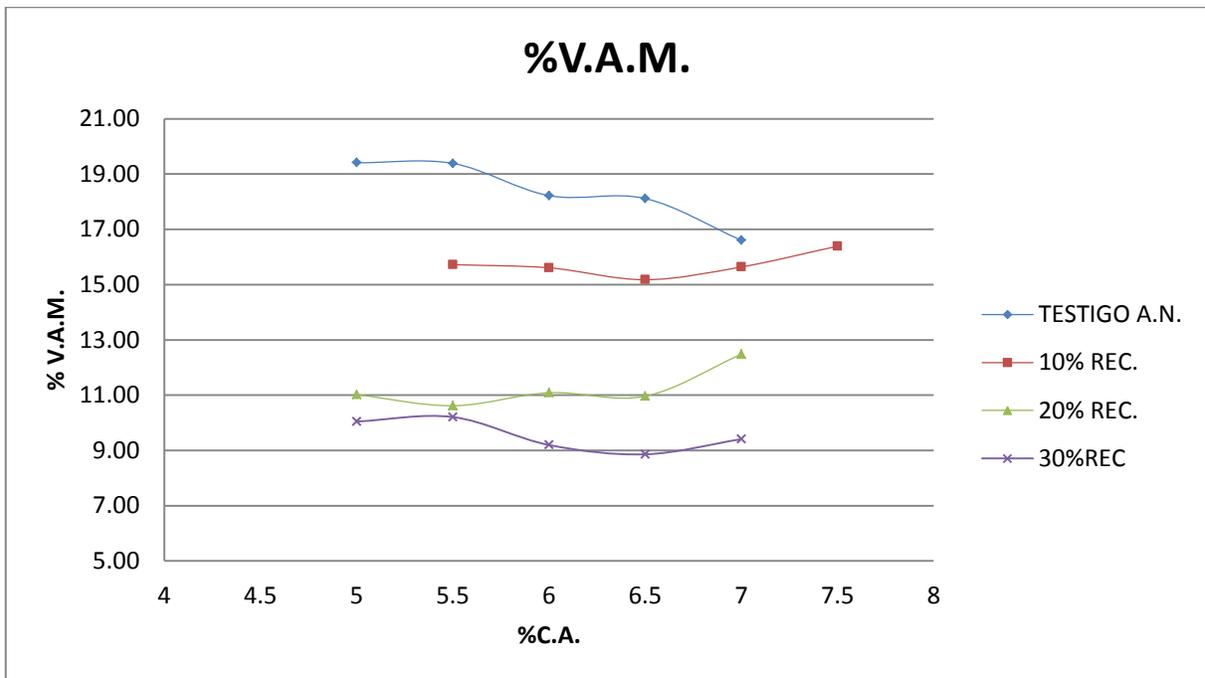


Figura 38.- Comparativa del % de VAM.

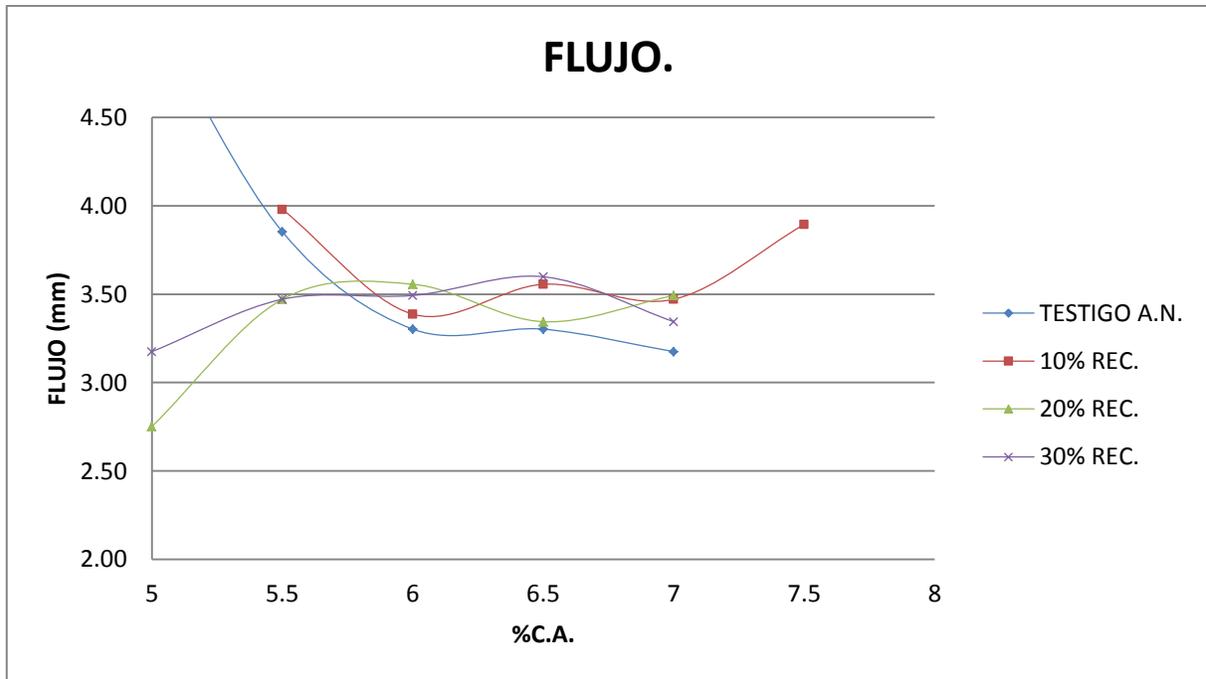


Figura 39.- Comparativa del Flujo.

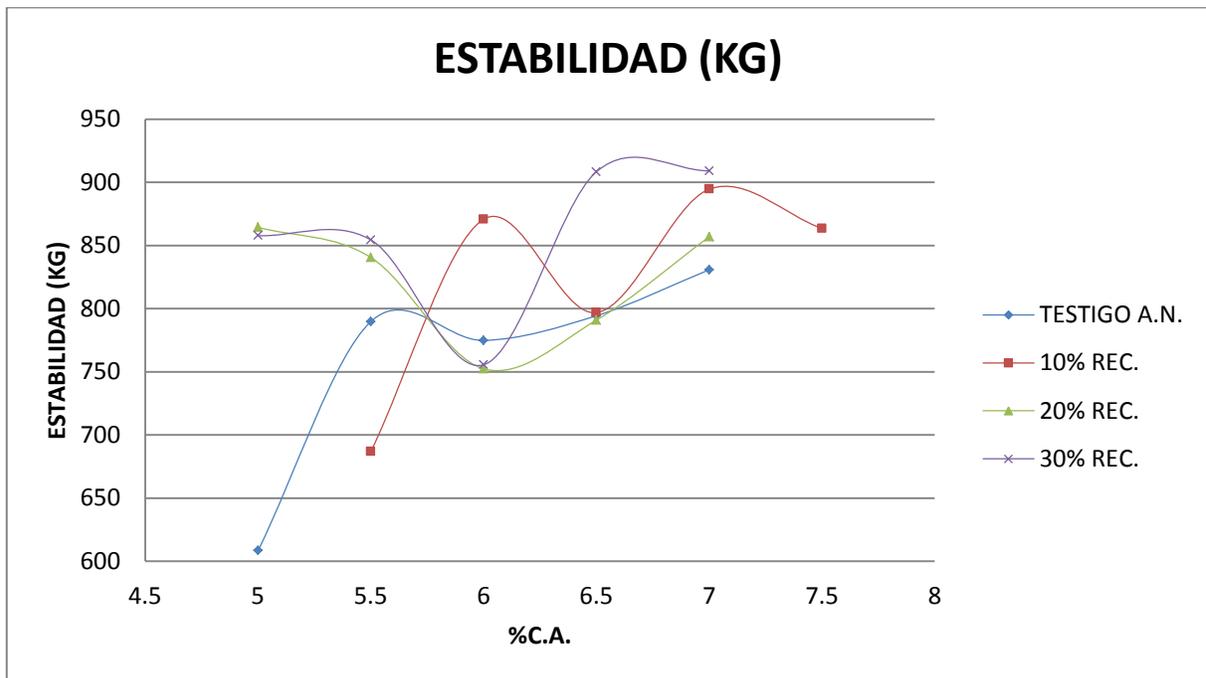


Figura 40.- Comparativa de Estabilidad.

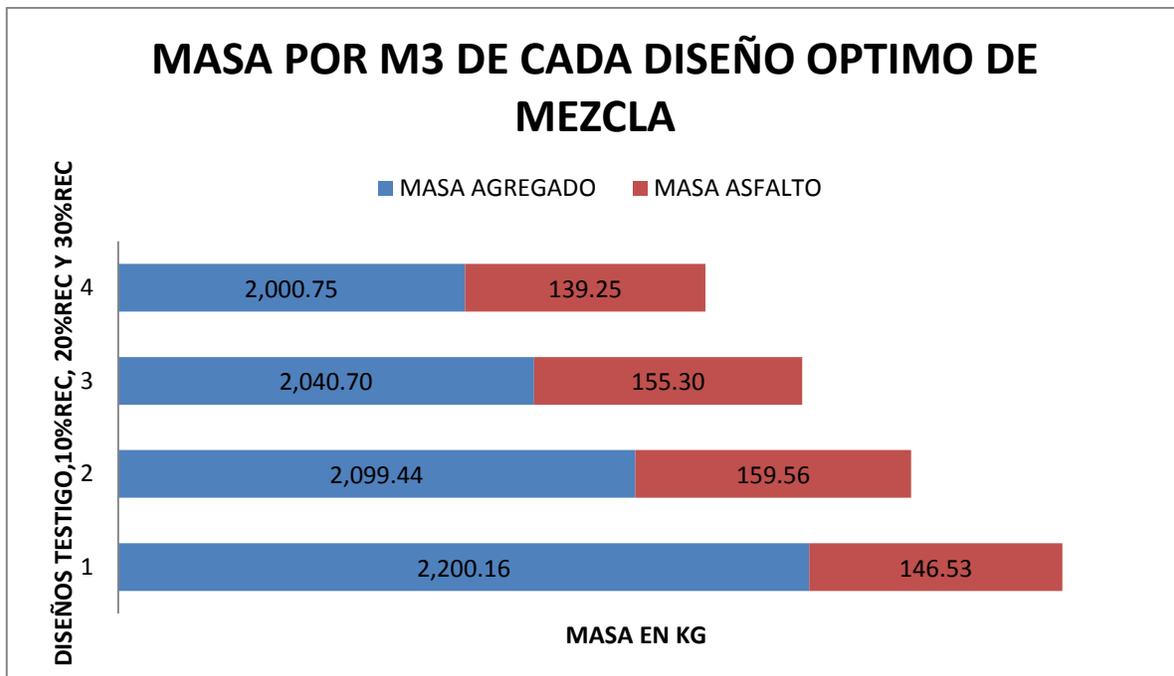


Figura 41.- Comparativa en cantidad de masa para cada diseño óptimo.

En la figura no. 41 se hace un análisis comparativo donde:

1 es el diseño óptimo con agregado pétreo 100% natural.

2 es el diseño óptimo con agregado pétreo 90% natural 10% reciclado.

3 es el diseño óptimo con agregado pétreo 80% natural 20% reciclado

4 es con agregado pétreo 70% natural 30% reciclado respectivamente, podemos observar claramente que:

1. La masa requerida de agregado por m³ va disminuyendo conforme va aumentando el agregado de RCD, por lo que esto podría significar un ahorro.
2. El asfalto primero aumenta en el diseño de 10% y 20% debido a que el asfalto absorbido aumenta entonces se requiere más asfalto para alcanzar el porcentaje de VAM, VAF y Vacíos en el agregado mineral, pero en el diseño de 30% con RCD llegamos a un punto que ya es suficiente el porcentaje de RCD que ya llega a cubrir más volumen por metro cubico de mezcla que el de agregado natural lo que ocasiona que el volumen requerido de asfalto vaya disminuyendo; y así se puede observar en esta gráfica comparativa que para el diseño de la mezcla con 30% de agregado RCD se requieren 139.25kg por metro cubico contra 146.53kg que se

requieren en el diseño de la mezcla con agregado 100% natural; lo que es un ahorro significativo finalmente en asfalto y en masa de agregado.

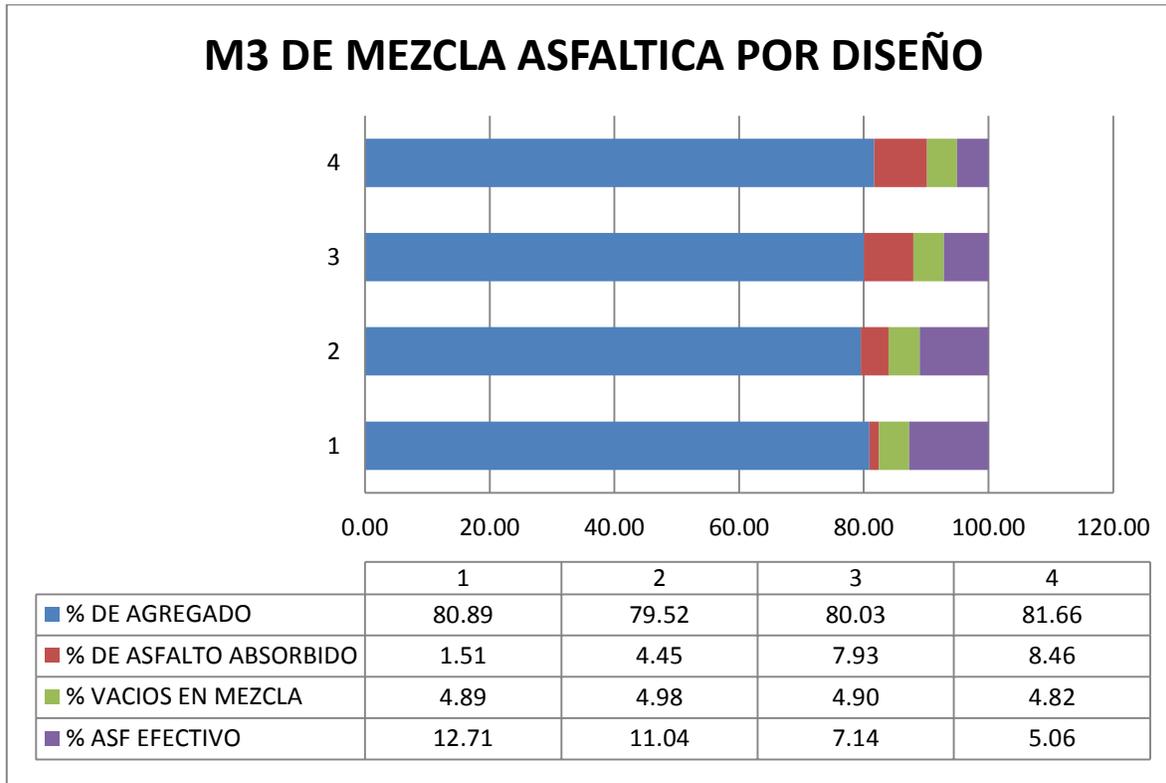


Figura 42.- comparativa de % en volumen de material ocupado en cada diseño óptimo.

En la figura no. 42 se trata de hacer un contraste entre los diferentes diseños óptimos mostrando el porcentaje de agregado, de asfalto y de vacíos. Donde:

- 1 es el diseño de la mezcla con agregado pétreo 100% natural.
- 2 es el diseño de la mezcla con agregado pétreo 90% natural y 10% reciclado.
- 3 es el diseño de la mezcla con agregado pétreo 80% natural 20% reciclado.
- 4 es el diseño de la mezcla con agregado pétreo 70% natural 30% reciclado.

Así podemos observar que en cuanto al volumen de agregado va paulatinamente aumentado conforme se añade mas RCD, el asfalto absorbido al igual se muestra que va aumentando y por lo tanto el efectivo disminuye y finalmente los vacíos en la mezcla se mantienen en el mismo porcentaje aproximadamente para los 4 diseños.

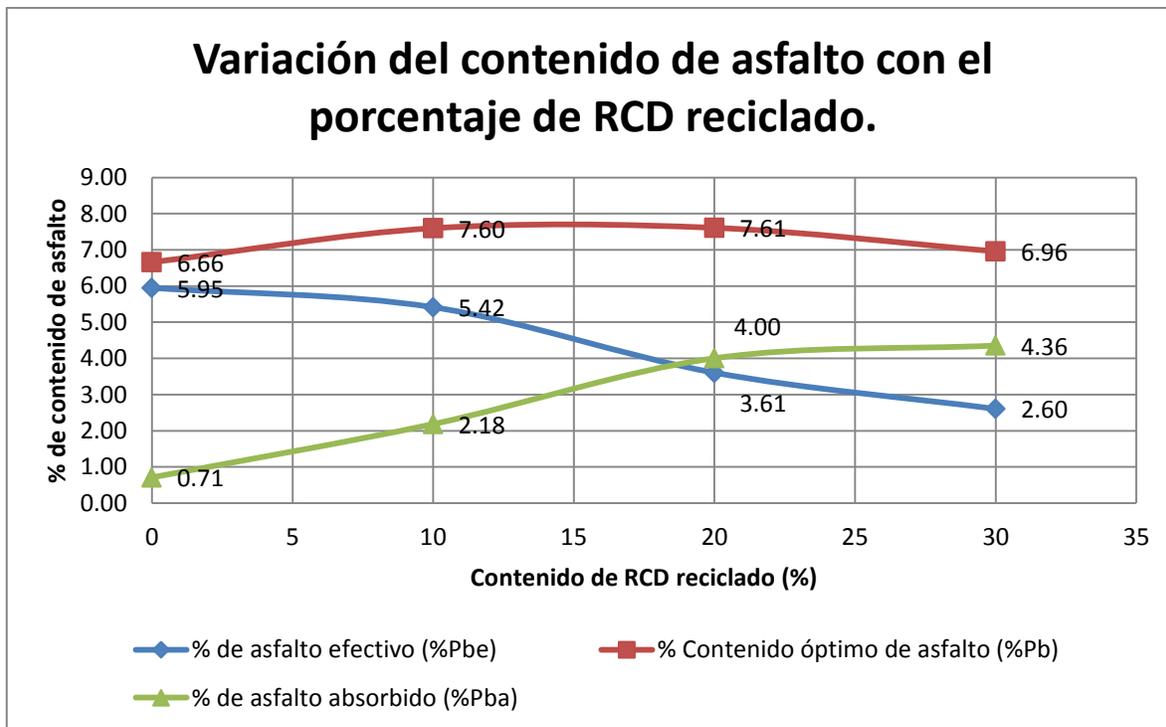


Figura 43. Variación del contenido de asfalto con el porcentaje de RCD reciclado.

- Como se puede observar en la figura no. 43 conforme va aumentando el contenido de RCD el porcentaje de asfalto absorbido va aumentando y el contenido de asfalto efectivo va disminuyendo proporcionalmente, como ya se mencionó esto es debido a la cantidad de poros que contiene el material RCD y por lo tanto el VAM y VAF disminuyen por debajo de la normativa establecida por la SCT.
- Sin embargo presentan buen comportamiento ante el flujo y la estabilidad evaluados con la prensa Marshall, con comportamientos similares a los de una mezcla convencional. Solo habrá que cuidar el tema de durabilidad ya que debido a la gran cantidad de asfalto absorbido posiblemente llegue más rápido al final de su vida útil si no se le da un adecuado mantenimiento.

Una vez analizados los resultados se realizó la comparación final de cada tipo de muestra mediante el diseño Marshall; posteriormente se analizaron los resultados llegando a las siguientes conclusiones.

1. En la gráfica de peso específico se observa que conforme va aumentando el porcentaje de material RCD el peso específico disminuye, esto debido a que la densidad del RCD es de 2.15 gr/cm³ mientras que la densidad del agregado natural es de 2.72 gr/cm³. Diversas investigaciones han llegado a la conclusión que una gestión adecuada del tratamiento del RCD y

trituras sucesivas pueden aumentar la densidad del agregado; la baja densidad es provocada generalmente por la presencia de mortero y agentes ajenos al agregado como podría ser tabique, ladrillo, yeso, etc. Por otra parte esto puede generar ahorros en la conformación de la carpeta ya que teóricamente con menos masa se estaría conformado el espesor requerido de la carpeta.

2. En relación a la gráfica de vacíos se puede observar una tendencia a que entre más porcentaje de material RCD tenga llega más rápidamente al porcentaje óptimo de 3-5% de vacíos, esto puede deberse a diversos factores uno de ellos puede ser el mejor acomodo de las partículas ya que la forma y el tamaño de las partículas cambia un poco de la grava natural a la grava producto de RCD, por ejemplo la grava reciclada tiene forma más cubica y con más aristas que la de RCD esto se puede observar en la prueba de partículas alargadas y lajeadas que para la grava es de 34.17% y para el RCD es de 32% por lo que las mezclas elaboradas con el agregado 100% natural pueden dejar más vacíos .
3. En cuanto a la gráfica de VAM se refiere, se observa que a mayor porcentaje de RCD EL VAM disminuye. Esto es debido a que a razón que va aumentando el porcentaje de RCD el VAM disminuye por la cantidad de asfalto absorbido, hay que recordar que el VAM solo incluye el espacio intergranular del agregado que es donde se acomoda el asfalto efectivo más el porcentaje de vacíos de la mezcla lo que quiere decir que el porcentaje de asfalto efectivo va disminuyendo conforme aumenta la absorción, esto se puede remediar aumentando la cantidad de asfalto hasta llegar a un adecuado funcionamiento de la carpeta. Como se vio en los capítulos anteriores para el diseño de 10% si cumple satisfactoriamente con el porcentaje de VAM y de VAF, ya para el diseño de 20% está sobre el límite establecido por la normativa y para el 30% ya no cumple con estos parámetros pero como la recomendación es que estas tipo de carpetas con agregados reciclados sea utilizada como capa estructural y posteriormente sea colocada una capa de rodadura lo que interesa más en estas capas estructurales de alto tráfico es su resistencia ósea el cumplimiento de la estabilidad y la deformación ya que lo del VAM bajo se puede corregir incluso con la adición de aditivos de durabilidad que mejoran el envejecimiento del asfalto.
4. En relación al VAF está directamente relacionado con el contenido de VAM, por lo tanto como ya se mencionó en el punto anterior a medida que

aumenta el porcentaje de RCD disminuye el VAM y por lo tanto el VAF, el rango aceptable de VFA depende del nivel del tránsito. Altos niveles de tránsito requieren menores porcentajes de VFA, debido a que en estas condiciones la resistencia y la estabilidad de las mezclas son la mayor preocupación. Bajos niveles de tránsito requieren porcentajes de VFA mayores para garantizar la durabilidad de la mezcla asfáltica. Si los porcentajes de VFA son demasiado altos la mezcla se vuelve inestable (S.A., 2013).

5. Para el análisis de la gráfica de flujo podemos observar que es muy similar el comportamiento para los 4 diferentes muestras con distintos porcentajes de RCD la diferencia más significativa que se observa es que las muestras con 100% agregado natural fluye ligeramente más que con 20% y 30% de RCD y esto se podría deber a la forma de la partícula del agregado 100% natural que es un poco más plana y con menos caras fracturadas por el proceso de trituración; en cambio con 20% y 30% de RCD tiene menor deformación a menor contenido asfalto debido a que ya hay más porcentaje de caras fracturadas y el anclaje entre asfalto-agregado es mejor por los poros del RCD. También por otro lado llega un cierto punto al que hay exceso de asfalto por lo tanto la mezcla asfáltica se vuelve inadecuada al volverse menos estable y más deformable por la acción de las cargas vehiculares por lo cual el mismo exceso de asfalto ya no permite el contacto entre un agregado y otro para un buen engranaje entre estos haciéndola fluir.
6. Finalmente lo que refiere al análisis de la gráfica de estabilidad el comportamiento es muy similar en las cuatro muestras; la diferencia más significativa se nota cuando el contenido de asfalto es bajo aun de 5 a 6% de asfalto ya que para las muestras elaboradas con material 100% natural y 10% de RCD conforme va aumentando el contenido de asfalto va aumentando su estabilidad paulatinamente, en cambio para porcentajes de 20% y 30% RCD empieza con una buena estabilidad cuando el porcentaje de asfalto es bajo entre el 5% y 5.5% debido a que el número de caras fracturadas y forma de la partícula del agregado RCD es mejor y el asfalto entra con mayor facilidad en los poros para hacer el anclaje asfalto-agregado, mientras que en las muestras con 10% de agregado RCD y 100% natural no se ancla tan fácilmente el asfalto con bajos porcentajes; posteriormente al aumentar el contenido de asfalto a partir de 6% las mezclas se comienzan a comportar similar y cumplen a partir de 6.5% de asfalto todas las muestras en general según la normativa mexicana hasta

aproximadamente un porcentaje poco mayor al 7% cumple y posteriormente comienza a bajar la estabilidad por el exceso de asfalto. Pero en general el comportamiento en cuanto a estabilidad cumple en cada uno de los diseños y va en aumento conforme aumenta el porcentaje de RCD lo que significa que tiene buena resistencia a la compresión simple incluso ligeramente por encima del agregado natural.

Finalmente después de analizar cada una de las propuestas y graficas se puede llegar a la conclusión definitiva que las muestras realizadas con 30% de RCD son la opción más viable y económica ya que cumple mejor con los lineamientos de la normativa mexicana, necesita menos asfalto para cumplirlos incluso menos que en el diseño de la mezcla con agregados 100% naturales por todo lo que ya se dijo anteriormente. Sin embargo también se analizara económicamente a continuación para ver su viabilidad.

8.2. Análisis económico de cada diseño.

Se elaboró un análisis económico en base a las mezclas realizadas con diferentes porcentajes de agregado reciclado. Para este análisis se corroboraron precios actuales al año 2017.

Este análisis es importante ya que nos da un panorama un poco más amplio de los ahorros aparte de ambientales, ahorros económicos en base a la utilización de este tipo de agregados reciclados.

Cabe destacar que este análisis se realizó considerando que el material reciclado es proporcionado por una planta de concreto reciclado la cual ha proporcionado el precio del material por m³ en \$75.00mx.

8.2.1. Costo/m³ de mezcla asfáltica de ¾" prueba agregado pétreo 100% natural.

Para este análisis hay que señalar que la cuantificación se hizo considerando la granulometría y los porcentajes previstos en el apartado 7.3.1 como se muestra a continuación.

$$G_{mb}=2.347 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 68. Proporcionamiento para diseño óptimo de muestra testigo.

Óptimo testigo 6.66%		
	porcentaje	peso kg
Asf.	6.24%	146.4528
Petreos	93.76%	2200.547

	Porcentaje	Peso en kg
Grava	30%	660.16416
Sello	27%	594.14774
Arena	43%	946.2353

El cálculo del volumen se realiza en base al PVSS del material.

Materiales	Peso(kg)	Densidad (gr/cm ³)	Volumen (m ³)	M.V.S.S (gr/cm ³)
Grava	660.16416	2.72	0.468201532	1.41
Sello	594.147744	2.61	0.421381379	1.41
Arena	946.235296	2.57	0.591766914	1.599
Asfalto	146.4528	1.03	0.142187184	

En la tabla no.68 se muestra el costo total de los insumos requeridos considerando que es la variante de los materiales utilizados la única que se va a comparar y así poder observar la variación de los costos directos finales; ya que el proceso de elaboración de la mezcla no varía y será el mismo para todas las mezclas.

Tabla 69. Análisis de costo para diseño de muestra testigo.

TESTIGO					
MATERIAL	UNIDAD	VOLUMEN	CANTIDAD	P.U	IMPORTE
Asfalto	KG.	0.142	146.45	\$ 5.57	\$ 815.74
Arena triturada	M3.	0.592	946.2353	\$ 140.00	\$ 82.85
Grava triturada	M3.	0.468	374.55	\$ 135.00	\$ 63.21
Sello triturado	M3.	0.421	594.1477	\$ 135.00	\$ 56.89
Costo directo					\$ 1,018.68

8.2.2. Costo/m³ de mezcla asfáltica de ¾” prueba agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.

Para este análisis hay que señalar que la cuantificación se hizo considerando la granulometría y los porcentajes previstos en el apartado 7.4.1 como se muestra a continuación.

$$G_{mb}=2.259 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 70. Proporcionamiento para diseño óptimo de 90% agregado pétreo natural y 10% RCD.

RCD 10% optimo 7.60% ASF.		
	porcentaje	peso kg
asf.	7.06%	159.4854
petreos	92.94%	2099.5146

	Porcentaje	Peso en kg
RCD	10%	209.95146
Grava	20%	419.90292
Sello	27%	566.868942
Arena	43%	902.791278

El cálculo del volumen se realizó de acuerdo al PVSS del material.

Materiales	Peso Kg	M.V.S.S(gr/cm ³)	Densidad(gr/cm ³)	Volumen(m ³)
Grava	419.90	1.41	2.72	0.297803489
Sello	566.87	1.41	2.61	0.402034711
Arena	902.79	1.599	2.57	0.564597422
Reciclado	209.95146	1.066	2.15	0.196952589
Asfalto	159.4854		1.03	0.154840194

Tabla 71. Análisis económico para diseño optimo con agregado pétreo 90% natural y 10% RCD.

RECICLADO 10%					
MATERIAL	UNIDAD	VOLUMEN	CANTIDAD	P.U	IMPORTE
Asfalto	KG.	0.154840194	159.49	\$ 5.57	\$ 888.33
Arena triturada	M3.	0.564597422	902.79	\$ 140.00	\$ 79.04
Grava triturada	M3.	0.297803489	419.90	\$ 135.00	\$ 40.20
Sello	M3.	0.402034711	566.87	\$ 135.00	\$ 54.27
RCD 10%	M3.	0.196952589	209.95146	\$ 75.00	\$ 14.77
Costo directo					\$ 1,076.63

En la tabla No.71 cabe señalar que el costo de \$75.00mx pesos por m3 de material reciclado es el proporcionado por la Planta de Concretos Reciclados México.

8.2.3. Costo/m3 de mezcla asfáltica de ¾” prueba agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.

Para este análisis hay que señalar que la cuantificación se hizo considerando la granulometría y los porcentajes previstos en el apartado 7.5.1 como se muestra a continuación.

Gmb=2.196 gr/cm3

Tabla 72. Proporcionamiento para diseño óptimo de 80% agregado pétreo natural y 20% RCD.

RCD 20% Óptimo 7.61% ASF.		
	Porcentaje	Peso kg
Asf.	7.07%	155.2572
Pétreos	92.93%	2040.7428

	Porcentaje	Peso en kg
RCD	20%	408.14856
Grava	10%	204.07428
Sello	27%	551.000556
Arena	43%	877.519404

El cálculo del volumen se realizó de acuerdo al PVSS del material.

Materiales	Peso Kg	Densidad(gr/cm3)	Volumen(m3)	M.V.S.S(gr/cm3)
Grava	204.07	2.72	0.144733532	1.41
Sello	551.00	2.61	0.390780536	1.41
Arena	877.52	2.57	0.548792623	1.599
Reciclado	408.14856	2.15	0.382878574	1.066
Asfalto	155.2572	1.03	0.150735146	

Tabla 73. Análisis económico para diseño óptimo de agregado pétreo 80% natural y 20% RCD.

RECICLADO 20%					
MATERIAL	UNIDAD	VOLUMEN	CANTIDAD	P.U	IMPORTE
Asfalto	KG.	0.151	155.2572	\$ 5.57	\$ 864.78
Arena triturada	M3.	0.549	877.52	\$ 140.00	\$ 76.83
Grava triturada	M3.	0.145	204.07	\$ 135.00	\$ 19.54
Sello	M3.	0.390781	551.00	\$ 135.00	\$ 52.76
RCD 20%	M3.	0.382879	408.14856	\$ 75.00	\$ 28.72
Costo directo					\$ 1,042.62

8.2.4. Costo/m³ de mezcla asfáltica de ¾" prueba agregado pétreo 70% natural y 30% RCD.

Para este análisis hay que señalar que la cuantificación se hizo considerando la granulometría y los porcentajes previstos en el apartado 7.6.1 como se muestra a continuación.

Gmb=2.140 gr/cm³

Tabla 74. Proporcionamiento para diseño óptimo con 70% agregado pétreo natural y 30% RCD.

RCD 30% Óptimo 6.96% ASF.		
	Porcentaje	Peso kg
Asf.	6.51%	139.314
Pétreos	93.49%	2000.686

	Porcentaje	Peso en kg
RCD	30%	600.2058
Grava	0%	0
Sello	27%	540.18522
Arena	43%	860.29498

El cálculo del volumen se realizó de acuerdo al PVSS del material.

Materiales	Peso Kg	Densidad (gr/cm ³)	Volumen (m ³)	M.V.S.S (gr/cm ³)
Sello	540.19	2.61	0.383110085	1.41
Arena	860.29	2.57	0.538020625	1.599
Reciclado	600.2058	2.15	0.563044841	1.066
Asfalto	139.314	1.03	0.135256311	

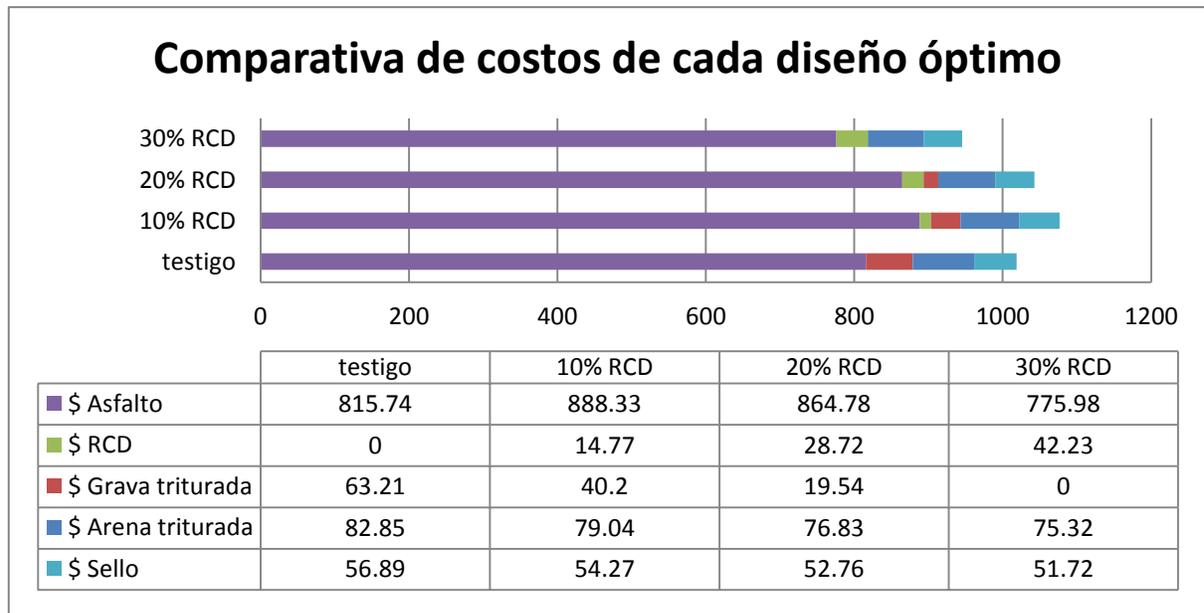
Tabla 75. Análisis económico para diseño óptimo de 70% agregado pétreo natural y 30% RCD.

RECICLADO 30%					
MATERIAL	UNIDAD	VOLUMEN	CANTIDAD	P.U	IMPORTE
Asfalto	KG.	0.135	139.314	\$ 5.57	\$ 775.98
Arena triturada	M3.	0.538	860.29	\$ 140.00	\$ 75.32
Sello	M3.	0.3831101	540.19	\$ 135.00	\$ 51.72
RCD 30%	M3.	0.5630448	600.2058	\$ 75.00	\$ 42.23
Costo directo					\$ 945.25

8.3. Comparaciones y conclusiones finales.

En la siguiente tabla se presentan las comparativas del costo de cada mezcla con diseño óptimo en Marshall.

Tabla 76. Tabla comparativa de costo de cada diseño óptimo.



DISEÑOS OPTIMOS DE CADA MEZCLA	
Testigo	\$ 1,018.68
Reciclado 10%	\$ 1,076.63
Reciclado 20%	\$ 1,042.62
Reciclado 30%	\$ 945.25
Testigo vs 30% RCD	\$ 73.43
Ahorro en 1000m3	\$ 73,433.06

- De acuerdo a lo analizado anteriormente la propuesta más económica es la de 30% con material RCD. Esto debido como se había mencionado ya en capítulos anteriores es porque el agregado RCD al ir aumentando, paulatinamente va cubriendo más volumen por m³ de mezcla debido a su densidad y por lo tanto el asfalto va reduciendo poco a poco a pesar de la absorción del asfalto, y entonces llega un momento en el que a pesar de que el porcentaje de asfalto en relación al peso del agregado aumenta por la absorción, tenemos un cierto punto que el volumen del RCD es tal que hace que el asfalto disminuya; como es en el caso de la mezcla con 30% de agregado RCD y como ya se desarrolló en capítulos anteriores.
- A pesar de que la diferencia de precio entre las diferentes mezclas es muy parecida, finalmente en la de 30% de RCD es en la que hay más ahorro.
- Lo más recomendable para el uso de este tipo de agregado RCD es utilizarlo cuando la planta de residuos de concreto reciclado quede cerca de la obra a construir y así poder ahorrar también en las distancias de los acarrees, como es conocimiento de muchos constructores generalmente los bancos de material natural quedan lejos de las zonas de construcción de la obra, principalmente en las afueras de las ciudades haciendo así más costoso el acarreo del material, que si se opta por la planta de concretos reciclados generalmente localizadas en las cercanías o dentro de la ciudad.
- También existe un ahorro en las emisiones de contaminantes al medio ambiente por parte de los vehículos de acarreo debido a que generalmente la planta de reciclados está más cerca que el banco de material más cercano.
- Por otro lado se reduce la explotación de bancos de material y el cambio de uso de suelo de ecosistemas.
- También hay que destacar que si surge escombros por alguna demolición en el lugar de la obra en construcción ya sea por sustitución de la misma. Existirá un ahorro en acarreo al momento de llevar el escombros a la planta de reciclaje y ahí mismo adquirir el material RCD para la obra en cuestión.
- Hoy en día inclusive ya existe maquinaria hoy en día que hace la demolición y el reciclado en situ como la Maquina Rubble Master RM 760 la cual también realiza la función de trituración y debido a que este equipo no es tan grande no requiere grandes espacios para su funcionamiento por lo

cual se pueden hacer trabajos de reciclado en situ como se muestra en la siguiente imagen. Lo cual significaría un ahorro muy importante en acarreos.



Imagen 19.- Maquina Rubble Master RM 760. Fuente (Reciclados)

Sin duda como se mencionó durante todos los capítulos hay un sin fin de ahorros que se pueden generar en relación al uso de RCD en pavimentos, desde su uso en capas inferiores como bases y sub-bases de lo cual existe ya documentación científica comprobada de la utilización de este tipo de agregado exitosamente en la práctica, hasta en carpetas asfálticas como se desarrolló en este trabajo de investigación, lo cual es un avance científico significativo tanto para el hombre como para el medio ambiente.

El reciclaje de los residuos de construcción y demolición y en cualquier otro tipo de reciclaje no es necesario altos porcentajes de reciclaje. Lo más viable y adecuado para aplicar el reciclaje es hacerlo con responsabilidad sin comprometer la calidad del producto final. No importa si se recicla un porcentaje mínimo, lo importante es que el producto final sea viable para la situación a la que sea requerida.

Puede ser costoso cuidar el medio ambiente pero sin duda será más costoso no hacerlo.

BIBLIOGRAFÍA

- (CSI), C. S. (2009). RECICLANDO CONCRETO. WBCSD.
- (SCT), S. d. (2003). Masa volumetrica seca suelta en gravas. En S. d. transportes. ciudad de méxico.
- (SCT), s. d. (2003). Masa volumetrica seca varillada en gravas. En s. d. transporte. ciudad de méxico.
- PLAN REGIONAL DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN.* (2006). MADRID, ESPAÑA.
- Adam J. Kardos, S. A. (2015). Strength, durability, and enviromental properties of concrete utilizing recycled tire particles for pavemente applications. *CONSTRUCTION AND BULDING MATERIALS* 98(832-845).
- ALAMILLA, H. D., LÓPEZ, J., & ANGUAS, P. G. (s.f.). *DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON LA METODOLOGÍA SUPERPAVE.* SAN FANDILA, QUERETARO.
- Anguas, P. G. (2003). Algunos Apectos de la Densificación de Mezclas Asfálticas con el Compactador Giratorio. *IMT.*
- Anguas, P. G., Alamilla, H. D., & Sandoval, C. D. (2005). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS MARSHALL Y SUPERPAVE PARA COMPACTACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.* SAN FANDILA, QUERETARO.
- Anguas, P. G., Alamilla, H. D., & Sandoval, C. D. (2005). *análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación de mezclas asfálticas.* Sanfandila, Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Anguas, P. G., Alamilla, H. D., López, J. A., Romero, S. A., & Orta, H. A. (2004). *ASPECTOS DEL DISEÑO VOLUMETRICO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS.* SANFANDILA, QUERETARO: INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.

- Arenas, C. F. (2007). *El impacto en la edificación, Criterios para una construcción sostenible*. ESPAÑA: Edifoser.
- ASTM. (s.f.). Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate. En ASTM.
- B.M., G. (2008). CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGIA, CERTIFICACIÓN VERDE. 40-43.
- Chavez, G. F. (octubre de 2012). Aprovechamiento de hormigón reciclado en obras viales.
- Co., H. M. (s.f.). *Marshall Mix Design*. Illinois 60176 U.S.A.
- COMINSKY, R. J. (s.f.). *THE SUPERPAVE MIX DESIGN MANUAL FOR NEW CONSTRUCTION AND OVERLAYS*.
- DANIEL, I. M. (2013). *RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) SITUACIÓN ACTUAL Y CORRECTA GESTION PARA EL PROCESO DE RECICLAJE EN LA INDUSTRIA MEXICANA*. MEXICO DF.
- ETXEARRIA, M. (2004). *ESTUDY ON MICROSTRUCTURE AND STRUCTURAL BEHAVIOUR OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE*. UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA.
- FRANCOISE PAROT, R. D. (1998, 2007). *DICCIONARIO AKAL DE PSICOLOGÍA DE MADRID: MOSTOLES*.
- GARCÍA, J. A., & YAÑEZ, R. V. (2004). *CONCRETO RECICLADO*. Instituto Politecnico Nacional.
- GARNICA ANGUAS, P. M. (2005). *CARACTERIZACIÓN GEOMECANICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, SANFANDILA, QUERETARO: PUBLICACIÓN NO. 267.
- <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2944/Capitulo2.pdf>. (s.f.).
- INSTITUTE, A. (s.f.). *SUPER PAVE MIX DESIGN*.

- Jimenez, L. y. (2007). Reparación de pavimentos flexibles con materiales reciclados de construcción y demolición. *Congreso Internacional de Reciclaje Metánica* .
- JUAN, M. S., & GUTIÉRREZ, M. P. (2006). *ESTUDIO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL ÁRIDO RECICLADO. UTILIZACIÓN EN HORMIGÓN ESTRUCTURA*. MADRID, ESPAÑA: CENTRO DE PUBLICACIONES; SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA; MINISTERIO DE FOMENTO; CEDEX.
- JUAN, M. S., & GUTIÉRREZ, P. A. (s.f.). *ESTUDIO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FABRICADO CON ARIDOS RECICLADOS*. MADRID, ESPAÑA: CENTRO DE PUBLICACIONES; SECRETARIA GENERAL TÉCNICA; MINISTERIO DE FOMENTO; CEDEX.
- LOPEZ DOMINGUEZ MARIA GUADALUPE, P. S. (2014). ESTADO DEL ARTE SOBRE EL USO DE RESIDUOS Y SUB-PRODUCTOS INDUSTRIALES EN LA CONSTRUCCION DE CARRETERAS. SANFANDILA, QUERETARO, MÉXICO. Obtenido de <http://www.imt.mx>
- Martinez Molina W., A. A.-A.-G.-G.-B.-G. (2015). CONCRETO RECICLADO: UNA REVISIÓN. *ALCONPAT*, 235-248.
- Mendoza–Escobedo, I. M.–S. (2006). Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados. *scielo*, Ing. invest. y tecnol. vol.7 no.3 México jul./sep. 2006.
- MURPHY, T., BENTSEN, P. A., & E., P. (s.f.). *MARSHALL MIX DESIGN*.
- NATALINI, MARIO B.-KLEES, D. R.-T., & JIRINA. (2000). *RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DE MATERIALES RESIDUALES DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN* . CHACO, ARGENTINA: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE.

- ORTIZ, O. J. (DICIEMBRE 2008). EFECTO DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN LAS PROPIEDADES MECANICAS Y DINÁMICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA. 28(3).
- Ossa, A., & García, J. L. (2015). *Una alternativa para la construcción de carpetas asfálticas*. Ciudad de México: INSTITUTO DE INGENIERÍA.
- Paranavithana, S., & Mohajerani, A. (2003). THE EFFECTS OF MIXING AND COMPACTATION ON VOLUMETRIC PROPERTIES OF AN ASPHALT CONCRETE CONTAINING RECYCLED CONCRETE AGREGATES. *Australian Geomechanics Vol 38 No 2*, 59-64.
- Pasandín, A. R., Pérez, I., & Gómez-Meijide, B. (2014). *TREATMENTS APPLIED TO RECYCLED CONCRETE AGGREGATES WHEN USED IN HOT MIX ASPHALT*. CORUÑA.
- PASANDÍN, A., & PEREZ, I. (s.f.). *OVERVIEW OF BITUMINOUS MIXTURE MADE WITH RECYCLED CONCRETE AGGREGATES*.
- PEMEX, R. (s.f.). http://www.ref.pemex.com/octanaje/20_sala.htm.
- Pérez Ignacio, M. T. (2007). Propiedades Mécanicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. *Materiales de construcción Vol. 57*, 17-29.
- Pérez, I. P., Pasandín, A. M., & Medina, J. G. (2016). *Mezclas Asfálticas Dosificadas con RCD para carreteras de bajo tráfico*. University of A Coruña, Coruña.
- Pérez, J. P. (2014). Reciclaje en México. *comercio 2 vol. 64*.
- Reciclados, C. (s.f.). *CONCRETOS RECICLADOS*. Obtenido de CONCRETOS RECICLADOS:
<http://www.concretosreciclados.com.mx>

- REVUELTA, M. B. (2010). *MANUAL DE RCD Y ARIDOS RECICLADOS*. MADRID: FUEYO EDITORES.
- Rodriguez, A. P. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. UPC.
- Rosa Zuñiga C., G. S. (2006). Contrastación de los métodos de ensayo Marshall y Superpave.
- S.A., A. M. (2013). *INTRODUCCIÓN AL PROTOCOLO AMAAC PARA DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, PROTOCOLO AMAAC PA-MA 01/2013*. CIUDAD DE MÉXICO.
- Sánchez, J. F. (2014). Criterios de sustentabilidad para carreteras en México.
- SCT. (2000). Penetración en Cementos y Residuos Asfálticos. En SCT, *Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas (M-MMP-4-05-006/00)*.
- SCT. (2000). Punto de Inflamación Cleveland en cementos Asfálticos. En SCT, *Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas*.
- SCT. (2000). Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos. En SCT, *Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas*.
- SCT. (2002). Desgaste mediante la prueba de Los Ángeles de los materiales Pétreos para mezclas asfálticas. En SCT, *Materiales pétreos para mezclas asfálticas*.
- SCT. (2002). Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas. En SCT, *Materiales Pétreos Para Mezclas Asfálticas*.
- SCT. (2002). Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos. En *MMP. METODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES*. MEXICO.

- SCT. (2006). Calidad de los materiales asfálticos. En SCT, *CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES*.
- SCT. (2007). Ductilidad de Cementos y Residuos Asfálticos (M-MMP-4-05-011/07). En SCT, *Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas*.
- SCT. (2008). CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CARRETERAS. En SCT, *CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES*.
- SCT. (2008). MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS. En SCT, *CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES*.
- SCT. (2008). Partículas alargadas y lajeadas de materiales pétreos para mezclas asfálticas (M-MMP-4-04-005/08). En SCT, *Materiales pétreos para mezclas asfálticas*.
- Secretaría de Medio Ambiente. (2002). Minimización y manejo de los residuos de la construcción, diagnóstico 2002. 56.
- Solis, J. V. (s.f.). *Manual de Diseño de mezclas asfálticas en caliente de Granulometría densa de Alto Desempeño con Protocolo AMAAC*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
- Tim Murphy, P. a. (2008). *Marshall Mix Design*. Schiller Park, Illinois 60176 U.S.A.: Humboldt Mfg. Co.
- Torres Rodrigo, P. F. (2014). Mezclas asfálticas para materiales de construcción y demolición para la reparación de pavimentos.
- Torres, M. I., & Lepe, D. J. (2008). *Comportamiento de especímenes de concreto reciclado ante la acción de cargas ambientales*. Ciudad de México.
- UICN. (s.f.). *GUÍA DE MANEJO DE ESCOMBROS Y OTROS RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN*.

VALENCIA, L. E., RAMIREZ, A. M., & BARRIGA, C. H. (2005).
ENVEJECIMIENTO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO.
QUERETARO: EDITORIAL ACADEMIA ESPAÑOLA.

Vázquez, M. B. (2012). Experiencia con Mezclas Bituminosas
Recicladas Templadas y en Caliente Para Capas de Rodadura
de Firmes de Carreteras de Baja Intensidad de Tránsito.
ASEFMA.

W., P. R., & A., G. V. (1984). Summary of testing of recycled Crushed
Concrete. *TranspRes Rec*, 19-26.