

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“COMPORTAMIENTO DEL DISEÑO DE MEZCLA
ASFÁLTICA TIBIA, CON ADICIÓN DE ZEOLITA PARA
LA PAVIMENTACIÓN DE LA CIUDAD DE JULIACA”**

TESIS

PRESENTADO POR:

WILBERT VALERIANO TURPO

ADHEMIR CATACORA MENDOZA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PROMOCIÓN 2014

PUNO - PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**“COMPORTAMIENTO DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA
TIBIA, CON ADICIÓN DE ZEOLITA PARA LA PAVIMENTACIÓN
DE LA CIUDAD DE JULIACA”**

TESIS

PRESENTADO POR:

Bach. Valeriano Turpo, Wilbert

Bach. Catacora Mendoza, Adhemir

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

APROBADO POR DICTAMEN DE JURADO:

PRESIDENTE:


Ing° MARIANO ROBERTO GARCIA LOAYZA

PRIMER MIEMBRO:


Ing° WALTER HUGO LIPA CONDORI

SEGUNDO MIEMBRO:


Ing° GINO FRANK LAQUE CORDOVA

DIRECTOR DE TESIS:


Ing° EMILIO CASTILLO ARONI

Área: Transportes y Gestión Vial.

Tema: Diseño de Mezcla Asfáltica.

Línea de investigación: Pavimentos Flexibles, Nuevas Tendencias.



DEDICATORIA

A Dios.

Quién supo guiarme por el camino correcto y darme fuerzas para seguir adelante. Por haberme dado la sabiduría para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor verdadero.

A mi madre Juana G.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, comprensión, amor y sobre todo por sus valores que caracteriza como una madre verdadera y única. Gracias por su oración, que me ha permitido ser una persona de bien.

A mi padre Mariano C.

Por los ejemplos de valentía, perseverancia y humildad que lo caracteriza. Además, que me ha instruido en el camino de valores y principios universales. Gracias padre, por tú deseo sincero para ser un profesional competente.

A mis familiares.

A mis hermanos Alfredo, Vilma, Edgar, Rigoberto y a todos que forman parte de mi familia; porque siempre he contado con ustedes para todo, gracias a la confianza que hemos tenido. Ellos participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

A mis amigos.

Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo amigos. Gracias por siempre y para siempre contare con ustedes.

¡De verdad gracias!

Wilbert Valeriano Turpo 

DEDICATORIA

A **Dios** Todopoderoso y a quienes me guardan desde el cielo, quienes me dan la sabiduría día a día y la fe necesaria para seguir adelante.

A mis **Padres**: Sr. Sabas Catacora V. y Sra. Gloria F. Mendoza C., por ayudarme con paciencia y cariño, guiándome siempre a escoger los caminos correctos; les dedico este trabajo con amor y cariño por su gran ejemplo de verdaderos padres por el empuje, confianza y apoyo incondicionales que me han brindado en todos los momentos de mi vida para poder conseguir mis metas.

A mis **hermanos**: Iber, Urizar, Yessenia y Rocio, porque siempre he contado con ustedes para todo, gracias a la confianza que hemos tenido. Ellos participaron directa o indirectamente en la elaboración de mi proyecto de investigación.

A todos mis **amigos y amigas**: que me apoyaron incondicionalmente, para seguir adelante y cumplir con mis metas y objetivos.

¡De verdad gracias!

Adhemir Catacora Mendoza



AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por bendecirnos con la inteligencia y sabiduría para llegar hasta donde hemos llegado, por consiguiente, hacemos realidad este sueño anhelado. Eres el padre celestial de nuestras vidas, ponemos en tus manos nuestras vidas y nuestro espíritu.

Agradecemos a nuestros padres y a nuestros hermanos (as) por haber colaborado en hacer la realidad el presente trabajo de investigación. Sobre todo, en guiarnos en el camino de los valores y principios inquebrantables.

Agradecemos a cada uno de los Ingenieros Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil por habernos impartido sus conocimientos durante nuestra formación profesional que, en este andar por la vida, influyeron con sus lecciones y experiencias en formarnos como personas de bien y preparada para los retos que nos pone la vida, a todos y a cada uno de ellos les agradecemos. Gracias por forjarnos unos profesionales competentes y eficientes.

Agradecemos a la Universidad Nacional del Altiplano y en especial a Escuela Profesional de Ingeniería Civil por formarnos excelentes profesionales. Al mismo tiempo agradecemos, a nuestro Director de tesis Ing° Emilio Castillo Aroni y a los Ingenieros jurados (dictaminador) por su apoyo en hacer realidad el presente trabajo de investigación.

Agradecemos al Ing° Ricardo Aroni Acero por habernos apoyado en la elaboración del presente trabajo de investigación y por habernos impartido sus conocimientos trascendentales. De la misma manera agradecemos a la Municipalidad Provincial de San Román - Juliaca en especial al Laboratorio de Suelos y Pavimentos, por habernos permitido en hacer la realidad el presente trabajo de investigación.

¡Gracias, de verdad a todos! 

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	20
ABSTRACT	21
I. Introducción	22
1.1 Planteamiento del Problema	22
1.1.1. Problema General	23
1.1.2. Problemas Específicos	23
1.2. Antecedentes	23
1.3. Justificación	30
1.4. Objetivos del Estudio	32
1.4.1. Objetivo General	32
1.4.2. Objetivos Específicos	32
1.5. Hipótesis	32
1.5.1. Hipótesis General.....	32
1.5.2. Hipótesis Específicos	32
1.6. Operacionalización de variables	33
1.6.1. Variable Independiente.....	33
1.6.2. Variable dependiente	33
1.6.3. Indicadores.....	33
1.7. Metodología de investigación	33
1.7.1. Tipo de investigación.....	33
1.7.2. Nivel de Investigación	33
1.7.3. Método de Investigación.....	34
1.7.4. Diseño de la investigación.....	34
II. Revisión de la Literatura	36
2.1 Materiales pétreos	36
2.1.1 Importancia del Agregado en una Mezcla Asfáltica	36
2.1.2 Definición de Agregado	36
2.1.3 Tipos de Agregados Pétreos	36
2.1.4 Clasificación de los Agregados de Acuerdo a su Tamaño	38
2.1.5 Consideraciones Acerca del Empleo de los Agregados Pétreos	38
2.1.6 Propiedades de los Agregados Pétreos	39
2.1.7 Polvo Mineral (Filler)	44

2.1.8	Zeolita	47
2.1.9	Mezcla de Agregados.....	53
2.1.10	Ensayos Realizados a los Agregados Pétreos	57
2.1.11	Especificaciones Técnicas Para Agregados	58
2.2	Materiales Asfálticos	60
2.2.1	Antecedentes	60
2.2.2	Definiciones:.....	60
2.2.3	Refinamiento del Petróleo	62
2.2.4	Tipos de Asfalto.....	65
2.2.5	Comportamiento Mecánico del Cemento Asfáltico	66
2.2.6	Especificaciones y Ensayos Para Cemento Asfálticos	69
2.3	Mezclas Asfálticas	72
2.3.1	Funcionalidad de las Mezclas Asfálticas	73
2.3.2	Propiedades Funcionales de las Mezclas Asfálticas.....	74
2.3.3	Clasificación de las Mezclas Asfálticas.....	74
2.3.4	Propiedades Volumétricas de las Mezclas Asfálticas	78
2.3.5	Mezclas Asfálticas Tibias (Warm Mixes Asphalt – WMA)	85
2.4	Diseño de Mezclas Asfálticas Mediante el Método Marshall	97
2.4.1	Preparación para Efectuar los Procedimientos Marshall.....	98
2.5	Ensayos de Mezclas Asfálticas	104
2.6	Metodología Normativa de Mezcla Asfáltica	105
2.6.1	Requisitos para Mezcla de Concreto Bituminoso	105
2.6.2	Recomendaciones para Mezclas Asfálticas.....	106
III.	Materiales y Métodos	109
3.1	Ensayo de Control de Calidad de Agregados	109
3.1.1	Agregado Mineral Grueso	109
3.1.2	Agregado Mineral Fino	110
3.1.3	Relleno Mineral Filler - Cal Hidratada.....	110
3.1.4	Relleno Mineral Filler - Zeolita Natural.....	110
3.1.5	Ensayo de Calidad de los Agregados.....	111
3.2	Cemento Asfáltico	140
3.3	Desarrollo Experimental del Método Marshall	141
3.3.1	Dosificación de Agregados.....	141
3.3.2	Procedimiento de Ensayo Marshall	143

3.4	Diseño para Mezclas Asfálticas por el Método Marshall (Asfalto Convencional – 140°C)	151
3.4.1	Peso Unitario de la Muestra Compactada	151
3.4.2	Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados	152
3.4.3	Gravedad Específica Efectiva del Agregado.....	152
3.4.4	Asfalto Absorbido	153
3.4.5	Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla.....	154
3.4.6	Porcentaje VMA en Mezcla Compactada	155
3.4.7	Porcentaje de Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada	156
3.4.8	Vacíos Llenos con Asfalto	157
3.4.9	Calculo del Contenido Óptimo de Asfalto Convencional.....	157
3.4.10	Gráficos de Ensayo Marshall.....	158
3.4.11	Resultado del Diseño de Mezcla Asfáltica Convencional (140°C)	159
3.5	Diseño para Mezclas Asfálticas por el Método Marshall (Asfalto Convencional – 100°C)	160
3.5.1	Peso Unitario de la Muestra Compactada	160
3.5.2	Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados	161
3.5.3	Gravedad Específica Efectiva del Agregado.....	161
3.5.4	Asfalto Absorbido	162
3.5.5	Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla.....	163
3.5.6	Porcentaje VMA en Mezcla Compactada	164
3.5.7	Porcentaje de Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada	165
3.5.8	Vacíos Llenos con Asfalto	166
3.5.9	Calculo del Contenido Óptimo de Asfalto Convencional.....	166
3.5.10	Gráficos de Ensayo Marshall.....	167
3.5.11	Resultado del Diseño de Mezcla Asfáltica Convencional (100°C)	168
3.6	Diseño para Mezclas Asfálticas por el Método Marshall (Asfalto Modificado – 100°C – 2% Zeolita Natural)	169
3.6.1	Peso Unitario de la Muestra Compactada	169
3.6.2	Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados	170
3.6.3	Gravedad Específica Efectiva del Agregado.....	170
3.6.4	Asfalto Absorbido	171
3.6.5	Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla.....	172
3.6.6	Porcentaje VMA en Mezcla Compactada	173

3.6.7	Porcentaje de Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada	174
3.6.8	Vacíos Llenos con Asfalto	175
3.6.9	Calculo del Contenido Óptimo de Asfalto Modificado	175
3.6.10	Gráficos de Ensayo Marshall.....	176
3.6.11	Resultado del Diseño de Mezcla Asfáltica Modificado (100°C – 2% Zeolita Natural).....	177
3.7	Resistencia a la Compresión Simple	178
3.8	Ensayo de la Tracción Indirecta	179
3.9	Análisis Estadístico	181
3.9.1	Distribución “T” de Student.....	181
IV.	Resultados y Discusión	184
4.1	Pruebas Efectuadas a la Zeolita Natural	184
4.1.1	Reacción de la zeolita con asfalto caliente:	184
4.2	Resultados del Ensayo Marshall de las Mezclas	187
4.2.1	Comparación del Contenido de Asfalto Óptimo	187
4.2.2	Comparación de Pesos Unitarios	187
4.2.3	Comparación de Vacíos de Aire	188
4.2.4	Comparación de Flujo	188
4.2.5	Comparación de Estabilidad.....	189
4.2.6	Comparación de Vacíos en el Agregado Mineral.....	190
4.2.7	Comparación de Vacíos Llenos con Asfalto	190
4.2.8	Comparación de Índice de Rigidez	191
4.3	Contrastación de Hipótesis	191
4.3.1	Contrastación de Hipótesis General	191
4.3.2	Contrastación de Hipótesis Específicos.....	193
V.	Conclusiones	222
5.1	Conclusiones Generales.	222
5.2	Conclusiones Específicos.	222
VI.	Recomendaciones	224
6.1	Recomendaciones	224
	Referencias.....	225
	Anexos.....	228
	Anexo A: Certificado de Uso de Laboratorio	228
	Anexo B: Ensayos de Control de la Calidad de Materiales	228

Anexo C: Ensayo de Mezcla Asfáltica.....	228
Anexo D: Ficha Técnica de Zeolita Natural	228
Anexo E: Informe de Medición de CO2	228
Anexo F: Tabla de Distribución T Student.....	228

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. 1.	Muestras de Estudio Convencional y Modificado	34
Figura N° 2. 1.	La Forma, Textura y Angularidad de las Partículas de Agregado.....	43
Figura N° 2. 2.	Estructura básica de una Zeolita.....	50
Figura N° 2. 3.	Grafico del Método del Cuadrado	54
Figura N° 2. 4.	Grafico del Método del Triangulo	55
Figura N° 2. 5.	Grafico del Método por ROTHFUCHS	57
Figura N° 2. 6.	Cemento asfáltico, agregados y briqueta	61
Figura N° 2. 7.	Productos y Temperaturas Típicas de Destilación	62
Figura N° 2. 8.	Refinamiento del Petróleo.....	64
Figura N° 2. 9.	Comportamiento del Asfalto.....	66
Figura N° 2. 10.	Características del Flujo de Líquidos	67
Figura N° 2. 11.	Ahuellamiento o Deformación Permanente o Rutting.....	68
Figura N° 2. 12.	Agrietamiento por bajas temperaturas	68
Figura N° 2. 13.	Esquema del Ensayo de Penetración	70
Figura N° 2. 14.	Viscosidad Absoluta	71
Figura N° 2. 15.	Viscosidad Cinemática.....	72
Figura N° 2. 16.	Clasificación de mezclas asfálticas por rango de temperaturas.....	76
Figura N° 2. 17.	Propiedades Peso – Volumen en Mezclas Asfálticas Compactadas.....	79
Figura N° 2. 18.	Esquema de una Muestra HMA Compactada	80
Figura N° 2. 19.	Técnicas de fabricación de Mezcla asfáltica	86
Figura N° 2. 20.	Prueba de comparación de MAC y MAT	90
Figura N° 2. 21.	Reducción de emisiones en la producción de mezcla en planta.....	91
Figura N° 2. 22.	Reducción de la viscosidad utilizando aditivos orgánicos	92
Figura N° 2. 23.	Reducción de las temperaturas de colocación y compactación.....	94
Figura N° 2. 24.	Consumo de Combustible vs Temperatura	95
Figura N° 2. 25.	Niveles de emisión de CO ₂ medida en la planta.....	96
Figura N° 2. 26.	Niveles de emisión de CO y NO _x medida en la planta.....	96

Figura N° 2. 27. Niveles de emisión de SO ₂ y polvo medida en planta	97
Figura N° 2. 28. Resultados Típicos de diseño de mezcla asfáltica ensayada en la prensa Marshall.....	103
Figura N° 3. 1. Cantera Zeolita Natural.....	111
Figura N° 3. 2. Acopio de la Cantera Cabanillas.....	111
Figura N° 3. 3. Selección de la Muestra Representativa.....	112
Figura N° 3. 4. Ensayo Granulométrico	113
Figura N° 3. 5. Molde Cónico y Golpes a la Superficie Suavemente.....	121
Figura N° 3. 6. Preparando las Probetas para Introducir la Muestra	122
Figura N° 3. 7. Peso Saturado al Agua del Agregado Grueso	124
Figura N° 3. 8. Ensayo Abrasión de Ángeles de Piedra Chancada.....	126
Figura N° 3. 9. Ensayo de Durabilidad al Sulfato de Magnesio.....	129
Figura N° 3. 10. Secado de las Muestras al Horno a 110°C.	129
Figura N° 3. 11. Selección de Una y Dos o Más Caras Fracturadas.....	131
Figura N° 3. 12. Partículas Chatas y Alargadas de la Piedra Chancada	133
Figura N° 3. 13. Ensayo de los Límites de ATTEBERG	136
Figura N° 3. 14. Ensayo de equivalente de Arena del Agregado Fino	138
Figura N° 3. 15. Contenido de Humedad de la Zeolita Natural	139
Figura N° 3. 16. Cemento Asfalto Para los Ensayos PEN 120-150.....	141
Figura N° 3. 17. Calentamiento de Agregado y Asfalto a 140°C y 100°C	144
Figura N° 3. 18. Mezcla de Agregado, Filler y Asfalto.....	144
Figura N° 3. 19. Medición de Temperatura y Chuseado de Mezcla Asfáltica	145
Figura N° 3. 20. Compactación de los Especímenes a 75 golpes.....	146
Figura N° 3. 21. Extracción de Espécimen con Gata Hidráulica	146
Figura N° 3. 22. Identificación de los especímenes para cada contenido de asfalto.....	147
Figura N° 3. 23. Peso en el Aire del Espécimen Seco	147
Figura N° 3. 24. Peso de Espécimen en Agua a 25°C.....	148
Figura N° 3. 25. Peso en el Aire del Espécimen Saturado con Superficie Seca.....	148
Figura N° 3. 26. Colocación de Especímenes en Baño de Agua a 60 ± 1°C durante 30 min.....	149
Figura N° 3. 27. Medición de Estabilidad y Flujo en Máquina de Marshall....	149
Figura N° 3. 28. Enfriamiento y Pesado de Mezcla Asfáltica - RICE.....	150

Figura N° 3. 29. Remoción del aire atrapado a 30 mm de Hg durante 5 -15 minutos.....	150
Figura N° 3. 30. Gráficos de Ensayo Marshall Convencional de 140°C	158
Figura N° 3. 31. Gráficos de Ensayo Marshall Convencional de 100°C	167
Figura N° 3. 32. Gráficos de Ensayo Marshall Modificado de 100°C	176
Figura N° 3. 33. Lectura de la Resistencia a la Compresión Simple	179
Figura N° 3. 34. Rotura del Ensayo Tracción Indirecta	181
Figura N° 3. 35. Nivel de Significancia.....	182
Figura N° 4. 1. Mezcla de zeolita húmeda, seca y asfalto.....	184
Figura N° 4. 2. Porcentaje de Composición Química de la Zeolita Natural Clinoptilolita.....	186
Figura N° 4. 3. Comparación de Contenido de Asfalto Óptimo	187
Figura N° 4. 4. Comparación de Pesos Unitarios.....	188
Figura N° 4. 5. Comparación de Vacíos de Aire	188
Figura N° 4. 6. Comparación de Flujo.....	189
Figura N° 4. 7. Comparación de Estabilidad	189
Figura N° 4. 8. Comparación de VMA.....	190
Figura N° 4. 9. Comparación de VFA	190
Figura N° 4. 10. Comparación de Índice de Rigidez	191
Figura N° 4. 11. Comparación de Estabilidad para Óptimo de asfalto	193
Figura N° 4. 12. Comparación de Flujo Para Óptimo de Asfalto	197
Figura N° 4. 13. Comparación de Resistencia a la Compresión Simple Para Óptimo de Asfalto	200
Figura N° 4. 14. Comparación de Tracción Indirecta Para Óptimo de Asfalto.....	204
Figura N° 4. 15. Comparación de Medición de CO2 (ppm).....	210
Figura N° 4. 16. Preparación y Medición de Temperatura de Mezclas Asfáltica.....	211
Figura N° 4. 17. Medición de Emisión de CO2 (ppm)	211
Figura N° 4. 18. Comparación de Costos por un Metro Cuadrado	218

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. 1. Chemical Composición and Physical Properties of Natural Zeolite.....	30
Tabla N° 1. 2. Chemical Composition of Clinoptilolite (Weight %).....	30
Tabla N° 1. 3. Matriz de Consistencia.....	35
Tabla N° 2. 1. Clasificación Estructural de las Zeolitas Naturales	48
Tabla N° 2. 2. Relación Si/Al para diferentes tipos de Zeolitas	49
Tabla N° 2. 3. Requerimientos Para los Agregados Gruesos	58
Tabla N° 2. 4. Requerimientos para los Agregados Finos	59
Tabla N° 2. 5. La gradación de la Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC).....	59
Tabla N° 2. 6. Porcentaje Retenido de Filler.....	60
Tabla N° 2. 7. Tipo de Cemento Asfáltico	65
Tabla N° 2. 8. Propiedades Funcionales de las Mezclas Asfálticas	74
Tabla N° 2. 9. Clasificación de las tecnologías WMA de acuerdo a la temperatura de producción.	75
Tabla N° 2. 10. Clasificación de las tecnologías WMA Empleando Asfalto Espumado.....	87
Tabla N° 2. 11. Clasificación de las tecnologías WMA de acuerdo al empleo de aditivos orgánicos	88
Tabla N° 2. 12. Consumo de Combustible en Función a la Temperatura	94
Tabla N° 2. 13. Consumo de Combustible para una Temperatura de 100°C ...	95
Tabla N° 2. 14. Requisitos Para Mezcla de Concreto Bituminoso.....	105
Tabla N° 2. 15. Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)	106
Tabla N° 3. 1. Piedra Chancada de Tamaño Máximo de 1/2"	114
Tabla N° 3. 2. Arena Chancada de Tamaño Máximo de 1/4"	115
Tabla N° 3. 3. Arena Zarandeada de Tamaño Máximo de 3/8"	116
Tabla N° 3. 4. Cal Hidratada.....	117
Tabla N° 3. 5. Zeolita Natural	117
Tabla N° 3. 6. Resultados del Ensayo Peso Específico de la Arena Chancada (1/4").....	120
Tabla N° 3. 7. Resultados del Ensayo Peso Específico de la Arena Zarandeada (3/8").....	121

Tabla N° 3. 8. Resultados del Ensayo Peso Específico de la Piedra Chancada (1/2").....	124
Tabla N° 3. 9. Resultados del Desgaste por Abrasión en la Máquina de Ángeles.....	125
Tabla N° 3. 10. Resultados de la Durabilidad al Sulfato de Magnesio (Agregado Fino).....	128
Tabla N° 3. 11. Resultados de la Durabilidad al Sulfato de Magnesio (Agregado Grueso).....	128
Tabla N° 3. 12. Resultados de las Partículas con Una Cara Fracturada del Agregado Grueso	130
Tabla N° 3. 13. Resultados de las Partículas con Dos o Más Caras Fracturadas del Agregado Grueso.....	131
Tabla N° 3. 14. Resultados de las Partículas Chatas	132
Tabla N° 3. 15. Resultados de las Partículas Alargadas.....	133
Tabla N° 3. 16. Resultados del Ensayo de Límites Pasante el Tamiz N° 40. .	134
Tabla N° 3. 17. Resultados del Ensayo de Límites Pasante el Tamiz N° 200.....	135
Tabla N° 3. 18. Resultados de Equivalente de Arena Zarandeada de 3/8"	137
Tabla N° 3. 19. Resultados de Equivalente de Arena Chancada de 1/4"	138
Tabla N° 3. 20. Resultados del Contenido de Humedad de la Zeolita.....	139
Tabla N° 3. 21. Especificaciones Técnicas del Cemento Asfáltico PEN 120-150.....	140
Tabla N° 3. 22. Dosificación de Agregados en el Marshall – Convencional 140°C.....	143
Tabla N° 3. 23. Peso Unitario de la Muestra Compactada (Gmb).....	151
Tabla N° 3. 24. Gravedad Específica Bulk de la combinación de agregados (Gsb).....	152
Tabla N° 3. 25. Gravedad Específica Efectiva del Agregado (Gse)	153
Tabla N° 3. 26. Asfalto Absorbido (Pba)	154
Tabla N° 3. 27. Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla (Pbe).....	155
Tabla N° 3. 28. Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)	156
Tabla N° 3. 29. Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada (Va)	156
Tabla N° 3. 30. Vacíos Llenos con Asfalto (VFA).....	157

Tabla N° 3. 31. Resultado del Diseño de Mezcla Asfáltica Convencional – 140°C.....	159
Tabla N° 3. 32. Peso Unitario de la Muestra Compactada (Gmb).....	160
Tabla N° 3. 33. Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados (Gsb).....	161
Tabla N° 3. 34. Gravedad Específica Efectiva del Agregado (Gse)	162
Tabla N° 3. 35. Asfalto Absorbido (Pba)	163
Tabla N° 3. 36. Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla (Pbe).....	164
Tabla N° 3. 37. Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)	165
Tabla N° 3. 38. Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada (Va)	165
Tabla N° 3. 39. Vacíos Llenos con Asfalto (VFA).....	166
Tabla N° 3. 40. Resultado del Diseño de Mezcla Asfáltica Convencional – 100°C.....	168
Tabla N° 3. 41. Peso Unitario de la Muestra Compactada (Gmb).....	169
Tabla N° 3. 42. Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados (Gsb).....	170
Tabla N° 3. 43. Gravedad Específica Efectiva del Agregado (Gse)	171
Tabla N° 3. 44. Asfalto Absorbido (Pba)	172
Tabla N° 3. 45. Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla (Pbe).....	173
Tabla N° 3. 46. Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)	174
Tabla N° 3. 47. Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada (Va)	174
Tabla N° 3. 48. Vacíos Llenos con Asfalto (VFA).....	175
Tabla N° 3. 49. Resultado del Diseño de Mezcla Asfáltica Modificado – 100°C – 2% Zeolita Natural	177
Tabla N° 3. 50. Resistencia a la Compresión Simple (140°C).....	178
Tabla N° 3. 51. Resistencia a la Compresión Simple (100°C).....	178
Tabla N° 3. 52. Resistencia a la Compresión Simple Modificado con 2% de Zeolita (100°C).....	178
Tabla N° 3. 53. Tracción Indirecta Convencional (140°C).....	180
Tabla N° 3. 54. Tracción Indirecta Convencional (100°C).....	180
Tabla N° 3. 55. Tracción Indirecta Modificado con 2% de Zeolita (100°C).....	180
Tabla N° 4. 1. Composición Química de la Zeolita Natural Clinoptilolita	186
Tabla N° 4. 2. Resultados de Ensayo Marshall.....	192

Tabla N° 4. 3. Análisis de <i>t</i> Student para Estabilidad Convencional 140°C y modificado 2% Zeolita Natural	194
Tabla N° 4. 4. Análisis de T Student Para Estabilidad Convencional de 100°C y Modificado 2% Zeolita Natural	195
Tabla N° 4. 5. Análisis de <i>t</i> Student Para Flujo Convencional de 140°C y Modificado 2% Zeolita Natural	197
Tabla N° 4. 6. Análisis de T Student Para Flujo Convencional de 100°C y Modificado 2% Zeolita Natural	199
Tabla N° 4. 7. Análisis de T Student Para Resistencia a la Compresión Simple Convencional de 140°C y Modificado 2% Zeolita Natural	201
Tabla N° 4. 8. Análisis de T Student Para Resistencia a la Compresión Simple Convencional de 100°C y Modificado 2% Zeolita Natural	202
Tabla N° 4. 9. Análisis de T Student Para Tracción Indirecta - Seca Convencional de 140°C y Modificado 2% Zeolita Natural	205
Tabla N° 4. 10. Análisis de T Student Para Tracción Indirecta - Seca Convencional de 100°C y Modificado 2% Zeolita Natural	206
Tabla N° 4. 11. Análisis de T Student Para Tracción Indirecta - Sumergido Convencional de 140°C y Modificado 2% Zeolita Natural	207
Tabla N° 4. 12. Análisis de T Student Para Tracción Indirecta - Sumergido Convencional de 100°C y Modificado 2% Zeolita Natural	208
Tabla N° 4. 13. Resultados de Medición de CO2 (ppm)	210
Tabla N° 4. 14. Análisis de T Student Para Medición de Emisión de CO2 Convencional de 140°C y Modificado 2% Zeolita Natural	212
Tabla N° 4. 15. Análisis de T Student Para Medición de Emisión de CO2 Convencional de 100°C y Modificado 2% Zeolita Natural	213
Tabla N° 4. 16. Calculo de Volumen para los Materiales de Mezcla Asfáltica	215
Tabla N° 4. 17. Calculo de la Cantidad de Materiales para 1 m ³ de Mezcla Asfáltica Convencional de 140°C	215
Tabla N° 4. 18. Cantidad de materiales para 1 m ² de carpeta asfáltica de 2 Pulg – Convencional 140°C	216
Tabla N° 4. 19. Calculo de la Cantidad de Materiales para 1 m ³ de Mezcla Asfáltica Convencional de 100°C	216
Tabla N° 4. 20. Cantidad de materiales para 1 m ² de carpeta asfáltica de 2 Pulg – Convencional 100°C	216

Tabla N° 4. 21. Calculo de la Cantidad de Materiales para 1 m ³ de Mezcla Asfáltica con 2% de Zeolita a 100°C	217
Tabla N° 4. 22. Cantidad de materiales para 1 m ² de carpeta asfáltica de 2 Pulg – 2% de Zeolita a 100°C	217
Tabla N° 4. 23. Análisis de Costo Unitario de Mezcla Asfáltica Convencional 140°C.....	219
Tabla N° 4. 24. Análisis de Costo Unitario de Mezcla Asfáltica Convencional 100°C.....	220
Tabla N° 4. 25. Análisis de Costo Unitario de Mezcla Asfáltica Modificado a 100°C con 2% de Zeolita	221

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

AASHTO:	American Association of State Highway and Transportation Officials o Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte
ASTM:	American Society for Testing and Materials ó Sociedad Americana para Ensayos y Materiales
NTP:	Normas Técnicas Peruanas
\bar{X} :	Media Muestral
S^2 :	Varianza
S:	Desviación estándar
H ₀ :	Hipótesis nula
H ₁ :	Hipótesis alternativa
α :	Nivel de significancia
L. L.:	Limite Líquido
L. P.:	Límite Plástico
I. P.:	Índice de Plasticidad
°C:	Grado Celsius
CO ₂ :	Dióxido de Carbono
HMA:	Hot Mixes Asphalt
MAT:	Mezcla Asfáltica Tibia
MAC:	Mezcla Asfáltica Convencional
N ₂ O:	Óxido Nitroso
PG:	Performance Grade
PPM:	Partes Por Millón
TM:	Tamaño Máximo de Partícula
VFA:	Voids Filled with Asphalt
VMA:	Voids in the Mineral Aggregates
WMA:	Warm Mixes Asphalt

RESUMEN

El presente proyecto de investigación del diseño de Mezcla Asfáltica Tibia, permite una reducción de la temperatura, principalmente en la producción de la mezcla asfáltica, mediante la adición de la Zeolita Natural. En esta investigación se analizó el comportamiento del diseño de Mezcla Asfáltica Tibia con adición de Zeolita Natural Clinoptilolita, además los beneficios ambientales y económicos en comparación con la Mezcla Asfáltica Convencional. Para ello, se realizó mediante la metodología Marshall un estudio comparativo, en porcentajes de Zeolita Natural Clinoptilolita de 1%, 2% y 3% como filler y contenido de asfalto 5.5%, 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%, obteniéndose mejores resultados del grafico Marshall un diseño de Mezcla Asfáltica Convencional (140°C y 100°C) con 6.8% de asfalto óptimo y 6.6% de asfalto optimo en la Mezcla Asfáltica Tibia con incorporación de 2% de Zeolita Natural Clinoptilolita como filler. El resultado obtenido mostró un comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica modificada con zeolita de 2% parcialmente inferior respecto a la Mezcla Asfáltica Convencional de 140°C; y ligeramente superior a la Mezcla Asfáltica Convencional de 100°C. En cuanto a los beneficios ambientales el diseño de Mezcla Asfáltica Tibia, cabe resaltar una disminución de la emisión del dióxido de carbono (CO₂) en 67.54% y 24.25% respecto a las Mezclas Asfálticas convencionales de 140°C y 100°C respectivamente, que es el responsable del calentamiento global; además se ahorra el consumo de combustible y disminución en costo de producción en 3.77% y 2.95% respecto a las Mezclas Asfálticas Convencionales de 140°C y 100°C respectivamente.

Palabras claves: *Mezcla asfáltica tibia, viscosidad, temperatura, zeolita.*

ABSTRACT

The present project of investigation of the design of Asphaltic Mix Tibia, allows a reduction of the temperature, mainly in the production of the asphaltic mixture, by the addition of Natural Zeolite. In this research the behavior of the Tibia Asphaltic Mix design with the addition of Natural Clinoptilolite Zeolite was analyzed, as well as the environmental and economic benefits compared to the Conventional Asphalt Mixture. For this, a comparative study was carried out using the Marshall methodology in percentages of 1%, 2% and 3% Zeolite Natural Clinoptilolite as filler and asphalt content 5.5%, 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% and 8.0% (140 ° C and 100 ° C) with 6.8% of optimum asphalt and 6.6% of optimum asphalt in the Tibia Asphaltic Mix with incorporation of 2% of Natural Zeolite Clinoptilolite as Filler The result obtained showed a mechanical behavior of the asphalt mixture modified with zeolite of 2% inferior to the Conventional Asphalt Mixture of 140 ° C; And slightly higher than the Conventional Asphalt Mixture of 100 ° C. As for the environmental benefits of the Tibia Asphalt Mixture design, it is worth mentioning a reduction in the emission of carbon dioxide (CO₂) by 67.54% and 24.25%, compared to the conventional Asphalt Mixtures of 140 ° C and 100 ° C respectively, which is responsible for global warming; In addition, fuel consumption and production cost reduction are reduced by 3.77% and 2.95%, respectively, compared to conventional asphalt mixtures of 140 ° C and 100 ° C respectively.

Keywords: *Warm asphalt mixture, viscosity, temperature, zeolite.*

CAPÍTULO I

Introducción

1.1 Planteamiento del Problema

El problema de la infraestructura vial en el Perú generalmente radica en proyectos de pavimentos flexibles en caliente y frío. El tipo de diseño de mezcla asfáltica más utilizada ha sido la mezcla asfáltica en caliente, por lo que éste diseño ha originado problemas ambientales en la contaminación, debido a emisión de gases, consumo de combustible y aumento de energía en la elaboración de las mezclas. Por lo que, es importante contar con una nueva técnica que permita la elaboración y aplicación del diseño de mezcla asfáltica tibia con adición de zeolita natural, y así logrando que sean más duraderas, económicas y disminuir los aspectos negativos de contaminación ambiental.

Hoy en día en la ciudad de Juliaca - región de Puno, el problema es buscar una mejor aplicación de mezclas asfálticas a temperaturas inferiores bajo cero y a altas temperaturas, es por lo que el diseño de mezcla asfáltica tibia con adición de zeolita natural brinda enormes beneficios como facilidad en colocación y compactación en climas fríos o en las noches donde baja más la temperatura del ambiente, menores velocidades de enfriamiento lo que permite distancias más largas de transporte y una apertura más rápida al tránsito.

El problema que se presenta en los pavimentos, es debido a que las mezclas asfálticas no poseen un buen comportamiento mecánico, debido a que son sometidos a condiciones de trabajo tales como flexión, compresión, tracción, cortante y otras. Por lo que la aplicación del diseño de mezcla asfáltica tibia con zeolita natural para construcción de pavimentos asfálticos; se busca el cumplimiento de la normatividad de las instituciones técnicas, tales como AASHTO, ASTM, Instituto del asfalto ACI, Manual de Ensayo de Materiales (MTC

- 2016) y Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG - 2013, son las especificaciones que rigen en la construcción de carreteras.

1.1.1. Problema General

¿Cómo influye la adición de zeolita en el comportamiento del diseño de mezcla asfáltica tibia; cuáles son los beneficios ambientales y económicos frente a las mezclas asfálticas convencionales para la pavimentación de la ciudad de Juliaca?

1.1.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo mejora las propiedades mecánicas con adición de zeolita en el diseño de mezcla asfáltica tibia, frente a las mezclas asfálticas convencionales?
- ¿Cómo influye ambientalmente la disminución de la emisión de CO₂ durante la etapa de producción al adicionar zeolita en la mezcla asfáltica tibia?
- ¿Cuál es la diferencia de costo en la producción de mezcla asfáltica tibia en comparación con la mezcla asfáltica convencional?

1.2. Antecedentes

Actualmente existen tecnologías de mezclas asfálticas tibias que no son conocidas en el Perú, en este trabajo de investigación se abordará la metodología de mezcla asfáltica tibia utilizando zeolita natural, la cual puede ofrecer una serie de ventajas en relación a las mezclas asfálticas que actualmente se produce en nuestro país. Este trabajo de investigación tiene como referencia lo siguiente:

(Alonso et al., 2013), en su artículo “Estudio de laboratorio sobre utilización de zeolita natural versus zeolita sintética en la fabricación de mezclas semicalientes”, realizada en Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría – La Habana – Cuba. Indica las mezclas semicalientes permiten una reducción de la temperatura de fabricación respecto a las mezclas tradicionales, mediante la modificación del proceso de producción en planta o el empleo de aditivos. En esta investigación se analiza el empleo de zeolita natural procedente de Cuba como aditivo para la fabricación de mezclas semicalientes, en comparación con el empleo de zeolitas artificiales.

Para ello, a través de pruebas de estabilidad Marshall, sensibilidad al agua y módulos de rigidez se realiza un estudio comparativo. El resultado obtenido mostró un comportamiento similar entre las mezclas con zeolita natural y la sintética, resultando en ambos casos ligeramente inferior al obtenido por la mezcla patrón. Además, se evaluó la influencia de la adición de zeolita natural a la mezcla en diferentes porcentajes, como filler o como arena, obteniendo mejores resultados con la incorporación en la fracción filler. Por lo que se llega a las siguientes conclusiones.

- Es posible emplear zeolita natural cubana para el desarrollo de mezclas asfálticas semicalientes dada la similitud de la composición y características con la zeolita sintética y los resultados de los ensayos realizados a mezclas con ambos aditivos.
- Parece más adecuado añadir la zeolita natural como filler de aportación en la mezcla, ya que los resultados obtenidos en forma de arena no son significativamente muy superiores, lo que representa un ahorro del aditivo. La adición de zeolita natural en forma de arena puede ser empleada siempre que el contenido de aditivo satisfaga, tanto las propiedades de las mezclas como los beneficios medioambientales que representa la utilización de este recurso (zeolita).
- Para los materiales, mezclas y condiciones de ensayos de esta investigación, los mejores resultados en el ensayo Marshall y sensibilidad al agua (ITSR) fueron para la adición de 0,6% de filler de zeolita.
- La cantidad de agua que aporta la zeolita al proceso de espumación (que lógicamente se incrementa con la cantidad de material incorporado), debe ser controlada ya que existe un punto óptimo para cada tiempo y temperatura de mezclado, el cual una vez superado, afecta negativamente al comportamiento de la mezcla. Por tanto, durante el diseño de las mezclas debe determinarse la cantidad óptima de zeolita a incorporar a la mezcla.

(Celis y Serrano, 2008), en su tesis “Mezclas Asfálticas Tibias”, realizada en la Universidad Industrial de Santander de Escuela de Ingeniería Civil. Indica que el principal factor fue la reducción de la temperatura de mezclado, compactación y extendido de una mezcla asfáltica. Se quiso encontrar una metodología para la fabricación de mezclas asfálticas a 100°C, en el cual usa zeolita (aditivo mineral) en un porcentaje de 2.84% de total de la mezcla, con ensayos habituales como: Granulometría, Compactación y Compresión Simple, Módulo de elasticidad, Estabilidad y flujo, Porcentaje de vacíos en aire, en donde se concluye lo siguiente.

- Se logró el objetivo de crear una mezcla asfáltica tibia, a una temperatura de 100°C, obteniendo un excelente recubrimiento del agregado, mediante la expansión y efervescencia del asfalto, por acción de la zeolita.
- Se comprobó que la zeolita húmeda produce una mayor efervescencia y expansión del asfalto que la misma zeolita seca y un fino húmedo.
- Los ensayos de laboratorio muestran que la mezcla asfáltica tibia mediante el uso de la mineral zeolita, tiene mejores características mecánicas que la mezcla fabricada a 100°C.
- La mezcla asfáltica tibia está dentro del rango normal de porcentaje de vacíos con aire establecido por INVIAS (3% -5%), lo cual implica que esta mezcla es de fácil compactación.

(Suarez y Santos, 2009), en su tesis “Mezclas asfálticas producto de la combinación de técnicas en mezclas de alto modulo y mezclas tibias”, en el desarrollo de esta investigación se llevó a cabo la preparación de una mezcla a diferentes temperaturas (120, 140 y 160°C) las cuales se analizaron en cuanto a su preparación y proceso de mezclado observando las variaciones de la adherencia del ligante con los agregados, se caracterizaron y se sometieron a diferentes pruebas analizando su comportamiento mecánico. Al observar los resultados obtenidos en el diseño de mezcla asfáltica tibia se llega a la siguiente conclusión respecto a la adición de la zeolita:

- Para el desarrollo de la investigación la cual combina mezclas asfálticas de alto modulo y mezclas tibias; las especificaciones de granulometría para las mezclas tibias se indican que se debe reemplazar por zeolita el 50% en peso de los finos utilizados en la mezcla de una probeta, agregando a la mezcla total un 3.35% de zeolita.

(Moll, Alonso y González, 2016), en su artículo “Mezclas asfálticas de bajo impacto ambiental para la rehabilitación de las carreteras en Cuba”, en esta investigación su objetivo fue reducir el impacto ambiental negativo que provoca la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y la generación de desechos durante las labores de conservación vial, se han desarrollado a nivel internacional las mezclas asfálticas semicalientes producidas a temperaturas inferiores que las convencionales; para la mezcla semicaliente se añadió zeolita natural cubana en diferentes porcentajes, en forma de filler: 0,2 %; 0,4 %; 0,6 %; 0,8 % y 1 % para 4,5% y 5% de asfalto y se llega a siguiente resultado; la densidad disminuye al incrementarse el porcentaje de zeolita natural y los resultados para 0,8 % y 1,0 % de filler de zeolita son muy similares en densidad y los resultados de la estabilidad Marshall muestran que el incremento de zeolita de 0,2 a 0,8 %, con 4,5 % de asfalto, hace que aumente la resistencia de las mezclas, incluso con valores superiores a la mezcla patrón.

(Lesme, 2015), en su tesis “Estudio del Comportamiento de Mezclas Asfálticas Tibias (Mezcla Templadas) empleando emulsiones Súper - Estabilizadas”, realizada en Pontificia Universidad Católica de Chile, concluye que las mezclas asfálticas tibias presentan similares propiedades volumétricas a las mezclas asfálticas en caliente, pero presentan diferencias en sus propiedades mecánicas.

- Se demuestra que las propiedades mecánicas evaluadas a través de los ensayos Resistencia a Tracción Indirecta (ITS) y de Módulo de Rigidez de las mezclas no son equivalentes, debido a que existe diferencia entre ambas. Las mezclas asfálticas tibias (MAT) alcanzan un valor aproximado de 89,0% de la resistencia a tracción indirecta respecto a una mezcla mezclas asfálticas en caliente (MAC), y el

Módulo de Rigidez inicial de las mezclas MAT desarrolla un valor aproximado de 70,1% del Módulo de Rigidez de una mezcla MAC.

- Del análisis de costos realizado se obtiene que en el proceso de elaboración, colocación y compactación de las mezclas MAT existe un ahorro económico de 1,33 US\$ por m³ de mezcla respecto a las mezclas MAC, y un ahorro energético del 30% debido a la disminución del uso de combustibles. El ahorro económico y energético puede incrementarse con la incorporación de material reciclado en las mezclas.

(Lopera, 2013), en su tesis “Diseño de mezcla asfáltica tibia a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma”, indica que, en cuanto a los beneficios de utilizar mezclas tibias en el medio ambiente, cabe resaltar que al tener que calentar menos el asfalto para elaborar la mezcla asfáltica ahorramos el consumo de combustible reduciendo las emisiones de diversos gases, siendo el principal el Dióxido de Carbono que es el responsable del calentamiento global. En Estados Unidos la producción aproximada de Dióxido de Carbono en las plantas de mezclas asfálticas en caliente es de aproximadamente 2.500 toneladas por año, con el uso de las mezclas asfálticas es posible reducir esta cantidad hasta 1.700 ton.

Según Barthel y Von Devivere; mediciones realizado para Eurovia, empleando Asphamin, revelaron una reducción del 30% en el consumo de energía a causa de una reducción aproximada de 12 °C a 17 °C en la temperatura de la mezcla y una reducción del 75% en las emisiones de humos resultante de una reducción de 8 °C en la temperatura de producción. Las mediciones en el lugar de aplicación indican una reducción en las emisiones de humos de más de 90%, cuando la temperatura de la mezcla se redujo de 174 °C a 141 °C. En todos los casos, cuando se ha añadido Aspha-Min, se han reducido las temperaturas de mezcla y colocación, los olores han disminuido y las cuadrillas de mano de obra han confirmado mejores condiciones de trabajo¹.

¹ Diseño de Mezclas Asfálticas Drenantes Tibias, a Partir de la Mezcla de Cemento Asfáltico AC 60-70 con Licomont BS-100 Para Diferentes Niveles de Precipitación - Senior Arrieta, 2013.

Resultados en pistas experimentales de la Compañía Shell revelaron, empleando la tecnología WAM-Foam, ahorros de combustible de plantas y reducciones de CO₂ de 30%. Las mediciones de una planta de tambor en Noruega mostraron que la producción WAM-Foam dio las siguientes reducciones, en comparación con HMA en las tasas de producción idénticos: 40% en el consumo de diesel, el 31% de las emisiones de CO₂, el 29% de las emisiones de CO, y 62% en las emisiones de NO_x.

- **2005:** Formación del grupo de trabajo (TWG) de la mezcla Asfáltica Tibia de NAPA FHWA. El objetivo principal del trabajo es la implementación adecuada a través de recolección de datos y análisis, de un método genérico de especificaciones técnicas en WMA. Se realizan pruebas de campo en Florida, Indiana, Maryland, New Hampshire, Ohio; y en Canadá. La NCAT, publica sus primeros reportes sobre Sasobit y Aspha-min.
- **2006:** Durante la Conferencia de Pavimento Asfáltico en el Mundo del Asfalto, se presenta una sesión de medio día sobre mezclas tibias Grupo de Trabajo Técnico TWG, y se publican lineamientos sobre el funcionamiento y pruebas ambientales. Con base en la declaración de investigación de problemas, cuyo documento fue sometido en 2005 a evaluación por parte de la AASHTO, se define como de alta prioridad la destinación de fondos de la investigación en WMA.

Se realizan pruebas de campo en California, incorporando hule a la mezcla asfáltica y en Nueva York, donde se probó el nuevo proceso de Asfalto de bajo consumo de energía. McKenzie describe cómo las temperaturas más bajas de producción de las WMA podrían suponer un ahorro de combustible que superan el costo adicional de \$ 3.60/ton del aditivo Aspha-Min en la mezcla.

- **2007:** La AASHTO y FHWA, realizan visitas guiadas a experiencias en WMA, en Francia, Alemania y Noruega. Astec Industries introduce su tecnología de asfalto espumado. Se desarrolla, Advera WMA, un producto a partir de Zeolite. 30.000 toneladas de diferentes tecnologías de WMA, son colocadas cerca de Yellowstone, para el mes de agosto.

En las pruebas realizadas en la Yellowstone, se utilizaron 9000 toneladas métricas de asfalto, en cada una de las tres secciones (Sección de Control, Sección Sasobit y Sección de Advere WMA). Las cuadrillas de pavimentación lograron buenas densidades: el promedio de Advere WMA 93.9% de densidad teórica máxima; el promedio de Sasobit 93.4%. Neitke, quien estuvo a cargo del proyecto, declaró que la densidad no fue difícil de alcanzar, aun cuando las temperaturas de la mezcla bajan, ante lo cual, parecía un tanto difícil mantener bajas las temperaturas de la mezcla; las temperaturas de producción tenían una tendencia a pasar de 120 °C a 127 °C. Las pruebas mostraron que los agregados se secaron adecuadamente aun con bajas temperaturas. Los contenidos de humedad estaban debajo del máximo de 0.5% tanto para las mezclas en tibio como para la mezcla de control.

- **2008:** Un equipo de investigadores expertos estadounidenses visitó Bélgica, Francia, Alemania y Noruega para evaluar las diversas tecnologías WMA con apoyo y respaldo de la Administración Federal de Carreteras de Tecnología del Programa Internacional de Exploración. De este estudio es posible concluir que los beneficios de las tecnologías WMA incluyen el uso reducido de combustible y las emisiones en apoyo del desarrollo sostenible, la compactación mejorada del campo, lo que puede facilitar mayores distancias de acarreo y mejores condiciones de trabajo.
- **2011:** En Colombia, se logra un novedoso diseño para la elaboración de mezclas asfálticas tibias a partir de la combinación de asfalto y aceite crudo de palma, con el cual se lograron interesantes reducciones de temperatura en el proceso de fabricación en planta de una mezcla asfáltica de gradación discontinua y de elaboración tibia.

(Erdem, Karapinar y Donat, 2004), en su trabajo de investigación titulado “The removal of heavy metal cations by natural zeolites” indica que la siguiente zeolita natural identificado como Clinoptilolita tiene la siguiente composición química y propiedades físicas, Tabla N° 1.1.

Tabla N° 1. 1. Chemical Composition and Physical Properties of Natural Zeolite

Chemical Composition	(%)	Physical Properties
SiO ₂	69.31	Appearance porosity (%), 41.5
Al ₂ O ₃	13.11	Appearance density (g/cm ³), 2.27
Fe ₂ O ₃	1.31	Weight of per unit volume (g/cm ³), 1.32
CaO	2.07	Water absorption (original) (%), 31.3
MgO	1.13	Water absorption (grinding) (%), 103.7
Na ₂ O	0.52	Oil absorption (g oil/100 g sample), 51
K ₂ O	2.83	Whiteness (%), 68
SO ₃	0.10	Original bleaching (g sample/g tonsil), 1.95
H ₂ O	6.88	Active bleaching (g sample/g tonsil), 1.92
Si/Al	4.66	pH 7.5

Fuente: *The removal of heavy metal cations by natural zeolites – Erdem, Karapinar y Donat – 2004*

(Abusafa y Yucel, 2002), en su trabajo de investigación titulado “Removal of Cs from aqueous solutions using different cationic forms of a natural zeolite: clinoptilolite” indica que la siguiente zeolita natural identificado como Clinoptilolita tiene la siguiente composición química, Tabla N° 1.2.

Tabla N° 1. 2. Chemical Composition of Clinoptilolite (Weight %)

	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	H ₂ O
CLI	2.90	0.45	1.17	3.46	0.62	12.84	63.98	15.37
Na-CLI	1.18	4.55	0.75	0.28	0.66	11.68	68.05	10.72
K-CLI	8.69	0.65	0.60	0.20	0.66	10.83	66.52	10.52
Ca-CLI	1.88	0.40	1.47	4.05	1.12	11.02	67.73	11.42
NH ₄ -CLI	4.36	0.36	0.44	0.20	0.82	10.69	70.01	10.20

Fuente: *Removal of Cs from aqueous solutions using different cationic forms of a natural zeolite: clinoptilolite – Abusafa y Yucel 2002.*

1.3. Justificación

En la ciudad de Juliaca, las carreteras ocupan un lugar muy importante dentro de la infraestructura vial debido a que contribuyen al desarrollo del país, por ello en el campo de los pavimentos flexibles, la continuidad búsqueda por ser amigables con el medio ambiente; ha promovido la aceptación a nivel mundial, de las mezclas asfálticas tibias con todo tipo de

aditivo. La mezcla asfáltica tibia cumple con lo establecido por el Protocolo de Kyoto que pretende reducir los gases de efecto invernadero que son lanzados a la atmósfera, haciendo que la mezcla asfáltica en caliente, quede obsoleta en diversos países.

En la actualidad la producción de mezclas asfálticas en el Perú, se limita únicamente a las mezclas asfálticas en caliente, por lo que se quiere introducir el uso de mezclas asfálticas tibias que es una técnica usada en varios países con el fin de aprovechar los asfaltos en la pavimentación de vías. Éste consiste en la adición de zeolitas a los asfaltos calientes con el fin de mejorar los procesos de elaboración, extendidos y compactados a temperaturas menores. La utilización de estas mezclas reduce la emisión de CO₂ en el medio ambiente debido a la disminución en las temperaturas de elaboración y colocación de estas mezclas, permite reducir los costos de energía y paralelamente las emisiones a la atmósfera.

El mineral zeolita se caracteriza a menudo por las siguientes propiedades: alto grado de hidratación, baja densidad y gran volumen de vacíos cuando están deshidratadas, estabilidad de la estructura cristalina cuando están deshidratadas, características de intercambio iónico, canales de tamaño molecular uniformes en los cristales deshidratados, conductividad eléctrica, adsorción de gases y vapores, características catalíticas (Breck, 1974).

La investigación es conveniente desde el punto de vista técnico y contribuirá el uso de estas mezclas asfálticas a menores temperaturas con las siguientes ventajas: menor esfuerzo de compactación, mayor facilidad de trabajo aún fuera de estación climática, mayor tiempo de almacenaje y transporte, reducción del fenómeno de segregación térmica, menores riesgos para los trabajadores, menor desgaste de partes en la planta, menor envejecimiento del asfalto, menor endurecimiento físico del asfalto, mayor trabajabilidad de la mezcla, menor velocidad de enfriamiento, permite también acelerar la habilitación al tránsito.

1.4. Objetivos del Estudio

1.4.1. Objetivo General

Analizar el comportamiento del diseño de Mezcla Asfáltica Tibia con adición de zeolita, además obtener beneficios ambientales y económicos frente a las mezclas asfálticas convencionales para la pavimentación de la ciudad de Juliaca.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Analizar el comportamiento mecánico del diseño de la Mezcla Asfáltica Tibia, con adición de la zeolita mediante la metodología Marshall.
- Lograr un beneficio ambiental de la mezcla asfáltica tibia frente a la mezcla asfáltica convencional.
- Obtener beneficio económico de mezcla asfáltica tibia en comparación a la mezcla asfáltica convencional.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

La aplicación de zeolita mejora el comportamiento del diseño de mezcla asfáltica tibia, además permite beneficios ambientales y económicos frente a las mezclas asfálticas convencionales para la pavimentación de la ciudad de Juliaca.

1.5.2. Hipótesis Específicos

- La adición de zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia mejora las propiedades mecánicas, frente a las mezclas asfálticas convencionales.
- La aplicación de zeolita a la mezcla asfáltica permite beneficios ambientales como disminución de la emisión de CO₂ durante la etapa de producción.
- Durante la producción de mezcla asfáltica tibia los costos disminuyen respecto a la mezcla asfáltica convencional.

1.6. Operacionalización de variables

1.6.1. Variable Independiente

Diseño de mezcla asfáltica con adición de zeolita.

1.6.2. Variable dependiente

- Comportamiento de diseño de Mezcla Asfáltica Tibia.
- Beneficios ambientales y económicos.

1.6.3. Indicadores

- Porcentaje de zeolita, cemento asfáltico, cal hidratada y agregados.
- Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.
- Niveles de emisión de CO₂ y costo unitario de materiales.

1.7. Metodología de investigación

1.7.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es Aplicativo Tecnológico, puesto que tiene como objetivo la comparación de comportamiento de mezclas asfálticas convencional y modificado, además obtener beneficios ambientales y económicos.

“Este tipo tiene como objetivo crear nueva tecnología a partir de los conocimientos adquiridos a través de la investigación estratégica para determinar si éstos pueden ser útilmente aplicados con o sin mayor refinamiento para los propósitos definidos” (Tam, Vera & Oliveros; 2008).

1.7.2. Nivel de Investigación

La presente investigación es de nivel CORRELACIONAL, puesto que tiene como propósito relacionar el comportamiento de la mezcla asfáltica tibia con la mezcla asfáltica convencional.

“Este tipo de estudios tiene como propósito conocer la relación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto en particular” (Hernández, Fernández & Baptista; 2006).

1.7.3. Método de Investigación

El método de investigación es CUANTITATIVO, puesto que el medio de prueba de hipótesis se basa en mediciones numéricas y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías.

1.7.4. Diseño de la investigación

El diseño de investigación es experimental, ya que busca verificar los resultados de las propiedades mecánicas, beneficios ambientales y económicos de diseño de mezcla asfáltica tibia con adición de zeolita natural. Para contrastar nuestra hipótesis se trabajará con diferentes contenidos de asfalto 5.5%, 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%, para cada contenido se fabricaron 3 especímenes a temperaturas de 100°C y 140°C para el grupo convencional y de 100°C para el grupo modificado con adición de zeolita. Como se muestra en la Figura N° 1.1.

Figura N° 1. 1. Muestras de Estudio Convencional y Modificado

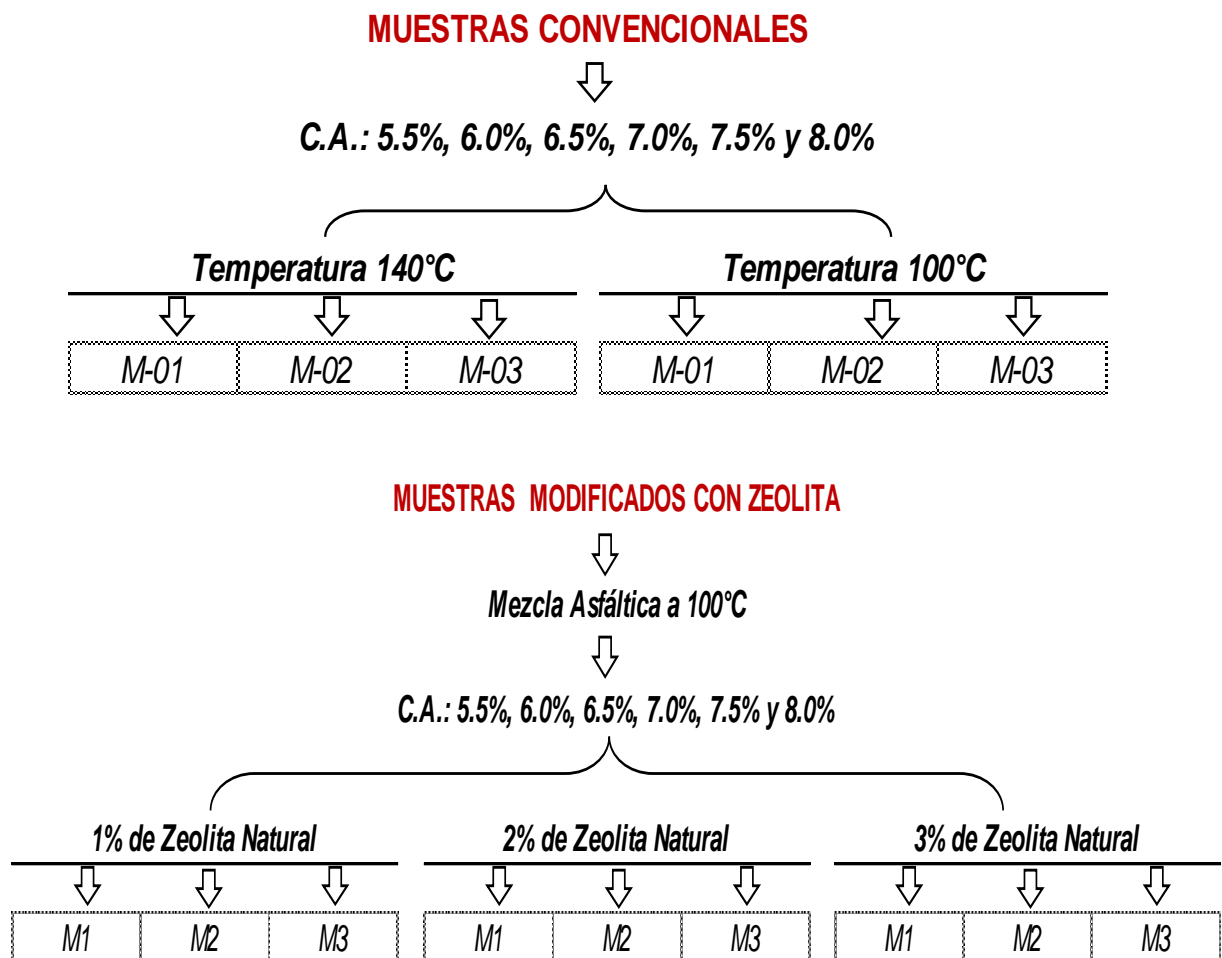


Tabla N° 1. 3. Matriz de Consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	OPERACIONALIZACIÓN		METODOLOGÍA
			Variables	Indicadores	
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General			
¿Cómo influye la adición de zeolita en el comportamiento del diseño de mezcla asfáltica tibia; cuáles son los beneficios ambientales y económicos frente a las mezclas asfálticas convencionales para la pavimentación de la ciudad de Juliaca?	Analizar el comportamiento del diseño de Mezcla Asfáltica Tibia con adición de zeolita, además obtener beneficios ambientales y económicos frente a las mezclas asfálticas convencionales para la pavimentación de la ciudad de Juliaca.	La aplicación de zeolita mejora el comportamiento del diseño de mezcla asfáltica tibia, además permite obtener beneficios ambientales y económicos frente a las mezclas asfálticas convencionales para la pavimentación de la ciudad de Juliaca.	V.I.: Diseño de mezcla asfáltica con adición de zeolita. V.D.: Comportamiento de diseño de mezcla asfáltica tibia y beneficios ambientales y económicos.	* % de Zeolita, % de cemento asfáltico, % cal hidratada y % de agregados. * Propiedades mecánicas, niveles de emisión de CO2 y costo unitario de materiales.	Tipo de Investigación: Aplicativo Tecnológico
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas			
¿Cómo mejora las propiedades mecánicas con adición de zeolita en el diseño de mezcla asfáltica tibia, frente a las mezclas asfálticas convencionales?	Analizar el comportamiento mecánico del diseño de la Mezcla Asfáltica Tibia, con adición de la zeolita mediante la metodología Marshall.	La adición de zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia mejora las propiedades mecánicas, frente a las mezclas asfálticas convencionales.	V.I.: Diseño de mezcla asfáltica con adición de zeolita V.D.: Propiedades mecánicas	* % de Zeolita, % de cemento asfáltico, % cal hidratada y % de agregados. * Estabilidad, flujo, tracción indirecta y resistencia a compresión simple	
¿Cómo influye ambientalmente la disminución de la emisión de CO2 durante la etapa de producción al adicionar zeolita en la mezcla asfáltica tibia?	Lograr beneficio ambiental de la mezcla asfáltica tibia frente a la mezcla asfáltica convencional.	La aplicación de zeolita a la mezcla asfáltica permite obtener beneficios ambientales como disminución de la emisión de CO2 durante la etapa de producción.	V.I.: Diseño de mezcla asfáltica con adición de zeolita V.D.: Emisión de CO2	* % de Zeolita, % de cemento asfáltico, % cal hidratada y % de agregados. * Niveles de emisión de CO2.		Nivel de Investigación: Correlacional y Cuantitativo
¿Cuál es la diferencia de costo en la producción de mezcla asfáltica tibia en comparación con la mezcla asfáltica convencional?	Obtener beneficio económico de mezcla asfáltica tibia en comparación a la mezcla asfáltica convencional.	Durante la producción de mezcla asfáltica tibia los costos disminuyen respecto a la mezcla asfáltica convencional.	V.I.: Diseño de mezcla asfáltica con adición de zeolita V.D.: Costo de producción	* % de Zeolita, % de cemento asfáltico, % cal hidratada y % de agregados. * Costo unitario de materiales.	

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II

Revisión de la Literatura

2.1 Materiales pétreos

2.1.1 Importancia del Agregado en una Mezcla Asfáltica

En el diseño de una mezcla asfáltica intervienen dos materiales indispensables que son los agregados pétreos y el asfalto; los agregados por su parte son de gran importancia ya que en una mezcla asfáltica constituyen entre el 90 y el 95 por ciento en peso, y entre el 75 y 85 por ciento en volumen; es de mencionar que la calidad de la mezcla asfáltica depende de la calidad de los materiales constituyentes y la capacidad de carga de la carpeta es proporcionada esencialmente por los agregados, de esto se deriva la importancia de una adecuada selección y manejo de los materiales pétreos que serán utilizados para elaborar una mezcla asfáltica, específicamente en lo que se refiere a una buena distribución granulométrica².

2.1.2 Definición de Agregado³

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos.

2.1.3 Tipos de Agregados Pétreos

Se clasifican en los siguientes tipos:

² Aplicacion del Metodo Marshall y Granulometria Superpave en el Diseño de Mezclas Asfalticas en Caliente con asfalto Clasificacion Grado de Desempeño” - Crespín Molina, R., Santa Cruz Jovel, I. E., & Torres Linares, P. A.

³ Universidad Politécnica de Cataluña UPC España, Mezclas Asfálticas - Alejandro Padilla Rodríguez.

2.1.3.1 Agregados Naturales.

Son aquellos que se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.

Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua, y los químicos. La forma de las partículas individuales es un producto, a la larga, de los agentes que actúan sobre ellas. Así mismo, las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas. Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimento son la grava y la arena.

2.1.3.2 Agregados artificiales.

Son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables.

Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales de producción como el refinamiento de metales. El producto secundario más comúnmente usado es la escoria de alto horno. Es una sustancia no metálica que brota a la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción. Una vez que es removida de la superficie del hierro, la escoria es transformada en pequeñas partículas al templarla inmediatamente en agua, o al triturarla una vez que se ha enfriado.

2.1.3.3 Agregados de Trituración.

Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. Se incluyen todos los materiales de canteras cuyas propiedades físicas sean adecuadas.

Existen dos fuentes principales de agregados triturados o procesados: gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimento de mezcla asfáltica, y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que son extraídas de canteras y que deben ser reducidas en tamaño en las plantas trituradoras, antes de ser usados en la pavimentación; de la calidad de las rocas que se explotan en las canteras dependerá la calidad de los

agregados procesados y dispuestos para ser utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas.

2.1.3.4 Agregados Marginales.

Los agregados marginales engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes.

2.1.4 Clasificación de los Agregados de Acuerdo a su Tamaño

2.1.4.1 Agregados finos

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS; Se define como agregado fino al material que pasa el tamiz ITINTEC 4.75 mm. (N°4) y queda retenido en la malla N° 200, el más usual es la arena producto resultante de la desintegración de las rocas.

2.1.4.2 Agregados gruesos

Se define como agregado grueso al material retenido en el tamiz ITINTEC 4.75 mm. (N° 4) proveniente de la desintegración de las rocas, puede a su vez clasificarse en piedra chancada y grava.

2.1.5 Consideraciones Acerca del Empleo de los Agregados Pétreos

Cuando se pretende hacer uso de los agregados pétreos para la construcción de pavimentos se deben considerar algunos aspectos fundamentales para su buen desempeño a la hora de formar parte en alguna de las capas del firme y principalmente en la elaboración de las mezclas asfálticas.

a. Naturaleza e Identificación:

Evaluación de la naturaleza petrográfica de los agregados, grado de alteración de los componentes minerales, porosidad y propiedades químicas.

b. Propiedades geométricas:

Principal y básicamente la forma y angulosidad de las partículas; con relación al conjunto del esqueleto mineral se estudia la distribución granulométrica.

c. Propiedades mecánicas:

Engloban los parámetros básicos de resistencia al desgaste y al pulimento.

d. Ausencia de impurezas:

Es fundamental que los agregados a emplear en la construcción de pavimentos estén libres de impurezas capaces de afectar el buen comportamiento de las capas. El empleo de agregados no limpios en la construcción de un pavimento, puede ser una causa suficiente para provocar su degradación.

e. Inalterabilidad:

Es imprescindible la evaluación de las posibles degradaciones que puedan sufrir los agregados pétreos que se van a utilizar en una obra; así, los materiales evolutivos han de ser empleados con especiales precauciones para evitar comportamientos anómalos que puedan afectar la vida útil de las capas.

f. Adhesividad:

Los agregados pétreos han de ser afines con los ligantes asfálticos que vayan a ser empleados en la construcción del pavimento, y en caso de problemas de afinidad, será necesario el uso de activantes, para garantizar el buen comportamiento de las mezclas asfálticas.

2.1.6 Propiedades de los Agregados Pétreos⁴

Las propiedades más comunes para considerar apropiado un agregado para concreto asfáltico de buena calidad, son las siguientes:

- Graduación y tamaño máximo de partícula
- Textura superficial
- Limpieza
- Capacidad de absorción
- Dureza
- Afinidad con el asfalto
- Forma de la partícula
- Peso específico

a. Graduación - Granulometría

Todas las especificaciones de mezcla asfáltica requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de distribución de

⁴ Aplicación del Método Marshall y Granulometría Superpave en el Diseño de Mezcla Asfáltica Templada Con Emulsión Asfáltica” - Castañeda, Escobar y López.

diferentes tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertos porcentajes en una serie de tamices.

b. Tamaño de las Partículas

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado utilizado.

Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas, estos se describen a continuación:

- **Tamaño máximo nominal de partícula.**

Designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.

- **Tamaño máximo de partícula.**

Designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula, típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100% de las partículas de agregado.

c. Textura Superficial

La textura superficial de las partículas de agregado es un factor que determina no solo la trabajabilidad y la resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también la resistencia que tiene esta al deslizamiento en la superficie de la carpeta de rodadura. Una textura áspera, como el papel de lija, aumenta de forma significativa la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro.

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas.

d. Limpieza

Las especificaciones de la obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etcétera) en el agregado, que provoquen deterioro cuando estos se aplican para la producción de mezclas asfálticas. La

limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075 mm (No. 200).

El Ensayo de Finos Plásticos en Agregados Graduados y Suelos por el Uso del Ensayo del Equivalente de Arena (AASHTO T 176-08) es un método con el cual se puede determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4).

e. Capacidad de Absorción

La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto es un elemento importante de información; si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades más grandes de asfalto que un agregado menos poroso. El ensayo utilizado para medir esta propiedad física es: el ensayo de Gravedad Específica y Absorción del Agregado. El valor de gravedad específica y absorción son utilizados en el diseño de mezclas para superficie, por ejemplo; la gravedad específica es utilizada en el análisis de densidad-vacíos de las mezclas asfálticas.

f. Dureza

Es la resistencia de los agregados a resistir los efectos de abrasión e intemperie a los cuales serán sometidos en los procesos de producción, colocación, compactación y en su vida de servicio. La resistencia de un agregado al desgaste y a la abrasión es medida a partir del ensayo en la Máquina de Los Ángeles regido por la norma (AASHTO T 96-02). Una medida indirecta de la dureza, también la proporciona la prueba de Sanidad de Agregados por Sulfato de Sodio (AASHTO T 104-99), ya que mide la resistencia de este a una simulación de intemperismo agresivo.

g. Afinidad por el Asfalto

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto, los agregados que tienen alta afinidad con

el asfalto son conocidos como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies.

Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto; por consiguiente, tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestos al agua. Los agregados silíceos como: la cuarcita y algunos granitos, son algunos ejemplos de agregados susceptibles al desprendimiento y deben ser usados con mucha precaución.

h. Forma de la Partícula

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida, la forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas.

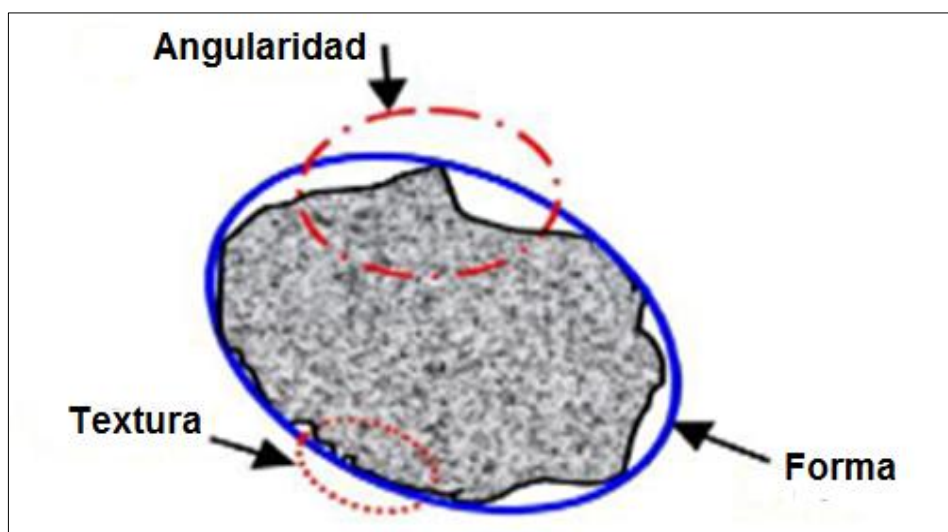
El mejor entrelazamiento ocurre con partículas de bordes puntiagudos y de forma cubica, producidas casi siempre, por procesos de trituración. Muchas de las mezclas asfálticas de pavimentación contienen partículas angulares y redondas, las partículas gruesas (grandes) de agregado, proporcionan la resistencia en el pavimento y provienen generalmente de piedra o grava triturada. Las partículas finas de agregado, suministran la trabajabilidad necesaria en la mezcla y generalmente provienen de arenas naturales.

La prueba de laboratorio más utilizada para medir la forma de las partículas es conocida como cubicidad de las partículas. Este método comprende el procedimiento de laboratorio para determinar las partículas chancadas (caras fracturadas), rodadas y lajeadas de la fracción retenida en la malla N° 4 (4.75 mm) de una muestra de agregados pétreos.

Valores altos de chancado indicaran que el agregado se compone de partículas con el potencial de proporcionar una superficie con adecuada rugosidad. Los valores que componen a la cubicidad, toman mayor significado en el diseño de las mezclas para superficie de pavimentos, ya que estos valores

serán determinantes para obtener el porcentaje óptimo de aglutinante y la rugosidad de la superficie del pavimento a construir con dichos agregados. Así agregados con bajo porcentaje de partículas chancadas, requerirán de un mayor porcentaje de aglutinante que otros con alto porcentaje de partículas chancadas. Las partículas chancadas contribuyen en gran medida a la estabilidad de la mezcla elaborada con estas mismas. Ver la figura 2.1.

Figura N° 2. 1. La Forma, Textura y Angularidad de las Partículas de Agregado.



Fuente: Paramo J., Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente en los Inicios del Siglo XXI, Argentina, 2012.

i. Peso específico.

El peso específico de un agregado (también conocido como gravedad específica), es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados en la mezcla, de acuerdo al peso.

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el peso específico de los agregados usados es: que este ayuda en el cálculo de porcentaje de vacíos de aire de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación deben incluir un cierto porcentaje (en volumen) de vacíos o

espacios de aire. Estos espacios desempeñan una labor importante en el pavimento terminado.

Se ha desarrollado tres tipos de peso específico para tener en cuenta la porosidad del agregado, debido a que esta afecta la cantidad de asfalto que se requiere para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final; estos tres tipos son:

- Peso específico Bulk.
- Peso específico aparente.
- Peso específico efectivo.

La determinación de esta propiedad (peso específico) incluyendo los tres tipos ya mencionados, se logra mediante el ensayo de Gravedad Específica y Absorción del Agregado. El peso específico total de una muestra incluye todos los poros de la muestra. El peso específico aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al saturar la muestra.

2.1.7 Polvo Mineral (Filler)⁵

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz N° 200.

El fíller o polvo mineral de aportación es un producto comercial de naturaleza pulverulenta (cemento normalmente o cenizas volantes de central térmica) o un polvo en general calizo, especialmente preparado para utilizarlo en mezclas asfálticas.

2.1.7.1 Características Deseables del Filler

- **Finura**

Al ocupar parcialmente los espacios libres dejados por la estructura granular compactada y conformada por las partículas mayores, reduce el volumen de vacíos de la mezcla evitando un aumento pronunciado de la cantidad de ligante asfáltico.

El polvo mineral consigue cumplir con su función rellenadora, dependiendo del volumen de vacíos existente una vez que se haya compactado

⁵ Universidad Politécnica de Cataluña UPC España, Mezclas Asfálticas - Alejandro Padilla Rodríguez.

la estructura granular y en función de la granulometría y de las partículas de mayor tamaño.

- **Modificación del Comportamiento Reológico**

El empleo del polvo mineral, incrementa la magnitud de la resistencia a la deformación de la mezcla, sin modificar la naturaleza viscosa del ligante, originando como consecuencia un aumento de la resistencia al corte de las mezclas asfálticas.

- **Acción estabilizante frente al agua**

Se incrementa la durabilidad de las mezclas asfálticas frente a la acción del agua debido a que se reduce parcialmente la porosidad de la estructura granular evitando el acceso del agua al interior, y por otro lado debido a que algunos polvos minerales presentan una mayor afinidad con el ligante asfáltico, mejoran la resistencia a la acción de desplazamiento que ejerce el agua sobre el ligante asfáltico.

Las características de finura y comportamiento reológico se hayan vinculadas el tamaño y forma de las partículas. La acción estabilizante frente al agua depende además del tamaño y forma de las partículas, de la composición química de los rellenos minerales. Las funciones del polvo mineral no pueden apartarse del contenido y consistencia del ligante asfáltico en la mezcla.

- **Procedencia del polvo mineral**

El polvo mineral que quede inevitablemente adherido a los agregados tras su paso por el secador de la planta de asfalto en ningún caso podrá rebasar ciertos límites que algunas normas contienen, este valor está aproximadamente dentro del dos por ciento (2%) de la masa de la mezcla. Si se asegurase que el polvo mineral procedente de los agregados cumple las condiciones exigidas al de aportación, se podrá rebajar la proporción mínima de éste.

2.1.7.2 Propiedades del Polvo Mineral

En la interface filler-asfalto y en el comportamiento de la mezcla asfáltica, tienen que ver las propiedades físicas y químicas tanto como las características geométricas, propiedades de superficie, adsorción, adhesión, etc.

La irregularidad geométrica (forma, angulosidad y textura de superficie), es uno de los aspectos más importantes en el papel del filler dentro de la mezcla. La irregularidad geométrica afecta directamente el contenido óptimo de asfalto en la mezcla, a las características de interfase del mástico y a su comportamiento reológico. Todos estos aspectos influyen directamente en el comportamiento estructural y mecánico de las mezclas.

La irregularidad geométrica se puede evaluar cualitativamente y cuantitativamente mediante el microscopio electrónico, y caracterizar la forma, angulosidad, textura superficial y la porosidad accesible de las partículas.

Para la caracterización física – química del filler y su influencia en el comportamiento y durabilidad de las mezclas asfálticas, el factor más significativo es la intensidad de adsorción.

En los sistemas filler – asfalto , existe adsorción entre un sólido y una fase viscosa, los factores que influyen más en el mecanismo de adsorción son la composición del asfalto y las propiedades del filler, es decir, su composición mineralógica, sus características estructurales, la textura superficial y la superficie específica, el tipo de adsorción depende del tipo de filler principalmente, todos los procesos de adsorción son exotérmicos y la cantidad de calor liberado depende del carácter de la interacción entre los átomos y moléculas adsorbidos y de la superficie del sólido.

El efecto que se logra en un pavimento a partir de la utilización de un filler activo en la dosificación de la mezcla asfáltica, es que aumenta considerablemente su durabilidad.

Existen filleres activos como cal hidratada y dolomítica que suelen mantener su resistencia en periodos de tiempo largos de tiempo en condiciones de contenido óptimo de asfalto, mientras que los filleres no activos como basaltos y areniscas suelen deteriorarse rápidamente, también bajo condiciones de contenido óptimo de asfalto.

2.1.8 Zeolita

2.1.8.1 Definición

Las zeolitas son aluminosilicatos hidratados altamente cristalinos que al deshidratarse desarrollan, en el cristal ideal, una estructura porosa con diámetros de poro mínimos, de entre 3 y 10 Å⁶.

Estos minerales al ser calentadas producen gran cantidad de vapor de agua (llamados por algunos investigadores como “piedra que hierve”). Este vapor de agua liberado, al entrar en contacto con el asfalto lo espuman. A su vez estos minerales que son aproximadamente el 20% en peso de agua atrapada en su estructura porosa. Por calentamiento a aproximadamente 85 ° C, el agua se libera, y cuando esto se hace en presencia de aglutinante de asfalto, se produce asfalto espumado⁷.

2.1.8.2 Origen de las zeolitas

Las zeolitas naturales son formadas a partir de la precipitación de fluidos contenidos en los poros, tal como en las ocurrencias hidro - termales, o por la alteración de vidrios volcánicos. Las condiciones de presión, temperatura, actividad de las especies iónicas y presión parcial de agua son factores determinantes en la formación de las diferentes especies de zeolitas. Existen cerca de 40 especies de zeolitas naturales conocidas, sin embargo, tan solo algunas especies son ampliamente utilizadas⁸.

2.1.8.3 Clasificación de las zeolitas

a. Zeolitas naturales

La zeolita es un aluminosilicato presente de forma natural en rocas de origen volcánico que contiene óxido de aluminio (Al₂O₃) y cuarzo (SiO₂). Este mineral tiene iones grandes y moléculas de agua con, libertad de movimiento, lo cual le permite el intercambio iónico. Gracias a esta estructura molecular la zeolita natural tiene la capacidad de desprender agua de manera continua a medida que se calienta a temperaturas relativamente bajas, teniendo la posibilidad de rehidratarse sumergiéndola en agua⁹.

⁶ Breck D.W. (1974), Zeolite Molecular Sieves, Wiley Interscience.

⁷ Bonaquist, R. F. (2011), Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt.

⁸ Curi, A., Granda, W., Lima, H., & Sousa, W. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros.

⁹ Celis Amado, L. M. (2008). Mezclas Asfálticas Tibias. Colombia.

- **Clasificación de Zeolitas Naturales¹⁰**

Las zeolitas naturales se clasifican por grupos como se muestra en la Tabla N° 2.1.

Tabla N° 2. 1. Clasificación Estructural de las Zeolitas Naturales

ZEOLITAS	FORMULA QUÍMICA
Grupo de las analcimas	
Analcimas	$\text{Na}_{16}(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})16\text{H}_2\text{O}$
Wairakita	$\text{Ca}_8(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})16\text{H}_2\text{O}$
Leucina	$\text{K}_{16}(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})$
Grupo de las natrolitas	
Natrolita	$\text{Na}_2(\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{30})16\text{H}_2\text{O}$
Edingtonita	$\text{Ba}_2(\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{20})6\text{H}_2\text{O}$
Thomsonita	$\text{Na}_4\text{Ca}_8(\text{Al}_{20}\text{Si}_{20}\text{O}_{30})24\text{H}_2\text{O}$
Grupo de las filipsitas	
Filipsita	$(\text{K},\text{Na})_5(\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32})10\text{H}_2\text{O}$
Garronita	$\text{NaCa}_{16}(\text{Al}_5\text{Si}_{10}\text{O}_{32})14\text{H}_2\text{O}$
Gismondita	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32})16\text{H}_2\text{O}$
Grupo de las heulanditas	
Heulandita	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72})24\text{H}_2\text{O}$
Clinoptilolita	$\text{Na}_6(\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72})24\text{H}_2\text{O}$
Estilbita	$\text{Na}_2\text{Ca}_4(\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72})32\text{H}_2\text{O}$
Grupo de las modernitas	
Modernita	$\text{Na}_8(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96})24\text{H}_2\text{O}$
Ferrierita	$\text{Na}_{15}\text{Mg}_2(\text{Al}_{5,5}\text{Si}_{30,5}\text{O}_{72})18\text{H}_2\text{O}$
Epistilbita	$\text{Ca}_3(\text{Al}_6\text{Si}_{18}\text{O}_{48})16\text{H}_2\text{O}$
Grupo de las chabasitas	
Chabasita	$\text{Ca}_2(\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24})13\text{H}_2\text{O}$
Edionita	$(\text{Ca},\text{MgNa},\text{K})_{4,5}(\text{Al},\text{Si}_{27}\text{O}_{72})27\text{H}_2\text{O}$
Zeolita L	$\text{K}_6\text{Na}_3(\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72})21\text{H}_2\text{O}$
Grupo de las faujasitas	
Faujasitas (X, Y)	$\text{Na}_{12}\text{Ca}_{12}\text{Mg}_{11}(\text{Al}_{59}\text{Si}_{153}\text{O}_{384})26\text{H}_2\text{O}$
Zeolita A	$\text{Na}_{12}(\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48})27\text{H}_2\text{O}$
Zeolita ZK-5	$\text{Na}_{30}(\text{Al}_{30}\text{Si}_{66}\text{O}_{192})98\text{H}_2\text{O}$
Grupo de las laumontitas	
Laumontita	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48})16\text{H}_2\text{O}$
Yugawaralita	$\text{Ca}_{16}(\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48})16\text{H}_2\text{O}$
Grupo de las pentasil	
Zeolita ZSM-5	$\text{Na}_n(\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192})16\text{H}_2\text{O}$

Fuente: *Industrial Minerals and Rocks - Kogel et al., 2006*

¹⁰ Industrial Minerals and Rocks - Kogel et al., 2006

- **Relación Silicio – Aluminio de Zeolitas Naturales¹¹**

Hay cerca de 50 tipos de zeolitas naturales con diferentes composiciones mineralógicas dependiendo de su estructura y la relación Si/Al (Giannetto y colbs., 2000; Gruszkiewicz y colbs, 2005; Yang y colbs., 2009). Algunos ejemplos de las zeolitas más típicas se muestran en la Tabla N° 2.2.

Tabla N° 2.2. Relación Si/Al para diferentes tipos de Zeolitas

Tipos de Zeolita	Rango de Si/Al
Analcita	1.00 - 3.00
Clinoptilolita	2.92 - 5.04
Chabazita	1.43 – 4.18
Edingtonita	1.00 – 2.00
Erionita	3.05 – 3.99
Faujasita	1.00 – 3.00
Ferrierita	3.79 – 6.14
Heulandita	2.85 – 4.31
Laumontita	1.95 – 2.25
Modernita	4.19 – 5.79
Natrolita	1.5
Fillipsita	1.45 – 2.87
Stibilita	2.50 – 5.00
Wairakita	2.0

Fuente: Aplicación de las Zeolitas naturales al tratamiento biológico de residuos – Montalvo, S. 2013.

b. Zeolitas sintéticas

Las zeolitas sintéticas son sólidos obtenidos a partir de soluciones acuosas saturadas de composición apropiada, en un dominio de temperaturas comprendido entre 25° y 300°C. La naturaleza de la zeolita viene determinada básicamente por factores cinéticos. Haciendo variar la composición de las soluciones y las condiciones operatorias, es posible sintetizar zeolitas de diferentes estructuras o la misma zeolita con diferentes composiciones químicas¹².

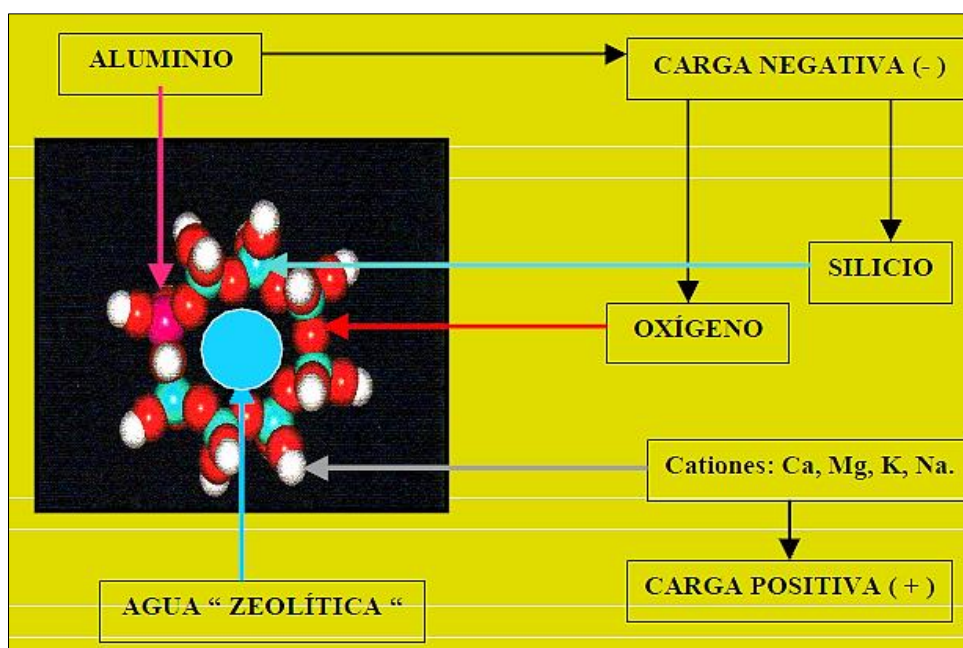
¹¹ Montalvo, S. (2013). Aplicación de las zeolitas naturales al tratamiento biológico de residuos

¹² Claudia Sofia Tacha Velasquez, Leidy Viviana Huertas Pasive, Yesica Paola Arevalo Berrio 2014; Diseño De Una Mezcla De Asfalto En Caliente Msc-25 Reciclada Modificada Con Zeolita Sintetica.

2.1.8.4 Estructura de la zeolita Natural

La estructura básica de una zeolita, donde se observan a los átomos de silicio rodeados por cuatro átomos de oxígeno; el Al³⁺ está reemplazando al Si⁴⁺, creando una deficiencia de cargas positivas o un aumento de cargas negativas que están siendo compensadas por los cationes de intercambio Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Na⁺, para mantener el equilibrio de la red de la zeolítica. Los cationes intercambiables pueden desprenderse fácilmente e intercambiarse con cationes selectivos de su entorno¹³.

Figura N° 2. 2. Estructura básica de una Zeolita



Fuente: www.relaq.mx/RLQ/cuba/zeolita.html.

2.1.8.5 Propiedades de las Zeolitas¹⁴

a. Porosidad

Las zeolitas son formadas por canales y cavidades regulares y uniformes de dimensiones moleculares (3 a 13 nm) que son medidas similares a los diámetros cinéticos de una gran cantidad de moléculas. Este tipo de estructura microporosa hace que las zeolitas presenten una superficie interna

¹³ Las Zeolitas de la Costa de Ecuador, Geología, Caracterización y Aplicación- Fernando Enrique Morante Carballo

¹⁴ Curi, A., Granda, W., Lima, H., & Sousa, W. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros.

extremadamente grande en relación a su superficie externa. La IUPAC (The International Unión of Pure and Applied Chemistry) reconoce tres tipos de poros atendiendo a su tamaño (Sing et al. 1985). Si son mayores de 50 nm se conocen como macroporos, si su diámetro está comprendido entre 2 y 50 nm se trata de mesoporos y si son menores de 2 nm, como es el caso de los poros de las zeolitas, son microporos.

Cuando la distancia entre dos superficies es suficientemente corta, los potenciales de adsorción se suman, de forma que una molécula situada en el interior del poro se ve atraída por toda la superficie del poro aumentando la fuerza con la que se ve atraída. Es decir, a medida que disminuye el tamaño del poro más profundo se hace el pozo de potencial. En el caso de que el poro sea suficientemente ancho las moléculas se irán adsorbiendo formando una monocapa a una distancia determinada de la superficie (distancia de adsorción), y a medida que aumenta la cantidad adsorbida el adsorbato se ordena en capas sucesivas (llenado en multicapas) (Gregg y Sing, 1967).

b. Adsorción

La superficie de los sólidos es una región singular, que es responsable o al menos condiciona muchas de sus propiedades. Los átomos que se encuentran en ella no tienen las fuerzas de cohesión compensadas, como ocurre en los átomos situados en el seno del sólido que es, en definitiva, responsable de las propiedades de adsorción de los sólidos. A distancias suficientemente grandes, no existe una interacción apreciable entre una molécula acercándose a una superficie, por lo tanto, la energía de este sistema es próxima a cero. A medida que la molécula se acerca a la superficie la energía del sistema comienza a disminuir debido a que las fuerzas de cohesión de los átomos de la superficie empiezan a verse compensadas. En otras palabras, el potencial de adsorción origina una fuerza atractiva que provoca el acercamiento de la molécula a la superficie. Cuando la distancia entre la superficie y la molécula libre comienza a disminuir, las fuerzas de repulsión (debidas a la proximidad de las capas de electrones de los átomos de la superficie con los átomos de la molécula libre) comienzan a ser importantes. Por lo tanto, existe una distancia para la cual la energía del sistema es mínima. La alta eficiencia de adsorción de las zeolitas está relacionada a la gran superficie interna que esta posee. Cuando el tamaño

del poro disminuye se produce un incremento significativo del potencial de adsorción, ocasionado por el solapamiento de los potenciales de las paredes del poro. Así, para un mismo adsorbato, la interacción con las paredes del poro es mayor cuanto menor es el tamaño del poro y, por tanto, mejor el confinamiento de la molécula adsorbida (García, M.J, 2002).

c. Intercambio iónico (I. I.)

La propiedad de Intercambio Iónico (I.I.) se ha observado en minerales silicatos cristalinos como arcillas, feldspatos y zeolitas. Se considera una propiedad intrínseca de estos minerales pues es el producto de la sustitución isomórfica de los átomos de silicio de su estructura cristalina por otros átomos. En el caso de las zeolitas esta sustitución ocurre por átomos tetravalentes de aluminio lo que produce una carga neta negativa en la estructura que se compensa por cationes fuera de ella. Estos cationes son intercambiables, de ahí la propiedad intrínseca de I.I. que también es una manifestación de su naturaleza de estructura cristalina microporosa, pues las dimensiones de sus cavidades y de los cationes que se intercambian determinan el curso del proceso.

El comportamiento de I.I. en las zeolitas depende de varios factores que determinan una mayor selectividad en las zeolitas a determinados cationes: -naturaleza de los cationes en solución, temperatura, concentración de los cationes en solución, aniones asociados con los cationes en solución, solvente – agua, solvente orgánico, estructura de la zeolita – topología de la red y densidad de la carga de red.

La capacidad de intercambio iónico (C.I.I.) de una zeolita es una magnitud que da una medida del monto de equivalentes de un catión que es capaz de retener por intercambio iónico una masa de zeolita. Esta capacidad está directamente relacionada con el Al presente en la red zeolítica y depende directamente de su composición química (Breck, 1974). Una alta capacidad de intercambio iónico corresponde a zeolitas con baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Clarke, 1980). La C.I.I. teórica máxima, número de equivalentes intercambiables por masa de la celda unitaria, no siempre puede ser alcanzada debido a la existencia de sitios de intercambio inaccesibles.

2.1.9 Mezcla de Agregados

Combinación de dos o más agregados que tienen diferentes gradaciones para originar una nueva combinación de agregados que cumpla con las especificaciones técnicas del proyecto. Existen diferentes métodos.

2.1.9.1 Método Analítico

Consiste en determinar en forma rápida y por tanteo, los porcentajes (%) de cada uno de los agregados estudiando los diferentes tamices y considerando cuál de los agregados controlara la cantidad del material que pasa en un determinado tamiz.

Al hacer la combinación de agregados es deseable, siempre que sea factible, producir una granulometría que se aproxime lo más posible a la media de los límites de las especificaciones.

Nos permite observar que para un tamiz determinado el % con que contribuye un tipo de agregado a la mezcla deseada se obtiene multiplicando el % total que pasa por el tamiz (expresado en decimal) por el % de agregado de ese tipo contenido en la mezcla.

El % del material combinado que pasa por un tamiz determinado se obtiene sumando las cantidades del material de cada tipo que pasa por dicho tamiz. La fórmula básica es la siguiente:

$$P = Aa + Bb + Cc + \dots + Nn \dots \dots \dots (a)$$

$$a + b + c + \dots + n = 1 \dots \dots \dots (b)$$

Donde:

P: % pasante correspondiente a un tamiz cualquiera. Este % es la media aritmética de las especificaciones.

A, B, C...N: % de material que pasa el tamiz dado en las granulometrías para cada uno de los agregados empleados en la combinación.

a, b, c, ...n: Proporciones expresadas en forma decimal resultante de la combinación para cada uno de los materiales y cuyo valor es igual a uno.

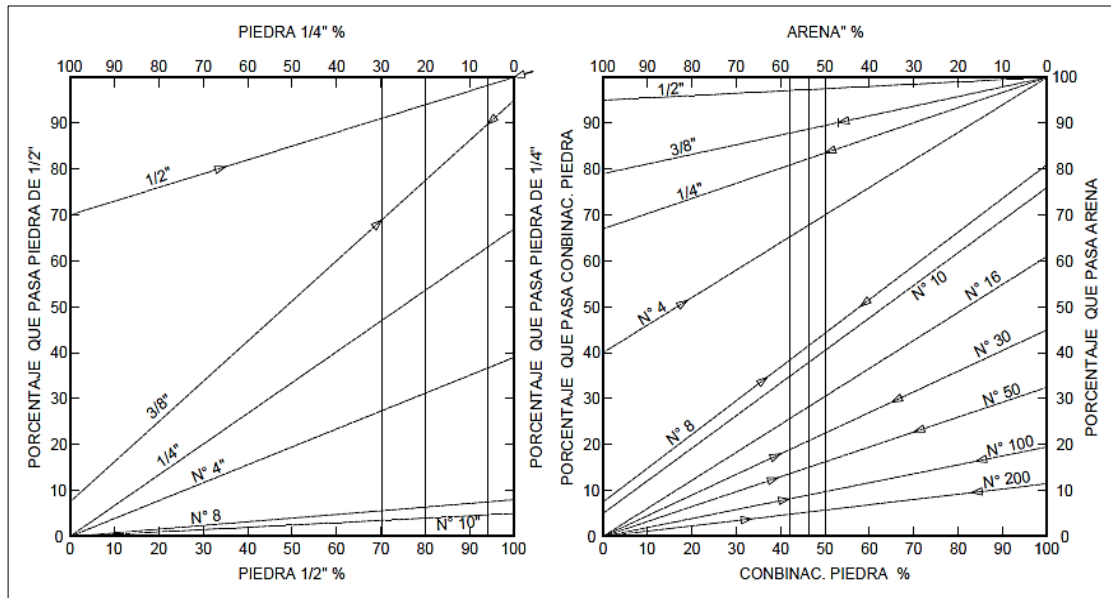
2.1.9.2 Método Grafico

- **Método del Cuadrado.**

Este método grafico del cuadrado, trata de un cuadrado en el cual se pone porcentaje de 100 unidades por lado opuestos para dos suelos (lados

horizontales), los porcentajes que pasan las mallas de los materiales 1 y 2 aisladamente (escala vertical). Muestra las curvas granulométricas de dos suelos 1 y 2, que se desea mezclar para lograr un tercero que este dentro del uso granulométrico de las especificaciones.

Figura N° 2. 3. Grafico del Método del Cuadrado



Fuente: *Tecnología de Hormigón – Fernanda Carrasco*

El procedimiento consiste en marcar en cada escala vertical los porcentajes que pasan correspondientes a cada tipo de malla en ambos suelos, los que luego se unen representando así los suelos 1 y 2 en cada malla. Luego se procede a marcar sobre estas líneas, los límites del uso granulométrico que representan los porcentajes que pasan por cada una de las mallas contenidos en el uso, de tal manera que la porción comprendida entre la menor separación de todas estas marcas, representa todas las posibles combinaciones de los suelos 1 y 2, que cumple con las especificaciones.

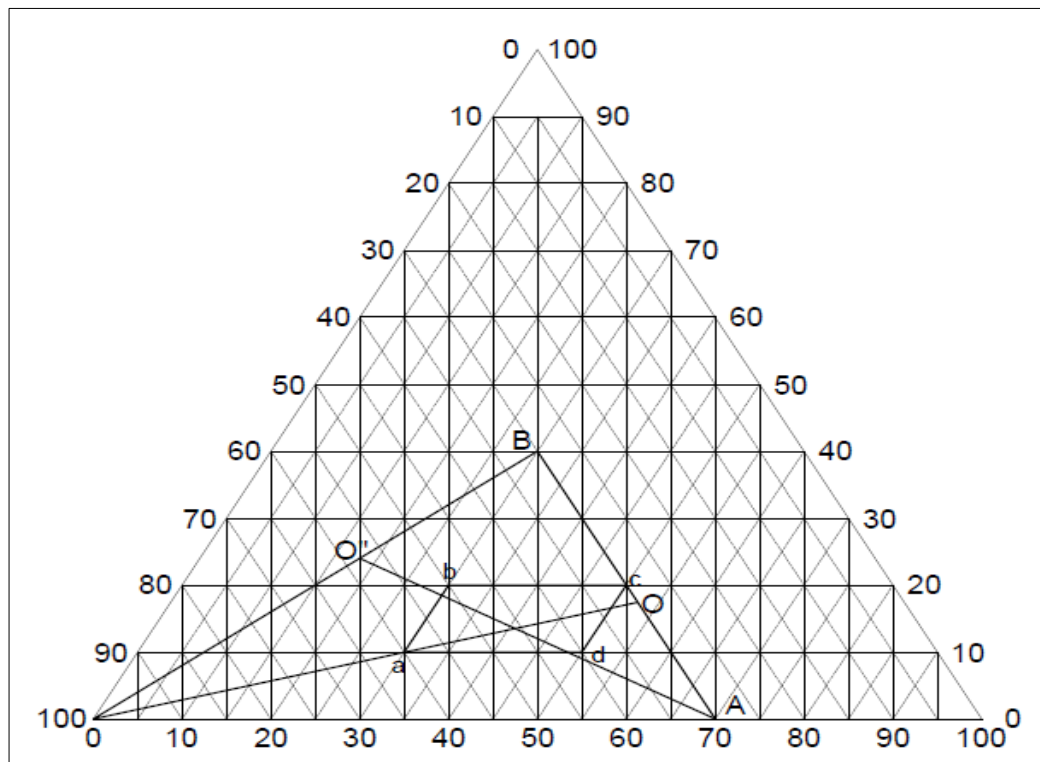
- **Método del triángulo**

Se utiliza el método del triángulo tomando la misma referencia anterior. Se tiene tres suelos A, B y C que se desea mezclar para obtener un cuarto que cumpla las especificaciones. El procedimiento consiste en construir un triángulo equilátero de 100 unidades por lado, correspondiente a los porcentajes que retiene la malla número 4, y los que pasan la malla número 4 y retenidos en la malla número 200, y los que pasan la malla 200. Dentro de este triángulo se

ubicar los puntos A, B y C correspondientes a cada tipo de suelo que interviene en la mezcla y lo mismo se hace con los límites del uso granulométrico, obteniéndose así un paralelogramo (abcd) cualquier punto dentro del triángulo ABC, representa una mezcla de los tres suelos, pero además si ese punto cae dentro del paralelogramo abcd, cumplirá además la especificación dada. Siendo el punto de mezcla óptima el que se localiza en el centro de gravedad del paralelogramo (punto o), se consigue la proporción de la mezcla de los tres suelos de la siguiente manera:

Se une el punto C con el punto o y se prolonga la línea hasta "o" sobre la línea que une a los suelos A y B. La relación oo'/o'C dará la proporción con la que interviene el suelo C en la mezcla. Del mismo modo, la relación Bo'/AB multiplica por el completo de la proporción con la que interviene C, dará la proporción con que interviene A. finalmente, el complemento de las dos anteriores será la proporción con la que interviene B en la mezcla. Esas proporciones multiplicadas por los correspondientes porcentajes de cada suelo que pasan las respectivas mallas, permitirá obtener la curva granulométrica de la mezcla.

Figura N° 2. 4. Grafico del Método del Triangulo



Fuente: Tecnología de Hormigón – Fernanda Carrasco

- **Método por ROTHFUCHS¹⁵**

Para resolver una mezcla de agregados por este método se procede según los siguientes pasos:

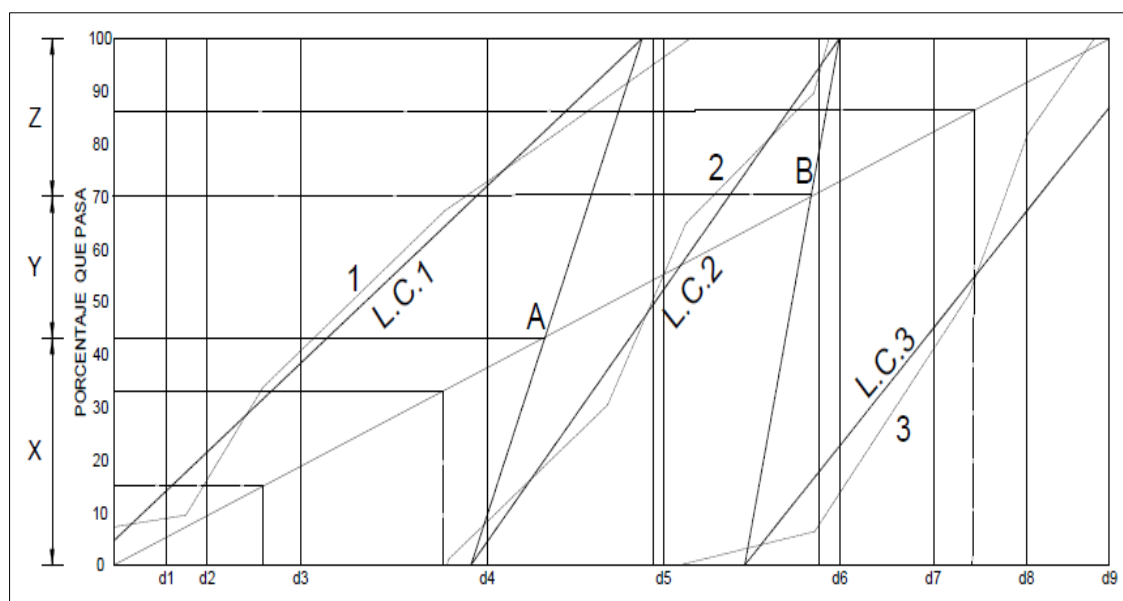
1. Se dibuja la curva representativa de la granulometría del árido deseado, de tal forma que sea una línea recta inclinada. Para ello se representa en ordenadas, en escala natural, los porcentajes pasantes a través de cada tamiz y en abscisas las aberturas de los tamices, pero en una escala tal que la curva granulométrica del agregado deseado sea una recta inclinada, como hemos dicho. Esta escala, o sea la ubicación en abscisas de las aberturas de los tamices, se realiza entrando con los porcentajes pasantes a través de cada tamiz hasta intersectar la recta inclinada ya trazada y bajando hasta la abscisa donde se indica el tamiz respectivo.
3. Determinada así la escala de abscisas, se representan los áridos a mezclar y que en general no son líneas rectas.
4. Con la ayuda de una regla transparente y para cada curva granulométrica de los áridos a mezclar, se dibuja una línea recta que más se aproxime a ella y de tal forma que las áreas comprendidas entre ella y la curva, por encima y por debajo, se compensen.
5. Siguiendo un orden, se unen los extremos opuestos de estas líneas rectas (líneas de cierre). En el ejemplo de mezclas de tres áridos, se une la intersección de L.C.1 con la horizontal del 100 % pasante e intersección de L.C.2 con intersección de 0 % pasante.

Esta línea de unión corta en A a la recta que representa el árido deseado, cuya ordenada (x) indica la proporción que debe tomarse del árido "1" para la mezcla. Procediendo análogamente se ubica el punto B, siendo (y) la proporción a tomar del árido "2" y (z) la del árido "3".

Es de fundamental importancia el trazado de las rectas compensadoras de los agregados, mencionadas en el punto 3, ya que pequeñas oscilaciones en su inclinación representan variaciones importantes en el porcentaje de los áridos que constituirán la mezcla.

¹⁵ Fernanda Carrasco (2013). Tecnología del Hormigón - Ingeniería Civil

Figura N° 2. 5. Grafico del Método por ROTHFUCHS



Fuente: Universidad Tecnológico Nacional – Colombia – Ing. Ma. Fernanda Carrasco

- “1”: curva granulométrica del árido 1 a mezclar
- “2”: curva granulométrica del árido 2 a mezclar
- “3”: curva granulométrica del árido 3 a mezclar
- “Md”: curva granulométrica del árido deseado
- L.C.1: línea de cierre 1
- L.C.2: línea de cierre 2
- L.C.3: línea de cierre 3

2.1.10 Ensayos Realizados a los Agregados Pétreos

Los ensayos se realizaron de acuerdo con el procedimiento que nos indica la norma de: MANUAL DE ENSAYO DE MATERIALES edición Mayo del 2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Sección N° 01 Suelos:

- **MTC E 110:** Determinación del Limite Liquido.
- **MTC E 111:** Determinación Del Limite Plástico e Índice De Plasticidad.
- **MTC E 114:** Método de Ensayo Estándar Para el Valor Equivalente de Arena de Suelos y Agregado Fino.

Sección N° 02 Agregados:

- **MTC E 201:** Muestreo Para Materiales de Construcción.
- **MTC E 204:** Análisis Granulométrico de Agregados Gruesos y Finos.
- **MTC E 205:** Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos.
- **MTC E 206:** Peso Específico y Absorción de Agregados Gruesos.
- **MTC E 207:** Abrasión Los Ángeles (L.A.) Al Desgaste de los Agregados de Tamaños Menores de 37,5 mm. (1 ½”).
- **MTC E 209:** Durabilidad al Sulfato de Sodio y Sulfato de Magnesio.
- **MTC E 210:** Método de Ensayo Estándar Para la Determinación del Porcentaje de Partículas Fracturadas en el Agregado Grueso.
- **MTC E 223:** Partículas Chatas y Alargadas en Agregados.

2.1.11 Especificaciones Técnicas Para Agregados

Según el Manual de Carreteras; Especificaciones Técnicas Generales Para Construcción, (EG - 2013), del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Para el diseño de Pavimento de Concreto Asfáltico en Caliente en su sección 423, del Capítulo IV Pavimentos Flexibles, nos indica que los agregados deben cumplir con los siguientes parámetros:

Tabla N° 2. 3. Requerimientos Para los Agregados Gruesos

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		≤ 3,000	>3,000
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	18 % máx.	15 % máx.
Abrasión los ángeles	MTC E 207	40 % máx.	35 % máx.
Adherencia	MTC E 517	+95	+95
Índice de durabilidad	MTC E 214	35 % mín.	35 % mín.
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10 % máx.	10 % máx.
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70
Sales solubles totales	MTC E 219	0.5 % máx.	0.5 % máx.
Absorción*	MTC E 206	1.0 % máx.	1.0 % máx.

Fuente: Manual de Carreteras; EG - 2013.

Tabla N° 2. 4. Requerimientos para los Agregados Finos

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		≤ 3,000	>3,000
Equivalente de arena	MTC E 114	60	70
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx.	8 máx.
Índice de plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	-	18 % máx.
Índice de durabilidad	MTC E 214	35 mín.	35 mín.
Índice de plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales solubles totales	MTC E 219	0.5 % máx.	0.5 % máx.
Absorción**	MTC E 205	0.5 % máx.	0.5 % máx.

Fuente: Manual de Carreteras; EG - 2013.

La **gradación** de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) deberá responder a algunos de los usos granulométricos, especificados en la Tabla 2.5. Alternativamente pueden emplearse las gradaciones especificadas en la ASTM D 3515 e Instituto del Asfalto.

Tabla N° 2. 5. La gradación de la Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC)

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC-1	MAC-2	MAC-3
25.00 mm (1")	100		
19.00 mm (3/4")	80-100	100	
12.50 mm (1/2")	67-85	80-100	
9.50 mm (3/8")	60-77	70-88	100
4.75 mm (N° 4)	43-54	51-68	65-87
2.00 mm (N° 10)	29-45	38-52	43-61
425 µm (N° 40)	14-25	17-28	16-29
180 µm (N° 80)	8-17	8-17	9-19
75 µm (N° 200)	4-8	4-8	5-10

Fuente: Manual de Carreteras; EG – 2013.

FILLER O POLVO MINERAL

El filler o relleno de origen mineral, que sea necesario emplear como relleno de vacíos, espesante del asfalto o como mejorador de adherencia al par

agregado-asfalto, podrá ser de preferencia cal hidratada, no plástica que deberá cumplir la norma AASHTO M-303.

Tabla N° 2. 6. Porcentaje Retenido de Filler

MALLA	% RETENIDO EN PESO
Residuo máximo en la malla de 600 μm (N° 30)	3%
Residuo máximo en la malla de 75 μm (N° 200)	20%

Fuente: Manual de Carreteras-Ensayo de Materiales para Carreteras - MTC.

2.2 Materiales Asfálticos¹⁶

2.2.1 Antecedentes

El asfalto es uno de los materiales más antiguos utilizados como aglutinante o impermeabilizante. Las primeras carreteras pavimentadas en los EE.UU. fueron en la Av. Pennsylvania, frente a la Casa Blanca. El asfalto usado fue natural proveniente de la Isla Trinidad en las Costas de Venezuela. La otra fuente de asfalto natural se encuentra en Bermudez – Venezuela.

Los asfaltos naturales se encuentran en depresiones de la corteza terrestre formando los lagos de asfalto o aparecen impregnados en calizas, formaciones de areniscas o similares, formando las llamadas rocas asfálticas, también se encuentra mezclados por impurezas minerales.

Durante 1800 y 1900 la demanda de las carreteras pavimentadas se incrementó tan rápido que la extracción y transporte desde los lagos de asfalto hasta la obra, fue limitado la construcción de estos pavimentos. Se tuvo que considerar otra fuente para producir asfalto, es así que la mayoría de los asfaltos utilizados en la actualidad son provenientes del refine del petróleo.

2.2.2 Definiciones:

Asfalto

ASTM (American Society for Testing and Materials ó Sociedad Americana para Ensayos y Materiales) lo define como un material cementante, de color oscuro y de consistencia variable, cuya rigidez depende de la temperatura en que se encuentre. A temperatura ambiente el asfalto es sólido a

¹⁶ Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.

semisólido, y cuando su temperatura se eleva se vuelve líquido, esta condición permite que los agregados sean cubiertos completamente, durante la mezcla.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, a altas temperaturas (135°C) es poco rígido, condición que permite que se adhiera fácilmente a las partículas del agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento que une los agregados en mezclas en caliente.

El cemento asfáltico también es usado como impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los alcális (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daño químico.

El asfalto al entrar en contacto con el oxígeno del medio ambiente reacciona, perdiendo sus propiedades elásticas y volviéndose duro y frágil. Esta es una de las características del asfalto que trata de retardarse, pero que se desarrolla con el tiempo.

En una mezcla convencional (asfalto + agregado de granulometría completa) el porcentaje de asfalto es de 6.5% y del agregado de 93.5% en peso de la mezcla, aprox.; sin embargo, es importante resaltar como un material cuya participación es mínima puede tener tanto efecto en el comportamiento de la mezcla. Figura N° 2.6.

Figura N° 2. 6. Cemento asfáltico, agregados y briqueta



Fuente: *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya y Ordoñez H.*

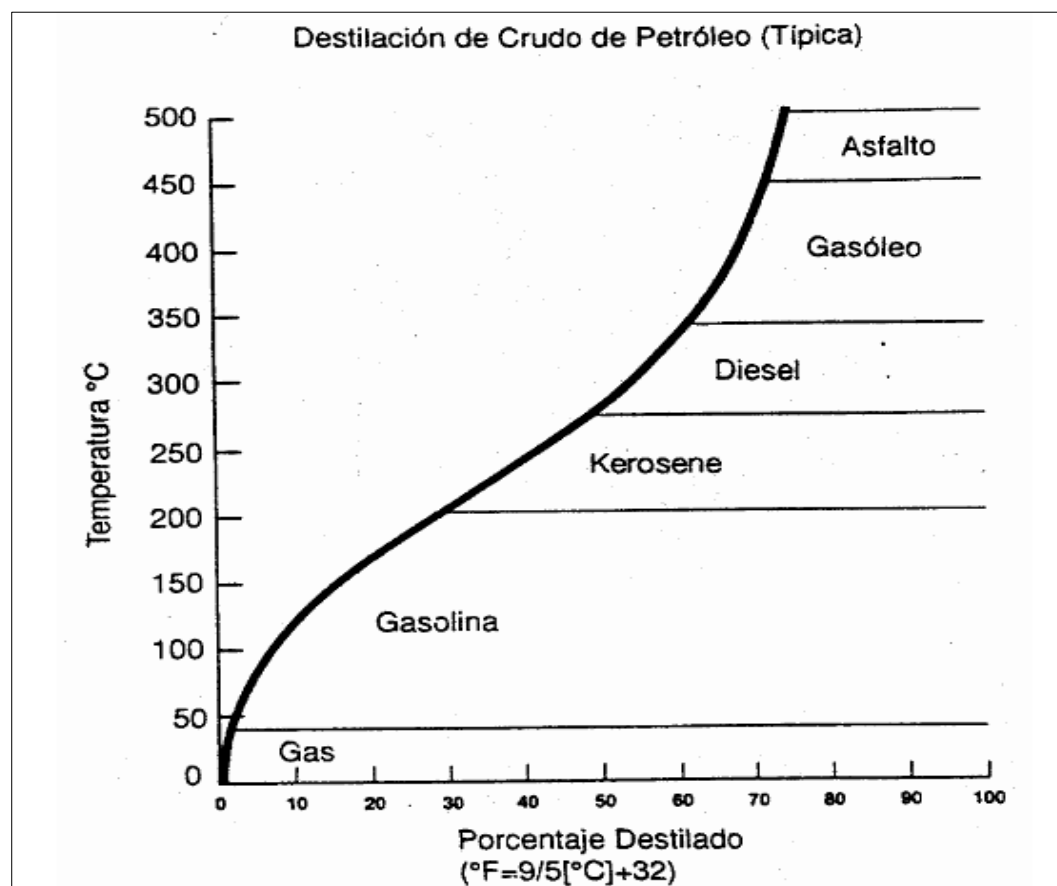
2.2.3 Refinamiento del Petróleo

Si se tuviese en un depósito alcohol y agua y éste se llevase a calentar, a 72°C aprox. El alcohol comenzaría a evaporarse. Cuando la temperatura alcance los 100°C el agua se evaporaría. De manera similar se refina el petróleo.

Mediante el incremento paulatino de temperatura el crudo del petróleo se descompone liberando los solventes más livianos, como la gasolina, el kerosene y el diesel. Para separar los destilados más pesados, no solo es necesario incrementar la temperatura sino someterlo a vacío. Luego de un periodo de tiempo se obtendrá el cemento asfáltico.

En la figura 2.7 se muestra la temperatura a la cual los solventes se van separando del crudo del petróleo. En la figura 2.8 hay un esquema del proceso de refine del petróleo.

Figura N° 2.7. Productos y Temperaturas Típicas de Destilación



Fuente: *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.*

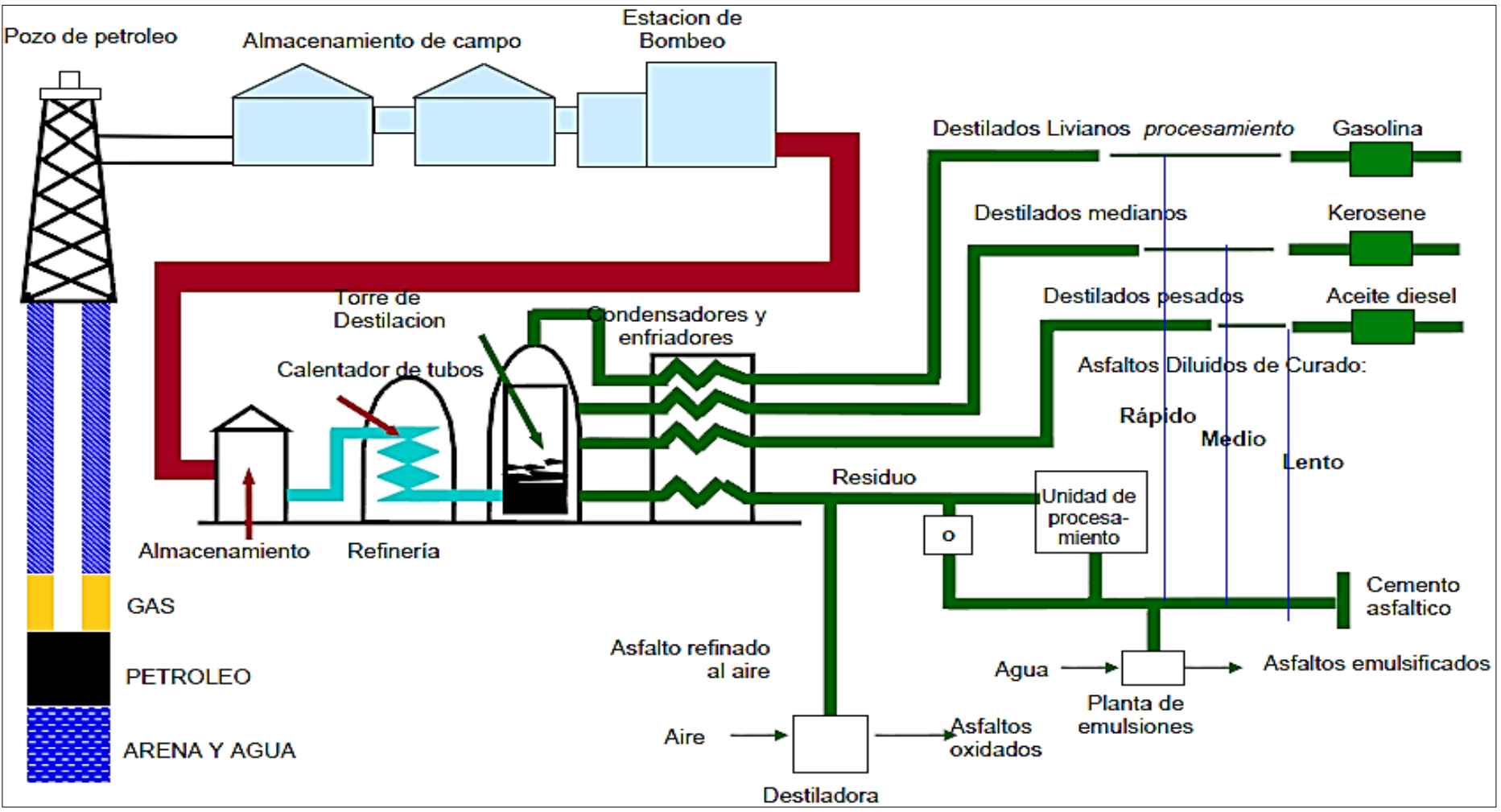
Si el cemento asfáltico se combina con algún solvente se obtienen los asfaltos diluidos o cutbacks. Así, si el asfalto se combina con gasolina será

asfalto de curado rápido (Rapid Cured, RC), si se combina con kerosene será de curado medio (Medium Cured, MC) y con diésel del curado lento (Slow Cured, SC).

Si el cemento asfáltico se combina con agua y un agente emulsificante se obtienen los asfaltos emulsificados.

Tanto en el caso de asfaltos diluidos como de asfaltos emulsificados, el objetivo es darle trabajabilidad al cemento asfáltico. Puesto que en esta condición los asfaltos pueden trabajarse a temperaturas que van de 60° a 20°C, respectivamente. Luego de la colocación de la mezcla el solvente o el agua se evaporará y quedará el asfalto solo. Por lo tanto, es importante conocer el comportamiento mecánico del cemento asfáltico.

Figura N° 2. 8. Refinamiento del Petróleo



Fuente: Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – Minaya y Ordoñez - Pag.46

2.2.4 Tipos de Asfalto¹⁷

2.2.4.1 Cemento Asfáltico (AC)

Es asfalto refinado, o una combinación de asfalto refinado y aceite fluidificante, de consistencia apropiada para trabajos de pavimentación.

Aceite fluidificante es un aceite viscoso, espeso, no volátil, obtenido por la destilación de productos volátiles livianos que se encuentran en el petróleo crudo. Se usa para ablandar los asfaltos muy duros, cuya penetración es menor de 10, hasta obtener la consistencia deseada.

Con los grados de penetración: 60-70; 85-100; 120-150 y 200-300.

Tabla N° 2. 7. Tipo de Cemento Asfaltico

Temperatura Media Anual			
24°C o más	24°C - 15°C	15°C - 5°C	Menos de 5°C
40 - 50 ó 60 - 70 o modificado	60-70	85 - 100 120 - 150	Asfalto Modificado

Fuente: EG -2013

2.2.4.2 Asfaltos Líquidos

Es un cemento asfáltico licuado mediante la adición de un fluidificante (destilación de petróleo ligero y volátil). Cuando se halla expuesto a la intemperie, se evapora el destilado volátil, quedando únicamente el cemento asfáltico. Hay tres tipos:

- **Curado Rápido (RC – Rapid Cured)**

Es un cemento asfáltico fluidificado con nafta, o con un destilado del tipo de la gasolina.

- **Curado Medio (MC – Medium Cured)**

Es un cemento asfáltico fluidificado con kerosene.

- **Curado Lenta (SC – Slow Cured)**

Es un aceite asfáltico residual, o una mezcla de estos aceites con destilados de volatilización lenta.

2.2.4.3 Asfaltos Emulsionados

Es una emulsión de cemento asfáltico y agua, conteniendo una pequeña cantidad de agente emulsivo.

¹⁷ Carreteras, Calles y Aeropistas – Valle Rodas, R.

De asentamiento rápido: RS-1 y RS-2;

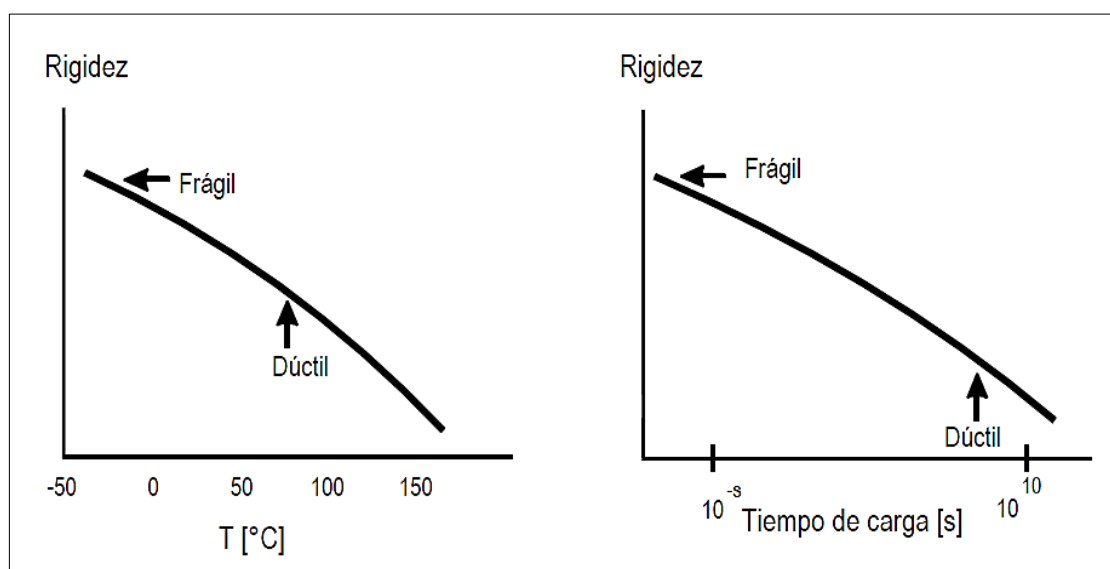
De asentamiento medio: MS-1;

De asentamiento lento: SS-1.

2.2.5 Comportamiento Mecánico del Cemento Asfáltico

La naturaleza del asfalto es viscoelástica, esto quiere decir que su comportamiento depende de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. El asfalto a altas temperaturas tiene menor rigidez, típico durante la temperatura de mezcla (135°C). A medida que la temperatura desciende el asfalto se vuelve más rígido. A temperaturas muy bajas el asfalto puede agrietarse porque se vuelve frágil y quebradizo.

Figura N° 2. 9. Comportamiento del Asfalto



Fuente: *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.*

Un comportamiento análogo se observa cuando se grafica el tiempo de aplicación de la carga (velocidad) y la rigidez. Cuando las cargas aplicadas son rápidas el asfalto tiene mayor rigidez y cuando las cargas son lentas hay menor rigidez y mayor deformación.

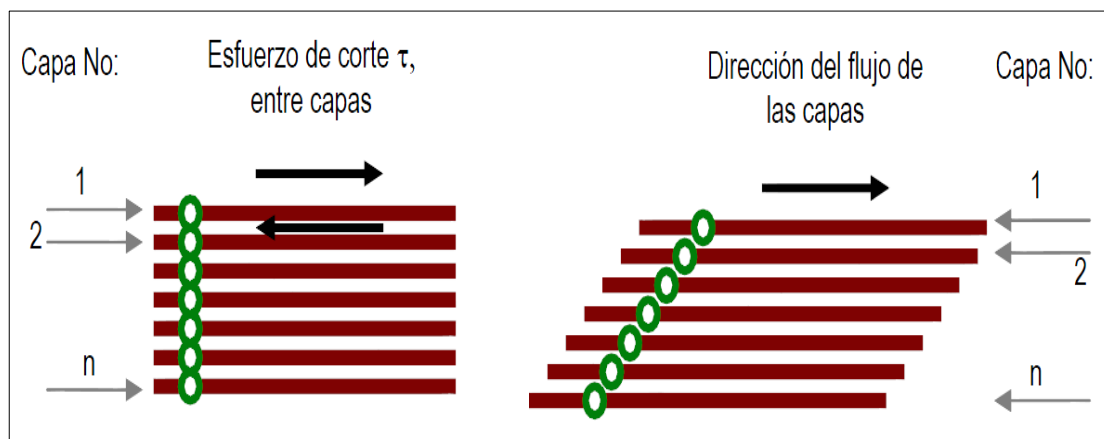
2.2.5.1 Comportamiento a altas temperaturas

En climas cálidos (el oriente del Perú, épocas de verano) o sometido a cargas de tráfico lentas (intersecciones, tramos en pendiente), el cemento asfáltico se comporta como un líquido viscoso, dejando que el agregado soporte las cargas cíclicas. Con esta condición la estructura granular de la mezcla asfáltica cumple un papel muy importante. El asfalto solo es el aglutinante.

Por definición, la viscosidad es la característica física del material que describe la resistencia de los líquidos a fluir. Si el flujo del cemento asfáltico en caliente es lento puede ser observado microscópicamente como capas adyacentes de moléculas deslizándose unas sobre otras. La resistencia o fricción entre capas se relaciona a la velocidad relativa de deslizamiento.

La viscosidad es una característica que ayuda a diferenciar a los líquidos y se define como el esfuerzo de corte entre la velocidad de deformación por corte. La figura 2.10 muestra un juego de cartas que tienen una línea vertical marcada a un lado. Cuando se aplica el corte en el punto superior, las cartas tratan de deslizarse una sobre la otra y los puntos marcados en las cartas empiezan a separarse. La velocidad al corte es la velocidad a la cual estos puntos se separan.

Figura N° 2. 10. Características del Flujo de Líquidos



Fuente: *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.*

Los fluidos Newtonianos tienen una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad relativa. El aire, agua y asfalto caliente (a temperaturas mayores que 60°C) son comúnmente fluidos Newtonianos. A temperaturas moderadas, la viscosidad del asfalto decrece cuando la velocidad relativa se incrementa.

Los líquidos viscosos como el asfalto caliente algunas veces son llamado plásticos porque una vez que empiezan a fluir no retornan a su posición original. El rutting o ahuellamiento es la acumulación de deformaciones plásticas no recuperables.

Figura N° 2. 11. Ahuellamiento o Deformación Permanente o Rutting

Fuente: Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.

2.2.5.2 Comportamiento a Bajas Temperaturas

En climas fríos o bajo aplicaciones de carga rápida, el cemento asfáltico se comporta como un sólido elástico. Los sólidos elásticos son como ligas porque cuando cesa la carga que los deforma, regresan a su posición original.

Si el material se esfuerza más allá de su capacidad, el sólido elástico puede romperse. El agrietamiento por bajas temperaturas algunas veces ocurre en los pavimentos cuando están sometidos a climas fríos. En estos casos, las cargas aplicadas producen esfuerzos internos que se acumulan en el pavimento asfáltico que tenderá a contraerse mientras su movimiento es restringido por las capas inferiores.

Figura N° 2. 12. Agrietamiento por bajas temperaturas

Fuente: Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.

2.2.5.3 Comportamiento a Temperaturas Intermedias

En estos climas el asfalto muestra características de líquido viscoso y sólido elástico. A estas temperaturas, el asfalto es un excelente material adhesivo usado en pavimentación. Cuando se calienta el asfalto actúa como un lubricante, permitiendo mezclarse con el agregado, cubrirlo y compactarse formando una superficie lisa y densa. Tan pronto como se enfría, el asfalto actúa manteniendo juntos los agregados en la matriz sólida. En esta etapa el comportamiento del asfalto es viscoelástico, es decir, tiene características elásticas y viscosas, dependiendo de la temperatura y velocidad de aplicación de carga.

2.2.6 Especificaciones y Ensayos Para Cemento Asfálticos

Como la química del asfalto es muy compleja, la experiencia ha demostrado que las especificaciones deben estar relacionadas, con las propiedades físicas o de manera más precisa, con su comportamiento mecánico. Las especificaciones actuales en el Perú utilizan todavía los ensayos de penetración, viscosidad y ductilidad para evaluar el asfalto. Muchos de los ensayos actuales son empíricos, significando que la experiencia es todavía necesaria para que los resultados de los ensayos se puedan interpretar adecuadamente. Sin embargo, tal práctica ha demostrado que tiene importantes limitaciones.

Reconociendo las deficiencias de tal sistema, las agencias estatales de carreteras de los Estados Unidos tuvieron que implementar un programa de investigación para adoptar un nuevo sistema para especificar el pavimento asfáltico. En 1987, la SHRP inició estudios para desarrollar nuevos ensayos que permitan medir las propiedades físicas del asfalto. La inversión de \$50 millones de dólares se plasmó en las especificaciones del Ligante Superpave, que requiere de un nuevo paquete de equipos para ensayos y procedimientos. Se llamó especificaciones del “ligante” porque se engloba a los asfaltos modificados y no modificados.

El avance más significativo fue probablemente cambiar ensayos empíricos por ensayos donde el ligante puede ser caracterizado a variaciones de temperaturas controladas obtenidas de campo.

Los ensayos de Reómetro de Corte Dinámico (DSR), Reómetro de Viga de Flexión (BBR) y Ensayo de Tensión Directa (DTT) reemplazaron a los ensayos de viscosidad, penetración y ductilidad, respectivamente. Junto con el envejecimiento en planta (RTFO) se adoptó el envejecimiento durante la vida de servicio (PAV).

2.2.6.1 Ensayos de Penetración y Viscosidad

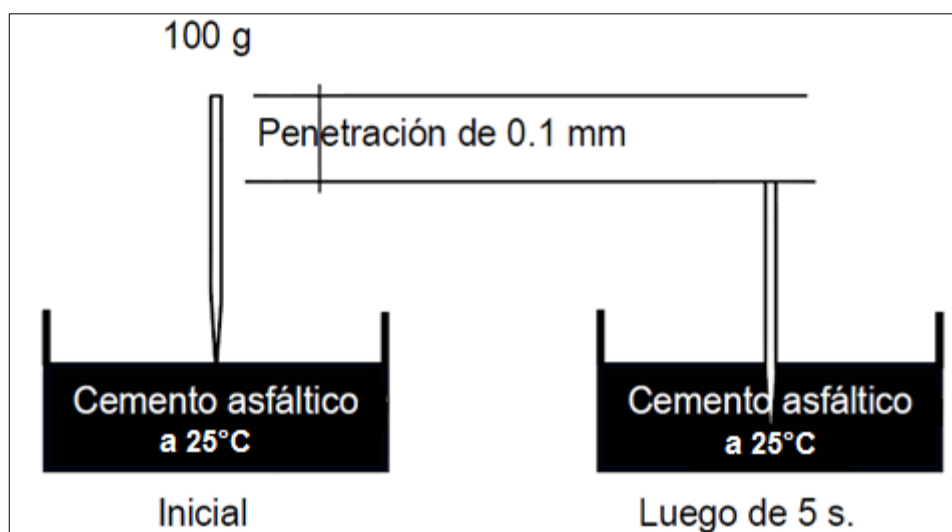
Ensayo de Penetración

Entre los años 40 y 50 el sistema de clasificación por penetración fue usado en los EE.UU. y Canadá. El ensayo de penetración realizado a 25°C (temperatura elegida como el promedio de la temperatura de servicio del pavimento), indica la rigidez del asfalto, que solo puede ser relacionado con su comportamiento en campo mediante la experiencia.

Como el valor de la penetración no es una medida fundamental dicho valor no puede ser racionalmente incluida en modelos mecánicos.

El ensayo consiste en aplicar una carga patrón en la superficie de una muestra de cemento asfáltico a 25°C. Se debe medir la penetración de la aguja en la muestra, luego de 5 segundos. Si el asfalto es duro la penetración será menor que cuando el asfalto es blando. Se recomendó siempre la utilización de asfaltos duros para carreteras en la selva mientras que los blandos eran recomendados para carreteras en la sierra o zonas con bajas temperaturas.

Figura N° 2. 13. Esquema del Ensayo de Penetración



Fuente: *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.*

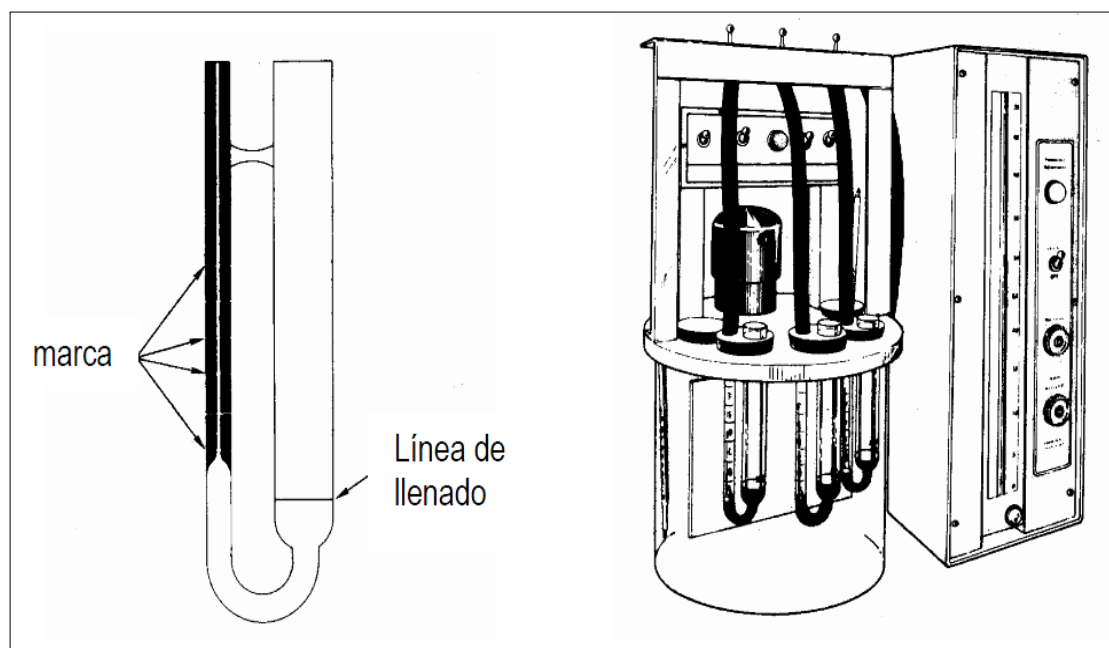
Ensayo de Viscosidad

El sistema de gradación por viscosidad se basó en los ensayos de viscosidad del ligante. La viscosidad es una medida fundamental del flujo, que proporciona información acerca del comportamiento viscoso a mayores temperaturas. Las temperaturas de ensayo son de 60°C y 135°C. Sin embargo, este ensayo no es adecuado para controlar el comportamiento mecánico del ligante no newtonianos (y viscoelásticos), requiriendo de ensayos adicionales al de la viscosidad.

Las especificaciones generalmente se refieren a la viscosidad del asfalto a dos temperaturas diferentes, 60°C (viscosidad absoluta) y 135°C (viscosidad cinemática). La primera es para clasificar el cemento asfalto y representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta de servicio; la segunda corresponde aproximadamente a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y colocación.

La viscosidad absoluta mide el tiempo que requiere el asfalto para fluir a través de un tubo capilar calibrado a 60°C, como el asfalto a esa temperatura es muy rígido, se requiere someter al vacío a la muestra para que el asfalto se mueva a través del tubo en un tiempo razonable. Figura 2.14.

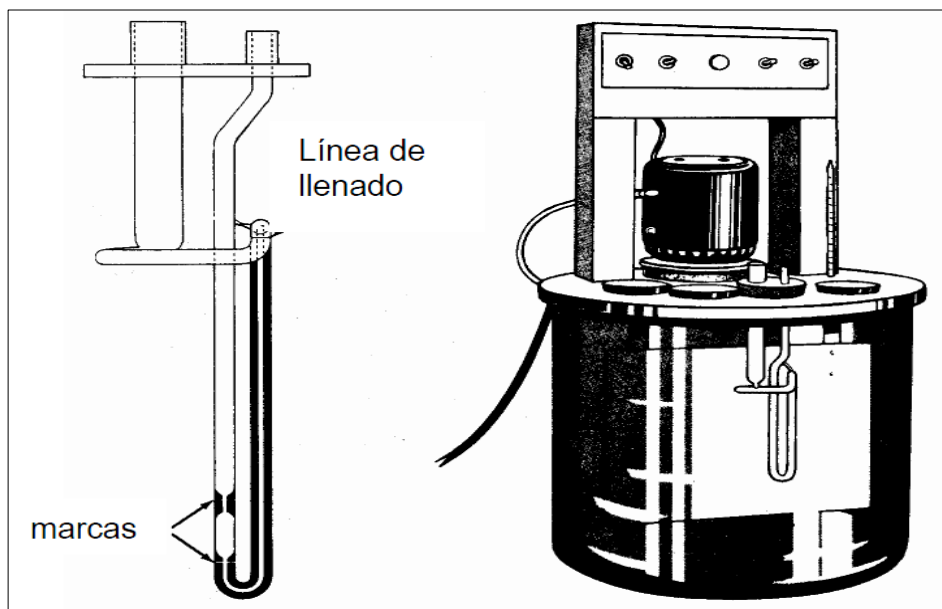
Figura N° 2. 14. Viscosidad Absoluta



Fuente: *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.*

La viscosidad cinemática se ensaya a 135°C y mide el tiempo requerido para que un volumen fijo de líquido fluya, por capilaridad, a través de un viscosímetro, a esa temperatura solo se requiere de la gravedad para que el asfalto fluya. Figura 2.15.

Figura N° 2. 15. Viscosidad Cinemática



Fuente: Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.

2.3 Mezclas Asfálticas¹⁸

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de capas de rodadura y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica para los usuarios, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta.

Se tienen que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño de mezclas asfálticas:

- La Función, que determina la resistencia de los materiales y el espesor de la capa que emplearemos en la construcción.
- La Finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir en la capa de rodadura, para que resulten seguras y confortables. A esta capa se le denomina pavimento.

¹⁸ Mezclas Asfálticas – Alejandro Padilla Rodríguez -2012-cap.3-pag.40

2.3.1 Funcionalidad de las Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales.

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, como son temperatura y duración de la carga.

Las cualidades residen fundamentalmente en su superficie de su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción como:

1. La adherencia del neumático al pavimento.
2. Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
3. El desgaste de los neumáticos.
4. El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
5. La comodidad y estabilidad en marcha.
6. Las cargas dinámicas del tráfico.
7. La resistencia a la rodadura.
8. El envejecimiento de los vehículos.

Como resumen se puede decir que en una mezcla asfáltica hay que optimizar las propiedades siguientes:

- Estabilidad
- Durabilidad
- Resistencia a la Fatiga

Si la mezcla se usa como capa de rodadura hay que añadir las propiedades siguientes:

- Resistencia al Deslizamiento
- Regularidad
- Permeabilidad Adecuada
- Sonoridad
- Color, entre otras.

2.3.2 Propiedades Funcionales de las Mezclas Asfálticas

La capa superior de un pavimento es la que debe proporcionar una superficie de rodadura segura, confortable y estética. Como todas las exigencias deseables para una superficie de rodadura no pueden optimizarse simultáneamente hay que equilibrar las propiedades contrapuestas para llegar a las soluciones más satisfactorias.

En las capas de rodadura el uso de agregados de alta calidad y de aditivos se justifica por las solicitaciones a que están sometidas. Actualmente la modificación de ligantes se ha generalizado para carreteras importantes persiguiéndose la optimización de la respuesta mecánica y de la durabilidad de la mezcla. Por la misma razón, la calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento.

Tabla N° 2. 8. Propiedades Funcionales de las Mezclas Asfálticas

Propiedades Funcionales de las Mezclas Asfálticas
Seguridad Resistencia al deslizamiento Regularidad transversal Visibilidad (marcas viales)
Comodidad Regularidad longitudinal Regularidad transversal Visibilidad Ruido
Durabilidad Capacidad soporte Resistencia a la desintegración superficial
Medio ambiente Ruido Capacidad de ser reciclado
Trabajabilidad

Fuente: Mezclas Asfálticas – Alejandro Padilla Rodríguez

2.3.3 Clasificación de las Mezclas Asfálticas

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas:

2.3.3.1 Por Fracciones de Agregado Pétreo Empleado

- Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.

- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico

2.3.3.2 Por la Temperatura de Producción¹⁹

De acuerdo a la temperatura de producción. Características principales.; se exponen los diferentes tipos de mezcla asfáltica de acuerdo a la temperatura de elaboración en planta.

Tabla N° 2. 9. Clasificación de las tecnologías WMA de acuerdo a la temperatura de producción.

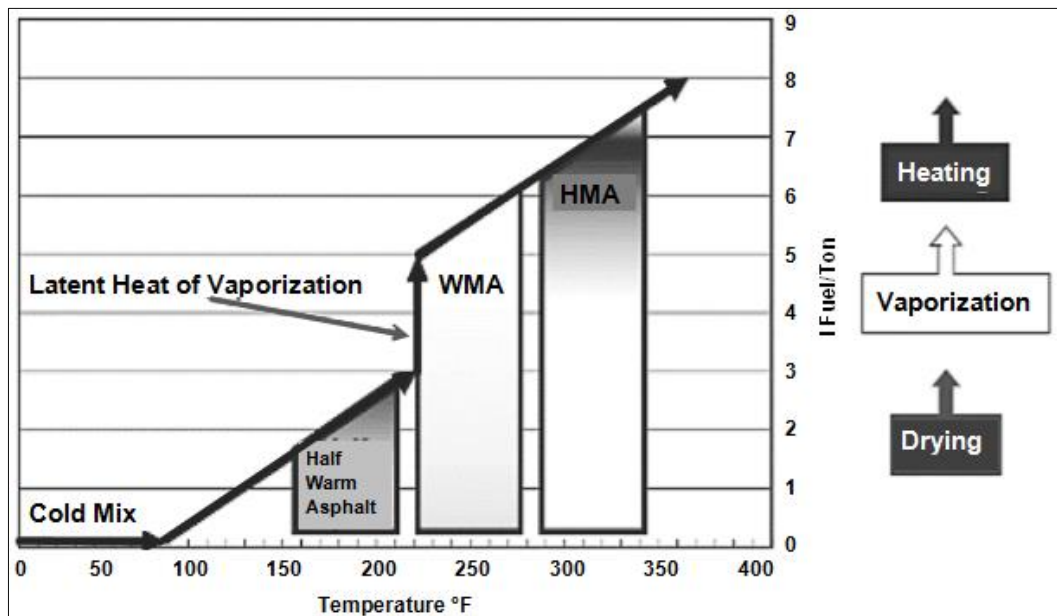
NOMBRE DE LA MEZCLA	TEMPERATURA	OBJETIVO	CARACTERÍSTICAS
Mezclas en frío	De 25°C a 60°C	Permitir la incorporación en la mezcla de una alta proporción, de material reciclado.	Las mezclas en frío con emulsiones asfálticas donde los agregados se revisten a temperaturas bajas en una emulsión de asfalto en agua, pueden utilizarse como capas intermedias, capas de refuerzo e incluso, capas de rodadura.
Mezclas Semi - templadas	De 60°C a 100°C	Maximizar los ahorros energéticos y las emisiones aprovechando parte de la humedad presente en los agregados.	Se están desarrollando varios productos y procesos para producir mezclas semi - templadas, a partir de emulsiones en planta, que resulten convencionales a los procesos de mezcla en caliente. Aunque los procesos más ambiciosos de reducción de temperatura hacen uso de las propiedades de espumado del asfalto, cuando entra en contacto con el aire y la humedad bajo presión; así a medida que se expande el volumen del asfalto, su viscosidad disminuye y se hace posible el revestimiento completo de los agregados.

¹⁹ Diseño De Mezclas Asfálticas Drenantes Tibias, A Partir De La Mezcla De Cemento Asfáltico AC 60-70 Con Licomont BS-100 Para Diferentes Niveles de Precipitación – Senior Arrieta,V.

Mezclas Tibias (WMA)	De 100°C a 135°C	Reducir los requerimientos térmicos de las mezclas en caliente.	Se mantienen o mejoran las características de rendimiento final de la mezcla asfáltica, para ello se requiere una tecnología para reducir la viscosidad del ligante durante las fases de mezcla y colocación, sin tener un efecto negativo a las temperaturas de uso.
Mezclas en Caliente	De 135°C a 180°C	Producción de mezcla asfáltica convencional - mente.	Son mezclas producidas por técnicas convencionales donde la temperatura de producción es elevada. Estas mezclas son de alto desempeño.

Fuente: Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias – Senior Arrieta.

Figura N° 2. 16. Clasificación de mezclas asfálticas por rango de temperaturas.



Fuente: Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias – Senior Arrieta.

2.3.3.3 Por la Proporción de Vacíos en la Mezcla Asfáltica

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- **Mezclas Cerradas o Densas:** La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- **Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas:** La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- **Mezclas Abiertas:** La proporción de vacíos supera el 12 %.
- **Mezclas Porosas o Drenantes:** La proporción de vacíos es superior al 20 %.

2.3.3.4 Por el Tamaño Máximo del Agregado Pétreo

Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.

Mezclas Finas: También llamadas micro aglomerado, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

2.3.3.5 Por la Estructura del Agregado Pétreo

Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

2.3.3.6 Por la Granulometría

Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

2.3.4 Propiedades Volumétricas de las Mezclas Asfálticas²⁰

2.3.4.1 Generalidades

Un factor importante que debe ser considerado en el comportamiento de mezclas asfálticas son las relaciones volumétricas entre el ligante asfáltico y los agregados. Las propiedades volumétricas más importantes de una mezcla compactada de pavimento son: vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos con asfalto (VFA), y contenido de asfalto efectivo (P_{be}), proporcionan un índice del probable comportamiento de la mezcla durante su vida de servicio.

2.3.4.2 Definiciones

El agregado mineral es poroso y puede absorber agua y asfalto en diferentes grados. Además, la proporción de agua a asfalto absorbido varía con el tipo de agregado. Los métodos son: gravedad específica bulk, gravedad específica aparente y gravedad específica efectiva.

a. Gravedad Específica Bulk (G_{sb})

La relación del peso en el aire de un material permeable (incluyendo los vacíos permeables e impermeables del material) a temperatura establecida al volumen del agregado incluyendo los vacíos permeables. Figura 2.17.

$$G_{sb} = \frac{W_s}{(V_s + V_{pp})\gamma_w} \dots \dots \dots (2.1)$$

Donde:

G_{sb} : Gravedad específica bulk del agregado

W_s : Peso del agregado seco

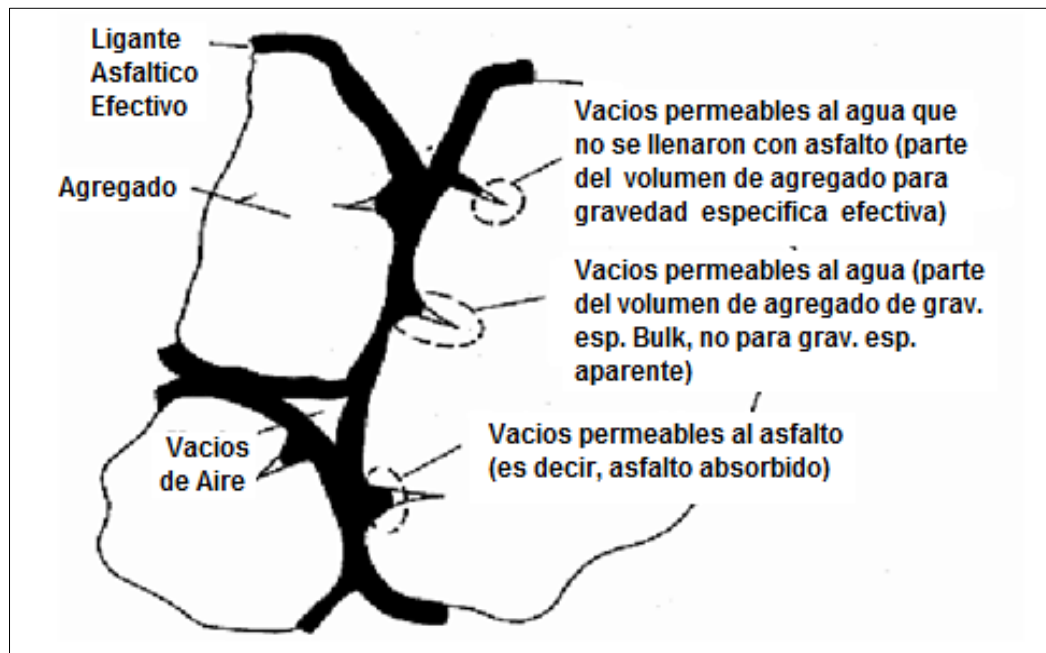
V_s : Volumen del agregado con los vacíos impermeables

V_{pp} : Volumen de vacíos permeables

γ_w : Peso específica del agua (1 gr/cm³)

²⁰ Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos -- S. Minaya G. y A. Ordoñez H.

Figura N° 2. 17. Propiedades Peso – Volumen en Mezclas Asfálticas Compactadas



Fuente: Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – Minaya y Ordoñez.

b. Gravedad Específica Aparente (Gsa)

Es la relación del peso en el aire de un material impermeable con respecto al volumen del agregado incluyendo los vacíos impermeables. Figura 2.17. Con la ecuación N° 2.2 se encuentra la gravedad específica aparente.

$$Gsa = \frac{Ws}{Vs\gamma_w} \dots \dots \dots (2.2)$$

Donde:

- Gsa: Gravedad específica aparente
- Ws: Peso del agregado seco
- Vs: Volumen del agregado con los vacíos impermeables
- γ_w : Peso específica del agua (1 gr/cm3)

c. Gravedad Específica Efectiva (Gse)

Relación del peso en el aire de un material permeable (excluyendo los vacíos permeables al asfalto) con respecto al volumen del agregado con los vacíos impermeables y vacíos permeables que no absorbieron asfalto. Figura 2.17. A continuación se muestra la ecuación N° 2.3, con el cual se encuentra la gravedad específica efectiva.

$$Gse = \frac{Ws}{(Vs + Vpp - Vap)\gamma_w} \dots \dots \dots (2.3)$$

Donde:

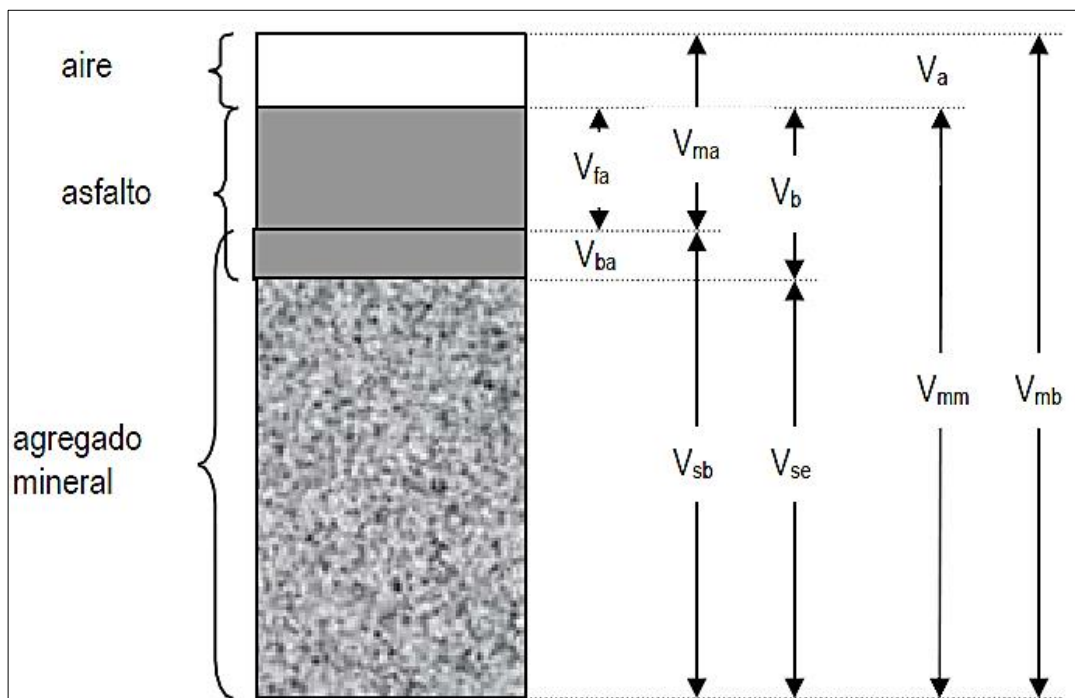
- Gse: Gravedad específica efectiva
- Ws: Peso del agregado seco
- Vs: Volumen del agregado con los vacíos impermeables
- Vpp: Volumen de vacíos permeables
- Vap: Volumen de vacíos permeables que absorben asfalto
- γ_w : Peso específica del agua (1 gr/cm3)

Las definiciones de vacíos en el agregado mineral (VMA), contenido de asfalto efectivo (Pbe), vacíos de aire (Va), y vacíos llenos con asfalto (VFA) son:

d. Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)

Volumen de vacíos entre los agregados de una mezcla compactada que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado en porcentaje del volumen total de la mezcla. Ver figura 2.18.

Figura N° 2. 18. Esquema de una Muestra HMA Compactada



Fuente: Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.

- V_{ma} : volumen de vacíos en agregado mineral
- V_{mb} : volumen bulk de la mezcla compactada

V_{mm}: volumen de vacíos de la mezcla de pavimentación

V_{fa}: volumen de vacíos llenos con asfalto

V_a: volumen de vacíos de aire

V_b: volumen de asfalto

V_{ba}: volumen de asfalto absorbido

V_{sb}: volumen del agregado mineral (gravedad específica bulk)

V_{se}: volumen del agregado mineral (gravedad específica efectiva)

e. Contenido de Asfalto Efectivo (P_{be})

El contenido de asfalto total de la mezcla menos la porción de asfalto absorbida por el agregado. Ver figura 2.18.

f. Vacíos de Aire (V_a)

Volumen total de las pequeñas cavidades de aire entre las partículas de agregado cubiertas en toda la mezcla, expresada como porcentaje del volumen bulk de la mezcla compactada. Ver figura 2.18.

g. Vacíos Llenos con Asfalto (VFA)

Porción del volumen de vacíos entre las partículas de agregado (VMA) que es ocupado por el asfalto efectivo. Figura 2.18.

Los siguientes análisis de mezcla compactada se relacionan para analizar los vacíos de una mezcla compactada.

2.3.4.3 Gravedad Específica Bulk del Agregado

Cuando el agregado total consiste de fracciones separadas de agregados grueso, fino y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas, la gravedad específica bulk de la combinación de agregados se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \dots \dots \dots (2.4)$$

Donde:

G_{sb}: Gravedad específica bulk de la combinación de agregados

P₁, P₂, P_n: Porcentaje individuales por peso del agregado

G₁, G₂, G_n: Gravedad específica bulk individual del agregado.

2.3.4.4 Gravedad Específica Efectiva del Agregado

La gravedad específica efectiva se calcula con la gravedad específica teórica máxima de mezclas asfálticas (RICE) ASTM D-2041, con la siguiente expresión:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \dots \dots \dots (2.5)$$

Donde:

- Gse: Gravedad específica efectiva del agregado
- Pmm: Porcentaje en peso del total de la mezcla suelta, 100%
- Pb: Porcentaje de asfalto para el peso total de la muestra
- Gmm: Gravedad específica teórica máxima (ASTM D-2041) de la mezcla
- Gb: Gravedad específica del asfalto

2.3.4.5 Gravedad Específica Teórica Máxima de Mezcla

Cuando se diseña una mezcla con un agregado dado, se requiere la gravedad específica teórica máxima, Gmm, con diferentes contenidos de asfalto para calcular el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto.

Luego de calcular la gravedad específica efectiva de los agregados considerando cada medición de las gravedades específicas teóricas máximas y promediando los resultados de Gse, la gravedad específica teórica máxima para algún otro contenido de asfalto puede obtenerse con la siguiente expresión:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \dots \dots \dots (2.6)$$

Donde:

- Gmm: Gravedad específica teórica máxima (ASTM D-2041) de la mezcla
- Pmm: Porcentaje en peso del total de la mezcla suelta, 100%
- Ps: Contenido de agregado, porcentaje en peso del total de la mezcla
- Pb: Contenido de asfalto, porcentaje en peso del total de la mezcla
- Gse: Gravedad específica efectiva del agregado
- Gb: Gravedad específica del asfalto

2.3.4.6 Absorción de asfalto

La absorción de asfalto se expresa como el porcentaje en peso del agregado más que como el porcentaje del peso total de la mezcla, el asfalto absorbido, P_{ba} , se determina usando:

$$P_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} * G_b \dots \dots \dots (2.7)$$

Donde:

P_{ba} : Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado

G_b : Gravedad específica del asfalto

G_{sb} : Gravedad específica bulk del agregado

2.3.4.7 Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla

El contenido de asfalto efectivo, P_{be} , de una mezcla es el contenido de asfalto total menos la cantidad de asfalto absorbido dentro de las partículas de agregado. Esta es la porción del contenido de asfalto total cubre el exterior del agregado. Este es el contenido de asfalto que gobierna la performance de una mezcla asfáltica. La fórmula es:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} * P_s \dots \dots \dots (2.8)$$

Donde:

P_{be} : Contenido de asfalto efectivo, porcentaje del peso total de la mezcla.

P_b : Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla.

P_{ba} : Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

P_s : Contenido de agregado, porcentaje del peso total de la mezcla.

2.3.4.8 Porcentaje de VMA en Mezcla Compactada

Los vacíos en el agregado mineral, VMA, se definieron como los vacíos entre las partículas de agregado de la mezcla compactada, incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, se expresa como un porcentaje del volumen total. El VMA se calcula en base a la gravedad específica bulk del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen bulk de la mezcla compactada. Por consiguiente, el VMA puede calcularse restando el volumen del agregado determinado por su gravedad específica bulk del volumen bulk de la mezcla compactada.

Si la composición de la mezcla se determina como porcentaje por peso de la mezcla total:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \dots \dots \dots (2.9)$$

Donde:

VMA: Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk

Gsb: Gravedad específica bulk del agregado total

Gmb: Gravedad específica bulk de la mezcla compactada (AASHTO T166; ASTM D1188 o D2726)

Ps: Contenido de agregado, porcentaje del peso total de la mezcla

2.3.4.9 Porcentaje de Vacíos de Aire en Mezcla Compactada

Los vacíos de aire, Va, en el total de la mezcla compactada consisten de los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregados recubiertos. El porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada puede determinarse usando:

$$Va = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \dots \dots \dots (2.10)$$

Donde:

Va: Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

Gmm: Gravedad específica teórica máxima de la mezcla

Gmb: Gravedad específica bulk de mezcla compactada

2.3.4.10 Porcentaje VFA en Mezcla Compactadas

Los vacíos llenos con asfalto, VFA, es el porcentaje de los vacíos entre partículas (VMA) que se llenan con asfalto. VFA, no incluye el asfalto absorbido, y se determina usando:

$$VFA = 100 * \frac{(VMA - Va)}{VMA} \dots \dots \dots (2.11)$$

Donde:

VFA: Vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA

VMA: Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk

Va: Vacíos de aire en mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

2.3.5 Mezclas Asfálticas Tibias (Warm Mixes Asphalt – WMA)²¹

2.3.5.1 Generalidades

Las WMA representa un grupo de tecnologías que permiten una reducción de las temperaturas en las que son producidas y colocadas las mezclas asfálticas. Estas tecnologías tienden a reducir la viscosidad del asfalto y proporcionar un completo recubrimiento del agregado a temperaturas más bajas. Las WMA pueden producirse a temperaturas desde 20 °C hasta 55 °C por debajo de lo habitual para mezclas asfálticas elaboradas en caliente (HMA).

Los mismos mecanismos que permiten a una WMA mejorar la trabajabilidad a temperaturas más bajas también permiten mejorar la densidad en el proceso de compactación o en su lugar, tienden a reducir la permeabilidad lo que conlleva a un endurecimiento para mejorar el rendimiento en términos de resistencia a la fisuración y la susceptibilidad a la humedad.

Expresado en otras palabras, las mezclas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100 °C y 135 °C, su producción involucra nuevas tecnologías a partir de las cuales es posible producir y colocar las mezclas asfálticas a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.

2.3.5.2 Tecnologías de Mezcla Asfálticas Tibias

Las emergentes tecnologías WMA, que permiten lograr la reducción de las temperaturas de elaboración de las mezclas asfálticas convencionales elaboradas en caliente (HMA), suelen clasificarse de acuerdo al tipo. Uno de ellos, es aquel que utiliza agua (asfalto espumado) y el otro es el que emplea algún tipo de aditivo orgánico o químico para provocar la reducción de la temperatura (ésta clasificación permite un análisis más descriptivo de los procesos).

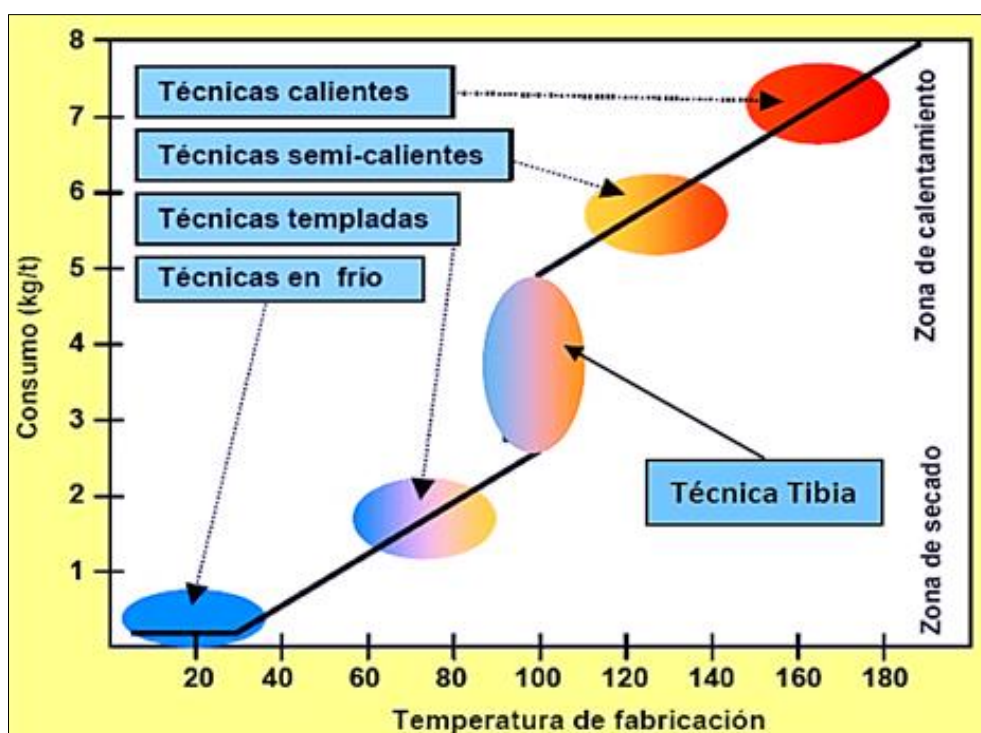
Los procesos que introducen pequeñas cantidades de agua caliente al asfalto, ya sea a través de una boquilla de formación de espuma o un material hidrófilo tal como zeolita, o agregado húmedo, se basan en el hecho de que cuando un volumen dado de agua se convierte en vapor a presión atmosférica,

²¹ Diseño De Mezclas Asfálticas Drenantes Tibias, A Partir De La Mezcla De Cemento Asfáltico Ac 60-70 Con Licomont Bs-100 Para Diferentes Niveles De Precipitación – Senior Arrieta,V.

se expande por un factor de 1,673. Cuando el agua se dispersa en el asfalto caliente y se convierte en vapor (por el contacto con el asfalto caliente), resulta en una expansión de la fase aglutinante y la reducción correspondiente en la viscosidad de la mezcla.

Las mezclas asfálticas tibias son un intermedio entre las mezclas semi - calientes y las mezclas templadas, en cuanto a temperatura se refiere. Debido a que las franjas de temperatura de la técnica semi – caliente (120°C a 140°C) y la Técnica Tibia (100°C) son muy cercanas, se creó la mezcla asfáltica tibia basándose en las tecnologías utilizadas en la fabricación de mezcla asfáltica Semi – Calientes, (Celis Amado & Serrano Flórez, 2008).

Figura N° 2. 19. Técnicas de fabricación de Mezcla asfáltica



Fuente: Mezcla Asfáltica Tibia - Celis Amado & Serrano Flórez, 2008

a. Tecnologías que emplean proceso de espumado:

- Zeolita sintética
- Low-Energy Asphalt (LEA)
- Low Energy Asphalt bitumen (LEAB)
- WAM-Foam

Tabla N° 2. 10. Clasificación de las tecnologías WMA Empleando Asfalto Espumado.

TECNOLOGÍAS WMA	COMPAÑÍA QUE PRODUCE	PORCENTAJE DE ADITIVACIÓN	TEMPERATURA DE PRODUCCIÓN EN PLANTA (°C)	PAÍSES QUE HAN APLICADO ESTA TECNOLOGÍA	PRODUCCIÓN APROXIMADA A LA FECHA
Aspha - min (Zeolita)	Eurovia y MHI	Aproximadamente el 0.3% en peso de la mezcla.	Variable de 20°C a 30°C por debajo de la temperatura de elaboración de las mezclas asfálticas en caliente. Alemania recomienda temperaturas de elaboración entre 130°C a 170°C, dependiendo de la rigidez del cemento asfáltico.	Francia, Alemania y Estados Unidos	Aproximadamente 300,000 toneladas
Ecomac (mezcla fría calentada brevemente previa su colocación)	Screg	Cantidad desconocida	Es colocada a 45°C aproximadamente	Francia	Algunas pruebas
LEA, EBE y EBT (espumado de una porción de los agregados)	LEACO, FAIRCO y EIFFAGE	Entre el 0.2% y 0.5% en peso del ligante modificado con un agente mejorador de adherencia y cohesión	Inferior a 100°C	Francia, España, Italia y Estados Unidos.	Más de 100,000 toneladas
LEAB (el asfalto espumado se obtiene de la mezcla con un ligante aditivado)	BAM	El 0.1% en peso del ligante para estabilizar el espumado, mejorar el recubrimiento y promover adherencia.	Inferior a 90°C	Países bajos	Siete proyectos comerciales
LT Asphalt (Asfalto espumado con la adición de un llenante higroscópico para mantener la trabajabilidad)	Nynas	Entre el 0.5% y 1.0% de un llenante higroscópico	a 90°C	Países bajos e Italia	Desconocido

WAM - Foam	Kolo Veidekke, Shell Bitumen (derechos de patente a nivel mundial, excepto Estados Unidos).	No es necesario	Entre 110°C y 120°C	Francia, Noruega, Canadá, Italia, Luxemburgo, Países bajos, Suiza, Suecia y Reino Unido	Más de 60,000 toneladas
------------	---	-----------------	---------------------	---	-------------------------

Fuente: Mezcla Asfáltica Tibia - Celis Amado & Serrano Flórez, 2008

b. Tecnologías que emplean aditivos orgánicos.

Los aditivos orgánicos son típicamente ceras con tamaños moleculares mayores que C45 y los puntos de fusión mayor que 70°C. A mayor longitud de cadena de carbono, mayor será el punto de fusión. Los ejemplos incluyen cera Fischer-Tropsch (Sasobit®), cera montana, amidas de ácidos grasos (Licomont BS 100), y mezclas de cera montana y de amidas de ácidos grasos (Asphaltan-B).

- Sasobit® (Cera Fischer-Tropsch)
- Amida de ácidos grasos

Tabla N° 2. 11. Clasificación de las tecnologías WMA de acuerdo al empleo de aditivos orgánicos

TECNOLOGÍAS WMA	COMPAÑÍA QUE PRODUCE	PORCENTAJE DE ADITIVACIÓN	TEMPERATURA DE PRODUCCIÓN EN PLANTA (°C)	PAÍSES QUE HAN APLICADO ESTA TECNOLOGÍA	PRODUCCIÓN APROXIMADA A LA FECHA
Sasobit (Fischer - Tropsch wax)	Sasol	En alemania, se añadió un promedio de 2.5% en peso del ligante. Una dosis entre 1.0% y 1.5% se empleó en Estados Unidos.	Variable de 20°C a 30°C por debajo de la temperatura de elaboración de las mezclas asfálticas en caliente. Alemania recomienda temperaturas de elaboración entre 130°C a 170°C, dependiendo de la rigidez del cemento asfáltico.	Alemania y otros 20 países en todo el mundo.	Más de 10 millones de toneladas en todo el mundo.
Asphaltan-B (cera)	Romonta	En Alemania, se añadió un promedio de 2.5% en peso del ligante.	Variable de 20°C a 30°C por debajo de la temperatura de elaboración de las mezclas asfálticas en caliente.	Alemania	Desconocido

			Alemania recomienda temperaturas de elaboración entre 130°C a 170°C, dependiendo de la rigidez del cemento asfáltico.		
Licomont Bs-100 (aditivo) o Subit (amida de ácidos grasos)	Clariant	Aproximadamente de 3.0% en peso del ligante	Variable de 20°C a 30°C por debajo de la temperatura de elaboración de las mezclas asfálticas en caliente.	Alemania	Más de 322,500 metros cuadrados desde 1994
3E LT o Ecoflex	Colas	Cantidad desconocida	Variable de 30°C a 40°C por debajo de la temperatura de elaboración de las mezclas asfálticas en caliente.	Francia	Desconocido

Fuente: Mezcla Asfáltica Tibia - Celis Amado & Serrano Flórez, 2008

c. Tecnologías emergentes en Estados Unidos

- Evotherm™
- Double-Barrel Green ®

2.3.5.3 Ventajas, desventajas y limitaciones

A continuación, se describen algunos de los beneficios que presentan las mezclas asfálticas tibias:

Consumo de energía. La reducción del consumo de energía es el beneficio más obvio de las mezclas tibias, uno de los dos principales beneficios de ésta. Los estudios han demostrado que la reducción del consumo de energía de alrededor de 30% se puede lograr mediante la reducción de las temperaturas de producción en la planta de asfalto. La reducción en el consumo de energía reduce a su vez el costo de la producción de la mezcla, pero puede haber también un ahorro añadido por reducción en los costos involucrados en el uso del proceso de mezcla tibia, es decir, para los aditivos y/o equipos de modificación. Otro beneficio adicional de la reducción de las temperaturas de producción que a veces se menciona, es el menor desgaste de la planta de asfalto.

Emisiones. La producción de mezcla tibia reduce significativamente las emisiones de gas carbónico y los olores, en comparación con la producción de mezclas en caliente. Cabe recordar que las emisiones de producción de mezcla-asfalto y la colocación pueden, en ciertos niveles elevados, ser perjudiciales para la salud.

Figura N° 2. 20. Prueba de comparación de MAC y MAT

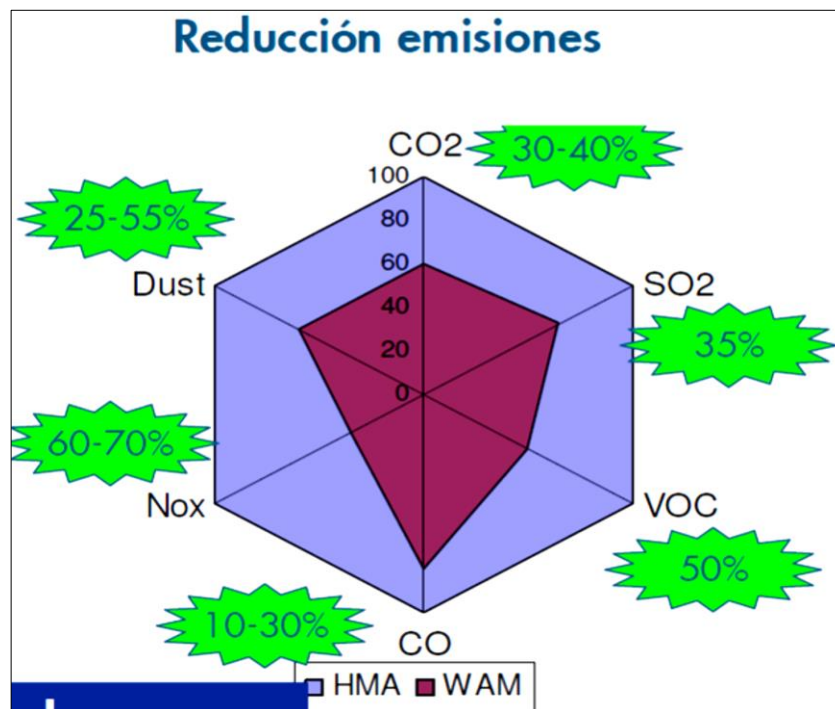


Fuente: Mezclas Asfálticas Tibias (MAT) – Ulloa Calderón, A.

Es importante resaltar que las emisiones de producción de mezcla -asfalto y la colocación pueden en ciertos niveles elevados ser perjudiciales para la salud. En 2000, el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de EE.UU. publicó un estudio de riesgo sobre los efectos en la Salud Ocupacional de la exposición a la mezcla- asfalto. En esta revisión, el NIOSH evaluó los efectos potenciales para la salud de la exposición ocupacional a asfalto. En 1977, el NIOSH determinó que entre los efectos adversos para la salud por la exposición se encuentran la irritación de las membranas de la conjuntiva y el tracto respiratorio, (Ortega Cuan & Paternina Medina, 2012).

A continuación, se puede observar considerablemente las reducciones de las emisiones producidas en planta de una mezcla asfáltica tibia. Ver Figura 2.21.

Figura N° 2. 21. Reducción de emisiones en la producción de mezcla en planta



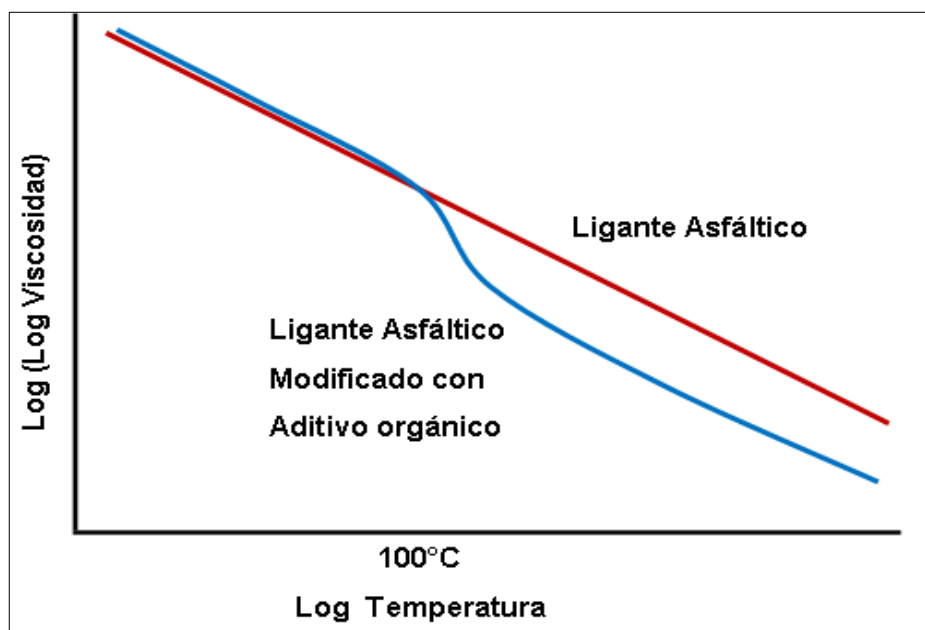
Fuente: XXXV Reunión del asfalto, Rosario – Argentina 2008.

En la figura 2.21 se puede notar que las mezclas asfálticas tibias (WMA) presentan unas reducciones importantes con respecto a las mezclas asfálticas en caliente (HMA) en cuanto a las emisiones que se generan en Medellín, así por ejemplo, con las mezclas WMA se pueden lograr reducciones entre el 25% y 55% en las partículas de polvo, entre 30% y 40% en las emisiones de gas carbónico, entre 60% y 70% en las de óxido de nitrógeno, 50% en compuestos orgánicos volátiles y 35% en las emisiones de dióxido de azufre, en este punto es importante resaltar que la disminución de las emisiones se da tanto en la fabricación como en la aplicación de las mezclas

Viscosidad. La funcionalidad de las tecnologías de WMA se basa en la reducción de la viscosidad del asfalto. La viscosidad reducida permite al agregado ser totalmente cubierto a una temperatura inferior a lo que tradicionalmente se requiere en las mezclas de producción en caliente.

Debido a la viscosidad reducida, los procesos de mezcla tibia pueden funcionar como una ayuda en la compactación y algunos beneficios relacionados con éste son mencionados a menudo en relación con este tipo de mezclas.

Figura N° 2. 22. Reducción de la viscosidad utilizando aditivos orgánicos



Fuente: Mezclas Asfálticas Tibias (MAT) – Ulloa Calderón, A.

Técnicos. Producción, colocación y compactación a temperaturas más frías, lo cual genera un control de densidades más eficaz. Aumento en las distancias de transporte, dado que por la menor temperatura de producción hay una mayor conservación de la energía de compactación de los equipos, por tanto se requiere menos esfuerzo para obtener las densidades requeridas, en otras palabras, los menores requerimientos de temperatura para la compactación de la mezcla, agilizan el trabajo aumentando las distancias de cobertura de la mezcla asfáltica lo que se traduce en una disminución de los costos.

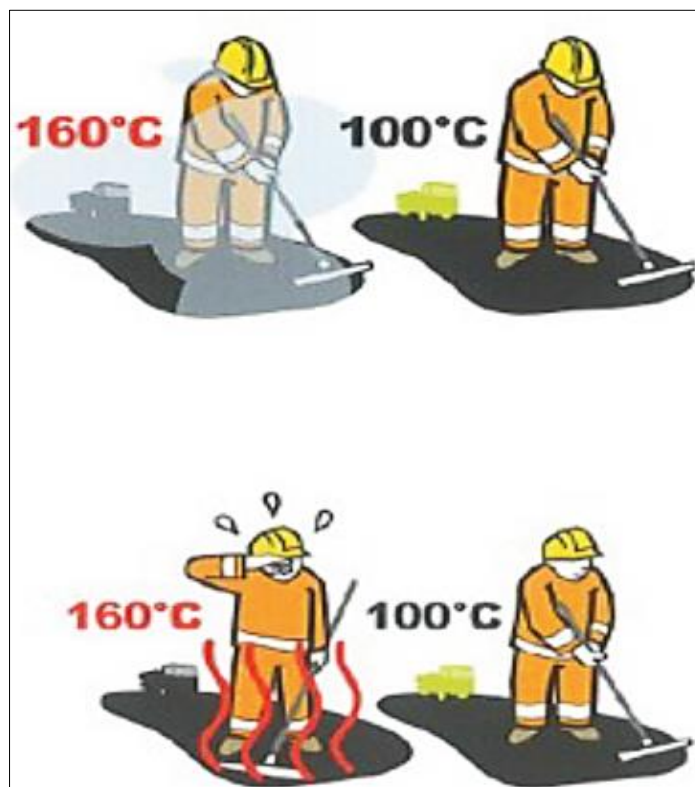
Se puede incorporar además un mayor porcentaje de RAP (recycling asphalt pavement) debido a las bajas temperaturas. Se puede lograr también una apertura al tráfico en menor tiempo comparado con las mezclas en caliente y obtener una menor oxidación en el asfalto por los gradientes de temperatura.

Entre otros beneficios potenciales de las WMA, es posible citar:

- Las temperaturas de producción y colocación significativamente menores.

- El envejecimiento del ligante es menor durante las operaciones de mezcla y colocación, lo que mejora la longevidad de pavimento durante su vida útil.
- La segregación térmica es reducida, así como también el consumo de combustible empleado, esto conlleva a un menor consumo de energía.
- Disminución de las emisiones y olores en la planta durante las etapas de mezclado y colocación.
- Disminución de la producción de polvo debido a las temperaturas más bajas y menor tiempo de calentamiento.
- Los plazos para la colocación y compactación de la mezcla pueden ser más largos (es decir, la mezcla tiene mayor trabajabilidad en un tiempo más prolongado).
- Permite mayores distancias de acarreo de la mezcla (debido a la menor diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de la mezcla).
- Facilita la compactación, lo cual es beneficioso para las mezclas rígidas tales como el RAP (recycling asphalt pavement).
- Construcción más rápida de secciones de pavimento (por ejemplo, intersecciones, que deben abrirse lo antes posible; se requiere menos tiempo para enfriar la mezcla, para colocar la siguiente capa).
- Mejora de las condiciones de trabajo de la planta y el equipo de pavimentación.
- Menor velocidad de enfriamiento desde la temperatura máxima hasta lograr la temperatura de compactación.
- Apertura más rápida de tráfico para algunos productos WMA (un factor particularmente importante para los algunos aeropuertos).
- Las tecnologías de WMA, en general, disminuyen el calor de la mezcla y las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), sin duda, esto implicará mejorar la seguridad y las condiciones laborales de los trabajadores de producción y equipos de pavimentación.

Figura N° 2. 23. Reducción de las temperaturas de colocación y compactación



Fuente: Mezclas Asfálticas Tibias – Ulloa Calderón, A.

2.3.5.4 Consumo de Combustible en Función a la Temperatura²²

Gracias a un estudio realizado, se pudo conocer el consumo de combustible de una planta de mezcla asfáltica en caliente en función de la temperatura de los agregados.

Tabla N° 2. 12. Consumo de Combustible en Función a la Temperatura

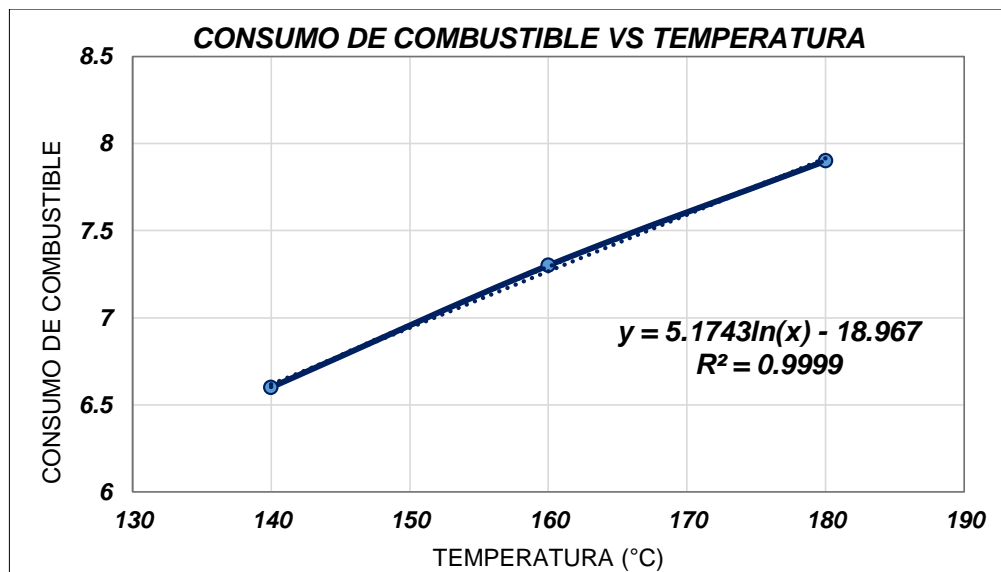
TEMPERATURA DE LOS ÁRIDOS (°C)	CONSUMO DE COMBUSTIBLE (KG FUEL/T AGLOMERADO)
140	6.6
160	7.3
180	7.9

Fuente: Mezcla Asfáltica Tibias – Celis Amado, L. M. – Serrano Flórez, C. G.

Se puede concluir que a menor temperatura el combustible que debe ser empleado es menor. Realizando una regresión logarítmica, con el fin de extrapolar los datos y con ello poder encontrar el consumo de combustible aproximado para una temperatura de 100°C.

²² Mezcla Asfáltica Tibias – Celis Amado, L. M. – Serrano Flórez, C. G.

Figura N° 2. 24. Consumo de Combustible vs Temperatura



Fuente: M Mezcla Asfáltica Tibias – Celis Amado, L. M. – Serrano Flórez, C. G.

Reemplazando:

$$Y = 5.1743 * \ln(100^{\circ}\text{C}) - 18,967$$

$$Y = 4.86 \text{ (Kg Fuel / T Aglomerado) Consumo de combustible para } 100^{\circ}\text{C}$$

Tabla N° 2. 13. Consumo de Combustible para una Temperatura de 100°C

TEMPERATURA DE LOS ÁRIDOS (°C)	CONSUMO DE COMBUSTIBLE (KG FUEL/T AGLOMERADO)
100	4.86

Fuente: Mezcla Asfáltica Tibias – Celis Amado, L. M. – Serrano Flórez, C. G.

Por lo tanto, para la elaboración de una mezcla asfáltica tibia, a 100°C, el ahorro de combustible (38%) se hace significativo en comparación con el consumo de combustible para las mezclas asfálticas en caliente.

2.3.5.5 Resultados del consumo de combustible en la planta de asfalto²³

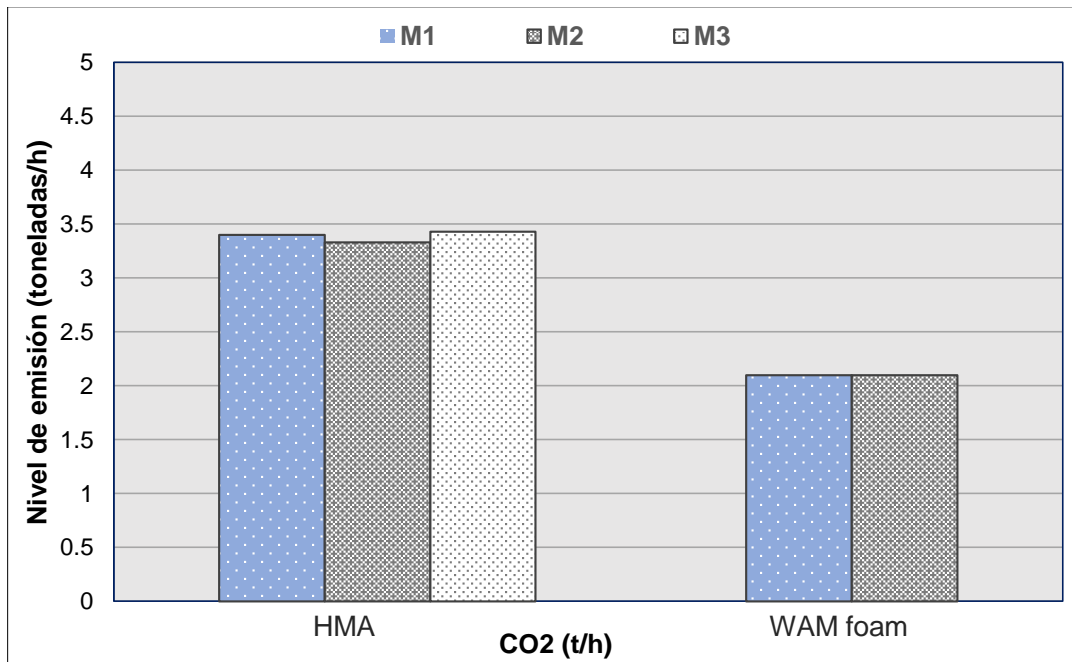
El consumo de combustible (gas) se midió a diferentes niveles de capacidad de producción de la planta en el intervalo de 60-100%. Los resultados mostraron una reducción en el consumo de combustible de un 35%.

Los resultados de emisiones de gas y polvo por la chimenea durante la producción de mezcla asfáltica para el trabajo de pavimentación en la autopista Florencia – Pisa - Livorno en Italia, fueron medidos por Det Norske Veritas AS

²³ Diseño y Producción de Mezclas Asfálticas Tibias, A Partir de la Mezcla de Asfalto y Aceite Crudo de Palma (Elaeis Guineensis) – Lopera Palacio, C. H.

varios contaminantes del aire (CO₂, CO, NO_x, SO₂, TOC y polvo) emitidos por la chimenea de la planta mezcladora.

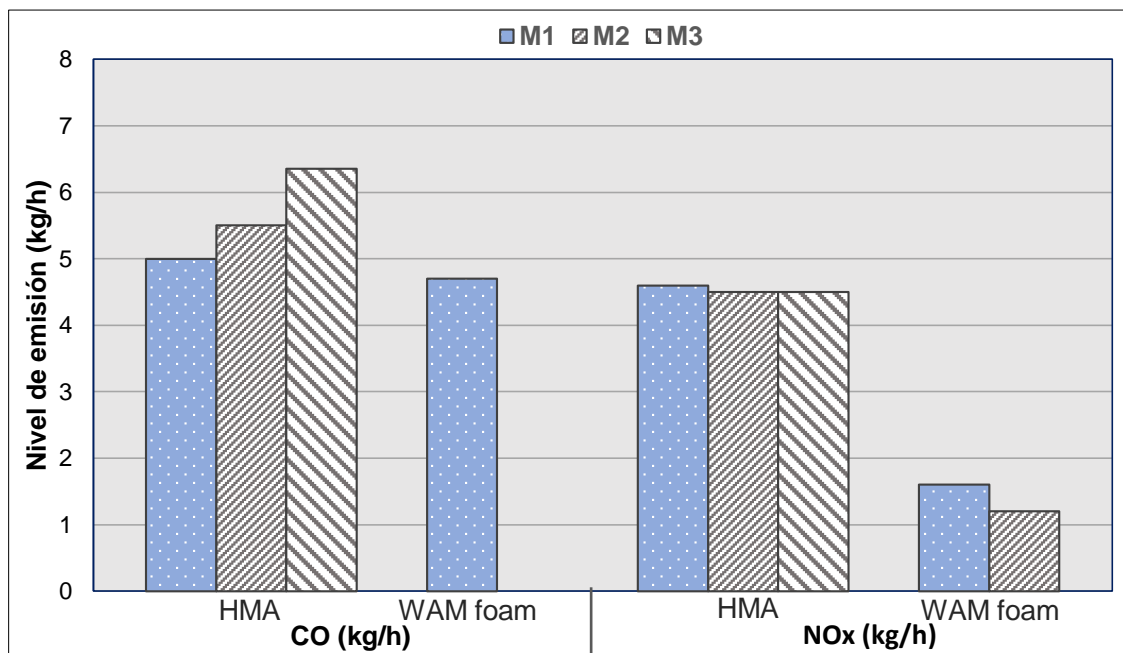
Figura N° 2. 25. Niveles de emisión de CO₂ medida en la planta



Fuente: *Diseño y Producción de Mezclas Asfálticas Tibias, A Partir de la Mezcla de Asfalto y Aceite Crudo de Palma (Elaeis Guineensis) – Lopera Palacio, C. H.*

Se muestra la emisión de CO₂ en toneladas por hora y la reducción de las emisiones alcanzada es aproximadamente de un 35%.

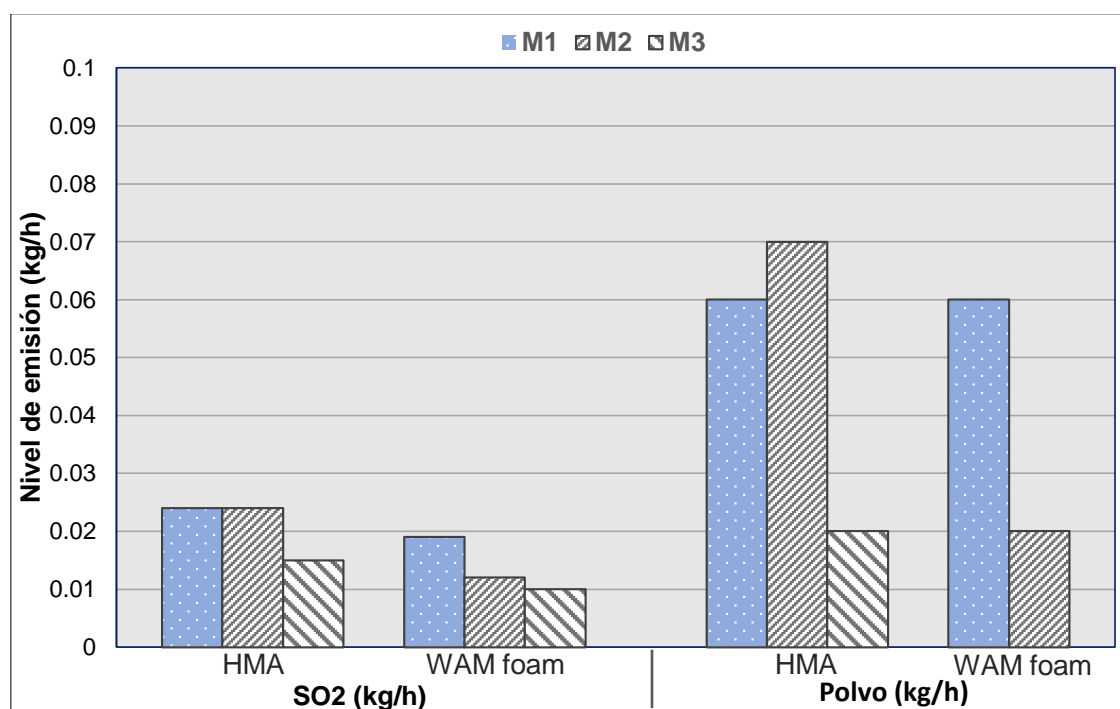
Figura N° 2. 26. Niveles de emisión de CO y NO_x medida en la planta



Fuente: *Diseño y Producción de Mezclas Asfálticas Tibias – Lopera Palacio, C. H.*

Las reducciones de CO alcanzadas fueron aproximadamente de un 8% y la reducción de NOx fue aproximadamente de un 60%.

Figura N° 2. 27. Niveles de emisión de SO2 y polvo medida en planta



Fuente: Diseño y Producción de Mezclas Asfálticas Tibias – Lopera Palacio, C. H.

Los niveles de emisión de SO2 y polvo son bajos, pero pueden obtenerse todavía reducciones del orden del 25 al 30%.

En las Figuras N° 2.25, 2.26 y 2.27 se presentan los resultados obtenidos para un ritmo de producción de 140 toneladas de mezcla por hora. La disminución de las temperaturas de operación desde 180°C en la producción de mezcla caliente a aproximadamente 125-130°C en la producción de mezcla de asfalto templada produjo una reducción considerable en la cantidad de emisiones de gas y polvo.

2.4 Diseño de Mezclas Asfálticas Mediante el Método Marshall²⁴

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentos fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del departamento de autopistas del estado de Mississippi. Este método es aplicable solo a mezclas

²⁴ Pavimento Flexibles – UNI – Huamán Guerrero, N.

asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. A continuación, se presenta una descripción general de los procedimientos seguidos en el Diseño Marshall de Mezclas. El procedimiento completo y detallado que se debe ser seguido se encuentra en la norma AASHTO T 245 (o ASTM D1559)

2.4.1 Preparación para Efectuar los Procedimientos Marshall

Existen diferentes agregados y asfaltos que presentan diferentes características. Estas características tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma del pavimento. El primer paso en el método de diseño, entonces, es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc.) que debe tener la mezcla de pavimentación y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

2.4.1.1 Selección de las Muestras de Material

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que va a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas al asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple: los datos extraídos de los procedimientos de diseño de mezclas determinar la fórmula o "receta" para la mezcla de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en el laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final.

2.4.1.2 Preparación del Agregado

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico, y efectuar un análisis granulométrico.

- **Secando el Agregado:** El Método Marshall requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, tan práctico como sea posible. Esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos. Una muestra de cada agregado a ser ensayado se coloca en una bandeja, por separado, y se calienta en un horno a una temperatura de 110° C. Hasta que el peso de la muestra permanezca constante.
- **Análisis granulométrico:** El análisis granulométrico es un procedimiento para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado. Esta información es importante porque las especificaciones de la mezcla deben estipular las proporciones necesarias de partículas de agregado de tamaño diferente, para producir una mezcla en caliente final con las características deseadas.
- **Determinación del Peso Específico:** El peso específico de una sustancia es la proporción peso - volumen de una unidad de esa sustancia comparada con la proporción peso - volumen de una unidad igual de agua. El peso específico de una muestra de agregado es determinado al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura. El peso específico del agregado se expresa en múltiplos del peso específico del agua (la cual siempre tiene un valor de 1).

2.4.1.3 Preparación de las Muestras (Probetas) de Ensayo

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto, las probetas son preparadas para un peso de 1200 gr. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- a. El asfalto y el agregado se calientan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- b. El porcentaje de asfalto se determina haciendo tres muestras de cada proporción de asfalto, las proporciones de asfalto deben de aumentar en 0.5% de cada porcentaje diferente. Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
- c. Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

2.4.1.4 Procedimiento de Ensayo Marshall

Existen tres procedimientos de ensayo en el método del ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

a. Determinación del Peso Específico Total

El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos. El peso específico total se determina usando el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 166. 73

b. Ensayo de Estabilidad y Fluencia

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga que ocurre en la mezcla.

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- Las probetas son calentadas en el baño de agua a 60° C (140° F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar (Baño María).
- La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste de un dispositivo que aplica a una carga sobre la probeta y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
- La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.
- La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

i. Valor de Estabilidad Marshall

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación existe una tendencia a pensar que, si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

ii. Valor de Fluencia Marshall

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

c. Análisis de Densidad y Vacíos

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de Probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

- **Análisis de Vacíos:** Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del asfalto y el agregado de la mezcla, con un margen apropiado para tener en cuenta la cantidad de asfalto absorbido por el agregado, o directamente mediante un ensayo normalizado (AASHTO T 2091) efectuado sobre la muestra de mezcla sin compactar. El peso específico total de las probetas compactadas se determina pesando las probetas en aire y en agua.
- **Análisis de Peso Unitarios:** El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 Kg/m³ (62.4 lb/ft³).
- **Análisis de VMA:** Los Vacíos en el Agregado Mineral (VMA) está definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla. El VMA es calculado con base en el peso específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Por lo tanto, el VMA puede ser calculado al restar el

volumen de agregado (determinado mediante el peso específico total del agregado) del volumen total de la mezcla compactada.

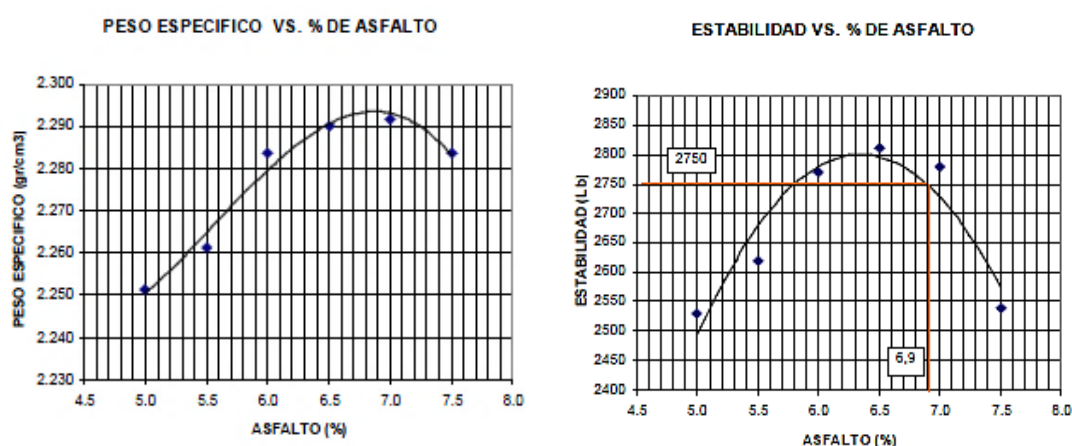
- **Análisis de VFA:** Los Vacíos Llenos de Asfalto, VFA, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire de VMA, y luego dividiendo por el VMA, y expresando el valor final como un porcentaje.

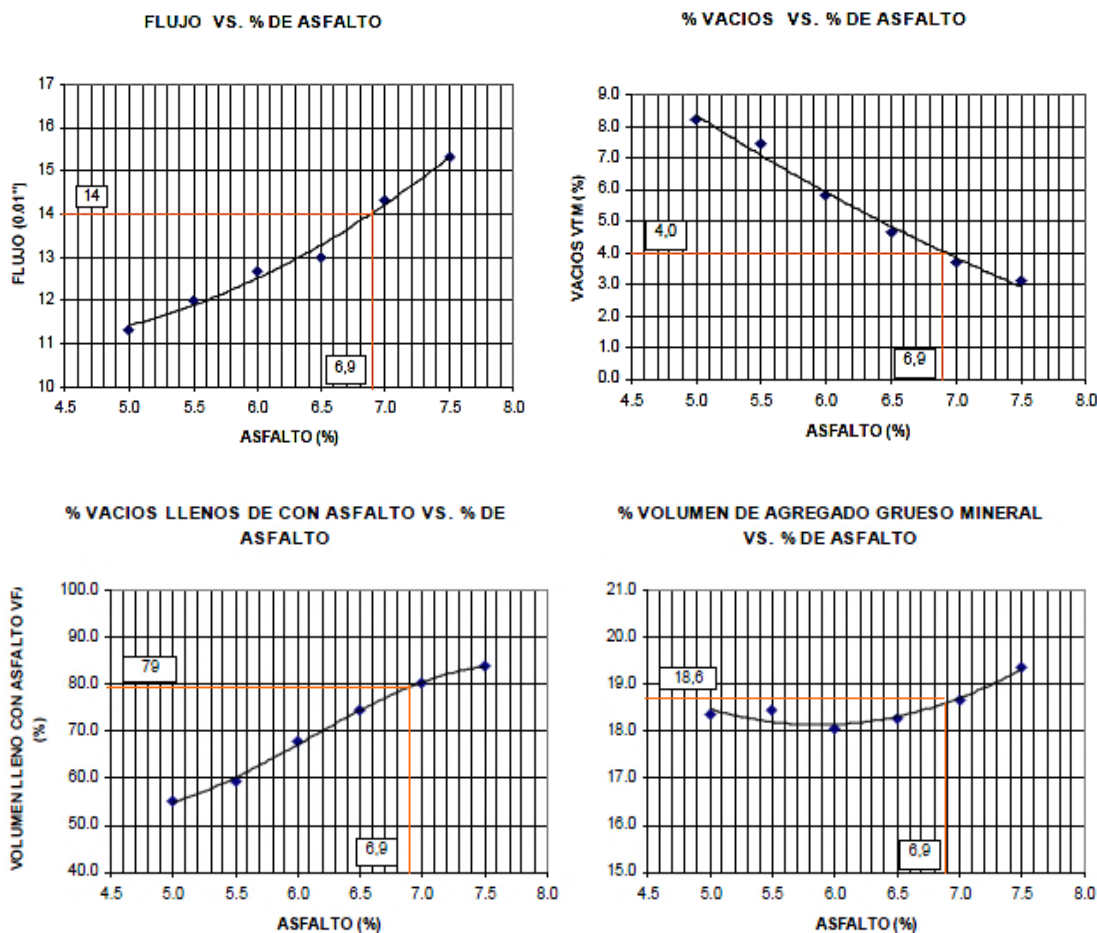
d. Análisis de los Resultados del Ensayo Marshall

Los técnicos del laboratorio trazan los resultados del ensayo Marshall en gráficos. Para poder entender las características particulares de cada probeta usada en la serie.

Mediante el estudio de las gráficas ellos pueden determinar cuál probeta. De la serie cumple mejor los criterios establecidos para el pavimento terminado. Las proporciones de asfalto y agregado en esta probeta se convierten en las proporciones usadas en la mezcla final. Los resultados de los ensayos se trazan en gráficos, están son tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de la mezcla.

Figura N° 2. 28. Resultados Típicos de diseño de mezcla asfáltica ensayada en la prensa Marshall





Fuente: Diseño Moderno de Pavimento Asfáltico - Minaya Gonzáles & Ordóñez Huamán

2.5 Ensayos de Mezclas Asfálticas

- **MTC E 504:** Resistencia de Mezclas Bituminosas Empleando el Aparato Marshall
- **MTC E 505:** Porcentaje de Vacíos de Aire en Mezclas Asfálticas Compactadas Densas y Abiertas
- **MTC E 508:** Peso Específico Teórico Máximo de Mezclas Asfálticas Para Pavimentos
- **MTC E 513:** Resistencia a Compresión Simple de Mezclas Asfálticas
- **MTC E 514:** Peso Específico Aparente y Peso Unitario de Mezclas Asfálticas Compactadas Empleando Especímenes Saturados con Superficie Seca

2.6 Metodología Normativa de Mezcla Asfáltica

2.6.1 Requisitos para Mezcla de Concreto Bituminoso²⁵

Las características de calidad de la mezcla asfáltica, deberán estar de acuerdo con las exigencias para mezclas de concreto bituminoso que se indican en la Tablas N° 2.14 y Tablas N° 2.15.

Tabla N° 2. 14. Requisitos Para Mezcla de Concreto Bituminoso

Parámetros de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo)	8.15 KN	5.44 KN	4.53 KN
3. Flujo 0.01" (0.25 mm)	8-14	8-16	8-20
4. Porcentaje de vacíos con aire (1) (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5
5. Vacíos en el agregado mineral	Ver Tabla 423 -10		
Inmersión - Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín.	2.1	2.1	1.4
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	75
Relación Polvo - Asfalto (2)	0.6 - 1.3	0.6 - 1.3	0.6 - 1.3
Relación Estabilidad/flujo (kg/cm) (3)	1,700 - 4,000		
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	80 Mín.		

Fuente: EG - 2013

(1) A la fecha se tienen tramos efectuados en el Perú que tienen el rango 2% a 4% (es deseable que tienda al menor 2%) con resultados satisfactorios en climas fríos por encima de 3.000 m.s.n.m. que se recomienda en estos casos.

(2) Relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0,075 mm y el contenido de asfalto efectivo, en porcentaje en peso del total de la mezcla.

(3) Para zonas de clima frío es deseable que la relación Est. /flujo sea de la menor magnitud posible.

(4) El Índice de Compactabilidad mínimo será 5.

El Índice de Compactabilidad se define como: $\frac{1}{GEB\ 50 - GEB5}$ Siendo GEB50 y GEB5, las gravedades específicas bulk de las briquetas a 50 y 5 golpes.

²⁵ Manual de Carreteras – Especificaciones Técnica Generales Para Construcción - EG 2013

Tabla N° 2. 15. Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)

Tamiz	Vacíos mínimos en agregado mineral %	
	Marshall	Superpave
2.36 mm (N° 8)	21	-
4.75 mm (N° 4)	18	-
9.50 mm (3/8")	16	15
12.5 mm (1/2")	15	14
19.0 mm (3/4")	14	13
25.0 mm (1")	13	12
37.5 mm (1 1/2")	12	11
50.0 mm (2")	11.5	10.5

Fuente: EG - 2013

Nota: Los valores de esta tabla serán seleccionados de acuerdo al tamaño máximo de las mezclas. Las tolerancias serán definidas puntualmente en función de las propiedades de los agregados.

2.6.2 Recomendaciones para Mezclas Asfálticas

2.6.2.1 Recomendaciones para mezclas asfálticas en climas fríos con altitud mayor de 3.000 msnm y cambios muy marcados entre las máximas y mínimas temperaturas

Para casos de pavimentos bituminosos ubicados en zonas con altitud mayor de 3.000 m.s.n.m. en que generalmente existen climas severos con alta pluviosidad y gradientes térmicas diarias altas, situación climática muy frecuente en el país, es preciso tener en cuenta entre otras las siguientes recomendaciones:

- Se deberá proporcionar una mezcla rica en cemento asfáltico, que debe ser superior a 6%, sin embargo, ello dependerá de las condiciones propias de obra y la calidad de los agregados.
- El diseño de la mezcla deberá ser indicado en el Proyecto.
- Se recomienda el uso de cal hidratada, como material aglomerante, espesante de mezcla y de adhesividad y estabilidad.
- En caso de requerirse aditivos mejoradores de adhesividad del par agregado-bitumen, será indicado en el Proyecto y este deberá cumplir la especificación correspondiente.
- Se usarán camiones térmicos.

- Se usará un equipo de transferencia de material para verter la mezcla asfáltica a la pavimentadora, evitando que el volquete vacíe directamente a ella, con la finalidad de evitar la segregación y uniformizar la temperatura.

2.6.2.2 Recomendaciones para el Diseño de Mezcla Asfáltica en Climas Fríos y en Altura²⁶

Para el diseño de mezclas asfálticas en caliente en zonas de clima frío y en altura (mayor a 3,000 msnm), se tendrá en cuenta las condiciones desfavorables que deben soportar.

Para el diseño se dará un especial énfasis a la calidad que deben reunir los agregados desde el punto de vista de su gradación, limpieza, forma, dureza, textura, etc.; y el cemento asfáltico especialmente en lo que se refiere a su consistencia, durabilidad, susceptibilidad térmica, etc. Además de la calidad de los materiales a emplear, se recomienda lo siguiente:

- Trabajar con granulometrías continuas, bien graduadas, tratando de lograr vacíos del agregado mineral (V.M.A) superiores al 15%.
- La condición anterior debe permitir incrementar el porcentaje de asfalto a incorporar en la mezcla, tendiendo en lo posible, el límite superior del porcentaje de vacíos llenos con asfalto, recomendados para la mezcla compactada; o sea próximo al 85% y manteniendo, además, las respectivas características físico – mecánicas exigidas para la carpeta o para la base asfáltica.
- Los vacíos residuales de la mezcla compactada deben tender al valor mínimo especificado, dado que ello contribuye a disminuir la posible alteración del asfalto por oxidación, y a preservar a las mezclas de la acción del agua (agravada por la acción del tránsito) y de los ciclos de variación térmica frío – calor – frío.
- El mayor espesor de la película bituminosa que recubrirá a los agregados por el mayor porcentaje de asfalto junto con el empleo de un ligante de consistencia y susceptibilidad térmica adecuada, incrementará la durabilidad del pavimento.

²⁶ Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – p.115

- La incorporación de porcentajes máximos de arena de trituración permite el logro de carpetas de rodadura con buena resistencia al deslizamiento y conveniente estabilidad; no obstante, debe realizarse un correcto balance de este valor máximo de arena a efectos de no afectar la trabajabilidad de la mezcla ni su compactabilidad, así como tampoco la flexibilidad de la carpeta por un aumento inconveniente del módulo de rigidez.
- El uso como filler de cal hidratada, en condiciones acordes con su “concentración crítica” a la vez que contribuye a la disminución de los vacíos de la mezcla, mejora la adherencia entre los agregados y el asfalto y mejora la resistencia del asfalto al envejecimiento.

CAPÍTULO III

Materiales y Métodos

3.1 Ensayo de Control de Calidad de Agregados

Los agregados empleados en el diseño de mezclas asfálticas investigadas, deben cumplir con todo lo requisitos que la norma EG - 2013 lo indica, tal que garanticen un buen comportamiento de pavimento durante su periodo de diseño.

3.1.1 Agregado Mineral Grueso

Los agregados gruesos que son utilizados en el diseño de mezclas asfálticas, son provenientes de la cantera Cabanillas, provincia de San Román del departamento de Puno; acopiados, zarandeados y chancados en el mismo lugar. El agregado grueso proviene de la trituración de rocas de origen aluvial, material rodado conformado por granitos, lícitas andesitas basálticas y otros minerales en menores proporciones, luego del chancado se procede para obtener el uso Granulométrico que mejor se ajuste a lo que establece la norma EG-2013, para altitudes >3000 msnm., deberá presentar uno o más caras planas provenientes de la fractura. Además, el mismo deberá ser limpio, compacto durable y estar libre de arcillas e impurezas orgánicas adheridas. Su forma deberá tender a ser cubica y de elongación. Así mismo deberá poseer suficiente resistencia al desgaste por fricción mecánica y resistencia a la desintegración por durabilidad química. Por ultimo será necesario que el agregado presente una textura superficial con micro rugosidades para favorecer su adherencia al asfalto y colaborar aportando fricción interna en la mezcla, condiciones que cumple el agregado a ser utilizado.

En el diseño teórico, la piedra chancada de diámetro 1/2" que es el máximo nominal, que ingresa con un 30% del total de agregado. Por ende, el agregado usado en la mezcla asfáltica es la que retiene en diferentes tamices inferiores a 1/2".

3.1.2 Agregado Mineral Fino

El agregado fino a ser utilizado en el diseño de mezcla asfáltica proviene de la misma cantera que el agregado grueso, que procedente de una fuente aluvial, resultando un material producto conformado por arenas naturales zarandeados y lavados. Se realizaron todos los ensayos de control que la norma EG-2013 lo establece.

En el diseño teórico es la arena chancada y arena zarandeada de diámetro 1/4" y 3/8" respectivamente, que es el máximo nominal de cada uno, que ingresa con un 35% de arena chancada y 32 % de arena zarandeada del total de agregado.

3.1.3 Relleno Mineral Filler - Cal Hidratada

El filler o relleno de origen mineral que es cal hidratada procedente de distrito da Cabanillas. Este filler es necesario emplear como relleno de vacíos, espesante del asfalto o como mejorador de adherencia al par agregado-asfalto, debe ser en lo posible no plástica que deberá cumplir la norma AASHTO M-303.

3.1.4 Relleno Mineral Filler - Zeolita Natural

El filler de origen mineral que es la zeolita natural procedente de la cantera de la comunidad Paxa del distrito de Tiquillaca, provincia de Puno y departamento de Puno. Este mineral aparte de rellenar los vacíos en la mezcla, es la que contrarresta el problema más significativo de las mezclas asfálticas que generan gran cantidad de gases tóxicos entre los cuales encontramos el NO₂, SO₂ y CO₂; así mismo que generan emisiones contaminantes de los COV (Compuestos Orgánicos Volátiles) procedentes del asfalto debido a las altas temperaturas empleadas, lo cual produce un sobre calentamiento de la atmosfera.

Figura N° 3. 1. Cantera Zeolita Natural

Fuente: Fotografía Propia

3.1.5 Ensayo de Calidad de los Agregados

3.1.5.1 Muestreo Para Materiales de Construcción (MTC E 201).

El muestreo de materiales para los ensayos de calidad de agregados es importante, por lo tanto el operador deberá tener siempre la precaución de obtener muestras que denoten la naturaleza y condiciones del material al cual representan.

Primero se procede a echar el material proveniente de la cantera de Cabanillas, en el piso del laboratorio, seguidamente; se procede a expandir el material para que forme una ruma del agregado, luego se expande con una pala hasta darle una base circular de espesor uniforme.

Figura N° 3. 2. Acopio de la Cantera Cabanillas

Fuente: Fotografía Propia

Seguidamente usando la regla de madera procedemos a cuartear el material en cuatro partes iguales, para luego tomar las 2 partes opuestas de la muestra representativa y las otras dos partes que no fueron seleccionadas las desechamos.

Otra vez las dos partes seleccionadas como muestra representativa se mezcla, luego se forma una ruma igual que la anterior, para dividir en cuatro partes por el método del cuarteo, se eligen la muestra representativa de dicho material las dos partes diagonales seleccionadas y se desecha el resto. Se realiza este procedimiento hasta obtener el peso adecuado para realizar todo el ensayo necesario para la calidad de agregados.

Figura N° 3. 3. Selección de la Muestra Representativa



Fuente: Fotografía Propia

3.1.5.2 Análisis Granulométrico (MTC E 204)

El objetivo de la granulometría es obtener cuantitativamente los tamaños de las partículas de agregados gruesos, finos y filler de un material por medio de tamices de abertura cuadrada.

Se empleó piedra chancada, arena chancada, arena zarandeada, filler de cal hidratada y el mineral zeolita natural para el diseño de mezclas asfálticas convencionales y mezcla asfáltica tibia con adición de zeolita natural.

El ensayo inicia después de haber realizado el cuarteo, para luego secar al horno la muestra seleccionada a una temperatura de 110°C hasta obtener peso constante. Se procedió con el tamizado por un periodo suficiente de la forma que después de terminado no pase más del 1% de la cantidad en peso retenida en cada tamiz, durante un minuto de tamizado continuo a mano tómesese individualmente cada tamiz con su tapa y fondo que ajuste sin holgura.

El peso total después del tamizado debe ser verificado con el peso original de la muestra que se ensayó. Si la cantidad difiere en más del 0.3% basado en el peso de la muestra original seca, el resultado no debe ser aceptado.

En la siguiente tabla se muestra la distribución granulométrica de la piedra chancada de tamaño máximo de 1/2", arena chancada de tamaño máximo 1/4", arena zarandeada de tamaño máximo 3/8", filler cal hidratada y zeolita natural.

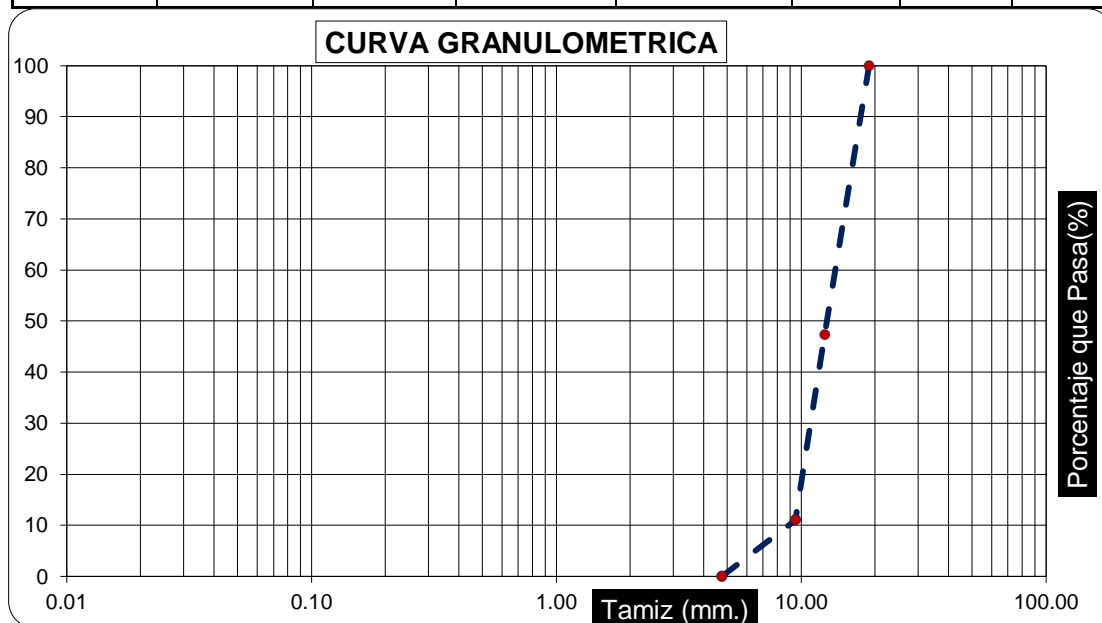
Figura N° 3. 4. Ensayo Granulométrico



Fuente: Fotografía Propia

Tabla N° 3. 1. Piedra Chancada de Tamaño Máximo de 1/2"

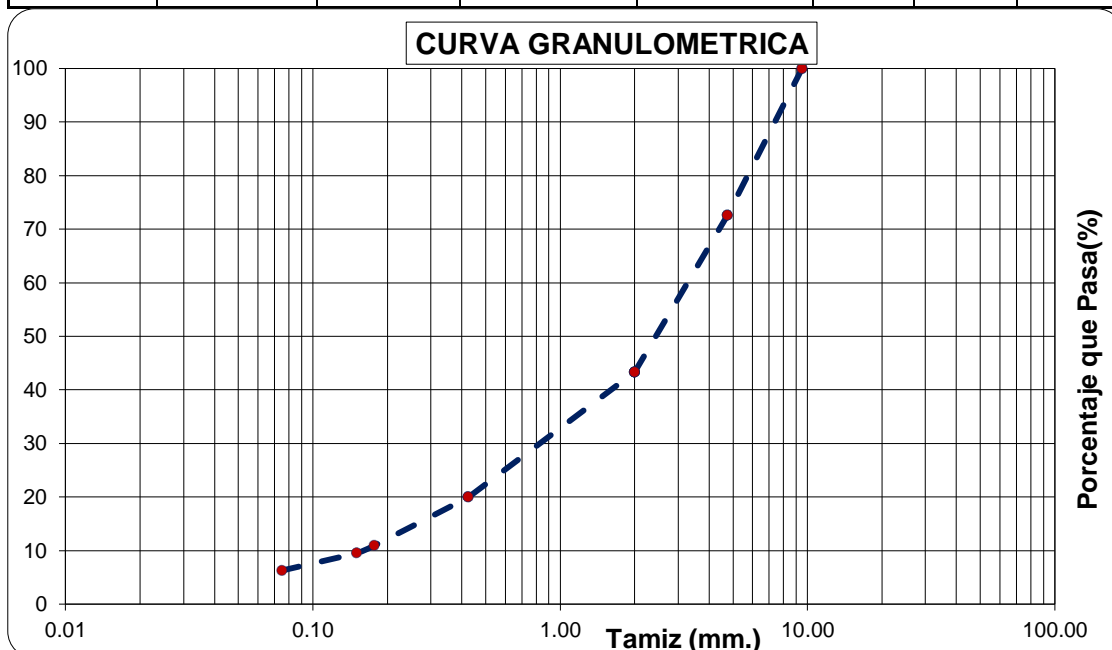
TAMIZ	AASHTO T-27	PESO	% RETENIDO	% RETENIDO	% QUE	Especificaciones	
Pulg.	m.m.	RETENIDO	PARCIAL	ACUMULADO	PASA	Inf.	Sup.
4"	101.600						
3"	76.200						
2 1/2"	60.350						
2"	50.800						
1 1/2"	38.100						
1"	25.400						
3/4"	19.000				100.00		
1/2"	12.500	1223.93	52.68	52.68	47.32		
3/8"	9.500	842.05	36.25	88.93	11.07		
1/4"	6.350						
N° 04	4.750	255.70	11.01	99.93	0.07		
N° 08	2.360						
N° 10	2.000	1.53	0.07	100.00	0.00		
N° 16	1.190						
N° 20	0.840						
N° 30	0.600						
N° 40	0.425						
N° 50	0.300						
N° 80	0.177						
N° 100	0.150						
N° 200	0.075						
Pasa 200	FONDO						



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 3. 2. Arena Chancada de Tamaño Máximo de 1/4"

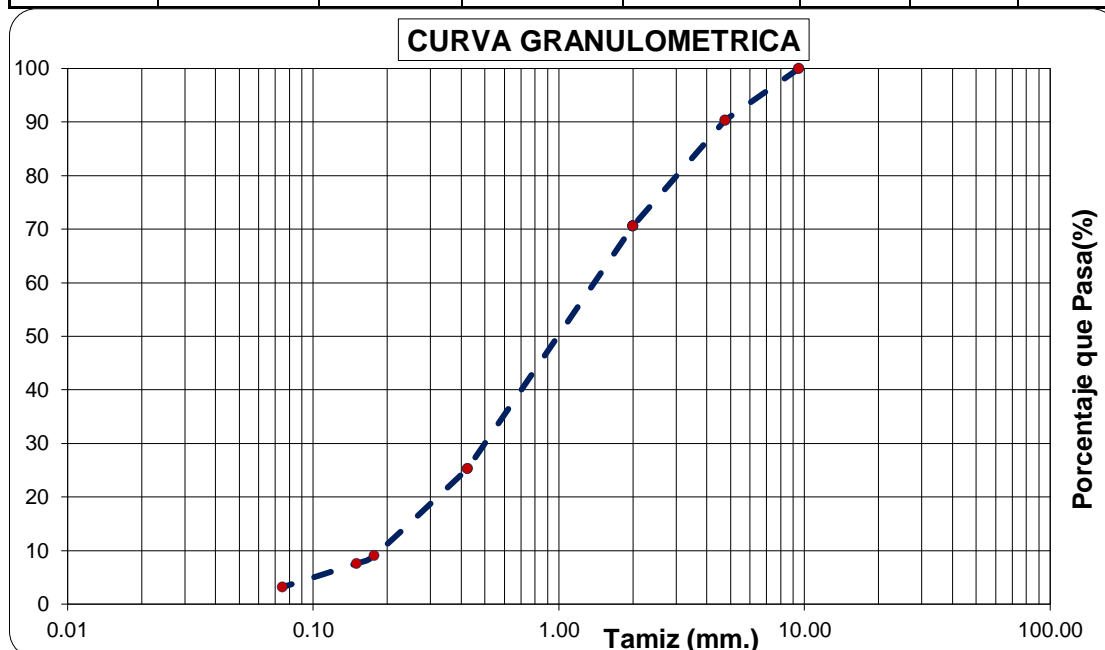
TAMIZ	AASHTO T-27	PESO	% RETENIDO	% RETENIDO	% QUE	Especificaciones	
Pulg.	m.m.	RETENIDO	PARCIAL	ACUMULADO	PASA	Inf.	Sup.
4"	101.600						
3"	76.200						
2 1/2"	60.350						
2"	50.800						
1 1/2"	38.100						
1"	25.400						
3/4"	19.000						
1/2"	12.500						
3/8"	9.500				100.00		
1/4"	6.350						
N° 04	4.750	489.40	27.36	27.36	72.64		
N° 08	2.360						
N° 10	2.000	523.90	29.29	56.64	43.36		
N° 16	1.190						
N° 20	0.840						
N° 30	0.600						
N° 40	0.425	418.18	23.38	80.02	19.98		
N° 50	0.300						
N° 80	0.177	161.30	9.02	89.04	10.96		
N° 100	0.150	24.75	1.38	90.42	9.58		
N° 200	0.075	58.30	3.26	93.68	6.32		
Pasa 200	FONDO	113.08	6.32	100.00	0.00		



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 3.3. Arena Zarandeada de Tamaño Máximo de 3/8"

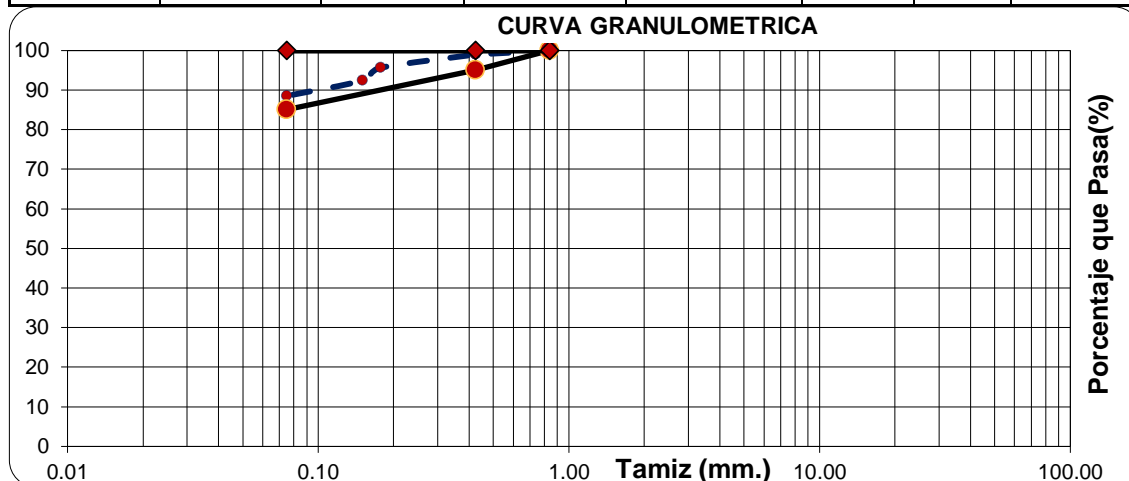
TAMIZ	AASHTO T-27 m.m.	PESO RETENIDO	% RETENIDO		% QUE PASA	Especificaciones	
			PARCIAL	ACUMULADO		Inf.	Sup.
4"	101.600						
3"	76.200						
2 1/2"	60.350						
2"	50.800						
1 1/2"	38.100						
1"	25.400						
3/4"	19.000						
1/2"	12.500						
3/8"	9.500				100.00		
1/4"	6.350						
N° 04	4.750	156.88	9.65	9.65	90.35		
N° 08	2.360	0.00					
N° 10	2.000	321.68	19.79	29.44	70.56		
N° 16	1.190						
N° 20	0.840						
N° 30	0.600						
N° 40	0.425	736.08	45.28	74.71	25.29		
N° 50	0.300						
N° 80	0.177	264.08	16.24	90.96	9.04		
N° 100	0.150	23.60	1.45	92.41	7.59		
N° 200	0.075	71.43	4.39	96.80	3.20		
Pasa 200	FONDO	52.00	3.20	100.00	0.00		



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 3. 4. Cal Hidratada

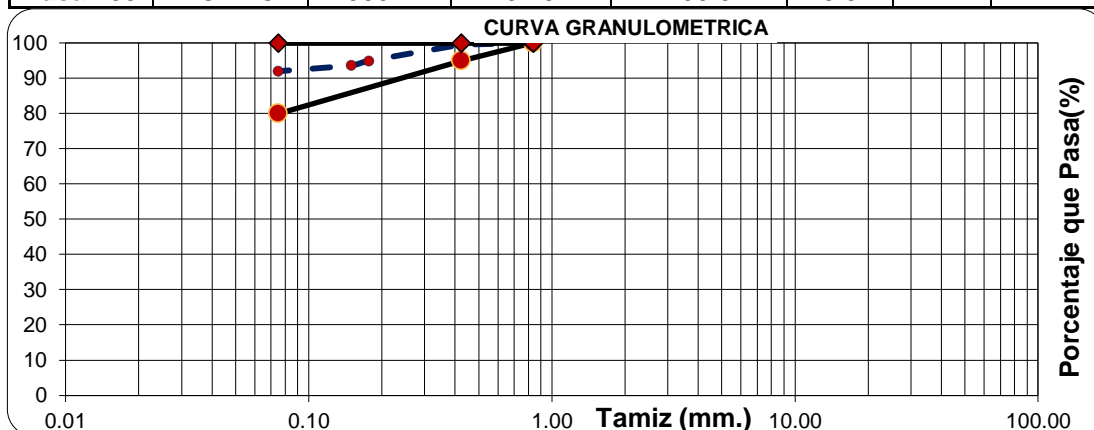
TAMIZ	AASHTO T-27	PESO	% RETENNIDO	% RETENIDO	% QUE	Especificaciones	
Pulg.	m.m.	RETENIDO	PARCIAL	ACUMULADO	PASA	Inf.	Sup.
N° 20	0.840						
N° 30	0.600				100.0	100	100
N° 40	0.425	4.8	1.0	1.0	99.0		
N° 50	0.300					95	100
N° 80	0.177	16.4	3.4	4.4	95.6		
N° 100	0.150	15.5	3.2	7.6	92.4		
N° 200	0.075	18.8	3.9	11.5	88.5	85	100
Pasa 200	FONDO	427.7	88.5	100.0	0.0		



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 3. 5. Zeolita Natural

TAMIZ	AASHTO T-27	PESO	% RETENNIDO	% RETENIDO	% QUE	Especificaciones	
Pulg.	m.m.	RETENIDO	PARCIAL	ACUMULADO	PASA	Inf.	Sup.
N° 20	0.840						
N° 30	0.600				100.0	100	100
N° 40	0.425	3.0	0.5	0.5	99.5		
N° 50	0.300					95	100
N° 80	0.177	28.2	4.6	5.1	94.9		
N° 100	0.150	8.0	1.3	6.4	93.6		
N° 200	0.075	10.2	1.7	8.1	91.9	80	100
Pasa 200	FONDO	560.4	91.9	100.0	0.0		



Fuente: Elaboración Propia.

3.1.5.3 Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos (MTC E 205)

Se obtuvo una muestra representativa mediante cuarteo (MTC E 201) y se procedió a saturar durante 24 horas. Posteriormente se colocó en el molde cónico y golpear la superficie suavemente 25 veces con la varilla para apisonado y levantar luego el molde.

Se introdujo en el frasco una muestra de 500 g de material preparado, para luego llenar parcialmente con agua a una temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar la marca de 500 cm³. Después de eliminar las burbujas de aire, se ajustó la temperatura del frasco y su contenido a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ para luego llenar el frasco hasta la capacidad calibrada y se determinó el peso total del frasco, espécimen y agua.

Finalmente se removió el agregado fino del frasco, para luego secar en la estufa hasta peso constante a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, posteriormente se enfriar a una temperatura ambiente por $\frac{1}{2}$ a $1 \frac{1}{2}$ hora y se determinó su peso.

I. Ensayo Peso Específico de la Arena Chancada (1/4")

Muestra N° 01

a. Calculo del Peso Específico Bulk Base Seca (Pem)

Este ensayo se realizó con tres especímenes, cuyos resultados inciden en el diseño de las mezclas asfálticas investigadas, para calcular los resultados se siguieron los siguientes pasos.

A: Peso Mat. Sat. Sup. Seco (en aire) (gr.)	= 500
B: Peso de frasco + agua (gr.)	= 1266.90
D: Peso de material + agua en el frasco (gr.)	= 1570.30
F: Peso de material seco (gr.)	= 492.50
C: Peso de frasco + agua + (A) = (B+A) (gr.)	
C: 1266.90 gr. + 500 gr.	
C: 1766.90 gr.	
E: Volumen de masa - Volumen de vacíos = C - D (ml)	
E: 1766.90 gr. - 1570.30 gr.	
E: 196.60 cm ³ .	
G: Volumen de masa = E - (A - F) en (cm ³)	

G: 196.60 gr. - (500gr. - 492.50gr.)

G: 189.10 cm³.

Por lo tanto, con la siguiente ecuación 3.1 se calcula el peso específico:

$$Pe.m = \frac{W_s}{V_t} \dots\dots\dots 3.1$$

Donde:

Pe.m: Peso específico de la masa.

W_s: Peso en el aire de la muestra secada en el horno (gr.).

V_t: Volumen de la masa y volumen de vacíos (cm³).

Reemplazando a la ecuación 3.1 se tiene:

$$Pe.m = \frac{492.50 \text{ gr}}{196.60 \text{ cm}^3}$$

$$Pe.m = 2.505 \text{ gr/cm}^3$$

b. Calculo Del Peso Específico Bulk Base Saturada (Pe.sss)

$$Pe.sss = \frac{W_{sss}}{V_t} \dots\dots\dots 3.2$$

Donde:

Pe.sss: Peso específico de la masa saturado con superficie seca.

W_{sss}: Peso del Mat. Sat. Sup. Seco (en aire) (gr.)

V_t: Volumen de la masa y volumen de vacíos (cm³).

Reemplazando a la ecuación 3.2 se tiene:

$$Pe.sss = \frac{500 \text{ gr.}}{196.60 \text{ cm}^3}$$

$$Pe.sss = 2.543 \text{ gr/cm}^3$$

c. Calculo del Peso Específico Aparente (Pe.a)

$$Pe.a = \frac{W_s}{V_m} \dots\dots\dots 3.3$$

Donde:

Pe.a: Peso específico aparente.

W_s: Peso en el aire de la muestra secada en el horno (gr.).

V_m: Volumen de masa (cm³).

Reemplazando a la ecuación 3.2 se tiene:

$$Pe.a = \frac{492.50 \text{ gr.}}{189.10 \text{ cm}^3} = 2.604 \text{ gr/cm}^3$$

d. Calculo del Porcentaje de Absorción (Abs)

$$Abs. = \frac{W_{sss} - W_s}{W_s} * 100 \dots\dots\dots 3.4$$

Donde:

Abs: Porcentaje de Absorción

Ws: Peso en el aire de la muestra secada en el horno (gr).

Wsss: Peso del Mat. Sat. Sup. Seco (en aire) (gr.).

Reemplazando a la ecuación 3.4 se tiene:

$$Abs. = \frac{500 \text{ gr.} - 492.50 \text{ gr.}}{492.50 \text{ gr.}} * 100$$

$$Abs. = 1.523 \%$$

Nota: Se sigue el mismo procedimiento descrito en los ítems “a” hasta la “d” para las muestras 2 y 3, que a continuación se presenta los resultados en la siguiente tabla N° 3.6.

Tabla N° 3. 6. Resultados del Ensayo Peso Específico de la Arena Chancada (1/4”)

AGREGADO FINO (MTC E 205)					
IDENT.	DESCRIPCIÓN	MUESTRAS			PROMEDIO
		1	2	3	(1+2+3)/3
A	Peso Mat. Sat. Sup. Seco (en aire) (gr.)	500.00	500.00	500.00	
B	Peso de frasco + agua (gr.)	1266.90	1355.70	1265.80	
C	Peso de frasco + agua + (A) =(A+B) (gr.)	1766.90	1855.70	1765.80	
D	Peso de material + agua en el frasco (gr.)	1570.30	1665.60	1570.60	
E	Volumen de masa - Volumen de vacíos =C-D (ml)	196.60	190.10	195.20	
F	Peso de material seco (gr.)	492.50	492.00	491.90	
G	Volumen de masa = E-(A-F) (cm3)	189.10	182.10	187.10	
H	Peso Específico Bulk (base seca) =F/E (gr/cm3)	2.505	2.588	2.520	2.538
I	Peso Específico Bulk (base saturada) =A/E (gr/cm3)	2.543	2.630	2.561	2.578
J	Peso Específico Aparente (base seca) =F/G (gr/cm3)	2.604	2.702	2.629	2.645
K	Absorción = ((A-F)/F)*100 (%)	1.523	1.626	1.647	1.599

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 3. 5. Molde Cónico y Golpes a la Superficie Suavemente



Fuente: Fotografía Propia.

II. Ensayo Peso Específico de la Arena Zarandeada (3/8”)

Este ensayo se realizó IDEM al ensayo de la arena chancada, en la Tabla N° 3.7 se muestra los resultados.

Tabla N° 3. 7. Resultados del Ensayo Peso Específico de la Arena Zarandeada (3/8”)

AGREGADO FINO (MTC E 205)					
IDENT.	DESCRIPCIÓN	MUESTRAS			PROMEDIO
		1	2	3	(1+2+3)/3
A	Peso Mat. Sat. Sup. Seco (en aire) (gr.)	500.00	500.00	500.00	
B	Peso de frasco + agua (gr.)	1267.10	1266.30	1356.80	
C	Peso de frasco + agua + (A) =(A+B) (gr.)	1767.10	1766.30	1856.80	
D	Peso de material + agua en el frasco (gr.)	1568.80	1570.70	1666.40	
E	Volumen de masa - Volumen de vacíos =C-D (ml)	198.30	195.60	190.40	
F	Peso de material seco (gr.)	493.20	492.90	493.30	
G	Volumen de masa = E-(A-F) (cm3)	191.50	188.50	183.70	
H	Peso Específico Bulk (base seca) =F/E (gr/cm3)	2.487	2.520	2.591	2.533
I	Peso Específico Bulk (base saturada) =A/E (gr/cm3)	2.521	2.556	2.626	2.568
J	Peso Específico Aparente (base seca) =F/G (gr/cm3)	2.575	2.615	2.685	2.625
K	Absorción = ((A-F)/F)*100 (%)	1.379	1.440	1.358	1.392

Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 3. 6. Preparando las Probetas para Introducir la Muestra

Fuente: Fotografía Propia.

3.1.5.4 Peso Específico y Absorción de Agregados Gruesos (MTC E 206)

Se obtuvo una muestra representativa mediante cuarteo (MTC E 201) y se procedió a saturar durante 24 horas. Se removió la muestra para luego hacerla rodar sobre un paño grande y absorbente, hasta hacer desaparecer toda película de agua visible. Luego se pesó en la balanza.

Después de pesar, se colocó de inmediato la muestra saturada con superficie seca en la cesta de alambre y se determinó su peso en agua. Finalmente se secó la muestra hasta peso constante, a una temperatura entre $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y se dejó enfriar hasta la temperatura ambiente, y se determinó su peso seco.

Muestra N° 01

a. Cálculo del Peso Específico Bulk Base Seca (Pem)

Este ensayo se realizó con tres especímenes, cuyos resultados inciden en el diseño de las mezclas asfálticas investigadas, para calcular los resultados se reemplazaron a la ecuación 3.5 que se muestra a continuación.

$$Pe.m = \frac{W_s}{(W_{sss} - W_{sat})} \dots \dots \dots 3.5$$

Donde:

Pe.m: Peso específico de la masa.

Ws: Peso de la muestra seca en el aire, gramos.

W_{sss}: Peso de la muestra saturada superficialmente seca en el aire (gr)

W_{sat}: Peso de la muestra saturada en el agua, gramos.

Reemplazando a la ecuación 3.5 se tiene:

$$Pe. m = \frac{2129.50 \text{ gr.}}{2159.50 \text{ gr.} - 1322.90 \text{ gr.}}$$

$$Pe. m = 2.545 \text{ gr/cm}^3.$$

b. Calculo del Peso Específico Bulk Base Saturada (Pe.sss)

$$Pe. sss = \frac{W_{sss}}{(W_{sss} - W_{sat})} \dots \dots \dots 3.6$$

Donde:

Pe.sss: Peso específico de la masa saturada con superficie seca.

W_{sss}: Peso de la muestra saturada superficialmente seca en el aire (gr).

W_{sat}: Peso de la muestra saturada en el agua, gramos.

Reemplazando a la ecuación 3.6 se tiene:

$$Pe. sss = \frac{2159.50 \text{ gr.}}{2159.50 \text{ gr.} - 1322.90 \text{ gr.}}$$

$$Pe. sss = 2.581 \text{ gr/cm}^3.$$

c. Calculo del Peso Específico Aparente (Pe.a)

$$Pe. a = \frac{W_s}{(W_s - W_{sat})} \dots \dots \dots 3.7$$

Donde:

Pe.a: Peso específico aparente.

W_s: Peso de la muestra seca en el aire, gramos.

W_{sat}: Peso de la muestra saturada en el agua, gramos.

Reemplazando a la ecuación 3.7 se tiene:

$$Pe. a = \frac{2129.50 \text{ gr.}}{2129.50 \text{ gr.} - 1322.90 \text{ gr.}}$$

$$Pe. a = 2.640 \text{ gr/cm}^3.$$

d. Calculo del Porcentaje de Absorción (Abs)

$$Abs. = \frac{W_{sss} - W_s}{W_s} * 100 \dots \dots \dots 3.8$$

Donde:

Abs: Porcentaje de absorción.

W_s: Peso de la muestra seca en el aire, gramos.

Wsss: Peso de la muestra saturada superficialmente seca en el aire (gr).

Reemplazando a la ecuación 3.8 se tiene:

$$\text{Abs.} = \frac{2159.50 \text{ gr.} - 2129.50 \text{ gr.}}{2129.50 \text{ gr.}} * 100 = 1.41\%$$

Nota: Se sigue el mismo procedimiento descrito en los ítems “a” hasta la “d” para ensayos 2 y 3, para la piedra chancada de tamaño máximo nominal de 1/2”, que a continuación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla N° 3. 8. Resultados del Ensayo Peso Específico de la Piedra Chancada (1/2”)

AGREGADO GRUESO (MTC E 206)					
IDENT.	DESCRIPCIÓN	MUESTRAS			PROMEDIO (1+2+3)/3
		1	2	3	
A	Peso Mat. Sat. Sup. Seco (en aire) (gr.)	2159.50	2232.70	2087.60	
B	Peso Mat. Sat. Sup. Seco (en agua) (gr.)	1322.90	1369.70	1278.80	
C	Vol de masas - Vol de vacíos = A-B (ml)	836.60	863.00	808.80	
D	Peso Mat. Seco en estufa (110°C) (gr.)	2129.50	2197.00	2057.90	
E	Vol de masas = C- (A-D)	806.60	827.30	779.10	
F	Pe Bulk (Base seca) = D/C	2.545	2.546	2.544	2.545
G	Pe Bulk (Base saturada) = A/C	2.581	2.587	2.581	2.583
H	Pe Aparente (Base seca) = D/E	2.640	2.656	2.641	2.646
I	% de Absorción = ((A-D)/D)*100	1.41	1.62	1.44	1.49

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 3. 7. Peso Saturado al Agua del Agregado Grueso



Fuente: Fotografía Propia.

3.1.5.5 Ensayo de Degaste por Abrasión en la Máquina de los Ángeles (MTC E 207).

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

Este ensayo se realizó para la piedra chancada el cual cumple con la gradación "B" del ensayo según norma indicada.

La muestra fue secada al horno a una temperatura de 110°C se preparó una muestra de 2500 gr. Que corresponde al pasante del tamiz 3/4" y retenido en el tamiz de 1/2", otra cantidad equivalente a 2500 gr. Que corresponde al pasante del tamiz 1/2" y retenido en el tamiz 3/8". Luego esta muestra conjuntamente con una cantidad de 11 esferas metálicas se colocó en la máquina de los ángeles para luego ser rotado a una velocidad de 30 rpm, por 500 revoluciones.

La muestra ensayada se separa por el tamiz N° 12 registrado en peso de la muestra retenida y pasante del tamiz señalado. El porcentaje de resistencia a desgaste se determina dividiendo el peso del material que pasa el tamiz N° 12 entre el peso inicial total de la muestra. En la siguiente tabla N° 3.9 se muestra el resultado de desgaste, impacto y trituración del agregado mineral.

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P \text{ inicial} - P \text{ final}}{P \text{ inicial}} * 100$$

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{5000 - 3875}{5000} * 100$$

$$\% \text{ Desgaste} = 22.50 \%$$

Tabla N° 3. 9. Resultados del Degaste por Abrasión en la Máquina de Ángeles

GRADACIÓN "B" (N° DE ESFERAS: 11)					
TAMAÑO DE MALLAS		MASA ORIGINAL (gr.)	MASA FINAL RETENIDO MALLA N°12 (gr.)	MASA PERDIDA DESPUES DE 500 REVOLUCIONES	% DE DESGASTE POR ABRASIÓN
PASA	RETIENE				
1 1/2" (38.1mm)	1" (25.4mm)		.....	.....	.....
1" (25.4mm)	3/4" (19.0mm)		.....	.....	.....
3/4" (19.0mm)	1/2" (12.7mm)	2500.00	.....	.....	.....
1/2" (12.7mm)	3/8" (9.5mm)	2500.00	.....	.....	.....
PESO TOTAL:		5000.00	3875.00	1125.00	22.50%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 3. 8. Ensayo Abrasión de Ángeles de Piedra Chancada

Fuente: Fotografía Propia.

3.1.5.6 Durabilidad al Sulfato de Magnesio (MTC E 209)

Es el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de durabilidad de los áridos sometidos al ataque con sulfato de sodio o sulfato de magnesio. Este ensayo estima la resistencia del agregado al deterioro por acción de los agentes climáticos durante la vida útil del pavimento.

Para realizar este ensayo se preparó una solución de 01 litro de agua y 350 gr. de sulfato de magnesio. Se procedió al vertido de la solución en las muestras que conforma la piedra chancada y arena chancada, con periodo de saturación de 18 horas.

Luego de este periodo de saturación, las muestras se secaron al horno a una temperatura de 110°C. Los procedimientos indicados anteriormente se repitieron hasta completar 05 ciclos, finalmente se lavaron las muestras y se secaron al horno a una temperatura de 110°C y se volvieron a tamizar respectivamente, registrándose los pesos después de los 05 ciclos.

Agregado Fino: Este ensayo se realizó según la norma indicada, para calcular los resultados se siguieron los siguientes pasos:

Se registran datos en el anexo B.

Fracción ensayada (Entre tamices N° 4 @ N° 8) = 100 gr.

Fracción ensayada (Entre tamices N° 8 @ N° 16) = 100 gr.

Fracción ensayada (Entre tamices N° 16 @ N° 30) = 100 gr.

Fracción ensayada (Entre tamices N° 30 @ N° 50) = 100 gr.

a. Calculo del porcentaje retenido entre tamices N° 4 @ N° 8:

$$\% \text{ Retenido (N° 4 @ N° 10)} = \frac{\text{Fraccion Ensayada (N° 4 @ N° 10)}}{\text{Peso Total}} \times 100$$

$$\% \text{ Retenido (N° 4 @ N° 10)} = \frac{100 \text{ gr.}}{400 \text{ gr.}} \times 100$$

$$\% \text{ Retenido (N° 4 @ N° 10)} = 25.00 \%$$

b. Calculo de la pérdida total entre tamices N° 4 @ N° 8:

Fracción ensayada (Entre tamices N° 4 @ N° 8) = 100 gr. = A

Peso de la muestra después del ensayo (Entre Tamices N° 4 @ N° 10) = 94.5 = B

$$\text{Pérdida Total (N° 4 @ N° 10)} = \frac{A - B}{A} \times 100$$

$$\text{Pérdida Total (N° 4 @ N° 8)} = \frac{100 \text{ gr.} - 94.5 \text{ gr.}}{100 \text{ gr.}} \times 100$$

$$\text{Pérdida Total (N° 4 @ N° 8)} = 5.50 \%$$

c. Calculo de la pérdida media entre tamices N° 4 @ N° 8:

$$\text{Pérdida Media (N° 4 @ N° 8)} = \frac{(\% \text{ Retenido}) \times (\% \text{ Pérdida Total})}{100}$$

$$\text{Pérdida Media (N° 4 @ N° 8)} = \frac{14.20 \times 5.50}{100}$$

$$\text{Pérdida Media (N° 4 @ N° 8)} = 0.78 \%$$

d. Calculo de la pérdida media entre tamices N° 4 @ N° 8, N° 8 @ N° 16, N° 16 @ N° 30, N° 30 @ N° 50:

Se ha calculado de forma similar que el procedimiento mostrado en los ítems “a” hasta la “c”; para el resto de los tamices, obteniéndose:

$$\text{Pérdida Media (N° 4 @ N° 8)} = 0.78 \%$$

$$\text{Pérdida Media (N° 8 @ N° 16)} = 2.20 \%$$

$$\text{Pérdida Media (N° 16 @ N° 30)} = 1.11 \%$$

$$\text{Pérdida Media (N° 30 @ N° 50)} = 0.87 \%$$

e. Durabilidad del Agregado Fino

$$Durabilidad = \sum \text{Pérdida Media (N°4 @ N°8, N°8 @ N°16, N°16 @ N°30, N°30 @ N°50)}$$

$$Durabilidad = 0.78 \% + 2.20 \% + 1.11\% + 0.87\%$$

$$Durabilidad = 4.96 \%$$

Tabla N° 3. 10. Resultados de la Durabilidad al Sulfato de Magnesio (Agregado Fino)

DURABILIDAD DEL AGREGADO FINO (al Sulfato de Magnesio)									
N°	HORA INICIO	FECHA INICIO	FECHA FINAL	HORAS DE INMERSIÓN	HORA ESCURRIDO	HORA SECADO	CICLOS	SOLUCIONES DE SULFATO DE MAGNESIO	
								DENSIDAD	TEMP. °C
1	3:30 pm	04/01/17	05/01/17	18.00	9:30 am	10:30 am	0	1.30	28.00
2	3:30 pm	05/01/17	06/01/17	18.00	9:30 am	10:30 am	1	1.30	28.00
3	3:30 pm	06/01/17	07/01/17	18.00	9:30 am	10:30 am	2	1.30	28.00
4	3:30 pm	07/01/17	08/01/17	18.00	9:30 am	10:30 am	3	1.29	29.00
5	3:30 pm	08/01/17	09/01/17	18.00	9:30 am	10:30 am	4	1.29	29.00
6	3:30 pm	09/01/17	10/01/17	18.00	9:30 am	10:30 am	5	1.29	28.00
INALTERABILIDAD DEL AGREGADO FINO EN SOLUCIONES DE SO4. Mg (5 CICLOS)									
MALLAS		PORCENJATE DEL RETENIDO MUESTRA ORIGINAL	PESO DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO	PESO DE LAS FRACCIONES DESPUES DEL ENSAYO	% DE PÉRDIDAS DESPUÉS DEL ENSAYO	% DE PÉRDIDAS CORREGIDAS			
PASA	RETENIDA								
3/8"	N° 4								
N° 4	N° 8	14.2	100.00	94.50	5.50	0.78			
N° 8	N° 16	33.3	100.00	93.40	6.60	2.20			
N° 16	N° 30	31.7	100.00	96.50	3.50	1.11			
N° 30	N° 50	20.8	100.00	95.80	4.20	0.87			
TOTALES		100.00	400.000			4.96			

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 3. 11. Resultados de la Durabilidad al Sulfato de Magnesio (Agregado Grueso)

DURABILIDAD DEL AGREGADO GRUESO (al Sulfato de Magnesio)									
N°	HORA INICIO	FECHA INICIO	FECHA FINAL	HORAS DE INMERSIÓN	HORA ESCURRIDO	HORA SECADO	CICLOS	SOLUCIONES DE SULFATO DE MAGNESIO	
								DENSIDAD	TEMP. °C
1	3:00 pm	04/01/17	05/01/17	18.00	9:00 am	10:00am	0	1.30	28.00
2	3:00 pm	05/01/17	06/01/17	18.00	9:00 am	10:00am	1	1.30	28.00
3	3:00 pm	06/01/17	07/01/17	18.00	9:00 am	10:00am	2	1.30	28.00
4	3:00 pm	07/01/17	08/01/17	18.00	9:00 am	10:00am	3	1.29	29.00
5	3:00 pm	08/01/17	09/01/17	18.00	9:00 am	10:00am	4	1.29	29.00
6	3:00 pm	09/01/17	10/01/17	18.00	9:00 am	10:00am	5	1.29	28.00

INALTERABILIDAD DEL AGREGADO GRUESO EN SOLUCIONES DE SO ₄ . Mg (5 CICLOS)						
MALLAS		PORCENJATE DEL RETENIDO MUESTRA ORIGINAL	PESO DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO	PESO DE LAS FRACCIONES DESPUES DEL ENSAYO	% DE PÉRDIDAS DESPUÉS DEL ENSAYO	% DE PÉRDIDAS CORREGIDAS
PASA	RETENIDA					
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"	52.68	550.30	525.30	4.54	2.39
1/2"	3/8"	36.25	709.40	658.80	7.13	2.59
3/8"	N° 4	11.07	750.60	713.10	5.00	0.55
TOTALES		100.00	2010.300			5.53

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 3. 9. Ensayo de Durabilidad al Sulfato de Magnesio



Fuente: Fotografía Propia.

Figura N° 3. 10. Secado de las Muestras al Horno a 110°C.



Fuente: Fotografía Propia.

3.1.5.7 Ensayo de Caras Fracturadas (MTC E 210).

Este ensayo se realiza con el propósito de maximizar la resistencia al esfuerzo cortante con el incremento de la fricción entre las partículas. Otro propósito es dar estabilidad a los agregados empleados para carpeta o afirmado; y dar fricción y textura a agregados empleados en pavimentación.

La forma de la partícula de los agregados puede afectar la trabajabilidad durante su colocación; así como la cantidad de fuerza necesaria para compactarla a la densidad requerida y la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida de servicio.

La muestra fue secada lo suficiente para obtener una separación clara entre el material fino y grueso en la operación de tamizado (Tamiz N° 4), luego se reduce la parte retenida con un cuarteador hasta obtener un peso adecuado que se superior a 500 gr. Posteriormente se selección al agregado con una y dos caras fracturadas para luego pesarlas cada uno.

Tabla N° 3. 12. Resultados de las Partículas con Una Cara Fracturada del Agregado Grueso

CON UNA CARA FRACTURADA							
TAMAÑO DE MALLAS		PESO RETENIDO (gr.)	PORCENT. RETENIDO (%)	PESO PARA ENSAYO (gr.)	PESO PART. 01 CARA FACT. (gr.)	% DE PART. 01 CARA FRACT. (gr.)	
PASA	RETIENE	Pr	Rj	Pi	Pa	Li	LixRj
1 1/2"	1"						
1"	3/4"						
3/4"	1/2"	687.92	69.38	687.92	655.66	95.31	6612.28
1/2"	3/8"	303.66	30.62	303.66	291.08	95.86	2935.52
PESO TOTAL DE MUESTRA		991.58	100.00				9547.79
PORCENTAJE CON UNA CARA FRACTURADA = Sumatoria(LixRj)/Sumatoria(Rj)=				95.48 %			

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 3. 13. Resultados de las Partículas con Dos o Más Caras Fracturadas del Agregado Grueso

CON DOS O MÁS CARAS FRACTURADAS							
TAMAÑO DE MALLAS		PESO RETENIDO (gr.)	PORCENT. RETENIDO (%)	PESO PARA ENSAYO (gr.)	PESO PART. 02 O MÁS CARAS FACT. (gr.)	% DE PART. 02 O MÁS CARAS FRACT. (gr.)	
PASA	RETIENE	Pr	Rj	Pi	Pa	Li	LixRj
1 1/2"	1"						
1"	3/4"						
3/4"	1/2"	687.92	69.38	687.92	604.13	87.82	6092.60
1/2"	3/8"	303.66	30.62	303.66	281.55	92.72	2839.41
PESO TOTAL DE MUESTRA		991.58	100.00				8932.01
PORCENTAJE CON DOS O MÁS CARAS FRACTURADAS = Sumatoria(LixRj)/Sumatoria(Rj)=					89.32 %		

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 3. 11. Selección de Una y Dos o Más Caras Fracturadas



Fuente: Fotografía Propia.

3.1.5.8 Ensayo de Partículas Chatas y Alargadas en Agregados Gruesos (MTC E 223).

Se ha demostrado en un sin número de investigaciones, que el exceso de partículas chatas y alargadas, pueden perjudicar el comportamiento de la estructura del pavimento. La carga proveniente del tráfico puede quebrar las partículas y modificar la estructura original.

Previamente a la realización de este ensayo, la muestra debe estar libre de impurezas y secada al horno. Se preparó una muestra no menor de 2 kg.

Una partícula es considerada chata cuando el espesor de la partícula es menor que la abertura del brazo menor del equipo de ensayo. Y una partícula es considerada alargada cuando el ancho de la partícula es menor que la abertura del brazo menor del equipo de ensayo.

Según el, procedimiento indicado, se pesaron las partículas por separado para determinar el porcentaje de partículas chatas y alargadas.

a. Registro de datos

- Peso pasante tamiz 3/4" y retenido tamiz 1/2" = 2204.00 gr.
- Peso de partículas chatas entre tamices 3/4" y 1/2" = 60.00 gr.
- Peso total de la muestra = 3343.00 gr.
- Porcentaje parcial entre tamices 3/4" y 1/2" = 2.72 %

b. Porcentaje parcial de partículas chatas entre tamices 3/4" y 1/2"

% Parcial de Particulas Chatas

$$= \frac{\text{Peso de Particulas Chatas entre Tamices } 3/4" \text{ y } 1/2"}{\text{Peso Pasante Tamiz } 3/4" \text{ y Retenido Tamiz } 1/2"} \times 100$$

$$\% \text{ Parcial de Particulas Chatas} = \frac{60}{2204} \times 100$$

$$\% \text{ Parcial de Particulas Chatas} = 2.72 \%$$

Tabla N° 3. 14. Resultados de las Partículas Chatas

PARTICULAS CHATAS							
TAMAÑO DE MALLAS		PESO RETENIDO (gr.)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PESO PARA ENSAYO (gr.)	PESO PART. CHATAS (gr.)	% DE PART. CHATAS (gr.)	
PASA	RETIENE	Pr	Rj	Pi	Pa	Li	LixRj
1 1/2"	1"						
1"	3/4"						
3/4"	1/2"	2204.00	65.93	2204.00	60.00	2.72	179.48
1/2"	3/8"	1139.00	34.07	1139.00	25.00	2.19	74.78
PESO TOTAL:		3343.00	100.00				254.26
PORCENTAJE DE PARTICULAS CHATAS					2.54 %		
(Sumatoria(LixRj)/Sumatoria(Rj))							

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 3. 15. Resultados de las Partículas Alargadas

PARTICULAS ALARGADAS							
TAMAÑO DE MALLAS		PESO RETENIDO (gr.)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PESO PARA ENSAYO (gr.)	PESO PART. ALARGADAS. (gr.)	% DE PART. ALARGADAS (gr.)	
PASA	RETIENE	Pr	Rj	Pi	Pa	Li	LixRj
1 1/2"	1"						
1"	3/4"						
3/4"	1/2"	2204.00	65.93	2204.00	7.00	0.32	20.94
1/2"	3/8"	1139.00	34.07	1139.00	4.00	0.35	11.97
PESO TOTAL:		3343.00	100.00				32.90
PORCENTAJE DE PARTICULAS ALARGADAS (Sumatoria(LixRj)/Sumatoria(Rj))					0.33 %		

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 3. 12. Partículas Chatas y Alargadas de la Piedra Chancada



Fuente: Fotografía Propia.

3.1.5.9 Determinación de Límites de Atteberg (MTC E 114).

a. Limite Líquido:

El límite líquido es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo seco en el horno, cuando este se entre el estado plástico y líquido. Se basa en las normas NTP 339.129, ASTM D-424 Y AASHTO T-89.

Esta muestra se obtuvo del material pasante del tamiz 4.25 mm (N° 40) de la fracción fina. Se colocó la muestra en la vasija de porcelana y mezclándose completamente con 15 a 20 ml de agua destilada, agitándola, amasándola y tajándola con una espátula en forma alternada y repetida.

Una vez preparada una pasta del material en la capsula de porcelana, se colocó la pasta a la Máquina de Casagrande, para luego usando el acanalador se separó en dos mitades (ranura) según el eje de simetría de la capsula. Seguidamente gira el brazo de Casagrande a un velocidad de 2 rev./seg.

Estas pruebas se realizaron para un cierre (distancia 12.7 mm) de la ranura; que requiera de 25 a 35 golpes, una para un cierre entre 20 y 30 golpes, y una prueba para un cierre que requiera de 15 a 25 golpes. Luego pesar la muestra y secarlo al horno.

b. Limite Plástico:

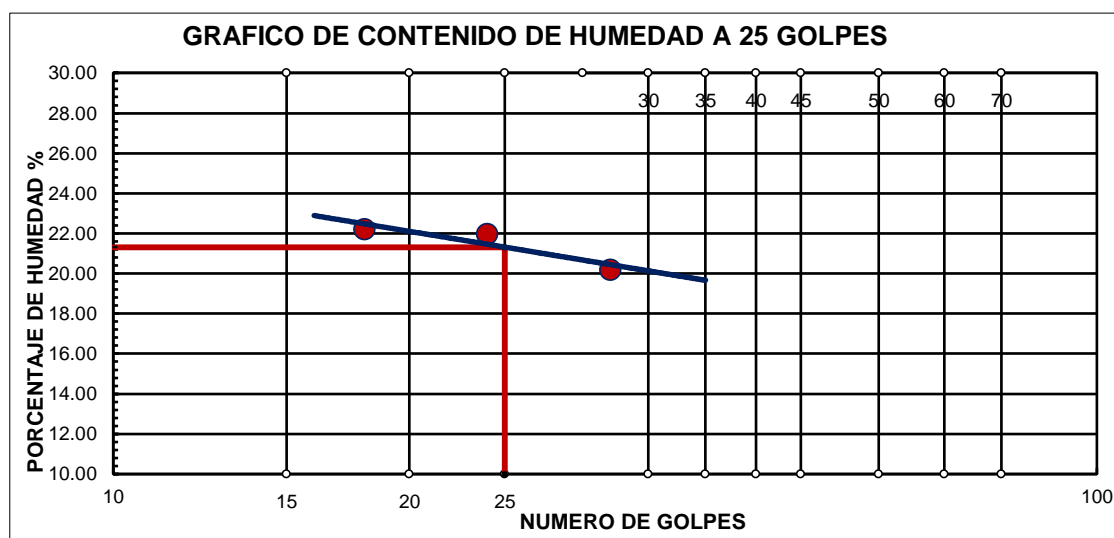
Se denomina límite plástico a la humedad más baja con la que se pueden formar barritas de suelo de unos 3.2 mm de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa (vidrio esmerilado) hasta que dichas barras se desmoronen. Se explica con más detalle en las normas NTP 339.129, ASTM D- 4318 Y AASHTO T-90.

El límite plástico (LP) es la frontera entre el estado plástico y el semisólido de un suelo. En este estado el material puede ser deformado rápidamente o moldeado sin recuperación elástica, existen cambios de volumen, agrietamiento o desmoronamiento.

Nota: Para el material pasante el tamiz N° 200 se realizó IDEM a los pasos anteriores descritos que en material pasante el Tamiz N° 40.

Tabla N° 3. 16. Resultados del Ensayo de Límites Pasante el Tamiz N° 40.

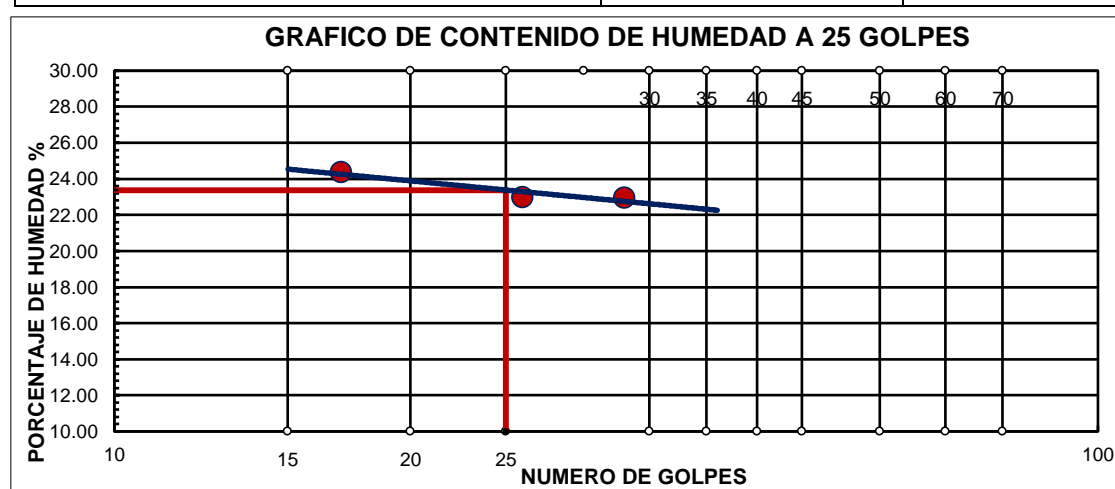
N°	DESCRIPCIÓN	LIMITE LIQUIDO (MTC E 110, AASHTO T 89)			LIMITE PLÁSTICO (MTC E 111, AASHTO T 90)
		T-02	T-07	T-03	
1	N° TARA				NP
2	PESO TARA +SUELO HUMEDO (gr.)	15.62	17.13	16.00	
3	PESO TARA + SUELO SECO (gr.)	14.74	16.06	15.16	
4	PESO DE AGUA (gr.)	0.88	1.07	0.84	
5	PESO DE LA TARA (gr.)	10.78	11.19	11.00	
6	PESO DEL SUELO SECO (gr.)	3.96	4.87	4.16	
7	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	22.22	21.97	20.19	
8	NUMERO DE GOLPES	18	24	32	
L.L. = 21.32		L.P.= NP			I.P. = NP



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 3. 17. Resultados del Ensayo de Límites Pasante el Tamiz N° 200.

N°	DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO (MTC E 110, AASHTO T 89)			LÍMITE PLÁSTICO (MTC E 111, AASHTO T 90)
		T-10	T-06	T-12	
1	N° TARA	T-10	T-06	T-12	NP
2	PESO TARA +SUELO HUMEDO (gr.)	20.56	15.79	15.04	
3	PESO TARA + SUELO SECO (gr.)	18.72	14.91	14.31	
4	PESO DE AGUA (gr.)	1.84	0.88	0.73	
5	PESO DE LA TARA (gr.)	11.17	11.08	11.13	
6	PESO DEL SUELO SECO (gr.)	7.55	3.83	3.18	
7	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	24.37	22.98	22.96	
8	NUMERO DE GOLPES	17	26	33	
L.L. = 23.38		L.P.= NP			I.P. = NP



Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 3. 13. Ensayo de los límites de ATTEBERG

Fuente: Fotografía Propia.

3.1.5.10 Ensayo Equivalente de Arena (MTC E 114).

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, fineza, y carácter del material arcilloso presente en el espécimen de ensayo. Para realizar este ensayo se tomó una muestra de arena chancada y arena zarandeada. Se ensaya para la muestra pasante el Tamiz N°4 (4.75 mm), en una cantidad aproximada de 1500 gr.

Se vierte la solución de cloruro de calcio en la probeta graduada hasta una altura de 4 ± 0.1 ". Se prepara una cantidad de 85 ml. de muestra y se procede a verter en la probeta graduada y en seguida se dejó reposar por un periodo de 10 ± 1 min. Después de este periodo se saturación se realizó el agitado con 90 ciclos en un tiempo de 30 seg. Se procedió a irrigar la muestra hasta alcanzar la lectura de 15" en la probeta correspondiente.

Se dejó en reposo durante un tiempo de 20 min. ± 15 segundos, finalizados este tiempo se registró la lectura del nivel de la parte superior de la suspensión de la arcilla.

a. **Calculo del Equivalente de Arena Zarandeada 3/8":**

Muestra N° 01:

- Altura del material fino = 5.2"
- Altura con dispositivo lector = 13.6"

Altura de la arena = altura con dispositivo lector – 10"

Altura de la arena = 13.6" – 10"

Altura de la arena = 3.6"

$$\text{Equivalente de Arena} = \frac{\text{Altura de la Arena}}{\text{Altura del Material Fino}} * 100$$

$$\text{Equivalente de Arena} = \frac{3.6''}{5.2''} * 100$$

$$\text{Equivalente de Arena} = 69.2 \%$$

Nota: Se siguió en mismo procedimiento descrito para el resto de las muestras, determinándose finalmente los valores promedio como se muestra a continuación en la tabla N° 3.18.

Tabla N° 3. 18. Resultados de Equivalente de Arena Zarandeada de 3/8"

EQUIVALENTE DE ARENA				
N°	DESCRIPCIÓN	MUESTRAS		
		1	2	3
1	Hora de entrada a saturación	3:54 pm	3:56 pm	3:58 pm
2	Hora de salida de saturación	4:04 pm	4:06 pm	4:08 pm
3	Hora de entrada a decantación	4:06 pm	4:08 pm	4:10 pm
4	Hora de salida de decantación	4:26 pm	4:28 pm	4:30 pm
5	Altura de nivel material fino (Pulg.)	5.2	5.4	5.2
6	Altura de nivel arena (Pulg.) - 10 pulg	3.6	3.6	3.6
7	Equivalente de arena (%) (6)/(5)*100	69.2%	66.7%	69.2%
EQUIVALENTE DE ARENA PROMEDIO:		68.4%		

Fuente: Elaboración Propia

b. Calculo del Equivalente de Arena chancada de 1/4"

Muestra N° 01:

- Altura del material fino = 5.9"
- Altura con dispositivo lector = 13.8"

Altura de la arena = altura con dispositivo lector – 10"

Altura de la arena = 13.6" – 10"

Altura de la arena = 3.8"

$$\text{Equivalente de Arena} = \frac{\text{Altura de la Arena}}{\text{Altura del Material Fino}} * 100$$

$$\text{Equivalente de Arena} = \frac{3.8''}{5.9''} * 100$$

$$\text{Equivalente de Arena} = 64.4 \%$$

Nota: Se siguió en mismo procedimiento descrito para el resto de las muestras, determinándose finalmente los valores promedio como se muestra a continuación en la Tabla N° 3.19.

Tabla N° 3. 19. Resultados de Equivalente de Arena Chancada de 1/4”

EQUIVALENTE DE ARENA				
N°	DESCRIPCIÓN	MUESTRAS		
		1	2	3
1	Hora de entrada a saturación	2:32 pm	2:34 pm	2:36 pm
2	Hora de salida de saturación	2:42 pm	2:44 pm	2:46 pm
3	Hora de entrada a decantación	2:44 pm	2:46 pm	2:48 pm
4	Hora de salida de decantación	3:04 pm	3:06 pm	3:08 pm
5	Altura de nivel material fino (Pulg.)	5.9	5.7	5.6
6	Altura de nivel arena (Pulg.) - 10 pulg	3.8	3.5	3.6
7	Equivalente de arena (%) $(6)/(5)*100$	64.4%	61.4%	64.3%
EQUIVALENTE DE ARENA PROMEDIO:		63.4%		

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 3. 14. Ensayo de equivalente de Arena del Agregado Fino



Fuente: Fotografía Propia.

3.1.5.11 Ensayos Efectuados a la Zeolita Natural

Ensayo de Contenido de Humedad

Este ensayo tiene por finalidad, determinar el contenido de humedad de una muestra de Zeolita Natural. Referencia: ASTM D-2216, MTC E 108

Se determina la humedad de la zeolita en laboratorio, por medio del secado a horno, donde la humedad de un suelo es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas, o sea:

Se registró el peso de la tara, peso de la tara más muestra húmeda y peso de la tara más la muestra secada al horno (110°C). Con la siguiente formula se calcula el contenido de humedad de la zeolita.

$$W = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso del Suelo Secado al Horno}} \times 100 = \frac{P1 - P2}{P2 - P} \times 100 \dots \dots \dots (I)$$

Donde:

W = Contenido de Humedad, (%)

P1 = Peso de la Tara más la Muestra Húmedo, (gr.)

P2 = Peso de la Tara más el suelo secado en horno, (gr.)

P = Peso de la Tara, (gr.)

Por lo tanto, reemplazando a la ecuación (I) se tiene:

Muestra N° 01:

$$W = \frac{36.13 - 33.56}{33.56 - 11.03} \times 100 = 11.407 \%$$

Tabla N° 3. 20. Resultados del Contenido de Humedad de la Zeolita

CONTENIDO DE HUMEDAD					
IDENT.	DESCRIPCIÓN	MUESTRAS			PROMEDIO (1+2+3)/3
		1	2	3	
1	Peso de la Tara) (gr.)	11.03	11.10	11.06	
2	Peso de la Tara + Zeolita Húmeda (gr.)	36.13	39.21	36.42	
4	Peso de la Tara + Zeolita Seca (gr.)	33.56	33.80	33.80	
6	% Contenido de Humedad	11.407	23.833	11.522	15.587

Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 3. 15. Contenido de Humedad de la Zeolita Natural



Fuente: Fotografía Propia.

3.2 Cemento Asfáltico

El cemento asfáltico utilizado en el presente diseño de concreto asfáltico es penetración 120-150 (Tabla N° 3.21), el empleo de este ligantes para zonas que se encuentra a una altitud superior a los 3.500 msnm como es el caso de nuestra investigación, a fin de mitigar cierto efecto que se pudo verificar en base a las experiencias de los últimos diez años en la construcción de carreteras en zonas de altura y dadas las condiciones climáticas predominantes en el altiplano (bajas temperaturas, gradiente térmico y fuerte radiación ultravioleta) que afecta negativamente a la carpeta asfáltica generan un incremento marcado en el módulo de rigidez, lo que provoca una flexión en toda la estructura del pavimento, produciéndose tracciones que pueden llegar a ocasionar la fractura de la misma.

Tabla N° 3. 21. Especificaciones Técnicas del Cemento Asfáltico PEN 120-150

		PETRÓLEOS DEL PERÚ - PETROPERÚ S.A.		
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PETROPERÚ				
CLASE DE PRODUCTO		ASFALTO SÓLIDO		Fecha efectiva: Enero 2014
TIPO DE PRODUCTO		CEMENTO ASFÁLTICO		Reemplaza edición de: Noviembre 2007
NOMBRE DE PRODUCTO				
ASFALTO SÓLIDO 120/150 PEN				
ENSAYOS	ESPECIFICACIONES (a)		MÉTODO	
	MÍN.	MÁX.	ASTM	AASHTO
PENETRACIÓN a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1mm	120	150	D-5	T-49
VOLATILIDAD				
Punto de inflamación Cleveland, copa abierta, °C	218		D-92	T-48
Gravedad específica a 15.6/15.6°C	Reportar		D-70	T-228
DUCTILIDAD a 25°C, 5 cm/min, cm	100		D-113	T-51
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO, % masa	99,0		D-2042	T-44
SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA				
Prueba de calentamiento sobre película fina, 3.2 mm, 163°C, 5 horas:			D-1754	T-179
Pérdida por calentamiento, % masa		1,3		
Penetración retenida, % del original	42+		D-5	T-49
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	100		D-113	T-51
Índice de susceptibilidad térmica	-1.0	+1.0		Francés RLB
FLUIDEZ				
Viscosidad cinemática a 100°C, cSt	Reportar		D-2170	T-201
Viscosidad cinemática a 135°C, cSt	140		D-2170	T-201
REQUERIMIENTO GENERAL:				
El cemento asfáltico deberá ser homogéneo, libre de agua, y no deberá formar espuma al ser calentado a 175°C.				
OBSERVACIONES:				
(a) En concordancia con a Norma Técnica Peruana NTP 321.051 y con los estándares ASTM D 948 y AASHTO M-20.				

Fuente: PETRO PERÚ

Figura N° 3. 16. Cemento Asfalto Para los Ensayos PEN 120-150

Fuente: Fotografía Propia

3.3 Desarrollo Experimental del Método Marshall

En desarrollo experimental del Método Marshall, primeramente se verifico las propiedades y características de materiales (agregados, cal hidratada, zeolita natural y asfalto), para realizar la combinación o dosificación de los materiales y luego se procede a diseño de mezcla asfáltica convencional (140°C y 100°C) y mezcla asfáltica modificado con zeolita natural (a 100°C de 1%, 2% y 3%), luego se procede en determinar a partir de la preparación y compactación tres especímenes a diferentes contenidos de asfalto y temperaturas de mezcla asfálticas para pavimentación, de altura nominal de 64 mm y 102 mm de diámetro, el diseño de una mezcla asfáltica y se calcula sus diferentes parámetros de comportamiento, por medio del método Marshall.

3.3.1 Dosificación de Agregados

Las especificaciones para pavimento asfaltico se requiere que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas este en ciertas proporciones. Como se muestra en el siguiente procedimiento de cálculo de proporciones de agregado, filler (cal hidratada y zeolita natural) y cemento asfaltico.

a. Porcentaje de la Piedra Chancada en Peso de la Mezcla:

Los datos se ajuntan en el Anexo C:

$$\% \text{ Cemento Asfáltico} = 5.5 \%$$

$$\% \text{ Piedra chancada} = 30 \% \text{ (de la mezcla de canteras)}$$

$$\% \text{ Piedra chancada} = \frac{(100 - \% \text{ Asfalto}) \times (\% \text{ de Piedra Chancada})}{100}$$

$$\% \text{ Piedra chancada} = \frac{(100 - 5.5) \times (30)}{100} = 28.35\%$$

b. Porcentaje de Arena Chancada en Peso de la Mezcla:

Los datos se ajuntan en el Anexo C:

$$\% \text{ Cemento Asfáltico} = 5.5 \%$$

$$\% \text{ Arena Chancada} = 35 \% \text{ (de la mezcla de canteras)}$$

$$\% \text{ Arena Chancada} = \frac{(100 - \% \text{ Asfalto}) \times (\% \text{ de Arena Chancada})}{100}$$

$$\% \text{ Arena Chancada} = \frac{(100 - 5.5) \times (35)}{100} = 33.08\%$$

c. Porcentaje de Arena Zarandeada en Peso de la Mezcla:

Los datos se ajuntan en el Anexo C:

$$\% \text{ Cemento Asfáltico} = 5.5 \%$$

$$\% \text{ Arena Zarandeada} = 32 \% \text{ (de la mezcla de canteras)}$$

$$\% \text{ Arena Zarandeada} = \frac{(100 - \% \text{ Asfalto}) \times (\% \text{ de Arena Zarandeada})}{100}$$

$$\% \text{ Arena Zarandeada} = \frac{(100 - 5.5) \times (32)}{100}$$

$$\% \text{ Arena Zarandeada} = 30.24 \%$$

d. Porcentaje de Filler (Cal Hidratada) en Peso de la Mezcla:

Los datos se ajuntan en el Anexo C:

$$\% \text{ Cemento Asfáltico} = 5.5 \%$$

$$\% \text{ Filler (Cal)} = 3.0 \% \text{ (de la mezcla de canteras)}$$

$$\% \text{ Filler (Cal)} = \frac{(100 - \% \text{ Asfalto}) \times (\% \text{ de Filler Cal})}{100}$$

$$\% \text{ Filler (Cal)} = \frac{(100 - 5.5) \times (3)}{100}$$

$$\% \text{ Filler (Cal)} = 2.84 \%$$

Tabla N° 3. 22. Dosificación de Agregados en el Marshall – Convencional 140°C

							% PIEDRA CHANCADA	30.00
							% ARENA CHANCADA	35.00
							% ARENA ZARANEADA	32.00
							% CAL	3.00
COMBINACIÓN	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	TOTAL (%)	100.00
TOTAL (%)	100	100	100	100	100	100		
ASFALTO (%)	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0		
% TOTAL (PIEDRA, ARENA Y CAL) EN EL MARSHALL	94.5	94.0	93.5	93.0	92.5	92.0		
(%) PIEDRA CHANCADA	28.35	28.20	28.05	27.90	27.75	27.60		
% ARENA CHANCADA	33.08	32.90	32.73	32.55	32.38	32.20		
(%) ARENA ZARANEADA	30.24	30.08	29.92	29.76	29.60	29.44		
CAL (%)	2.84	2.82	2.81	2.79	2.78	2.76		

Fuente: *Elaboración Propia*

Nota: La dosificación de agregados en el Marshall, para convencional de 100°C y modificado de 1%, 2% y 3% de zeolita natural se muestra en el Anexo C.

3.3.2 Procedimiento de Ensayo Marshall

Según la norma MTC E 504 se basa en determinar los parámetros de comportamiento de los especímenes (altura 64 mm y diámetro 102 mm) de mezcla asfáltica para pavimentación. Para los ensayos de estabilidad y flujo deberán consistir del promedio de un mínimo de 03 especímenes por cada incremento de contenido de asfalto de 0.5 %. Los especímenes de mezclas asfálticas compactadas, moldeadas por este procedimiento son empleados para varios ensayos físicos tales como densidad, vacíos, estabilidad, flujo, resistencia a tracción indirecta y módulos. Las mezclas no compactadas son empleadas para la determinación de peso específico teórico máximo (RICE).

Los agregados fueron secados a peso constante a una temperatura de 105°C a 110°C para la preparación de la mezcla asfáltica convencional de temperatura 140°C y 100°C de 1200 gr de misma manera para mezcla asfáltica modificado con zeolita natural en porcentajes de 1%, 2% y 3% a temperatura 100°C cada porcentaje. Luego se calienta los agregados y asfalto a una temperatura 140°C y 100°C para lo cual la temperatura se midió con termómetro

(Modelo: MULTI – THERMOMETER) de un rango de 0°C a 250°C con sensibilidad de 3°C, como se muestra en la Figura N° 3.17.

Figura N° 3. 17. Calentamiento de Agregado y Asfalto a 140°C y 100°C



Fuente: Fotografía Propia

La mezcla de agregados y asfalto se realizó a una temperatura de 140°C y 100°C para mezcla asfáltica convencional, mientras para modificado a una temperatura de 100°C con un peso total de 1200gr. La balanza que se utiliza tiene con aproximación de 0.1 gr, como se muestra en la Figura N° 3.18.

Figura N° 3. 18. Mezcla de Agregado, Filler y Asfalto



Fuente: Fotografía Propia

Para la compactación de los especímenes se limpia completamente el molde ensamblado y la cara del martillo de compactación y se calentó en una bandeja a temperatura entre 90°C y 150°C y se colocó también un papel circular no absorbente cortado del tamaño de la base del molde antes de introducir la mezcla, luego de colocado la mezcla en el molde se procede a chusear vigorosamente la mezcla con una espátula calentada 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en el interior, en seguida se coloca otra pieza de papel en la parte superior de la mezcla y la temperatura antes de compactado es medido con termómetro, como se muestra en la Figura N° 3.19.

**Figura N° 3. 19. Medición de Temperatura y Chuseado de Mezcla
Asfáltica**



Fuente: Fotografía Propia

Luego de colocar el molde ensamblado en el pedestal de compactación con el sujetador se procede con la compactación de 75 golpes con el martillo de compactación y después se remueve la placa de base y el collar para que se voltee y se re ensamble el molde para aplicar el mismo número de golpes de compactación en la cara reversa del espécimen. El martillo de compactación tendrá un pie de compactación plano con un tornillo y una masa deslizante de $4.54 \pm 0.01\text{kg}$ con caída libre de $457.2 \pm 1.5\text{mm}$ y pedestal de compactación consistirá de un poste de madera (roble, pino amarillo u otro) de 203.2 mm x 203.2 mm y de 457 mm de largo, como se muestra en la Figura N° 3.20.

Figura N° 3. 20. Compactación de los Especímenes a 75 golpes

Fuente: Fotografía Propia

Después de compactado los especímenes se enfrían lo suficiente al medio ambiente para prevenir algún daño y luego se extrae el espécimen del molde. El extractor de especímenes tendrá un disco de acero que encaja al molde sin doblarse y no será menor de 100 mm de diámetro y 12.5 mm de espesor tal como una gata hidráulica puede ser empleada, de tal manera que el espécimen no se deforme durante el proceso de extracción, como se muestra en la Figura N° 3.21.

Figura N° 3. 21. Extracción de Especímen con Gata Hidráulica

Fuente: Fotografía Propia

Luego de extracción de especímenes se procede en identificación de los especímenes para cada contenido de asfalto, como se muestra en la Figura N° 3.22.

Figura N° 3. 22. Identificación de los especímenes para cada contenido de asfalto



Fuente: Fotografía Propia

A cada espécimen se determinará el peso específico bulk como se indica MTC E 514 (Peso Aparente y Peso Unitario de Mezclas Asfálticas Compactadas empleando Especímenes Saturados con Superficie Seca). El peso en el aire del espécimen completamente seco se determina después de que haya permanecido al aire a temperatura ambiente, por lo menos durante 1 hora, como se muestra en la Figura N° 3.23.

Figura N° 3. 23. Peso en el Aire del Especimen Seco



Fuente: Fotografía Propia

El peso del espécimen en agua se sumerge en un baño de agua a 25°C de 3 a 5 minutos para luego pesarse en el agua, como se muestra en la Figura N° 3.24.

Figura N° 3. 24. Peso de Espécimen en Agua a 25°C



Fuente: Fotografía Propia

El peso en el aire del espécimen saturado con superficie seca se determina al secar rápidamente la superficie del espécimen con una toalla húmeda y pesa en el aire, como se muestra en la Figura N° 3.25.

Figura N° 3. 25. Peso en el Aire del Especimen Saturado con Superficie Seca



Fuente: Fotografía Propia

En el ensayo de estabilidad y flujo se ensayan para 03 especímenes que tiene el mismo tipo de agregado, calidad, gradación, filler, la misma fuente de ligante, grado y cantidad. Además, tiene la misma preparación de temperatura, compactación y enfriamiento. Para lo cual los especímenes se colocan en baño de agua a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 30 a 40 min, como se muestra en la Figura N° 3.26.

Figura N° 3. 26. Colocación de Especímenes en Baño de Agua a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 30 min



Fuente: Fotografía Propia

Para ensayo en máquina de carga, el cabezal se calentó en horno a temperatura de 20 a 40°C , luego el tiempo desde la remoción del espécimen del baño de agua a la determinación de la carga máxima no debe exceder los 30 segundos a una razón constante de 50 mm/min hasta registrar la máxima carga y flujo indicada en la máquina de carga, como se muestra en la Figura N° 3.27.

Figura N° 3. 27. Medición de Estabilidad y Flujo en Máquina de Marshall



Fuente: Fotografía Propia

La determinación de peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas (RICE) para pavimento se procedió el ensayo mediante norma MTC E 508 para determinar el cálculo de vacíos de aire en mezcla compactadas y cálculo de la cantidad de asfalto absorbido por el agregado. Para lo cual cada muestra de mezcla asfáltica es enfriada hasta la temperatura de ambiente, luego se coloca en recipiente y se pesa, en seguida se agrega agua suficiente de 25°C de temperatura aproximadamente para cubrir la muestra. Inmediatamente se procede a remoción del aire atrapado de 30 mm de Hg (4 kPa) o menor de presión absoluta, durante un periodo de 5 a 15 minutos, como se muestra en la Figura N° 3.28. y Figura N° 3.29.

Figura N° 3. 28. Enfriamiento y Pesado de Mezcla Asfáltica - RICE



Fuente: Fotografía Propia

Figura N° 3. 29. Remoción del aire atrapado a 30 mm de Hg durante 5 -15 minutos



Fuente: Fotografía Propia

3.4 Diseño para Mezclas Asfálticas por el Método Marshall (Asfalto Convencional – 140°C)

3.4.1 Peso Unitario de la Muestra Compactada

Este ensayo consiste en pesar el espécimen seco después que haya permanecido al aire por lo menos durante una hora, a la temperatura ambiente. El espécimen se lleva su condición saturada superficialmente seca y se sumerge en agua y se pesa.

El peso Unitario de la mezcla asfáltica compactada está determinado por la siguiente ecuación:

$$G_{mb} = \frac{W_d}{W_{ssd} - W_{sumergido}} \dots \dots \dots (3.11)$$

Donde:

G_{mb} : Peso unitario de la mezcla asfáltica compactada

W_d : Peso al aire del espécimen seco

W_{ssd} : Peso al aire del espécimen saturado superficialmente seco

$W_{sumergido}$: Peso del espécimen saturado superficialmente seco sumergido

Reemplazando en la ecuación (3.11), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$G_{mb} = \frac{1191.20}{1193.80 - 660.70} = 2.234 \text{ gr/cm}^3$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.23.

Tabla N° 3. 23. Peso Unitario de la Muestra Compactada (G_{mb})

PESO UNITARIO DE LA MUESTRA COMPACTADA - CONVENCIONAL 140°C (gr/cm3)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	2.234	2.233	2.237
6.0%	2.274	2.271	2.273
6.5%	2.285	2.280	2.282
7.0%	2.291	2.289	2.290
7.5%	2.272	2.275	2.273
8.0%	2.252	2.250	2.253

Fuente: Elaboración Propia

3.4.2 Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados

Cuando el agregado total consiste de fracciones separadas de agregados grueso, fino y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas, la gravedad específica bulk de la combinación de agregados se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$Gsb = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \dots \dots \dots (3.12)$$

Donde:

Gsb: Gravedad específica bulk de la combinación de agregados

P1, P2, Pn: Porcentaje individuales por peso del agregado

G1, G2, Gn: Gravedad específica bulk individual del agregado.

Reemplazando en la ecuación (3.12), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$Gsb = \frac{28.35 + 33.08 + 30.24 + 2.84}{\frac{28.35}{2.545} + \frac{33.08}{2.538} + \frac{30.24}{2.533} + \frac{2.84}{2.365}} = 2.533 \text{ gr/cm}^3$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.24.

Tabla N° 3. 24. Gravedad Específica Bulk de la combinación de agregados (Gsb)

GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS - CONVENCIONAL 140°C (gr/cm3)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	2.533	2.533	2.533
6.0%	2.533	2.533	2.533
6.5%	2.533	2.533	2.533
7.0%	2.533	2.533	2.533
7.5%	2.533	2.533	2.533
8.0%	2.533	2.533	2.533

Fuente: Elaboración Propia

3.4.3 Gravedad Específica Efectiva del Agregado

El procedimiento se calcula a partir de la gravedad específica teórica máxima de mezclas asfálticas (RICE) ASTM D-2041, con la siguiente expresión:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \dots \dots \dots (3.13)$$

Donde:

- Gse: Gravedad específica efectiva del agregado
- Pmm: Porcentaje en peso del total de la mezcla suelta, 100%
- Pb: Porcentaje de asfalto para el peso total de la muestra
- Gmm: Gravedad específica teórica máxima de la mezcla (sin vacíos de aire)
- Gb: Gravedad específica del asfalto

Reemplazando en la ecuación (3.13), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$G_{se} = \frac{100 - 5.5}{\frac{100}{2.401} - \frac{5.5}{1.021}} = 2.606 \text{ gr/cm}^3$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.25.

Tabla N° 3. 25. Gravedad Específica Efectiva del Agregado (Gse)

GRAVEDAD ESPECÍFICA EFECTIVA DEL AGREGADO - CONVENCIONAL 140°C (gr/cm3)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	2.606	2.606	2.606
6.0%	2.617	2.617	2.617
6.5%	2.625	2.625	2.625
7.0%	2.622	2.622	2.622
7.5%	2.607	2.607	2.607
8.0%	2.602	2.602	2.602

Fuente: Elaboración Propia

3.4.4 Asfalto Absorbido

Se expresa como el porcentaje en peso del agregado más que como el porcentaje del peso total de la mezcla, se determina mediante la ecuación:

$$P_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} * G_b \dots \dots \dots (3.14)$$

Donde:

- Pba: Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.
- Gse: Gravedad específica efectiva del agregado

Gb: Gravedad específica del asfalto

Gsb: Gravedad específica bulk del agregado

Reemplazando en la ecuación (3.14), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$P_{ba} = 100 * \frac{2.606 - 2.533}{2.606 * 2.533} * 1.021 = 1.14\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.26.

Tabla N° 3. 26. Asfalto Absorbido (Pba)

ASFALTO ABSORBIDO - CONVENCIONAL 140°C (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	1.14	1.14	1.14
6.0%	1.30	1.30	1.30
6.5%	1.41	1.41	1.41
7.0%	1.37	1.37	1.37
7.5%	1.14	1.14	1.14
8.0%	1.06	1.06	1.06

Fuente: Elaboración Propia

3.4.5 Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla

El contenido de asfalto efectivo de la mezcla es el contenido de asfalto total menos la cantidad de asfalto absorbido dentro de las partículas de agregado. La ecuación es:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} * P_s \dots \dots \dots (3.15)$$

Donde:

Pbe: Contenido de asfalto efectivo, porcentaje del peso total de la mezcla.

Pb: Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla.

Pba: Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

Ps: Contenido de agregado, porcentaje del peso total de la mezcla.

Reemplazando en la ecuación (3.15), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$P_{be} = 5.5 - \frac{1.14}{100} * (28.35 + 33.08 + 30.24 + 2.84)$$

$$P_{be} = 4.43\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.27.

Tabla N° 3. 27. Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla (Pbe)

CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO DE LA MEZCLA - CONVENCIONAL 140°C (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	4.43	4.43	4.43
6.0%	4.78	4.78	4.78
6.5%	5.18	5.18	5.18
7.0%	5.73	5.73	5.73
7.5%	6.45	6.45	6.45
8.0%	7.02	7.02	7.02

Fuente: Elaboración Propia

3.4.6 Porcentaje VMA en Mezcla Compactada

El VMA se calcula en base a la gravedad específica bulk del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen bulk de la mezcla compactada. Y se determina por la siguiente ecuación.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \dots \dots \dots (3.16)$$

Donde:

VMA: Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk

Gsb: Gravedad específica bulk del agregado total

Gmb: Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

Ps: Contenido de agregado, porcentaje del peso total de la mezcla

Reemplazando en la ecuación (3.16), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$VMA = 100 - \frac{2.234 * (28.35 + 33.08 + 30.24 + 2.84)}{2.533}$$

$$VMA = 16.63\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.28.

Tabla N° 3. 28. Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)

VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL - CONVENCIONAL 140°C (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	16.63	16.69	16.54
6.0%	15.61	15.72	15.65
6.5%	15.67	15.84	15.76
7.0%	15.90	15.96	15.92
7.5%	17.02	16.92	16.99
8.0%	18.19	18.28	18.17

Fuente: Elaboración Propia

3.4.7 Porcentaje de Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada

El porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada puede determinarse usando:

$$Va = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \dots \dots \dots (3.17)$$

Donde:

Va: Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

Gmm: Gravedad específica teórica máxima de la mezcla

Gmb: Gravedad específica bulk de mezcla compactada

Reemplazando en la ecuación (3.17), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$Va = 100 * \frac{2.401 - 2.234}{2.401} = 6.9\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.29.

Tabla N° 3. 29. Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada (Va)

VACÍOS DE AIRE EN LA MEZCLA COMPACTADA - CONVENCIONAL 140°C (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	6.9	7.0	6.8
6.0%	5.0	5.1	5.0
6.5%	4.1	4.3	4.2
7.0%	3.0	3.1	3.1
7.5%	2.7	2.6	2.6
8.0%	2.7	2.8	2.7

Fuente: Elaboración Propia

3.4.8 Vacíos Llenos con Asfalto

Los vacíos llenos con asfalto (VFA o VLLCA), es el porcentaje de los vacíos entre partículas (VMA) que se llenan con asfalto. VFA, no incluye el asfalto absorbido, y se determina mediante la siguiente ecuación.

$$VFA = 100 * \frac{(VMA - V_a)}{VMA} \dots \dots \dots (3.18)$$

Donde:

VFA: Vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA

VMA: Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk

V_a: Vacíos de aire en mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Reemplazando en la ecuación (3.18), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$VFA = 100 * \frac{16.63 - 6.9}{16.63}$$

$$VFA = 58.24\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.30.

Tabla N° 3. 30. Vacíos Llenos con Asfalto (VFA)

VACÍOS LLENOS CON ASFALTO - CONVENCIONAL 140°C (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	58.24	58.01	58.64
6.0%	68.21	67.63	68.01
6.5%	73.98	73.06	73.47
7.0%	80.87	80.50	80.72
7.5%	84.28	84.89	84.45
8.0%	85.15	84.66	85.28

Fuente: Elaboración Propia

3.4.9 Calculo del Contenido Óptimo de Asfalto Convencional

Se determina el contenido óptimo de asfalto de la mezcla, considerando el peso unitario, la estabilidad, y vacíos en la mezcla. De dichos cálculos se determina el porcentaje de asfalto óptimo.

$$P_{b \text{ Optimo}} = \frac{P_{b1} + P_{b2} + P_{b3}}{3} \dots \dots \dots (3.19)$$

Donde:

P_b Óptimo: Contenido óptimo de asfalto

P_{b1} : Porcentaje de asfalto óptimo de máxima estabilidad

P_{b2} : Porcentaje de asfalto óptimo de peso unitario

P_{b3} : Porcentaje de asfalto para un 3% de vacíos

Reemplazando en la ecuación (3.19), se tiene:

Óptimo de máxima estabilidad (P_{b1}): 6.7%

Óptimo de peso unitario (P_{b2}): 6.8%

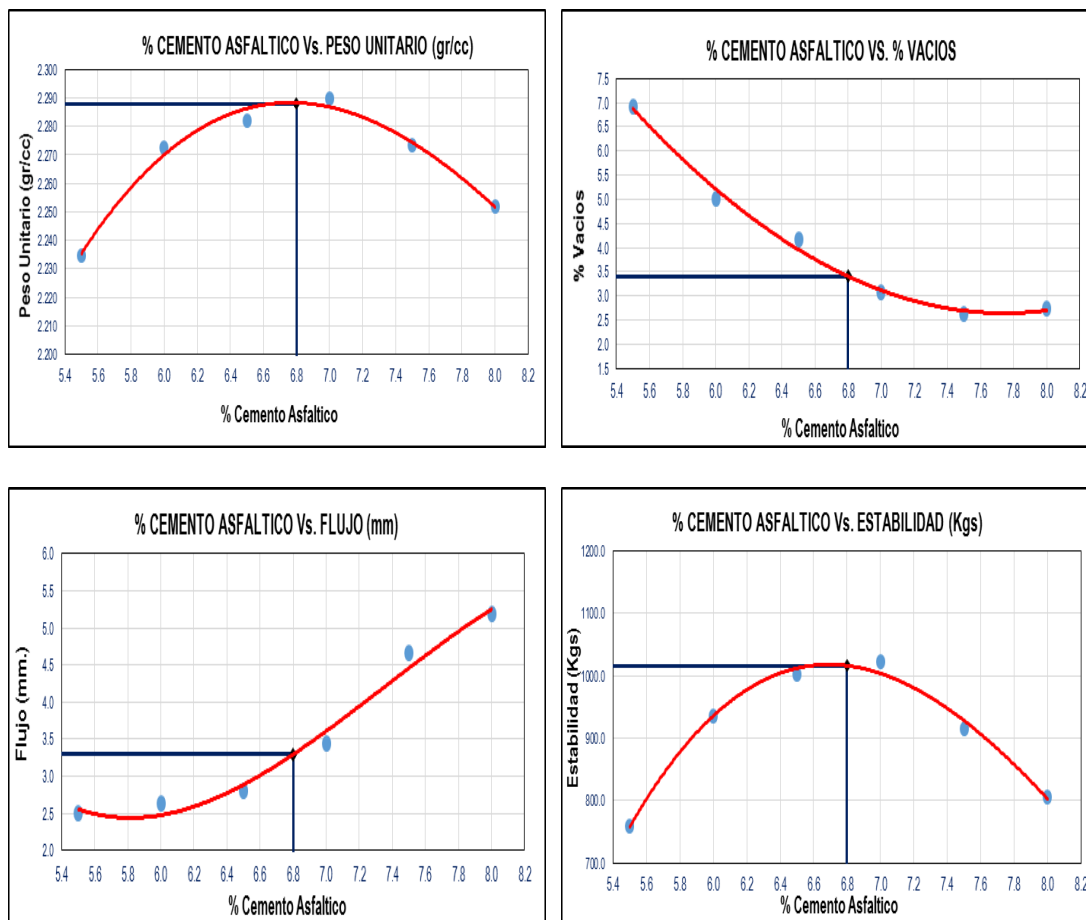
Óptimo para un 3% de vacíos (P_{b3}): 7.0%

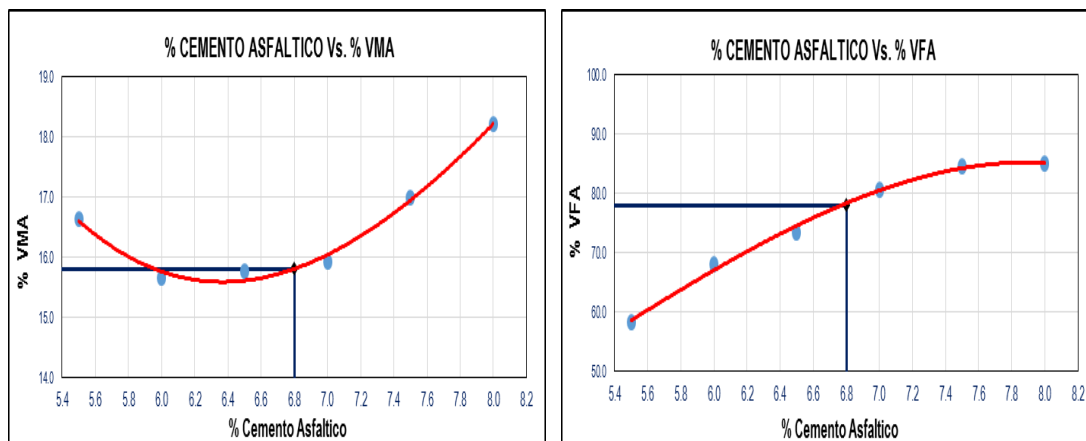
$$P_{b \text{ óptimo}} = \frac{6.7 + 6.8 + 7}{3} = 6.8 \%$$

Óptima a usar: 6.8 %

3.4.10 Gráficos de Ensayo Marshall

Figura N° 3. 30. Gráficos de Ensayo Marshall Convencional de 140°C





Fuente: Elaboración Propia

3.4.11 Resultado del Diseño de Mezcla Asfáltica Convencional (140°C)

Tabla N° 3. 31. Resultado del Diseño de Mezcla Asfáltica Convencional – 140°C

A. MEZCLA DE AGREGADOS (PROPORCIÓN EN PESO)		
A.1.	Piedra Chancada 1/2"	30.00%
A.2.	Arena Chancada 1/4"	35.00%
A.3.	Arena Zarandeada 3/8"	32.00%
A.4.	Filler Mineral (Ca)	3.00%
TOTAL:		100.00%

B. CEMENTO ASFÁLTICO		
B.1.	Tipo de Asfalto	PEN 120/150
B.2.	% Optimo de C.A.	6.8 % + 0.3
B.3.	Aditivo	-----

C.	CARACTERÍSTICAS FÍSICO - MECÁNICAS			
	CARACTERÍSTICAS	DISEÑO	ESPECIFICACIÓN	EVALUACIÓN
C.1.	% Óptimo de Cemento asfáltico	6.8		
C.2.	N° de Golpes en cada lado	75		
C.3.	Peso Unitario (gr/cm ³)	2.288		
C.4.	% Vacíos de aire	3.4	3 - 5 %	CUMPLE
C.5.	Flujo (mm)	3.3	2 - 3.5 mm	CUMPLE
C.6.	Estabilidad (Kgs.)	1016.0	Min. 831 Kg.	CUMPLE
C.7.	% V.M.A.	15.8	Min. 15 %	CUMPLE
C.8.	% V.F.A.	78.0	Max. 85 %	CUMPLE
C.9.	Índice de Rigidez (Kg/cm)	3150.00	1,700 - 4,000	CUMPLE

Fuente: Elaboración Propia

3.5 Diseño para Mezclas Asfálticas por el Método Marshall (Asfalto Convencional – 100°C)

3.5.1 Peso Unitario de la Muestra Compactada

Este ensayo consiste en pesar el espécimen seco después que haya permanecido al aire por lo menos durante una hora, a la temperatura ambiente. El espécimen se lleva su condición saturada superficialmente seca y se sumerge en agua y se pesa.

El peso Unitario de la mezcla asfáltica compactada está determinado por la siguiente ecuación:

$$G_{mb} = \frac{W_d}{W_{ssd} - W_{sumergido}} \dots \dots \dots (3.1)$$

Donde:

G_{mb} : Peso unitario de la mezcla asfáltica compactada

W_d : Peso al aire del espécimen seco

W_{ssd} : Peso al aire del espécimen saturado superficialmente seco

$W_{sumergido}$: Peso del espécimen saturado superficialmente seco sumergido

Reemplazando en la ecuación (3.1), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$G_{mb} = \frac{1182.40}{1183.2 - 651.7} = 2.225 \text{ gr/cm}^3$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.32.

Tabla N° 3. 32. Peso Unitario de la Muestra Compactada (G_{mb})

PESO UNITARIO DE LA MUESTRA COMPACTADA - CONVENCIONAL 100°C (gr/cm3)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	2.225	2.230	2.228
6.0%	2.255	2.264	2.257
6.5%	2.267	2.270	2.281
7.0%	2.279	2.284	2.272
7.5%	2.255	2.261	2.253
8.0%	2.239	2.244	2.249

Fuente: Elaboración Propia

3.5.2 Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados

Cuando el agregado total consiste de fracciones separadas de agregados grueso, fino y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas, la gravedad específica bulk de la combinación de agregados se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$Gsb = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \dots \dots \dots (3.2)$$

Donde:

Gsb: Gravedad específica bulk de la combinación de agregados

P1, P2, Pn: Porcentaje individuales por peso del agregado

G1, G2, Gn: Gravedad específica bulk individual del agregado.

Reemplazando en la ecuación (3.2), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$Gsb = \frac{28.35 + 33.08 + 30.24 + 2.84}{\frac{28.35}{2.545} + \frac{33.08}{2.538} + \frac{30.24}{2.533} + \frac{2.84}{2.365}} = 2.533 \text{ gr/cm}^3$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.33.

Tabla N° 3. 33. Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados (Gsb)

GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGRAGADOS - CONVENCIONAL 100°C (gr/cm3)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	2.533	2.533	2.533
6.0%	2.533	2.533	2.533
6.5%	2.533	2.533	2.533
7.0%	2.533	2.533	2.533
7.5%	2.533	2.533	2.533
8.0%	2.533	2.533	2.533

Fuente: Elaboración Propia

3.5.3 Gravedad Específica Efectiva del Agregado

El procedimiento se calcula a partir de la gravedad específica teórica máxima de mezclas asfálticas (RICE), con la siguiente expresión:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \dots \dots \dots (3.3)$$

Donde:

Gse: Gravedad específica efectiva del agregado

Pmm: Porcentaje en peso del total de la mezcla suelta, 100%

Pb: Porcentaje de asfalto para el peso total de la muestra

Gmm: Gravedad específica teórica máxima de la mezcla (sin vacíos de aire)

Gb: Gravedad específica del asfalto

Reemplazando en la ecuación (3.3), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$G_{se} = \frac{100 - 5.5}{\frac{100}{2.455} - \frac{5.5}{1.021}} = 2.673 \text{ gr/cm}^3$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.34.

Tabla N° 3. 34. Gravedad Específica Efectiva del Agregado (Gse)

GRAVEDAD ESPECIFICA EFECTIVA DEL AGREGADO - CONVENCIONAL 100°C (gr/cm3)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	2.673	2.673	2.673
6.0%	2.699	2.699	2.699
6.5%	2.660	2.660	2.660
7.0%	2.616	2.616	2.616
7.5%	2.590	2.590	2.590
8.0%	2.595	2.595	2.595

Fuente: Elaboración Propia

3.5.4 Asfalto Absorbido

Se expresa como el porcentaje en peso del agregado más que como el porcentaje del peso total de la mezcla, se determina mediante la ecuación:

$$P_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} * G_b \dots \dots \dots (3.4)$$

Donde:

Pba: Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

Gse: Gravedad específica efectiva del agregado

Gb: Gravedad específica del asfalto

Gsb: Gravedad específica bulk del agregado

Reemplazando en la ecuación (3.4), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$P_{ba} = 100 * \frac{2.673 - 2.533}{2.673 * 2.533} * 1.021 = 2.12\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.35.

Tabla N° 3. 35. Asfalto Absorbido (Pba)

ASFALTO ABSORBIDO - CONVENCIONAL 100°C (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	2.12	2.12	2.12
6.0%	2.49	2.49	2.49
6.5%	1.93	1.93	1.93
7.0%	1.27	1.27	1.27
7.5%	0.89	0.89	0.89
8.0%	0.97	0.97	0.97

Fuente: Elaboración Propia

3.5.5 Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla

El contenido de asfalto efectivo de la mezcla es el contenido de asfalto total menos la cantidad de asfalto absorbido dentro de las partículas de agregado. La ecuación es:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} * P_s \dots \dots \dots (3.5)$$

Donde:

Pbe: Contenido de asfalto efectivo, porcentaje del peso total de la mezcla.

Pb: Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla.

Pba: Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

Ps: Contenido de agregado, porcentaje del peso total de la mezcla.

Reemplazando en la ecuación (3.5), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$P_{be} = 5.5 - \frac{2.12}{100} * (28.35 + 33.08 + 30.24 + 2.84) = 3.50\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.36.

Tabla N° 3. 36. Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla (Pbe)

CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO DE LA MEZCLA - CONVENCIONAL 100°C (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	3.50	3.50	3.50
6.0%	3.66	3.66	3.66
6.5%	4.70	4.70	4.70
7.0%	5.81	5.81	5.81
7.5%	6.68	6.68	6.68
8.0%	7.11	7.11	7.11

Fuente: Elaboración Propia

3.5.6 Porcentaje VMA en Mezcla Compactada

El VMA se calcula en base a la gravedad específica bulk del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen bulk de la mezcla compactada. Y se determina por la siguiente ecuación.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \dots \dots \dots (3.6)$$

Donde:

VMA: Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk

Gsb: Gravedad específica bulk del agregado total

Gmb: Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

Ps: Contenido de agregado, porcentaje del peso total de la mezcla

Reemplazando en la ecuación (3.6), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$VMA = 100 - \frac{2.225 * (28.35 + 33.08 + 30.24 + 2.84)}{2.533}$$

$$VMA = 17.00\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.37.

Tabla N° 3. 37. Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)

VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL - CONVENCIONAL 100°C (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	17.00	16.80	16.88
6.0%	16.31	15.98	16.24
6.5%	16.30	16.21	15.80
7.0%	16.33	16.14	16.58
7.5%	17.67	17.43	17.72
8.0%	18.68	18.49	18.31

Fuente: Elaboración Propia

3.5.7 Porcentaje de Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada

El porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada puede determinarse usando:

$$Va = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \dots \dots \dots (3.7)$$

Donde:

Va: Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

Gmm: Gravedad específica teórica máxima de la mezcla

Gmb: Gravedad específica bulk de mezcla compactada

Reemplazando en la ecuación (3.7), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$Va = 100 * \frac{2.455 - 2.225}{2.455} = 9.4\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.38.

Tabla N° 3. 38. Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada (Va)

VACÍOS DE AIRE EN LA MEZCLA COMPACTADA - CONVENCIONAL 100°C (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	9.4	9.2	9.2
6.0%	8.2	7.9	8.1
6.5%	5.9	5.8	5.3
7.0%	3.4	3.1	3.6
7.5%	2.9	2.6	3.0
8.0%	3.1	2.9	2.7

Fuente: Elaboración Propia

3.5.8 Vacíos Llenos con Asfalto

Los vacíos llenos con asfalto (VFA o VLLCA), es el porcentaje de los vacíos entre partículas (VMA) que se llenan con asfalto. VFA, no incluye el asfalto absorbido, y se determina mediante la siguiente ecuación.

$$VFA = 100 * \frac{(VMA - V_a)}{VMA} \dots \dots \dots (3.8)$$

Donde:

VFA: Vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA

VMA: Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk

V_a: Vacíos de aire en mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Reemplazando en la ecuación (3.8), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$VFA = 100 * \frac{17.00 - 9.4}{17.00}$$

$$VFA = 44.85\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.39.

Tabla N° 3. 39. Vacíos Llenos con Asfalto (VFA)

VACÍOS LLENOS CON ASFALTO - CONVENCIONAL 100°C (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	44.85	45.50	45.25
6.0%	49.59	50.82	49.86
6.5%	63.98	64.42	66.40
7.0%	79.47	80.59	78.04
7.5%	83.45	84.81	83.12
8.0%	83.42	84.45	85.47

Fuente: Elaboración Propia

3.5.9 Calculo del Contenido Óptimo de Asfalto Convencional

Se determina el contenido óptimo de asfalto de la mezcla, considerando el peso unitario, la estabilidad, y vacíos en la mezcla. De dichos cálculos se determina el porcentaje de asfalto óptimo.

$$P_{b \text{ optimo}} = \frac{P_{b1} + P_{b2} + P_{b3}}{3} \dots \dots \dots (3.9)$$

Donde:

P_b Óptimo: Contenido óptimo de asfalto

P_{b1} : Porcentaje de asfalto óptimo de máxima estabilidad

P_{b2} : Porcentaje de asfalto óptimo de peso unitario

P_{b3} : Porcentaje de asfalto para un 3% de vacíos

Reemplazando en la ecuación (3.9), se tiene:

Óptimo de máxima estabilidad (P_{b1}): 6.6%

Óptimo de peso unitario (P_{b2}): 6.7%

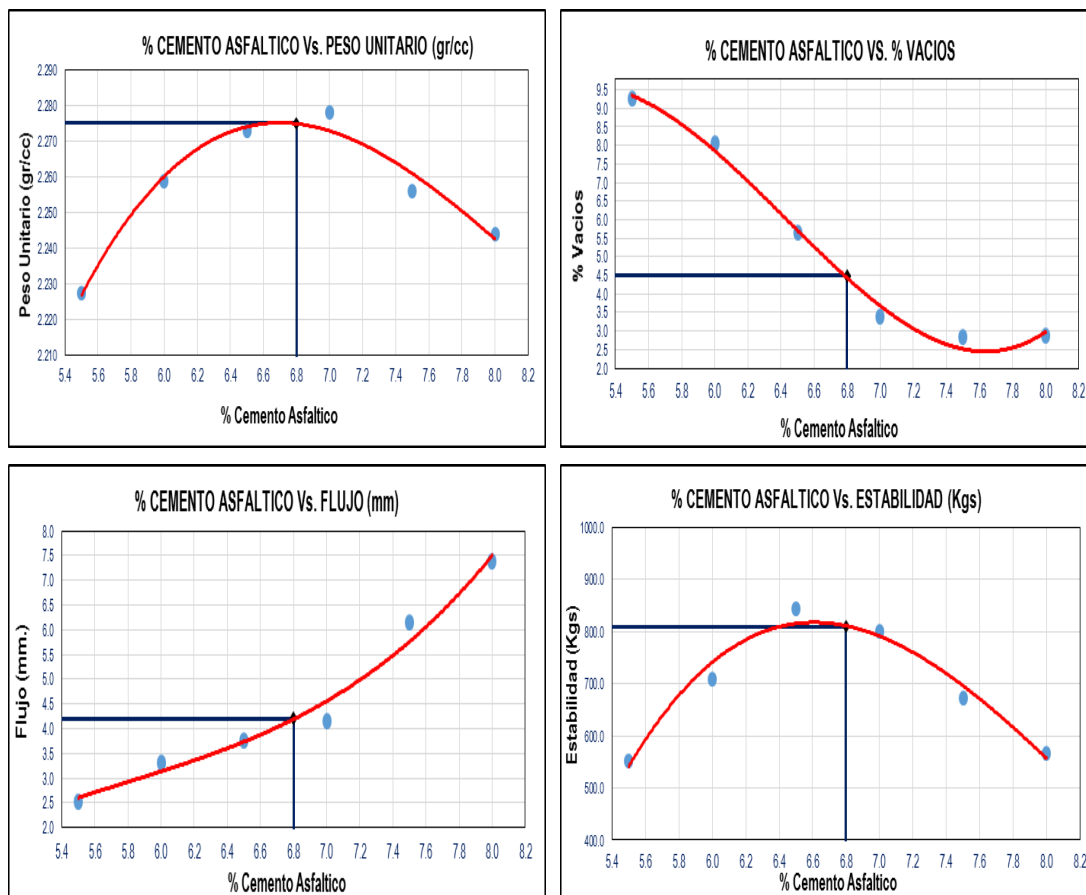
Óptimo para un 3% de vacíos (P_{b3}): 7.2%

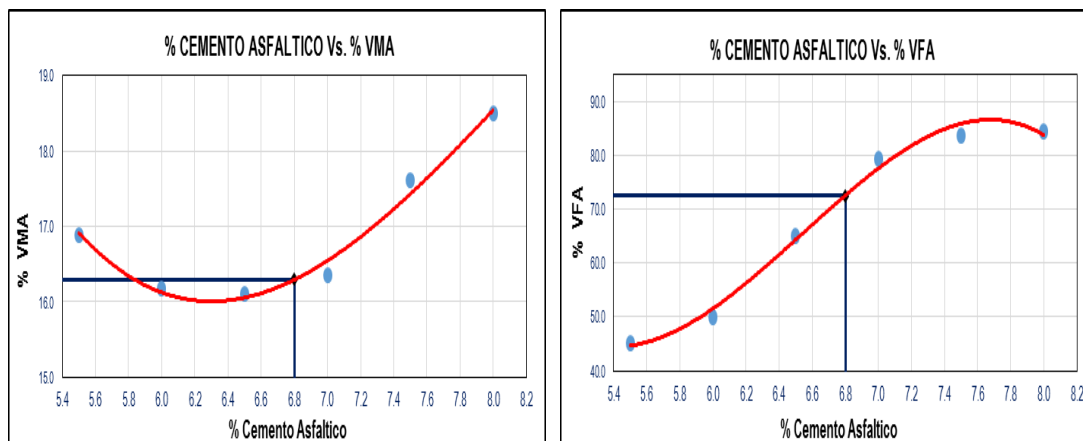
$$P_{b \text{ Optimo}} = \frac{6.6 + 6.7 + 7.2}{3} = 6.8 \%$$

Óptima a usar: 6.8 %

3.5.10 Gráficos de Ensayo Marshall

Figura N° 3. 31. Gráficos de Ensayo Marshall Convencional de 100°C





Fuente: Elaboración Propia.

3.5.11 Resultado del Diseño de Mezcla Asfáltica Convencional (100°C)

Tabla N° 3. 40. Resultado del Diseño de Mezcla Asfáltica Convencional – 100°C

A. MEZCLA DE AGREGADOS (PROPORCIÓN EN PESO)		
A.1.	Piedra Chancada 1/2"	30.00%
A.2.	Arena Chancada 1/4"	35.00%
A.3.	Arena Zarandeada 3/8"	32.00%
A.4.	Filler Mineral (Cal)	3.00%
TOTAL:		100.00%

B. CEMENTO ASFÁLTICO		
B.1.	Tipo de Asfalto	PEN 120/150
B.2.	% Optimo de C.A.	6.8 % +- 0.3
B.3.	Aditivo	.....

C. CARACTERÍSTICAS FÍSICO - MECÁNICAS				
	CARACTERÍSTICAS	DISEÑO	ESPECIFICACIÓN	EVALUACIÓN
C.1.	% Óptimo de Cemento asfáltico	6.8		
C.2.	N° de Golpes en cada lado	75		
C.3.	Peso Unitario (gr/cm ³)	2.275		
C.4.	% Vacíos de aire	4.5	3 - 5 %	CUMPLE
C.5.	Flujo (mm)	4.2	2 - 3.5 mm	NO CUMPLE
C.6.	Estabilidad (Kgs.)	810.0	Min. 831 Kgf.	NO CUMPLE
C.7.	% V.M.A.	16.3	Min. 15 %	CUMPLE
C.8.	% V.F.A.	72.5	Max. 85 %	CUMPLE
C.9.	Índice de Rigidez (Kg/cm)	1965.00	1,700 - 4,000	CUMPLE

Fuente: Elaboración Propia

3.6 Diseño para Mezclas Asfálticas por el Método Marshall (Asfalto Modificado – 100°C – 2% Zeolita Natural)

3.6.1 Peso Unitario de la Muestra Compactada

Este ensayo consiste en pesar el espécimen seco después que haya permanecido al aire por lo menos durante una hora, a la temperatura ambiente. El espécimen se lleva su condición saturada superficialmente seca y se sumerge en agua y se pesa.

El peso Unitario de la mezcla asfáltica compactada está determinado por la siguiente ecuación:

$$G_{mb} = \frac{W_d}{W_{ssd} - W_{sumergido}} \dots \dots \dots (3.1)$$

Donde:

G_{mb} : Peso unitario de la mezcla asfáltica compactada

W_d : Peso al aire del espécimen seco

W_{ssd} : Peso al aire del espécimen saturado superficialmente seco

$W_{sumergido}$: Peso del espécimen saturado superficialmente seco sumergido

Reemplazando en la ecuación (3.1), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$G_{mb} = \frac{1173.20}{1175.10 - 650.80} = 2.238 \text{ gr/cm}^3$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.41.

Tabla N° 3. 41. Peso Unitario de la Muestra Compactada (G_{mb})

PESO UNITARIO DE LA MUESTRA COMPACTADA - MODIFICADO 2% ZEOLITA (gr/cm3)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	2.238	2.242	2.248
6.0%	2.276	2.274	2.282
6.5%	2.296	2.297	2.301
7.0%	2.279	2.291	2.295
7.5%	2.277	2.277	2.282
8.0%	2.252	2.261	2.250

Fuente: Elaboración Propia

3.6.2 Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados

Cuando el agregado total consiste de fracciones separadas de agregados grueso, fino y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas, la gravedad específica bulk de la combinación de agregados se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$Gsb = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \dots \dots \dots (3.2)$$

Donde:

Gsb: Gravedad específica bulk de la combinación de agregados

P1, P2, Pn: Porcentaje individuales por peso del agregado

G1, G2, Gn: Gravedad específica bulk individual del agregado.

Reemplazando en la ecuación (3.2), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$Gsb = \frac{28.35 + 33.08 + 30.24 + 0.95 + 1.89}{\frac{28.35}{2.545} + \frac{33.08}{2.538} + \frac{30.24}{2.533} + \frac{0.95}{2.365} + \frac{1.89}{2.284}} = 2.531 \text{ gr/cm}^3$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.42.

Tabla N° 3. 42. Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados (Gsb)

GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGRAGADOS - MODIFICADO 2% ZEOLITA (gr/cm3)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	2.531	2.531	2.531
6.0%	2.531	2.531	2.531
6.5%	2.533	2.533	2.533
7.0%	2.531	2.531	2.531
7.5%	2.531	2.531	2.531
8.0%	2.531	2.531	2.531

Fuente: Elaboración Propia

3.6.3 Gravedad Específica Efectiva del Agregado

El procedimiento se calcula a partir de la gravedad específica teórica máxima de mezclas asfálticas (RICE), con la siguiente expresión:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \dots \dots \dots (3.3)$$

Donde:

Gse: Gravedad específica efectiva del agregado

Pmm: Porcentaje en peso del total de la mezcla suelta, 100%

Pb: Porcentaje de asfalto para el peso total de la muestra

Gmm: Gravedad específica teórica máxima de la mezcla (sin vacíos de aire)

Gb: Gravedad específica del asfalto

Reemplazando en la ecuación (3.3), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$G_{se} = \frac{100 - 5.5}{\frac{100}{2.435} - \frac{5.5}{1.021}} = 2.649 \text{ gr/cm}^3$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.43.

Tabla N° 3. 43. Gravedad Específica Efectiva del Agregado (Gse)

GRAVEDAD ESPECIFICA EFECTIVA DEL AGREGADO - MODIFICADO 2% ZEOLITA (gr/cm3)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	2.649	2.649	2.649
6.0%	2.660	2.660	2.660
6.5%	2.651	2.651	2.651
7.0%	2.596	2.596	2.596
7.5%	2.589	2.589	2.589
8.0%	2.595	2.595	2.595

Fuente: Elaboración Propia

3.6.4 Asfalto Absorbido

Se expresa como el porcentaje en peso del agregado más que como el porcentaje del peso total de la mezcla, se determina mediante la ecuación:

$$P_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} * G_b \dots \dots \dots (3.4)$$

Donde:

Pba: Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

Gse: Gravedad específica efectiva del agregado

Gb: Gravedad específica del asfalto

Gsb: Gravedad específica bulk del agregado

Reemplazando en la ecuación (3.4), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$P_{ba} = 100 * \frac{2.649 - 2.531}{2.649 * 2.531} * 1.021 = 1.80\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.44.

Tabla N° 3. 44. Asfalto Absorbido (Pba)

ASFALTO ABSORBIDO - MODIFICADO 2% ZEOLITA (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	1.80	1.80	1.80
6.0%	1.95	1.95	1.95
6.5%	1.82	1.82	1.82
7.0%	1.02	1.02	1.02
7.5%	0.91	0.91	0.91
8.0%	1.00	1.00	1.00

Fuente: Elaboración Propia

3.6.5 Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla

El contenido de asfalto efectivo de la mezcla es el contenido de asfalto total menos la cantidad de asfalto absorbido dentro de las partículas de agregado. La ecuación es:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} * P_s \dots \dots \dots (3.5)$$

Donde:

Pbe: Contenido de asfalto efectivo, porcentaje del peso total de la mezcla.

Pb: Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla.

Pba: Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

Ps: Contenido de agregado, porcentaje del peso total de la mezcla.

Reemplazando en la ecuación (3.5), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$P_{be} = 5.5 - \frac{1.80}{100} * (28.35 + 33.08 + 30.24 + 0.95 + 1.89) = 3.84\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.45.

Tabla N° 3. 45. Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla (Pbe)

CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO DE LA MEZCLA - MODIFICADO 2% ZEOLITA (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	3.84	3.84	3.84
6.0%	4.20	4.20	4.20
6.5%	4.83	4.83	4.83
7.0%	6.07	6.07	6.07
7.5%	6.68	6.68	6.68
8.0%	7.10	7.10	7.10

Fuente: Elaboración Propia

3.6.6 Porcentaje VMA en Mezcla Compactada

El VMA se calcula en base a la gravedad específica bulk del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen bulk de la mezcla compactada. Y se determina por la siguiente ecuación.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \dots \dots \dots (3.6)$$

Donde:

VMA: Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk

Gsb: Gravedad específica bulk del agregado total

Gmb: Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

Ps: Contenido de agregado, porcentaje del peso total de la mezcla

Reemplazando en la ecuación (3.6), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$VMA = 100 - \frac{2.238 * (28.35 + 33.08 + 30.24 + 0.95 + 1.89)}{2.531}$$

$$VMA = 18.12\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.46.

Tabla N° 3. 46. Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)

VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL - MODIFICADO 2% ZEOLITA (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	18.12	17.96	17.75
6.0%	17.16	17.23	16.94
6.5%	16.89	16.84	16.70
7.0%	17.93	17.50	17.36
7.5%	18.43	18.45	18.27
8.0%	19.79	19.46	19.85

Fuente: Elaboración Propia

3.6.7 Porcentaje de Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada

El porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada puede determinarse usando:

$$Va = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \dots \dots \dots (3.7)$$

Donde:

Va: Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

Gmm: Gravedad especifica teórica máxima de la mezcla

Gmb: Gravedad especifica bulk de mezcla compactada

Reemplazando en la ecuación (3.7), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$Va = 100 * \frac{2.435 - 2.238}{2.435} = 8.1\%$$

$$Va = 8.1\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.47.

Tabla N° 3. 47. Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada (Va)

VACÍOS DE AIRE EN LA MEZCLA COMPACTADA - MODIFICADO 2% ZEOLITA (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	8.1	7.9	7.7
6.0%	6.2	6.3	5.9
6.5%	4.4	4.4	4.2
7.0%	2.7	2.2	2.1
7.5%	1.9	1.9	1.7
8.0%	2.5	2.1	2.6

Fuente: Elaboración Propia

3.6.8 Vacíos Llenos con Asfalto

Los vacíos llenos con asfalto (VFA o VLLCA), es el porcentaje de los vacíos entre partículas (VMA) que se llenan con asfalto. VFA, no incluye el asfalto absorbido, y se determina mediante la siguiente ecuación.

$$VFA = 100 * \frac{(VMA - V_a)}{VMA} \dots \dots \dots (3.8)$$

Donde:

VFA: Vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA

VMA: Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk

V_a: Vacíos de aire en mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Reemplazando en la ecuación (3.8), para un contenido de cemento asfáltico 5.5% (muestra M-1), se tiene:

$$VFA = 100 * \frac{18.12 - 8.1}{18.12} = 55.24\%$$

Similarmente se determina para los contenidos de asfalto 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%. Como se muestra en la Tabla N° 3.48.

Tabla N° 3. 48. Vacíos Llenos con Asfalto (VFA)

VACÍOS LLENOS CON ASFALTO - MODIFICADO 2% ZEOLITA (%)			
% Asfalto	M-1	M-2	M-3
5.5%	55.24	55.81	56.65
6.0%	63.96	63.63	64.95
6.5%	73.89	74.16	74.94
7.0%	84.73	87.26	88.13
7.5%	89.62	89.53	90.61
8.0%	87.19	89.04	86.86

Fuente: Elaboración Propia

3.6.9 Calculo del Contenido Óptimo de Asfalto Modificado

Se determina el contenido óptimo de asfalto de la mezcla, considerando el peso unitario, la estabilidad, y vacíos en la mezcla. De dichos cálculos se determina el porcentaje de asfalto óptimo.

$$P_b \text{ Optimo} = \frac{P_{b1} + P_{b2} + P_{b3}}{3} \dots \dots \dots (3.9)$$

Donde:

P_b Óptimo: Contenido óptimo de asfalto

P_{b1} : Porcentaje de asfalto óptimo de máxima estabilidad

P_{b2} : Porcentaje de asfalto óptimo de peso unitario

P_{b3} : Porcentaje de asfalto para un 3% de vacíos

Reemplazando en la ecuación (3.9), se tiene:

Óptimo de máxima estabilidad (P_{b1}): 6.5%

Óptimo de peso unitario (P_{b2}): 6.6%

Óptimo para un 3% de vacíos (P_{b3}): 6.8%

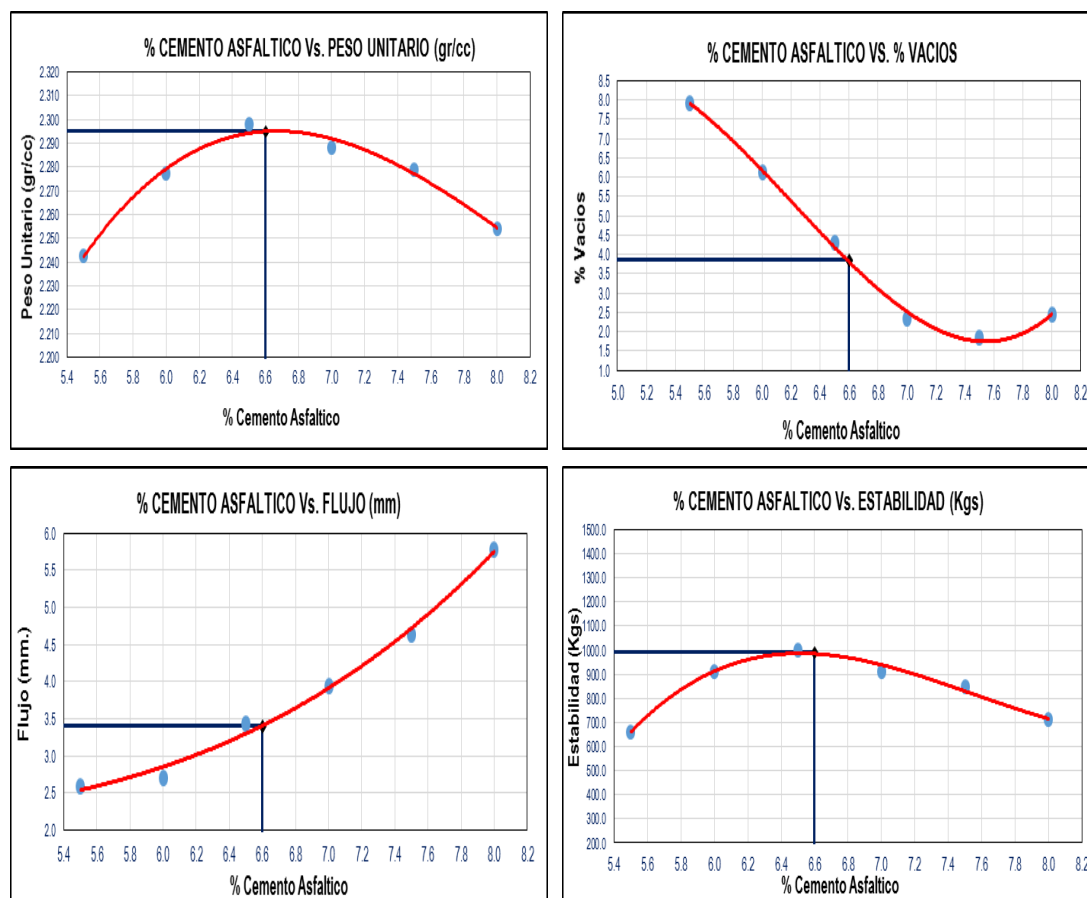
$$P_{b \text{ óptimo}} = \frac{6.5 + 6.6 + 6.8}{3} = 6.6 \%$$

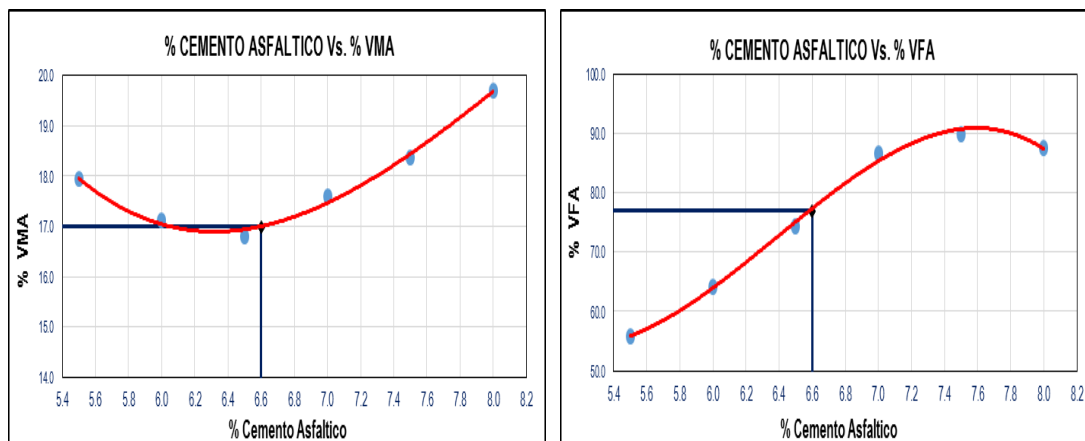
Óptima a usar: 6.6 %

NOTA: Todos los resultados obtenidos con los diferentes porcentajes de Zeolita (1% y 3%) y asfalto en base a los parámetros Marshall se muestran en Anexo C.

3.6.10 Gráficos de Ensayo Marshall

Figura N° 3. 32. Gráficos de Ensayo Marshall Modificado de 100°C





Fuente: Elaboración Propia

3.6.11 Resultado del Diseño de Mezcla Asfáltica Modificado (100°C – 2% Zeolita Natural)

Tabla N° 3. 49. Resultado del Diseño de Mezcla Asfáltica Modificado – 100°C – 2% Zeolita Natural

A. MEZCLA DE AGREGADOS (PROPORCIÓN EN PESO)		
A.1.	Piedra Chancada 1/2"	30.00%
A.2.	Arena Chancada 1/4"	35.00%
A.3.	Arena Zarandeada 3/8"	32.00%
A.4.	Filler Mineral (Cal)	1.00%
A.5.	Zeolita	2.00%
TOTAL:		100.00%

B. CEMENTO ASFÁLTICO		
B.1.	Tipo de Asfalto	PEN 120/150
B.2.	% Optimo de C.A.	6.6% +- 0.3

C. CARACTERÍSTICAS FÍSICO - MECÁNICAS				
	CARACTERÍSTICAS	DISEÑO	ESPECIFICACIÓN	EVALUACIÓN
C.1.	% Óptimo de Cemento asfáltico	6.6%		
C.2.	N° de Golpes en cada lado	75		
C.3.	Peso Unitario (gr/cm ³)	2.295		
C.4.	% Vacíos de aire	3.9	3 - 5 %	CUMPLE
C.5.	Flujo (mm)	3.4	2 - 3.5 mm	CUMPLE
C.6.	Estabilidad (Kgs.)	992.0	Min. 831 Kgf.	CUMPLE
C.7.	% V.M.A.	17.0	Min. 15 %	CUMPLE
C.8.	% V.F.A.	77.0	Max. 85 %	CUMPLE
C.9.	Índice de Rigidez (Kg/cm)	2950.30	1,700 - 4,000	CUMPLE

Fuente: Elaboración Propia

NOTA: Todos los resultados obtenidos con los diferentes porcentajes de Zeolita (1% y 3%) y asfalto en base a los parámetros Marshall se muestran en Anexo C.

3.7 Resistencia a la Compresión Simple

Con este ensayo se mide la resistencia a la compresión de mezclas bituminosas compactadas, mezclados, pesados y fabricados en laboratorio.

Tabla N° 3. 50. Resistencia a la Compresión Simple (140°C)

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND	M-1	M-2	M-3
1	Diámetro	cm.	10.10	10.10	10.10
2	Altura	cm.	5.96	6.17	6.05
3	Área	cm ² .	80.12	80.12	80.12
4	Carga Máxima	kg.	2858.00	2797.00	2883.00
5	Resistencia a la Compresión Simple	Kg/cm ² .	35.67	34.91	35.98
6	Promedio de Resistencia la Compresión Simple	Kg/cm ² .	35.52		
7	Promedio de Resistencia la Compresión Simple	MPa	3.48		

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 3. 51. Resistencia a la Compresión Simple (100°C)

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND	M-1	M-2	M-3
1	Diámetro	cm.	10.10	10.10	10.10
2	Altura	cm.	5.93	6.02	5.97
3	Área	cm ² .	80.12	80.12	80.12
4	Carga Máxima	kg.	1912.00	1924.00	1917.00
5	Resistencia a la Compresión Simple	Kg/cm ² .	23.86	24.01	23.93
6	Promedio de Resistencia la Compresión Simple	Kg/cm ² .	23.94		
7	Promedio de Resistencia la Compresión Simple	M/Pa	2.35		

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 3. 52. Resistencia a la Compresión Simple Modificado con 2% de Zeolita (100°C)

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND	M-1	M-2	M-3
1	Diámetro	cm.	10.10	10.10	10.10
2	Altura	cm.	6.04	5.97	5.89
3	Área	cm ² .	80.12	80.12	80.12
4	Carga Máxima	kg.	2262.00	2278.00	2259.00
5	Resistencia a la Compresión Simple	Kg/cm ² .	28.23	28.43	28.20
6	Promedio de Resistencia la Compresión Simple	Kg/cm ² .	28.29		
7	Promedio de Resistencia la Compresión Simple	M/Pa	2.77		

Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 3. 33. Lectura de la Resistencia a la Compresión Simple



Fuente: Fotografía Propia

3.8 Ensayo de la Tracción Indirecta

Este ensayo consiste en cargar una probeta cilíndrica, similar a la definida para el ensayo Marshall, con una carga de compresión diametral a lo largo de dos generatrices opuestas; el presente ensayo nos permite definir un parámetro capaz de caracterizar la mezcla bituminosa, optimizar en función del contenido de ligante, la cohesión de la mezcla y su resistencia al esfuerzo cortante. El parámetro a medir es la carga de rotura de la probeta. Como referencia normativa tenemos NLT – 346/90 (ensayo brasileño).

Con la siguiente formula se determina la resistencia a la tracción indirecta.

$$Rt = \frac{2 * P}{\pi * h * d} \dots \dots \dots (\alpha)$$

Donde:

Rt = Resistencia a la tracción indirecta (Kg.f /cm2)

P = carga Máxima de Rotura (Kg.f)

π = Constante 3.141592...

h = Altura de Probeta (mm.)

d = Diámetro de la Probeta (mm.)

Reemplazando a la ecuación α se tiene los resultados, donde se muestran en las tablas siguientes a continuación:

Tabla N° 3. 53. Tracción Indirecta Convencional (140°C)

DESCRIPCIÓN	UND	GRUPO: Seca			GRUPO: Sumergido		
		M-1	M-2	M-3	M-1	M-2	M-3
Diámetro	cm.	10.12	10.13	10.11	10.14	10.10	10.11
Altura	cm.	6.28	6.24	6.33	6.24	6.34	6.42
Carga Registrada	Kg.	1253.20	1302.10	1274.80	1146.20	1131.10	1153.40
Resistencia a la Compresión Diametral	Kg/Cm2	12.55	13.11	12.68	11.53	11.25	11.31
Promedio Resistencia a la Compresión Diametral	Kg/Cm2	12.78			11.36		
Resistencia Retenida	%	88.90%					

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 3. 54. Tracción Indirecta Convencional (100°C)

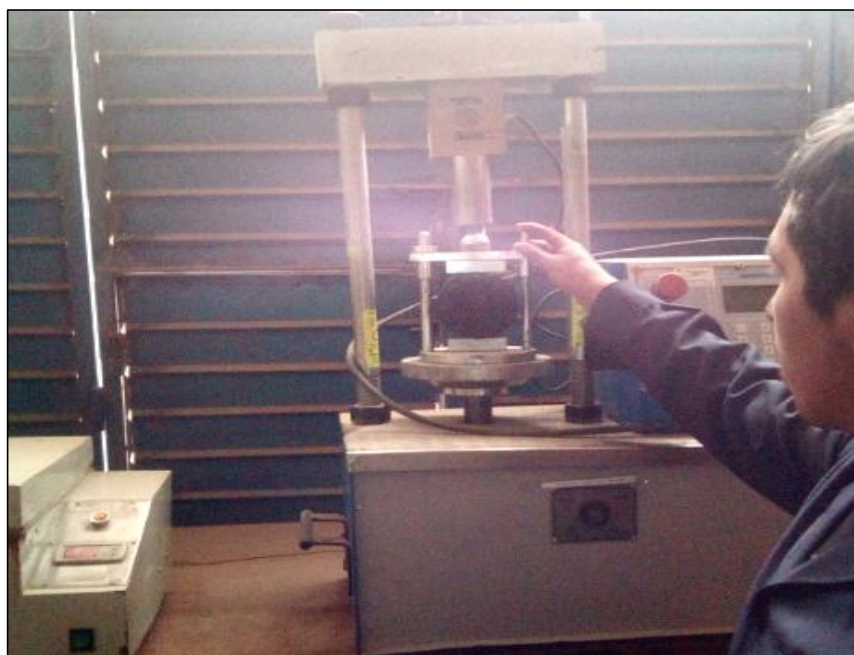
DESCRIPCIÓN	UND	GRUPO: Seca			GRUPO: Sumergido		
		M-1	M-2	M-3	M-1	M-2	M-3
Diámetro	cm.	10.17	10.14	10.10	10.13	10.16	10.14
Altura	cm.	5.98	6.10	6.42	6.08	6.10	6.40
Carga Registrada	Kg.	832.60	854.30	889.40	669.20	687.10	682.40
Resistencia a la Compresión Diametral	Kg/Cm2.	8.72	8.79	8.73	6.92	7.06	6.69
Promedio Resistencia a la Compresión Diametral	Kg/Cm2.	8.75			6.89		
Resistencia Retenida	%	78.77%					

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 3. 55. Tracción Indirecta Modificado con 2% de Zeolita (100°C)

DESCRIPCIÓN	UND	GRUPO: Seca			GRUPO: Sumergido		
		M-1	M-2	M-3	M-1	M-2	M-3
Diámetro	cm.	10.12	10.08	10.15	10.10	10.18	10.13
Altura	cm.	5.99	6.08	6.24	6.04	6.18	6.22
Carga Registrada	Kg.	998.80	979.80	982.20	843.30	830.90	851.70
Resistencia a la Compresión Diametral	Kg/Cm2.	10.49	10.18	9.87	8.80	8.41	8.61
Promedio Resistencia a la Compresión Diametral	Kg/Cm2.	10.18			8.60		
Resistencia Retenida	%	84.53%					

Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 3. 34. Rotura del Ensayo Tracción Indirecta

Fuente: Fotografía Propia

3.9 Análisis Estadístico

El análisis estadístico es de importancia en la evaluación de los resultados obtenidos por que nos permite tener una certeza de confiabilidad de los valores extraídos de las pruebas, y en función de los parámetros estadísticos poder evaluar los resultados.

3.9.1 Distribución “T” de Student²⁷

En muchas ocasiones no se conoce el desviación estándar poblacional (σ) y el número de observaciones en la muestra es menor de 30.

a. Usos para los cuales es idónea esta distribución:

- Para determinar el intervalo de confianza dentro del cual se puede estimar la media de una población a partir de muestras pequeñas ($n < 30$).
- Para probar la hipótesis cuan la investigación en un muestreo ´pequeño.
- Para probar si dos muestras provienen de una misma población.

b. Grado de libertad:

Existe una distribución “ t ” distinta para cada uno de los posibles grados de libertad, pues esta se puede definir como el número de valores elegir libremente.

²⁷ <https://es.slideshare.net/jab2801/t-de-student-para-dos-muestras-independientes>

c. Propiedades de las distribuciones t:

- Cada curva t tiene la forma de una campana con centro en 0.
- Cada curva t, está más dispersa que la curva normal estándar.
- A medida que k aumenta, la dispersión de la curva t correspondiente disminuye.
- A medida que $k > \alpha$, la secuencia de curvas t se aproxima a la curva normal estándar.

d. Calculo de la distribución t student:**La prueba de hipótesis para medias t de student ($n < 30$)**

Esta prueba de hipótesis para medias usando distribución t de student se usa cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- Es posible calcular las medias y la desviación estándar a partir de la muestra.
- El tamaño de la muestra es menor a 30.

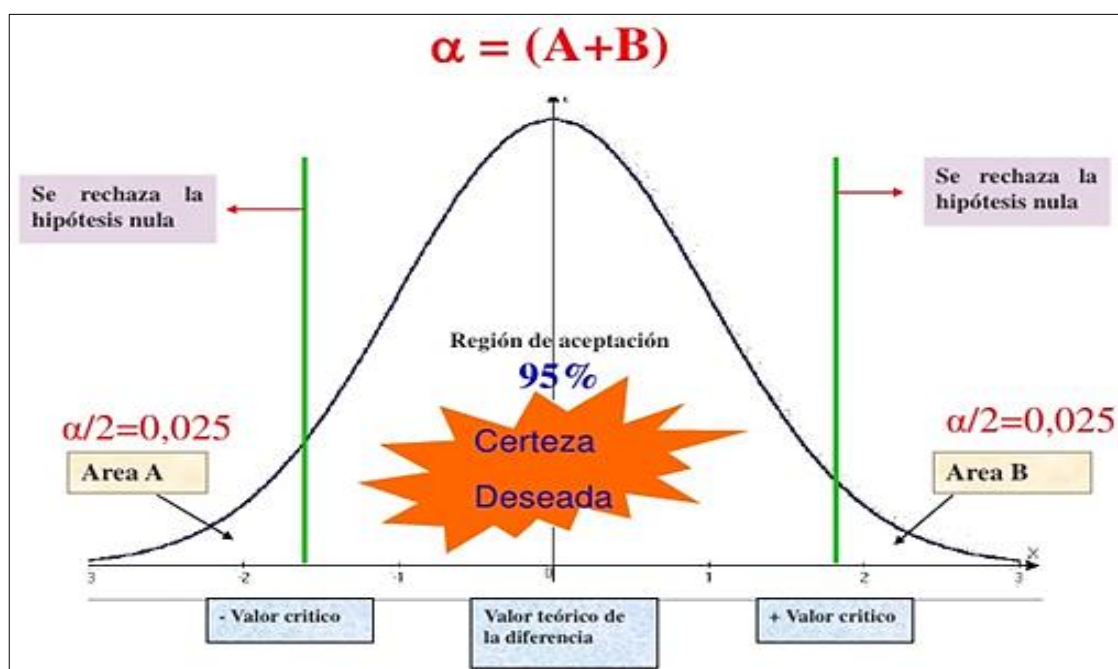
Pasos:

Plantear hipótesis nula (H_0) e hipótesis alternativa (H_1)

Determinar el nivel de significancia (α):

- 0.05 Para proyectos de investigación
- 0.01 Para aseguramiento de calidad
- 0.10 Para encuestas de mercadotecnia y políticas.

Figura N° 3. 35. Nivel de Significancia



Evidencia de muestra: Se calcula la media y desviación estándar a partir de la muestra.

La distribución *t* student se calculará por medio la siguiente formula:

$$t_c = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{S^2_p * \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}; \quad S^2_p = \frac{(n_1 - 1)S^2_1 + (n_2 - 1)S^2_2}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)}; \quad G.L. = n_1 + n_2 - 2$$

Donde:

t c: Estadística de prueba

$\bar{X}_1; \bar{X}_2$: Media muestral

$n_1; n_2$: Tamaño de las muestras

$S^2_1; S^2_2$: Varianza muestral

S^2_p : Varianza ponderada

G. L.: Grado de libertad

$t_{\alpha/2}$: Valor crítico (tabla)

α : Nivel de significancia

Prueba de hipótesis:

Planteamiento de hipótesis de contraste bilateral (dos colas): Vemos como el contraste de que las medias son iguales es equivalente al contraste de que la diferencia de medias vale cero:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (\mu_1 - \mu_2 = 0)$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (\mu_1 - \mu_2 \neq 0)$$

Donde:

H_0 : Hipótesis nula

H_1 : Hipótesis alternativa

Para lo cual se tiene las siguientes condiciones:

- Si $|t_c| > t_{\frac{\alpha}{2}; n_1 + n_2 - 2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1 .
- Si el cero (0) no se encuentra en su interior de intervalo de confianza IC entonces se concluye que $\mu_1 \neq \mu_2$ ($\mu_1 - \mu_2 \neq 0$).

$$IC = \left[\bar{X}_1 - \bar{X}_2 \pm t_{\alpha/2} \sqrt{S^2_p * \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)} \right]$$

CAPÍTULO IV

Resultados y Discusión

4.1 Pruebas Efectuadas a la Zeolita Natural

4.1.1 Reacción de la zeolita con asfalto caliente:

Se tomó una muestra de zeolita seca y una muestra de zeolita húmeda, para luego mezclarlo con el asfalto caliente, para ver la reacción durante la mezcla.

Figura N° 4. 1. Mezcla de zeolita húmeda, seca y asfalto



Fuente: Fotografía Propia

Al agregar la zeolita seca al asfalto caliente, este produjo un espumado o efervescencia no tan significativa y al agregar la zeolita húmeda al asfalto caliente se observó una espumación y expansión significativa.

Según el informe de los ensayos realizados en los Laboratorios Analíticos del Sur – Arequipa, de la zeolita natural procedente de la cantera, ubicado en la

comunidad de Paxa del distrito de Tiquillaca, provincia de Puno. Se obtuvieron los siguientes resultados de análisis de composición química, como se muestra en la Tabla N° 4.1. Dicho informe se adjunta en el anexo D.

De los resultados de la Tabla N° 4.1 concluimos que la composición química de Zeolita Natural, lo componen SiO_2 es de 69.96%, Al_2O_3 es de 17.15%, Fe_2O_3 es de 6.47%, K_2O es de 2.02%, Na_2O es de 1.86%, MgO es de 0.58%, LOI es de 0.31%, Mn_2O_3 es de 0.26%, Ca es de 0.20% y otros es 1.19%; lo que coincide a los valores de identificación de Zeolita Natural Clinoptilolita desarrollado por (Erdem, Karapinar y Donat, 2004) y (Abusafa y Yucel, 2002) como se muestran en las Tabla N° 1.1 y Tabla N° 1.2 respectivamente.

Por otra parte según la relación Silicio – Aluminio (Si/Al) de Zeolita Natural Clinoptilolita de la Tabla N° 2.2 se tiene un rango de aceptación 2.92 a 5.04. Por lo que para nuestra investigación de Zeolita Natural se tiene siguiente relación:

Porcentaje de Composición Química: $\text{SiO}_2 = 69.96\%$ y $\text{Al}_2\text{O}_3 = 17.15\%$

Peso atómico de los elementos (P.A): Si = 28.08 uma, Al = 26.98 uma y
O = 16 uma.

Peso molecular (\bar{M}):

$$\text{SiO}_2: \bar{M} = 1 \times 28.08 + 2 \times 16 = 60.08 \text{ uma}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3: \bar{M} = 2 \times 26.98 + 3 \times 16 = 101.96 \text{ uma}$$

$$\%Si = \frac{1 * 28.08}{60.08} * 100 * \frac{69.96}{100} = 32.70\%$$

$$\%Al = \frac{2 * 26.98}{101.96} * 100 * \frac{17.15}{100} = 9.08\%$$

$$Si/Al = \frac{32.70}{9.08} = 3.60$$

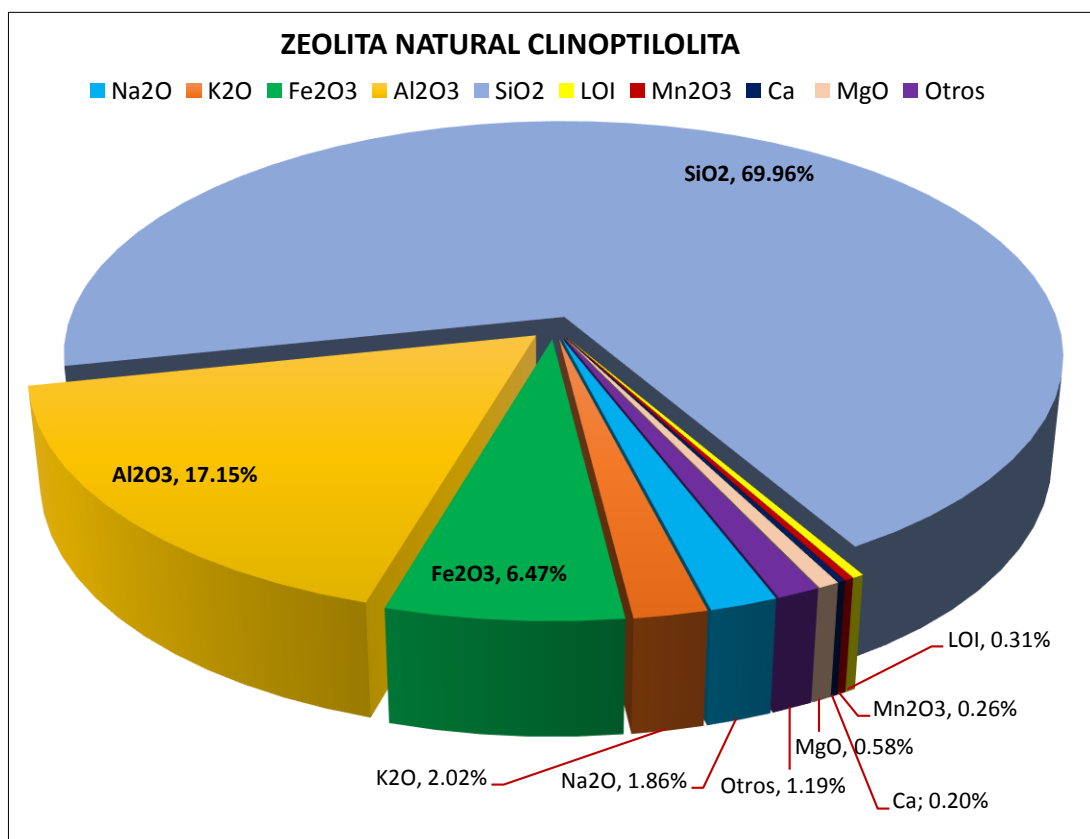
Por lo tanto, la relación Si/Al = 3.60 está entre los rangos de 2.92 y 5.04 de esto concluimos que la Zeolita Natural empleado en presente investigación es de tipo Clinoptilolita y según la Tabla N° 2.1 pertenece al grupo de las Heulanditas.

Tabla N° 4. 1. Composición Química de la Zeolita Natural Clinoptilolita

Composición Química	Porcentaje
SiO ₂	69.96%
Al ₂ O ₃	17.15%
Fe ₂ O ₃	6.47%
K ₂ O	2.02%
Na ₂ O	1.86%
MgO	0.58%
LOI	0.31%
Mn ₂ O ₃	0.26%
Ca	0.20%
Otros	1.19%

Fuente: Informe de ensayo, Laboratorios Analíticos del Sur – Arequipa

Figura N° 4. 2. Porcentaje de Composición Química de la Zeolita Natural Clinoptilolita



Fuente: Elaboración Propia

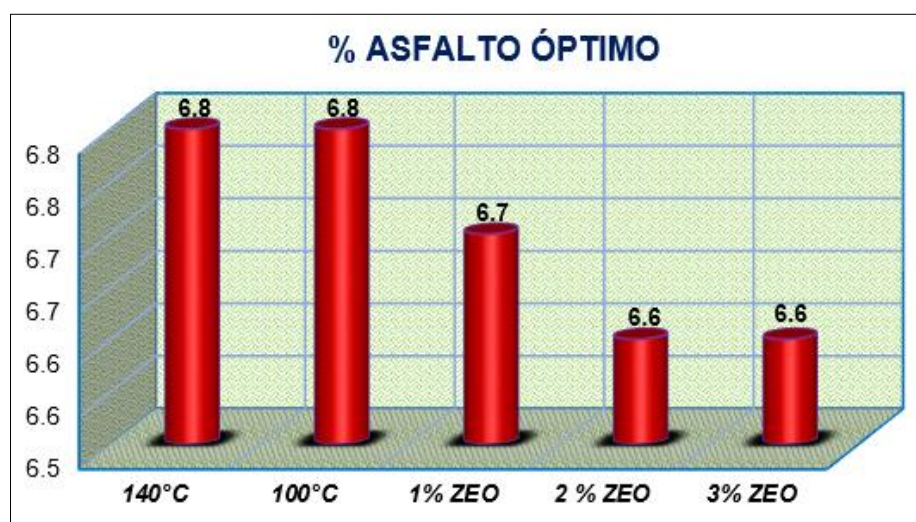
4.2 Resultados del Ensayo Marshall de las Mezclas

Del capítulo III se tiene los resultados de las características físicas mecánicas mediante la metodología de método Marshall para los asfaltos convencionales (140°C y 100°C) y asfaltos modificados con Zeolita Natural (1%, 2% y 3%).

4.2.1 Comparación del Contenido de Asfalto Óptimo

Según los gráficos de ensayo Marshall para asfalto convencional de 140°C y 100°C se determinó un contenido de asfalto óptimo de 6.8%, mientras que para asfalto modificado con zeolita natural de 1% se determinó un contenido de asfalto óptimo de 6.7%, similarmente con zeolita natural de 2% y 3% se obtuvieron un contenido de asfalto óptimo de 6.6%, como se muestra en la Figura N° 4.3.

Figura N° 4. 3. Comparación de Contenido de Asfalto Óptimo



Fuente: Elaboración Propia

4.2.2 Comparación de Pesos Unitarios

De los resultados del diseño de mezcla asfáltica convencional de 140°C es 2.288 gr/cm³ y de 100°C es 2.275 gr/cm³ y diseño de mezcla asfáltica modificado a 100°C de 1% de zeolita natural es 2.269 gr/cm³, 2% de zeolita natural es 2.295 gr/cm³ y de 3% de zeolita natural es 2.265 gr/cm³, como se muestra en la Figura N° 4.4.

Figura N° 4. 4. Comparación de Pesos Unitarios

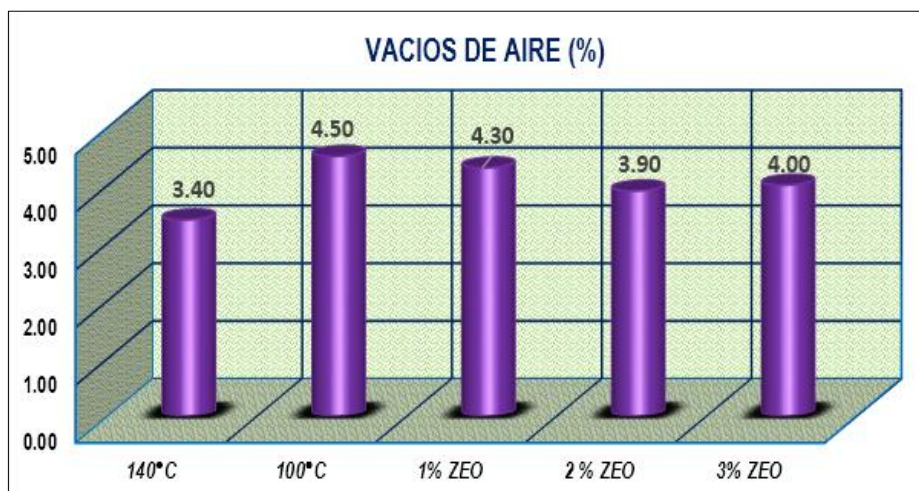


Fuente: Elaboración Propia

4.2.3 Comparación de Vacíos de Aire

De los resultados del diseño de mezcla asfáltica convencional de 140°C es 3.4% y de 100°C es 4.5% y diseño de mezcla asfáltica modificado a 100°C de 1% de zeolita natural es 4.3%, 2% de zeolita natural es 3.9% y de 3% de zeolita natural es 4.0%, como se muestra en la Figura N° 4.5.

Figura N° 4. 5. Comparación de Vacíos de Aire



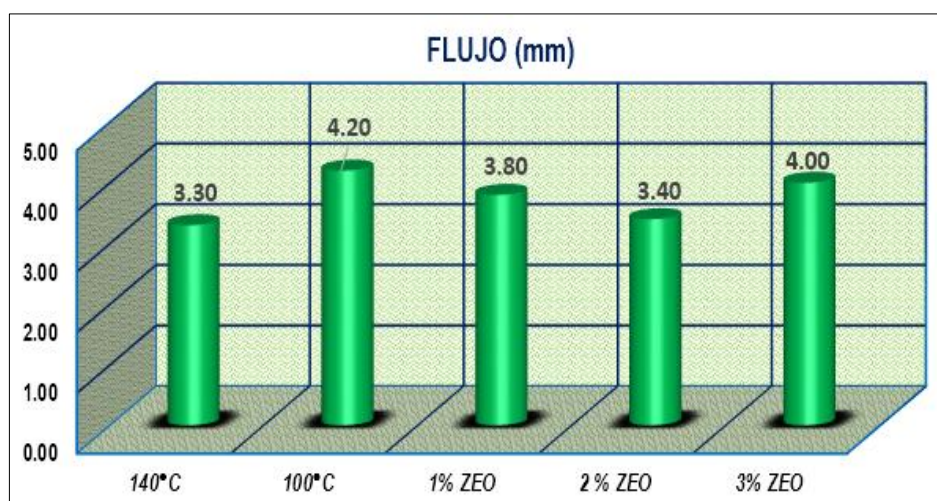
Fuente: Elaboración Propia

4.2.4 Comparación de Flujo

El flujo de los asfaltos convencional de 140°C es de 3.30 mm y de 100°C es 4.20 mm mientras de los asfaltos modificados con zeolita natural de 1% es de 3.80 mm, 2% es de 3.40 mm y de 3% es de 4.00 mm, siendo superior los asfaltos

modificados a convencional de 140°C e inferior de convencional 100°C, como se muestra en la Figura N° 4.6.

Figura N° 4. 6. Comparación de Flujo



Fuente: Elaboración Propia

4.2.5 Comparación de Estabilidad

La estabilidad de los convencionales de 140°C es de 1016.00 kg y de 100°C es 810.00 kg mientras de los asfaltos modificados a 100°C de 1% es 868.00 kg, de 2% es de 992.00 kg y de 3% es de 821.00 kg, siendo superior convencional de 140°C a los demás asfaltos modificados y convencional de 100°C, por lo que aporta mayor estabilidad a la deformación, como se muestra en la Figura N° 4.7.

Figura N° 4. 7. Comparación de Estabilidad



Fuente: Elaboración Propia

4.2.6 Comparación de Vacíos en el Agregado Mineral

De los resultados del diseño de mezcla asfáltica convencional de 140°C es 15.80% y de 100°C es 16.30% y diseño de mezcla asfáltica modificado a 100°C de 1% de zeolita natural es 17.30%, 2% de zeolita natural es 17.00% y de 3% de zeolita natural es 19.20%, como se muestra en la Figura N° 4.8.

Figura N° 4. 8. Comparación de VMA

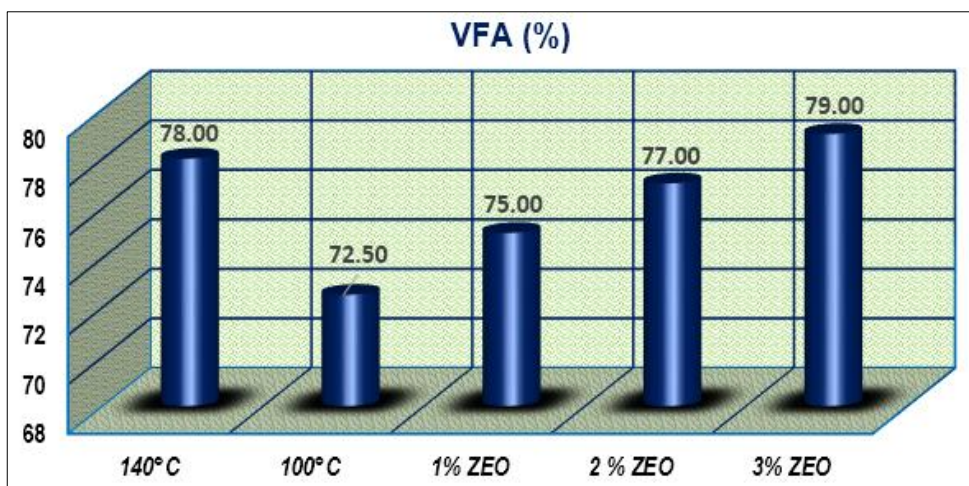


Fuente: Elaboración Propia

4.2.7 Comparación de Vacíos Llenos con Asfalto

Los vacíos llenados con cemento asfáltico convencional a 140°C es 78.0% y de 100°C es 72.5%, en caso de asfaltos modificados con zeolita natural a 100° de 1% es 75.0%, de 2% es 77.0% y de 3% es 79.0%, como se indica en la Figura N° 4.9.

Figura N° 4. 9. Comparación de VFA

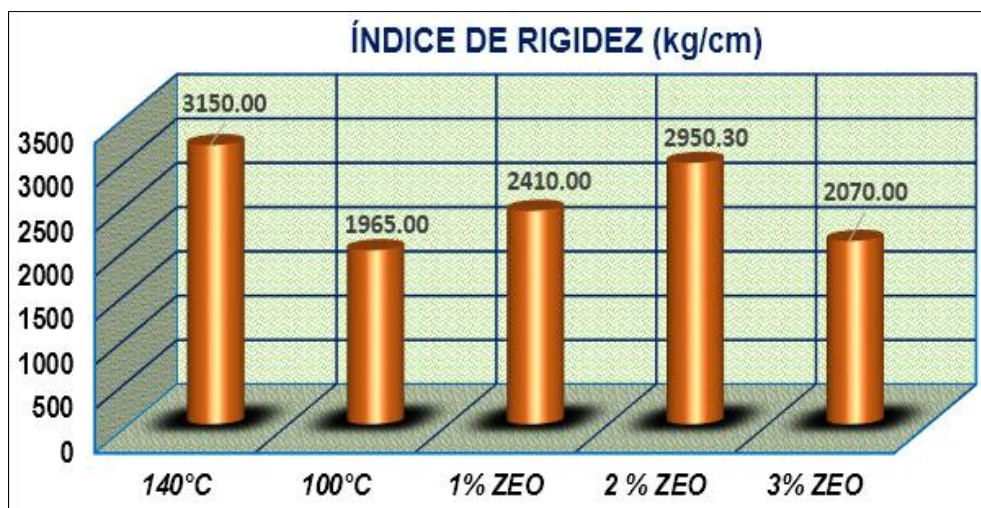


Fuente: Elaboración Propia

4.2.8 Comparación de Índice de Rigidez

La relación estabilidad flujo o rigidez de las mezclas convencionales de 140°C es 3150.00 kg/cm y de 100°C es de 1965.00 kg/cm, mientras de mezclas modificados con zeolita natural a 100°C de 1% es de 2410.00 kg/cm, 2% es de 2950.30 kg/cm y de 3% es 2070.00 kg/cm, como se muestra en la Figura N° 4.10.

Figura N° 4. 10. Comparación de Índice de Rigidez



Fuente: Elaboración Propia

4.3 Contrastación de Hipótesis

4.3.1 Contrastación de Hipótesis General

“La aplicación de zeolita mejora el comportamiento del diseño de mezcla asfáltica tibia, además permite beneficios ambientales y económicos frente a las mezclas asfálticas convencionales para la pavimentación de la ciudad de Juliaca”

Para contrastar el Hipótesis General se usará el modelo estadístico *t* Student para dos muestras independientes uno es diseño de mezcla asfáltica convencional (140°C y 100°C) y la otra es diseño de mezcla asfáltica modificado con 2% de zeolita natural a partir de muestras pequeñas menores a 30, con un nivel de significancia de 0.05 (nivel de confiabilidad 95%).

Planteamiento de hipótesis de contraste bilateral (dos colas): Vemos como el contraste de que las medias son iguales es equivalente al contraste de que la diferencia de medias vale cero:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (\mu_1 - \mu_2 = 0)$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (\mu_1 - \mu_2 \neq 0)$$

Donde:

H_0 : Hipótesis nula

H_1 : Hipótesis alternativa

Para lo cual se tiene las siguientes condiciones:

- Si $|t_c| > t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_2-2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1 .
- Si el cero (0) no se encuentra en su interior de intervalo de confianza IC entonces se concluye que $\mu_1 \neq \mu_2$ ($\mu_1 - \mu_2 \neq 0$).

$$IC = \left[\bar{X}_1 - \bar{X}_2 \pm t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_2-2} * S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

Comparación de los resultados de Ensayo Marshall, para contenido óptimo de asfalto de 6.8% de diseño de mezcla asfáltica a temperatura de 140°C y de 100°C, también para diseño de mezcla modificado con zeolita natural de 2% y 6.6% de contenido óptimo de asfalto para 100°C, la cantidad de especímenes que fueron elaborados es de tres con 75 golpes a cada lado (para tráfico pesado) como se muestra en la Tabla siguiente.

Tabla N° 4. 2. Resultados de Ensayo Marshall

N°	RESULTADO DE ENSAYO MARSHALL			
	CARACTERISTICAS	CONV. 140°C	CONV. 100°C	MOD. 100°C - 2% ZEO
1	% Óptimo de Cemento asfáltico	6.8	6.8	6.6
2	N° de Golpes en cada lado	75	75	75
3	Peso Unitario (gr/cm3)	2.282	2.270	2.298
4	% Vacíos de aire	3.6	4.6	4.1
5	Flujo (mm)	3.28	4.11	3.38
6	Estabilidad (Kgs.)	1018.5	813.0	993.3
7	% V.M.A.	16.0	16.5	16.9
8	% V.F.A.	77.8	71.9	75.9
9	Índice de Rigidez (Kg/cm)	3109.86	1984.16	2935.99

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2 Contrastación de Hipótesis Específicos

4.3.2.1 Hipótesis Específica 01

“La adición de zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia mejora las propiedades mecánicas, frente a las mezclas asfálticas convencionales”

Para contrastar estadísticamente hipótesis específica se utiliza Análisis de *t* Student con contraste bilateral, para diseño de mezcla asfáltica convencional (140°C y 100°C) y modificado con zeolita natural de 2% a temperatura de 100°C.

La **estabilidad** para el diseño de Mezcla Asfáltica Convencional de 140°C es de 1018.50 Kg y del Convencional a 100°C es de 813.00 kg, mientras que de la mezcla modificada con zeolita de 2% a 100°C es de 993.3 Kg; lo cual esta mezcla modificada con zeolita de 2% es parcialmente inferior a la mezcla convencional de 140°C en 25.20 Kg que equivale a 2.47%; y a su vez esta mezcla modificado con 2% de zeolita es superior a la mezcla convencional de 100°C en 180.3 Kg que equivale a 22.18%. Por lo que la *estabilidad* de la mezcla convencional de 140°C es mayor que la mezcla modificada con 2% de zeolita y esta es mayor que la mezcla convencional de 100°C. En cuanto a las especificaciones la *estabilidad* de la mezcla convencional de 140°C y la mezcla modificada con zeolita de 2% cumplen, mientras que la mezcla convencional de 100°C no cumple; (Estabilidad: Min. 831 Kg.f ; EG - 2013), en la siguiente Figura N° 4.11 se muestra la comparación de la *estabilidad* de la tres mezclas.

Figura N° 4. 11. Comparación de Estabilidad para Óptimo de asfalto



Fuente: Elaboración Propia

Análisis de *t* Student para **estabilidad** de diseño de mezcla asfáltica **convencional de 140°C y modificado con zeolita natural de 2%** a temperatura de 100°C.

H_0 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; no existe diferencia significativa entre las dos medias de estabilidad, frente a la mezcla asfáltica convencional 140°C.

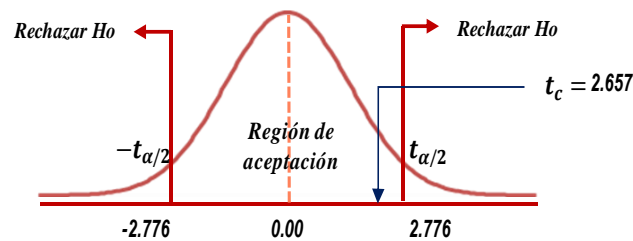
H_1 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; existe diferencia significativa entre las dos medias de estabilidad, frente a la mezcla asfálticas convencional 140°C.

Tabla N° 4. 3. Análisis de *t* Student para Estabilidad Convencional 140°C y modificado 2% Zeolita Natural

ESTABILIDAD (kgs)					
N° de Muestras	Convencional de 140°C (Xi)	Modificado 2% Zeolita (Yi)	$(X_i - \bar{X})^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Contraste Bilateral
1	1019.10	1008.30	0.321	226.001	Dos Colas
2	1008.20	985.00	106.778	68.338	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
3	1028.30	986.50	95.388	45.788	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$
<p>Condición: Si $|t_c| > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1</p>					

Tamaño de Muestra Convencional: $n_1 =$	3	Tamaño de Muestra Modificado: $n_2 =$	3
Media Muestral Convencional: $\bar{X}_1 =$	1018.53	Media Muestral Modificado: $\bar{Y}_2 =$	993.27
Varianza Muestral Convencional: $S_1^2 =$	101.243	Varianza Muestral Modificado: $S_2^2 =$	170.063
Desviación Estándar Convencional: $S_1 =$	10.062	Desviación Estándar Modificado: $S_2 =$	13.041
Varianza Ponderada: $S_p^2 =$	135.653		
Desviación Estándar: $S_p =$	11.647		
Estadístico de Prueba: $t_c =$	2.657		
Grados de Libertad: $gl=df=$	4		
Nivel de Significancia al 95%: $\alpha =$	0.05		
Valor Crítico de Tabla (Dos Colas): $t_{\alpha/2} =$	2.776		

Decisión y Conclusión: Como $|t_c| = 2.657 < t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} = t_{0.025;4} = 2.776$ entonces se acepta H_0 , esto es, no existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.



También se podría haber considerado un intervalo de confianza, dado que el contraste es bilateral y ver si el 0 se encuentra en su interior de intervalo:

$$\left[\bar{X}_1 - \bar{Y}_2 \pm t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} * S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

Intervalo de Confianza: $IC = [-1.13 ; 51.67]$

Decisión y Conclusión: Como 0 pertenece a IC entonces se concluye con 95% que $\mu_1 = \mu_2$.

Por lo que no se acepta hipótesis alternativo H_1 .

Análisis de *t* Student para **estabilidad** de diseño de mezcla asfáltica convencional de 100°C y modificado con zeolita natural de 2% a temperatura de 100°C.

H_0 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; no existe diferencia significativa entre las dos medias de estabilidad, frente a la mezcla asfáltica convencional 100°C.

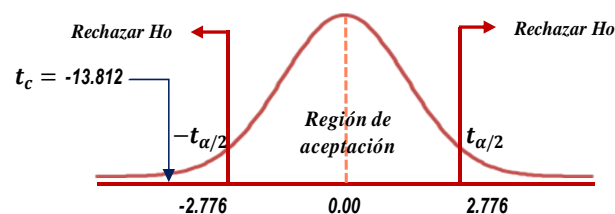
H_1 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; existe diferencia significativa entre las dos medias de estabilidad, frente a la mezcla asfálticas convencional 100°C.

Tabla N° 4. 4. Análisis de T Student Para Estabilidad Convencional de 100°C y Modificado 2% Zeolita Natural

ESTABILIDAD (kgs)					
N° de Muestras	Convencional de 100°C (Xi)	Modificado 2% Zeolita (Yi)	$(X_i - \bar{X})^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Contraste Bilateral
1	832.30	1008.30	372.490	226.001	Dos Colas
2	795.50	985.00	306.250	68.338	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
3	811.20	986.50	3.240	45.788	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$
<p>Condición: Si $|t_c| > t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1</p>					

Tamaño de Muestra Convencional:	$n_1 = 3$	Tamaño de Muestra Modificado:	$n_2 = 3$
Media Muestral Convencional:	$\bar{X}_1 = 813.00$	Media Muestral Modificado:	$\bar{Y}_2 = 993.27$
Varianza Muestral Convencional:	$S_1^2 = 340.990$	Varianza Muestral Modificado:	$S_2^2 = 170.063$
Desviación Estándar Convencional:	$S_1 = 18.466$	Desviación Estándar Modificado:	$S_2 = 13.041$
Varianza Ponderada:	$S_p^2 = 255.527$		
Desviación Estándar:	$S_p = 15.985$		
Estadístico de Prueba:	$t_c = -13.812$		
Grados de Libertad:	$gl=df= 4$		
Nivel de Significancia al 95%:	$\alpha = 0.05$		
Valor Crítico de Tabla (Dos Colas):	$t_{\alpha/2} = 2.776$		

Decisión y Conclusión: Como $|t_c| = 13.812 > t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} = t_{0.025; 4} = 2.776$ entonces no se acepta H_0 esto es, existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.



También se podría haber considerado un intervalo de confianza, dado que el contraste es bilateral y ver si el 0 se encuentra en su interior de intervalo:

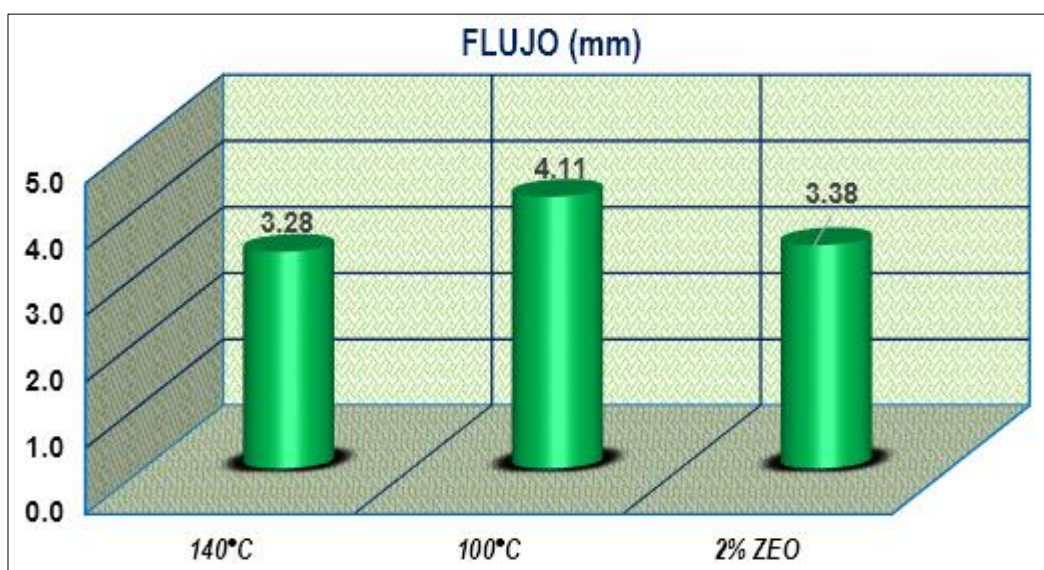
$$\left[\bar{X}_1 - \bar{Y}_2 \pm t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} * S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

Intervalo de Confianza: $IC = [-216 ; -144]$

Decisión y Conclusión: Como 0 no pertenece a IC entonces se concluye con 95% que $\mu_1 \neq \mu_2$. Por lo que se acepta hipótesis alternativo H_1 .

El **Flujo** para el diseño de Mezcla Asfáltica Convencional de 140°C es de 3.28 mm y del Convencional a 100°C es de 4.11 mm., mientras que de la mezcla modificada con zeolita de 2% es de 3.38 mm; lo cual esta mezcla modificada con zeolita de 2% es parcialmente superior al convencional de 140°C en 0.10 mm que equivale a 3.05%; y a su vez esta mezcla modificado con 2% de zeolita es inferior a la mezcla convencional de 100°C en 0.73 mm que equivale a 17.76%. Por lo que el *flujo* de la mezcla convencional de 140°C es menor que la mezcla modificada con 2% de zeolita y esta es menor que la mezcla convencional de 100°C. En cuanto a las especificaciones el *flujo* de la mezcla convencional de 140°C y la mezcla modificada con zeolita de 2% si cumplen, mientras que la mezcla convencional de 100°C no cumple; (Flujo: 2 – 3.5 mm.; EG - 2013), en la siguiente Figura N° 4.12 se muestra la comparación del flujo de las tres mezclas.

Figura N° 4. 12. Comparación de Flujo Para Óptimo de Asfalto



Fuente: Elaboración Propia

Análisis de *t* Student para **flujo** de diseño de mezcla asfáltica convencional de 140°C y modificado con zeolita natural de 2% a temperatura de 100°C.

H_0 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; no existe diferencia significativa entre las dos medias de flujo, frente a la mezcla asfáltica convencional 140°C.

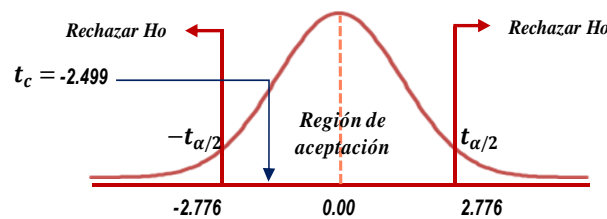
H_1 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; existe diferencia significativa entre las dos medias de flujo, frente a la mezcla asfálticas convencional 140°C.

Tabla N° 4. 5. Análisis de *t* Student Para Flujo Convencional de 140°C y Modificado 2% Zeolita Natural

FLUJO (mm)					
N° de Muestras	Convencional de 140°C (Xi)	Modificado 2% Zeolita (Yi)	$(X_i - X)^2$	$(Y_i - Y)^2$	Contraste Bilateral
1	3.29	3.36	0.000	0.001	Dos Colas
2	3.34	3.40	0.004	0.000	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
3	3.20	3.39	0.006	0.000	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$
<p>Condición: Si $|t_c| > t_{\alpha/2, n_1+n_1-2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1</p>					

Tamaño de Muestra Convencional:	$n_1 = 3$	Tamaño de Muestra Modificado:	$n_2 = 3$
Media Muestral Convencional:	$\bar{X}_1 = 3.28$	Media Muestral Modificado:	$\bar{Y}_2 = 3.38$
Varianza Muestral Convencional:	$S_1^2 = 0.005$	Varianza Muestral Modificado:	$S_2^2 = 0.000$
Desviación Estándar Convencional:	$S_1 = 0.071$	Desviación Estándar Modificado:	$S_2 = 0.021$
Varianza Ponderada:	$S_p^2 = 0.003$		
Desviación Estándar:	$S_p = 0.052$		
Estadístico de Prueba:	$t_c = -2.499$		
Grados de Libertad:	$gl=df= 4$		
Nivel de Significancia al 95%:	$\alpha = 0.05$		
Valor Crítico de Tabla (Dos Colas):	$t_{\alpha/2} = 2.776$		

Decisión y Conclusión: Como $|t_c| = 2.499 < t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} = t_{0.025,4} = 2.776$ entonces se acepta H_0 , esto es, no existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.



También se podría haber considerado un intervalo de confianza, dado que el contraste es bilateral y ver si el 0 se encuentra en su interior de intervalo:

$$\left[\bar{X}_1 - \bar{Y}_2 \pm t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} * S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

Intervalo de Confianza: $IC = [-0.23 ; 0.012]$

Decisión y Conclusión: Como 0 pertenece a IC entonces se concluye con 95% que $\mu_1 = \mu_2$. Por lo que no se acepta hipótesis alternativo H_1 .

Análisis de t Student para **flujo** de diseño de mezcla asfáltica **convencional de 100°C y modificado con zeolita natural de 2%** a temperatura de 100°C.

H_0 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; no existe diferencia significativa entre las dos medias de flujo, frente a la mezcla asfáltica convencional 100°C.

H_1 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; existe diferencia significativa entre las dos medias de flujo, frente a la mezclas asfálticas convencional 100°C.

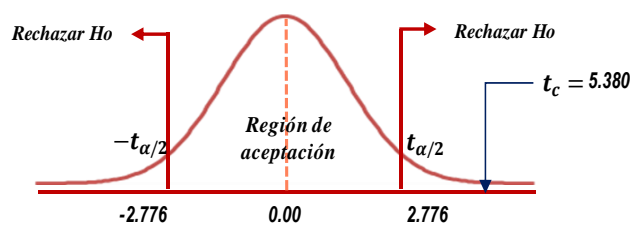
Tabla N° 4. 6. Análisis de T Student Para Flujo Convencional de 100°C y Modificado 2% Zeolita Natural

FLUJO (mm)					
N° de Muestras	Convencional de 100°C (Xi)	Modificado 2% Zeolita (Yi)	$(X_i - \bar{X})^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Contraste Bilateral
1	3.85	3.36	0.068	0.001	Dos Colas
2	4.30	3.40	0.036	0.000	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
3	4.18	3.39	0.005	0.000	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

Condición: Si $|t_c| > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1

Tamaño de Muestra Convencional:	$n_1 = 3$	Tamaño de Muestra Modificado:	$n_2 = 3$
Media Muestral Convencional:	$\bar{X}_1 = 4.11$	Media Muestral Modificado:	$\bar{Y}_2 = 3.38$
Varianza Muestral Convencional:	$S_1^2 = 0.054$	Varianza Muestral Modificado:	$S_2^2 = 0.000$
Desviación Estándar Convencional:	$S_1 = 0.233$	Desviación Estándar Modificado:	$S_2 = 0.021$
Varianza Ponderada:	$S_p^2 = 0.027$		
Desviación Estándar:	$S_p = 0.165$		
Estadístico de Prueba:	$t_c = 5.380$		
Grados de Libertad:	$gl=df= 4$		
Nivel de Significancia al 95%:	$\alpha = 0.05$		
Valor Crítico de Tabla (Dos Colas):	$t_{\alpha/2} = 2.776$		

Decisión y Conclusión: Como $|t_c| = 5.380 > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2} = t_{0.025;4} = 2.776$ entonces no se acepta H_0 esto es, existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.



También se podría haber considerado un intervalo de confianza, dado que el contraste es bilateral y ver si el 0 se encuentra en su interior de intervalo:

$$\left[\bar{X}_1 - \bar{Y}_2 \pm t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2} * S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

Intervalo de Confianza: $IC = [0.352; 1.102]$

Decisión y Conclusión: Como 0 no pertenece a IC entonces se concluye con 95% que $\mu_1 \neq \mu_2$. Por lo que se acepta hipótesis alternativo H_1 .

La **Resistencia a la Compresión Simple** para el diseño de mezcla asfáltica convencional de 140°C es de 35.52 Kg/cm² y del convencional a 100°C es de 23.94 Kg/cm², mientras que de la mezcla modificada con zeolita de 2% es de 28.29 Kg/cm²; lo cual esta mezcla modificada con zeolita de 2% es parcialmente inferior al convencional de 140°C en 7.23 Kg/cm² que equivale a 20.35%; y a su vez esta mezcla modificado con 2% de zeolita es superior a la mezcla convencional de 100°C en 4.35 Kg/cm² que equivale a 18.17%. Por lo que la **Resistencia a la Compresión Simple** de la mezcla convencional de 140°C es mayor que la mezcla modificada con 2% de zeolita y esta es mayor que la mezcla convencional de 100°C. En cuanto a las especificaciones la **Resistencia a la Compresión Simple** de la mezcla convencional de 140°C, mezcla convencional de 100°C y la mezcla modificada con zeolita de 2% si cumplen; (Resistencia a la Compresión Simple: Min. 2.12 Mpa.; EG - 2013), en la siguiente Figura N° 4.13 se muestra la comparación de la Resistencia a la Compresión Simple de las tres mezclas.

Figura N° 4. 13. Comparación de Resistencia a la Compresión Simple Para Óptimo de Asfalto



Fuente: Elaboración Propia

Análisis de *t* Student para **resistencia a la compresión simple** de diseño de mezcla asfáltica **convencional de 140°C y modificado con zeolita natural de 2%** a temperatura de 100°C.

H_0 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; no existe diferencia significativa entre las dos medias de resistencia a la compresión simple, frente a la mezcla asfáltica convencional 140°C.

H_1 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; existe diferencia significativa entre las dos medias de resistencia a la compresión simple, frente a la mezcla asfáltica convencional 140°C.

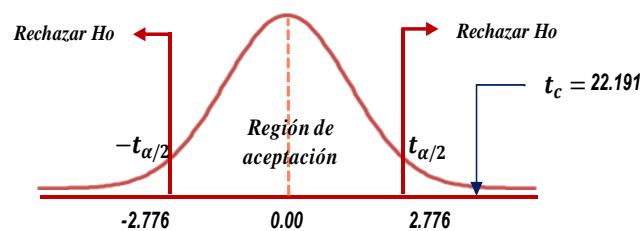
Tabla N° 4. 7. Análisis de T Student Para Resistencia a la Compresión Simple Convencional de 140°C y Modificado 2% Zeolita Natural

RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (kg/cm2)					
N° de Muestras	Convencional de 140°C (Xi)	Modificado 2% Zeolita (Yi)	$(X_i - \bar{X})^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Contraste Bilateral
1	35.67	28.23	0.022	0.003	Dos Colas
2	34.91	28.43	0.372	0.021	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
3	35.98	28.20	0.212	0.008	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

Condición: Si $|t_c| > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1

Tamaño de Muestra Convencional: $n_1 = 3$	Tamaño de Muestra Modificado: $n_2 = 3$
Media Muestral Convencional: $\bar{X}_1 = 35.52$	Media Muestral Modificado: $\bar{Y}_2 = 28.29$
Varianza Muestral Convencional: $S_1^2 = 0.303$	Varianza Muestral Modificado: $S_2^2 = 0.016$
Desviación Estándar Convencional: $S_1 = 0.551$	Desviación Estándar Modificado: $S_2 = 0.125$
Varianza Ponderada: $S_p^2 = 0.159$	
Desviación Estándar: $S_p = 0.399$	
Estadístico de Prueba: $t_c = 22.191$	
Grados de Libertad: $gl=df= 4$	
Nivel de Significancia al 95%: $\alpha = 0.05$	
Valor Crítico de Tabla (Dos Colas): $t_{\alpha/2} = 2.776$	

Decisión y Conclusión: Como $|t_c| = 22.191 > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2} = t_{0.025,4} = 2.776$ entonces se rechaza H_0 esto es, existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.



Tambien se podría haber considerado un intervalo de confianza, dado que el contraste es bilateral y ver si el 0 se encuentra en su interior de intervalo:

$$\left[\bar{X}_1 - \bar{Y}_2 \pm t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2} * S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

Intervalo de Confianza: IC = [6.328 ; 8.138]

Decisión y Conclusión: Como 0 no pertenece a IC entonces se concluye con 95% que $\mu_1 \neq \mu_2$.

Por lo que se acepta hipótesis alternativo H_1 .

Análisis de *t* Student para **resistencia a la compresión simple** de diseño de mezcla asfáltica **convencional de 100°C y modificado con zeolita natural de 2%** a temperatura de 100°C.

H_0 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; no existe diferencia significativa entre las dos medias de resistencia a la compresión simple, frente a la mezcla asfáltica convencional 100°C.

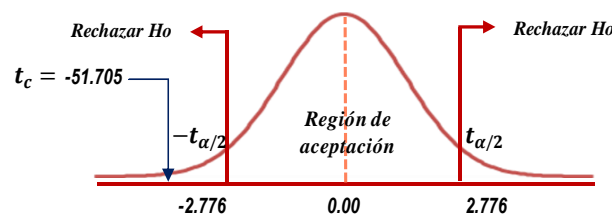
H_1 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; existe diferencia significativa entre las dos medias de resistencia a la compresión simple, frente a la mezcla asfáltica convencional 100°C.

Tabla N° 4. 8. Análisis de T Student Para Resistencia a la Compresión Simple Convencional de 100°C y Modificado 2% Zeolita Natural

RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (kg/cm2)					
N° de Muestras	Convencional de 100°C (Xi)	Modificado 2% Zeolita (Yi)	$(X_i - \bar{X})^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Contraste Bilateral
1	23.86	28.23	0.005	0.003	Dos Colas
2	24.01	28.43	0.006	0.021	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
3	23.93	28.20	0.000	0.008	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$
Condición: Si $|t_c| > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1					

Tamaño de Muestra Convencional:	$n_1 = 3$	Tamaño de Muestra Modificado:	$n_2 = 3$
Media Muestral Convencional:	$\bar{X}_1 = 23.93$	Media Muestral Modificado:	$\bar{Y}_2 = 28.29$
Varianza Muestral Convencional:	$S_1^2 = 0.006$	Varianza Muestral Modificado:	$S_2^2 = 0.016$
Desviación Estándar Convencional:	$S_1 = 0.075$	Desviación Estándar Modificado:	$S_2 = 0.125$
Varianza Ponderada:	$S_p^2 = 0.011$		
Desviación Estándar:	$S_p = 0.103$		
Estadístico de Prueba:	$t_c = -51.705$		
Grados de Libertad:	$gl=df= 4$		
Nivel de Significancia al 95%:	$\alpha = 0.05$		
Valor Crítico de Tabla (Dos Colas):	$t_{\alpha/2} = 2.776$		

Decisión y Conclusión: Como $|t_c| = 51.705 > t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} = t_{0.025; 4} = 2.776$ entonces no se acepta H_0 esto es, existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.



También se podría haber considerado un intervalo de confianza, dado que el contraste es bilateral y ver si el 0 se encuentra en su interior de intervalo:

$$\left[\bar{X}_1 - \bar{Y}_2 \pm t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} * S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

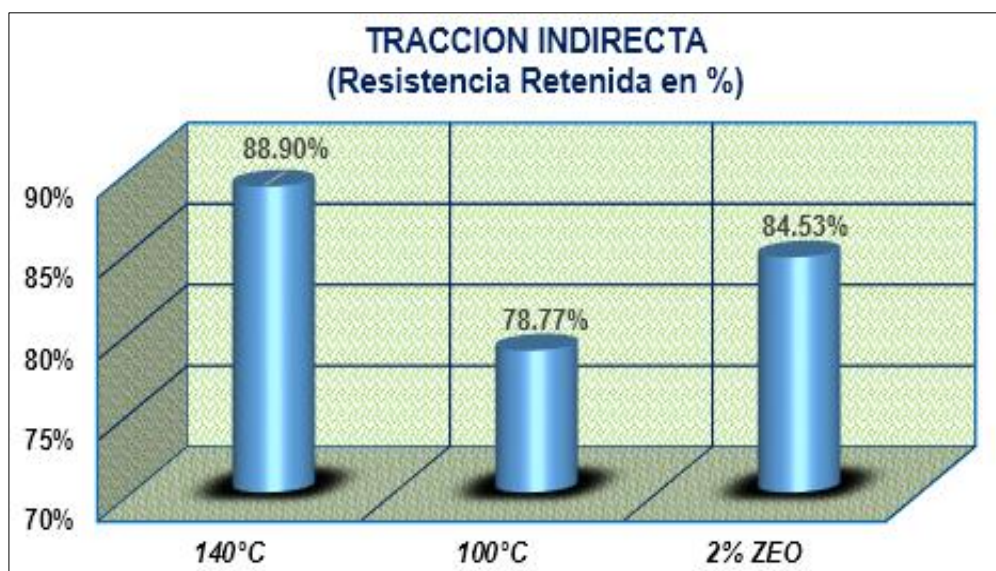
Intervalo de Confianza: $IC = [-4.59 ; -4.12]$

Decisión y Conclusión: Como 0 no pertenece a IC entonces se concluye con 95% que $u_1 \neq u_2$. Por lo que se acepta hipótesis alternativo H_1 .

El ensayo de **Tracción Indirecta** para el diseño de mezcla asfáltica convencional de 140°C su resistencia retenida es de 88.90% y la resistencia retenida del convencional a 100°C es de 78.77%, mientras que de la mezcla modificada con zeolita de 2% su resistencia retenida es de 84.53%; lo cual esta mezcla modificada con zeolita de 2% es parcialmente inferior al convencional de 140°C en 4.37%; y a su vez esta mezcla modificado con 2% de zeolita es superior a la mezcla convencional de 100°C en 5.76%. Por lo que en el de **Tracción Indirecta** de la mezcla convencional de 140°C su resistencia retenida es mayor que la mezcla modificada con 2% de zeolita y esta es mayor que la mezcla convencional de 100°C. En cuanto a las especificaciones del ensayo de **tracción indirecta** la mezcla convencional de 140°C y la mezcla modificada con zeolita de

2% si cumplen, mientras que la mezcla convencional de 100°C no cumple; (Tracción Indirecta: Resistencia Retenida Min. 80%; EG - 2013), en la siguiente Figura N° 4.14 se muestra la comparación del ensayo de tracción indirecta de las tres mezclas.

Figura N° 4. 14. Comparación de Tracción Indirecta Para Óptimo de Asfalto



Fuente: Elaboración Propia

Análisis de *t* Student para **tracción indirecta (Grupo: Seca)** de diseño de mezcla asfáltica **convencional de 140°C y modificado con zeolita natural de 2%** a temperatura de 100°C.

H_0 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; no existe diferencia significativa entre las dos medias de tracción indirecta, frente a la mezcla asfáltica convencional 140°C.

H_1 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; existe diferencia significativa entre las dos medias de tracción indirecta, frente a la mezcla asfáltica convencional 140°C.

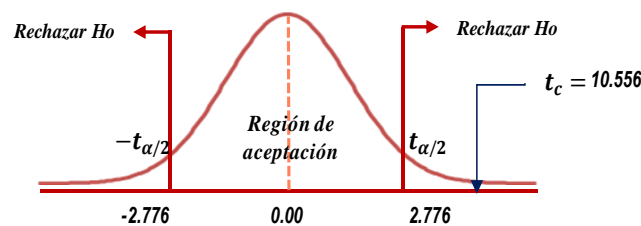
Tabla N° 4. 9. Análisis de T Student Para Tracción Indirecta - Seca Convencional de 140°C y Modificado 2% Zeolita Natural

TRACCIÓN INDIRECTA - GRUPO: SECA (kg/cm2)					
N° de Muestras	Convencional de 140°C (Xi)	Modificado 2% Zeolita (Yi)	$(X_i - \bar{X})^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Contraste Bilateral
1	12.55	10.49	0.053	0.096	Dos Colas
2	13.11	10.18	0.109	0.000	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
3	12.68	9.87	0.010	0.096	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

Condición: Si $|t_c| > t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1

Tamano de Muestra Convencional: $n_1 = 3$ Tamano de Muestra Modificado: $n_2 = 3$
 Media Muestral Convencional: $\bar{X}_1 = 12.78$ Medial Muestral Modificado: $\bar{Y}_2 = 10.18$
 Varianza Muestral Convencional: $S_1^2 = 0.086$ Varianza Muestral Modificado: $S_2^2 = 0.096$
 Desviación Estándar Convencional: $S_1 = 0.293$ Desviación Estándar Modificado: $S_2 = 0.310$
 Varianza Ponderada: $S_p^2 = 0.091$
 Disviación Estándar: $S_p = 0.302$
 Estadístico de Prueba: $t_c = 10.556$
 Grados de Libertad: $gl=df = 4$
 Nivel de Significancia al 95%: $\alpha = 0.05$
 Valor Crítico de Tabla (Dos Colas): $t_{\alpha/2} = 2.776$

Decisión y Conclusión: Como $|t_c| = 10.556 > t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} = t_{0.025;4} = 2.776$ entonces no se acepta H_0 esto es, existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.



Tambien se podría haber considerado un intervalo de confianza, dado que el contraste es bilateral y ver si el 0 se encuentra en su interior de intervalo:

$$\left[\bar{X}_1 - \bar{Y}_2 \pm t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} * S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

Intervalo de Confianza: $IC = [1.916 ; 3.284]$

Decisión y Conclusión: Como 0 no pertenece a IC entonces se concluye con 95% que $\mu_1 \neq \mu_2$. Por lo que se acepta hipótesis alternativo H_1 .

Análisis de *t* Student para **tracción indirecta (Grupo: Seca)** de diseño de mezcla **asfáltica convencional de 100°C y modificado con zeolita natural de 2%** a temperatura de 100°C.

H_0 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; no existe diferencia significativa entre las dos medias de tracción indirecta, frente a la mezcla asfáltica convencional 100°C.

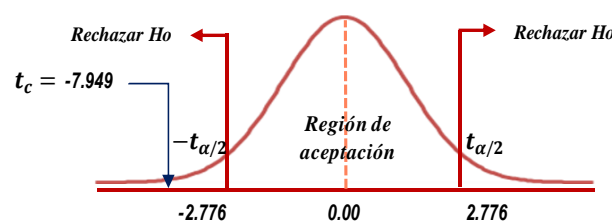
H_1 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; existe diferencia significativa entre las dos medias de tracción indirecta, frente a la mezcla asfáltica convencional 100°C.

Tabla N° 4. 10. Análisis de T Student Para Tracción Indirecta - Seca Convencional de 100°C y Modificado 2% Zeolita Natural

TRACCIÓN INDIRECTA - GRUPO: SECA (kg/cm2)					
N° de Muestras	Convencional de 100°C (Xi)	Modificado 2% Zeolita (Yi)	$(X_i - \bar{X})^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Contraste Bilateral
1	8.72	10.49	0.001	0.096	Dos Colas
2	8.79	10.18	0.002	0.000	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
3	8.73	9.87	0.000	0.096	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$
<p>Condición: Si $|t_c| > t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1</p>					

Tamano de Muestra Convencional: $n_1 = 3$	Tamano de Muestra Modificado: $n_2 = 3$
Media Muestral Convencional: $\bar{X}_1 = 8.75$	Media Muestral Modificado: $\bar{Y}_2 = 10.18$
Varianza Muestral Convencional: $S_1^2 = 0.001$	Varianza Muestral Modificado: $S_2^2 = 0.096$
Desviación Estándar Convencional: $S_1 = 0.038$	Desviación Estándar Modificado: $S_2 = 0.310$
Varianza Ponderada: $S_p^2 = 0.049$	
Desviación Estándar: $S_p = 0.221$	
Estadístico de Prueba: $t_c = -7.949$	
Grados de Libertad: $gl=df= 4$	
Nivel de Significancia al 95%: $\alpha = 0.05$	
Valor Crítico de Tabla (Dos Colas): $t_{\alpha/2} = 2.776$	

Decisión y Conclusión: Como $|t_c| = 7.949 > t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} = t_{0.025;4} = 2.776$ entonces no se acepta H_0 esto es, existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.



Tambien se podría haber considerado un intervalo de confianza, dado que el contraste es bilateral y ver si el 0 se encuentra en su interior de intervalo:

$$\left[\bar{X}_1 - \bar{Y}_2 \pm t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2} * S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

Intervalo de Confianza: IC = [-1.93 ; -0.93]

Decisión y Conclusión: Como 0 no pertenece a IC entonces se concluye con 95% que $\mu_1 \neq \mu_2$.

Por lo que se acepta hipótesis alternativo H_1 .

Análisis de *t* Student para **tracción indirecta (Grupo: Sumergido)** de diseño de mezcla asfáltica **convencional de 140°C y modificado con zeolita natural de 2% a temperatura de 100°C.**

H_0 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; no existe diferencia significativa entre las dos medias de tracción indirecta, frente a la mezcla asfáltica convencional 140°C.

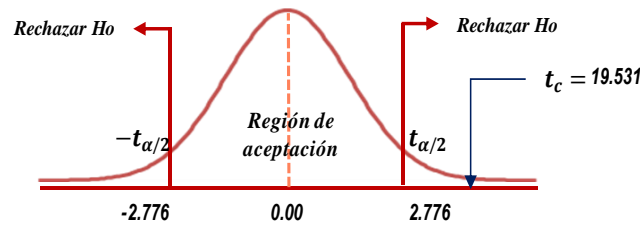
H_1 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; existe diferencia significativa entre las dos medias de tracción indirecta, frente a la mezcla asfáltica convencional 140°C.

Tabla N° 4. 11. Análisis de T Student Para Tracción Indirecta - Sumergido Convencional de 140°C y Modificado 2% Zeolita Natural

TRACCIÓN INDIRECTA - GRUPO: SUMERGIDO (kg/cm2)					
N° de Muestras	Convencional de 140°C (Xi)	Modificado 2% Zeolita (Yi)	$(X_i - \bar{X})^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Contraste Bilateral
1	11.53	8.80	0.028	0.037	Dos Colas
2	11.25	8.41	0.013	0.039	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
3	11.31	8.61	0.003	0.000	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$
Condición: Si $|t_c| > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1					

Tamano de Muestra Convencional:	$n_1 = 3$	Tamano de Muestra Modificado:	$n_2 = 3$
Media Muestral Convencional:	$\bar{X}_1 = 11.36$	Medial Muestral Modificado:	$\bar{Y}_2 = 8.61$
Varianza Muestral Convencional:	$S_1^2 = 0.022$	Varianza Muestral Modificado:	$S_2^2 = 0.038$
Desviación Estándar Convencional:	$S_1 = 0.147$	Desviación Estándar Modificado:	$S_2 = 0.195$
Varianza Ponderada:	$S_p^2 = 0.030$		
Disviación Estándar:	$S_p = 0.173$		
Estadístico de Prueba:	$t_c = 19.531$		
Grados de Libertad:	$gl=df= 4$		
Nivel de Significancia al 95%:	$\alpha = 0.05$		
Valor Crítico de Tabla (Dos Colas):	$t_{\alpha/2} = 2.776$		

Decisión y Conclusión: Como $|t_c| = 19.531 > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2} = t_{0.025,4} = 2.776$ entonces no se acepta H_0 , esto es, existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.



También se podría haber considerado un intervalo de confianza, dado que el contraste es bilateral y ver si el 0 se encuentra en su interior de intervalo:

$$\left[\bar{X}_1 - \bar{Y}_2 \pm t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2} * S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

Intervalo de Confianza: $IC = [2.365 ; 3.148]$

Decisión y Conclusión: Como 0 no pertenece a IC entonces se concluye con 95% que $\mu_1 \neq \mu_2$. Por lo que se acepta hipótesis alternativo H_1 .

Análisis de *t* Student para **tracción indirecta (Grupo: Sumergido)** de diseño de **mezcla asfáltica convencional de 100°C y modificado con zeolita natural de 2%** a temperatura de 100°C.

H_0 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; no existe diferencia significativa entre las dos medias de tracción indirecta, frente a la mezcla asfáltica convencional 100°C.

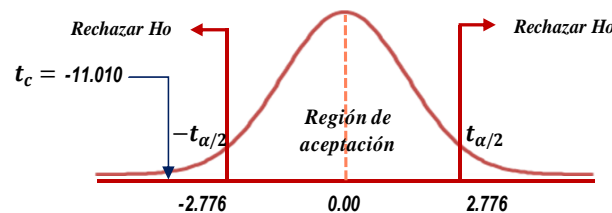
H_1 : Al adicionar la zeolita al diseño de mezcla asfáltica tibia; existe diferencia significativa entre las dos medias de tracción indirecta, frente a la mezcla asfáltica convencional 100°C.

Tabla N° 4. 12. Análisis de T Student Para Tracción Indirecta - Sumergido Convencional de 100°C y Modificado 2% Zeolita Natural

TRACCIÓN INDIRECTA - GRUPO: SUMERGIDO (kg/cm2)					
N° de Muestras	Convencional de 100°C (Xi)	Modificado 2% Zeolita (Yi)	$(X_i - \bar{X})^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Contraste Bilateral
1	6.92	8.80	0.001	0.037	Dos Colas
2	7.06	8.41	0.029	0.039	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
3	6.69	8.61	0.040	0.000	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$
Condición: Si $|t_c| > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1					

Tamaño de Muestra Convencional:	$n_1 = 3$	Tamaño de Muestra Modificado:	$n_2 = 3$
Media Muestral Convencional:	$\bar{X}_1 = 6.89$	Media Muestral Modificado:	$\bar{Y}_2 = 8.61$
Varianza Muestral Convencional:	$S_1^2 = 0.035$	Varianza Muestral Modificado:	$S_2^2 = 0.038$
Desviación Estándar Convencional:	$S_1 = 0.187$	Desviación Estándar Modificado:	$S_2 = 0.195$
Varianza Ponderada:	$S_p^2 = 0.036$		
Desviación Estándar:	$S_p = 0.191$		
Estadístico de Prueba:	$t_c = -11.010$		
Grados de Libertad:	$gl=df = 4$		
Nivel de Significancia al 95%:	$\alpha = 0.05$		
Valor Crítico de Tabla (Dos Colas):	$t_{\alpha/2} = 2.776$		

Decisión y Conclusión: Como $|t_c| = 11.010 > t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} = t_{0.025;4} = 2.776$ entonces no se acepta H_0 esto es, existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.



También se podría haber considerado un intervalo de confianza, dado que el contraste es bilateral y ver si el 0 se encuentra en su interior de intervalo:

$$\left[\bar{X}_1 - \bar{Y}_2 \pm t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} * S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

Intervalo de Confianza: $IC = [-2.15 ; -1.28]$

Decisión y Conclusión: Como 0 no pertenece a IC entonces se concluye con 95% que $\mu_1 \neq \mu_2$. Por lo que se acepta hipótesis alternativo H_1 .

4.3.2.2 Hipótesis Específica 02

“La aplicación de zeolita a la mezcla asfáltica permite beneficios ambientales como disminución de la emisión de CO2 durante la etapa de producción”

Para contrastar estadísticamente hipótesis específica se utiliza Análisis de t Student con contraste bilateral, para diseño de mezcla asfáltica convencional (140°C y 100°C) y modificado con zeolita natural de 2% a temperatura de 100°C.

La medición de **emisión de CO2** se realizó con un medidor de gases portátil Aeroqual serie 500, se prepararon una mezcla asfáltica con 6.8% de asfalto óptimo para mezcla asfáltica convencional (140°C y 100°C) y 6.6% de

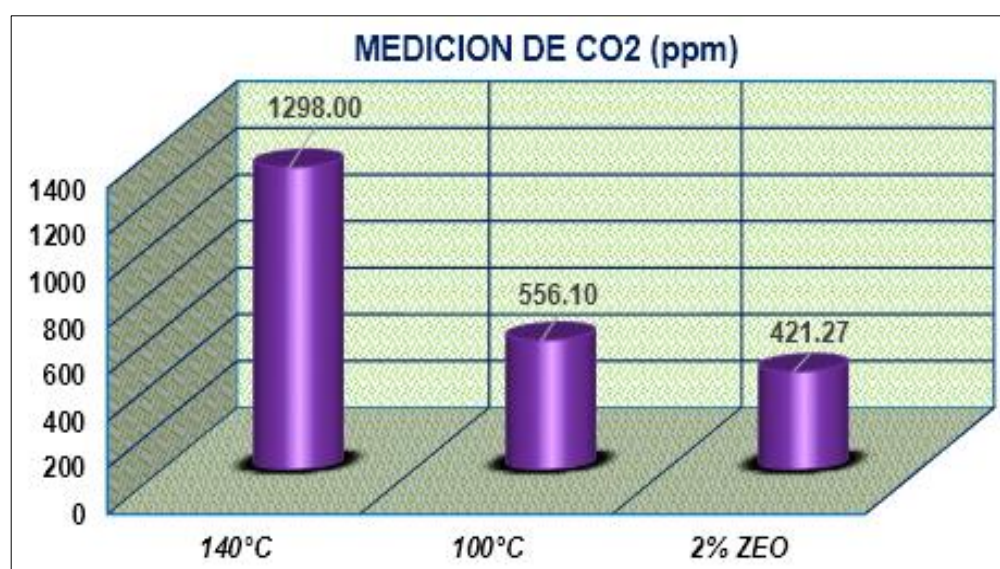
asfalto óptimo para mezcla asfáltica modificado con 2% de zeolita natural. El promedio de emisión de CO₂ para diseño de mezcla asfáltica modificado con 2% de zeolita es 421.27 ppm y de convencional de 140°C es 1298.00 ppm es inferior en 876.73 ppm que representa en 67.54% respecto a convencional de 140°C, además para convencional de 100°C de 556.10 ppm es parcialmente inferior en 134.83 ppm que equivale a 24.25% respecto a convencional de 100°C. Como se muestra en la Tabla N° 4.13 y Figura N° 4.15.

Tabla N° 4. 13. Resultados de Medición de CO₂ (ppm)

N°	RESULTADO DE MEDICIÓN DE CO ₂ (ppm)			
	INSTRUMENTO	CONV. 140°C	CONV. 100°C	MOD. 100°C - 2% ZEO
1	La medición de CO ₂ se realizó con un medidor de gases portátil Aeroqual serie 500.	1423.20	465.00	480.40
2		1170.80	560.30	382.20
3		1300.00	643.00	401.20
PROMEDIO (ppm):		1298.00	556.10	421.27

Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 4. 15. Comparación de Medición de CO₂ (ppm)



Fuente: Elaboración Propia

**Figura N° 4. 16. Preparación y Medición de Temperatura de Mezclas
Asfáltica**



Fuente: Fotografía Propia

Figura N° 4. 17. Medición de Emisión de CO2 (ppm)



Fuente: Elaboración Propia

Análisis de t Student para **medición de emisión de CO2** de diseño de mezcla asfáltica **convencional de 140°C** y **modificado con zeolita natural de 2%** a temperatura de 100°C.

H_0 : Al aplicar la zeolita a la mezcla asfáltica tibia, no existen diferencias significativas entre las dos medias de medición de emisión de CO2 durante la etapa de producción.

H_1 : Al aplicar la zeolita a la mezcla asfáltica tibia, existen diferencias significativas entre las dos medias de medición de emisión de CO2 durante la etapa de producción.

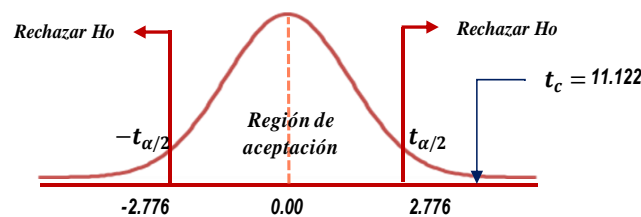
Tabla N° 4. 14. Análisis de T Student Para Medición de Emisión de CO2 Convencional de 140°C y Modificado 2% Zeolita Natural

MEDICIÓN DE CO2 (ppm)					
N° de Muestras	Convencional de 140°C (Xi)	Modificado 2% Zeolita (Yi)	$(X_i - \bar{X})^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Contraste Bilateral
1	1423.20	480.40	15675.040	3496.751	Dos Colas
2	1170.80	382.20	16179.840	1526.204	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
3	1300.00	401.20	4.000	402.671	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

Condición: Si $|t_c| > t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1

Tamano de Muestra Convencional: $n_1 = 3$ Tamano de Muestra Modificado: $n_2 = 3$
 Media Muestral Convencional: $\bar{X}_1 = 1298.00$ Medial Muestral Modificado: $\bar{Y}_2 = 421.27$
 Varianza Muestral Convencional: $S_1^2 = 15929.440$ Varianza Muestral Modificado: $S_2^2 = 2712.813$
 Desviación Estándar Convencional: $S_1 = 126.212$ Desviación Estándar Modificado: $S_2 = 52.085$
 Varianza Ponderada: $S_p^2 = 9321.127$
 Disviación Estándar: $S_p = 96.546$
 Estadístico de Prueba: $t_c = 11.122$
 Grados de Libertad: $gl=df= 4$
 Nivel de Significancia al 95%: $\alpha = 0.05$
 Valor Crítico de Tabla (Dos Colas): $t_{\alpha/2} = 2.776$

Decisión y Conclusión: Como $|t_c| = 11.122 > t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} = t_{0.025;4} = 2.776$ entonces se rechaza H_0 esto es, existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.



Tambien se podría haber considerado un intervalo de confianza, dado que el contraste es bilateral y ver si el 0 se encuentra en su interior de intervalo:

$$\left[\bar{X}_1 - \bar{Y}_2 \pm t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_1-2} * S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

Intervalo de Confianza: $IC = [657.9 ; 1096]$

Decisión y Conclusión: Como 0 no pertenece a IC entonces se concluye con 95% que $\mu_1 \neq \mu_2$. Por lo que se acepta hipótesis alternativo H_1 .

Análisis de *t* Student para **medición de emisión de CO2** de diseño de mezcla asfáltica **convencional de 100°C y modificado con zeolita natural de 2%** a temperatura de 100°C.

H_0 : Al aplicar la zeolita a la mezcla asfáltica tibia, no existen diferencias significativas entre las dos medias de medición de emisión de CO2 durante la etapa de producción.

H_1 : Al aplicar la zeolita a la mezcla asfáltica tibia, existen diferencias significativas entre las dos medias de medición de emisión de CO2 durante la etapa de producción.

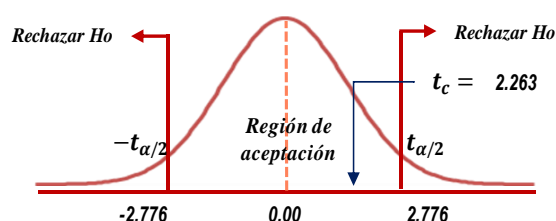
Tabla N° 4. 15. Análisis de T Student Para Medición de Emisión de CO2 Convencional de 100°C y Modificado 2% Zeolita Natural

MEDICIÓN DE CO2 (ppm)					
N° de Muestras	Convencional de 100°C (Xi)	Modificado 2% Zeolita (Yi)	$(X_i - \bar{X})^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Contraste Bilateral
1	465.00	480.40	8299.210	3496.751	Dos Colas
2	560.30	382.20	17.640	1526.204	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
3	643.00	401.20	7551.610	402.671	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

Condición: Si $|t_c| > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2}$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1

Tamano de Muestra Convencional:	$n_1 = 3$	Tamano de Muestra Modificado:	$n_2 = 3$
Media Muestral Convencional:	$\bar{X}_1 = 556.10$	Media Muestral Modificado:	$\bar{Y}_2 = 421.27$
Varianza Muestral Convencional:	$S_1^2 = 7934.230$	Varianza Muestral Modificado:	$S_2^2 = 2712.813$
Desviación Estándar Convencional:	$S_1 = 89.074$	Desviación Estándar Modificado:	$S_2 = 52.085$
Varianza Ponderada:	$S_p^2 = 5323.522$		
Desviación Estándar:	$S_p = 72.962$		
Estadístico de Prueba:	$t_c = 2.263$		
Grados de Libertad:	$gl=df= 4$		
Nivel de Significancia al 95%:	$\alpha = 0.05$		
Valor Crítico de Tabla (Dos Colas):	$t_{\alpha/2} = 2.776$		

Decisión y Conclusión: Como $|t_c| = 2.263 < t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_1-2} = t_{0.025;4} = 2.776$ entonces se acepta H_0 esto es, no existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.



También se podría haber considerado un intervalo de confianza, dado que el contraste es bilateral y ver si el 0 se encuentra en su interior de intervalo:

$$\left[\bar{X}_1 - \bar{Y}_2 \pm t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} * S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

Intervalo de Confianza: $IC = [-30.5 ; 300.2]$

Decisión y Conclusión: Como 0 pertenece a IC entonces se concluye con 95% que $\mu_1 = \mu_2$.

Por lo que no se acepta hipótesis alternativo H_1 .

4.3.2.3 Hipótesis Específica 03

“Durante la producción de mezcla asfáltica tibia los costos disminuyen respecto a la mezcla asfáltica convencional”

a. Cálculo de rendimiento para la preparación de la mezcla asfáltica²⁸:

Capacidad de la planta : 45 Tn/h

Eficiencia del equipo : 85 %

Tiempo Útil : 90 %

Peso Específico : 2.367 Tn/m³

$$\text{Rendimiento} = \frac{45 \text{ Tn/h} \times 8 \text{ h} \times 0.9 \times 0.85}{2.367 \text{ Tn/m}^3}$$

$$\text{Rendimiento} = 116.35 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$\text{Rendimiento por m}^2 = \frac{116.35 \text{ m}^3/\text{día}}{0.0508 \text{ m}} = 2290.35 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$\text{Factor de Compensación} = 1.20$$

$$\text{Rendimiento por m}^2 = \frac{2290.35 \text{ m}^2/\text{día}}{1.20}$$

$$\text{Rendimiento por m}^2 = 1908.63 \text{ m}^2/\text{día}$$

Por lo tanto, para análisis de costo unitario se considera un rendimiento de la planta de asfalto de 1910 m²/día.

b. Cálculo de la cantidad de materiales para el análisis de Costos Unitarios:

Para análisis de costo unitario se considera un área de un metro cuadrada (1 m²) y espesor de dos pulgadas (2 pulg) de carpeta asfáltica. En las

²⁸ Costos y Tiempos en Carreteras – Walter Ibañez

mezclas asfálticas convencionales (140°C y 100°C) y modificado con 2% de zeolita natural clinoptilolita, se considera las siguientes materiales: piedra chancada de 1/2", arena chancada de 1/4", arena zarandeada de 3/8", cemento asfáltico PEN 120/150, Cal hidratada, Zeolita natural clinoptilolita y Petroleo D2 son determinadas las cantidades para un metro cuadrado (1 m²) de área, como se muestra en las siguientes tablas.

Tabla N° 4. 16. Cálculo de Volumen para los Materiales de Mezcla Asfáltica

Área	1.00	1.00	1.00	M2
Espesor de la Carpeta Asfáltica	2.00	Pulg.	0.0508	M
Volumen Compactado			0.051	M3
Volumen Suelto en Planta			0.066	M3

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 4. 17. Cálculo de la Cantidad de Materiales para 1 m³ de Mezcla Asfáltica Convencional de 140°C

MEZCLA ASFÁLTICA DE 140°C (Para 1 m ³)				
DESCRIPCIÓN		COMPACTADA	SUELTO	UNIDAD
Peso Unitario de Mezcla		2282	2367	kg/m3
% Cemento Asfáltico Optimo		6.8	6.8	%
Peso de Cemento Asfáltico		155.176	160.956	kg
Peso Específico de C.A.		1.021	1.021	kg/m3
Volumen de C.A.		40.1544	41.6501	gln
Peso de Agregados		2126.824	2206.044	kg
Peso Unitario de Agregados		1500	1500	kg/m3
Volumen de Agregados		1.4179	1.4707	m3
DE ACUERDO AL DISEÑO		COMPACTADA	SUELTO	UNIDAD
Piedra Chancada de 1/2"	27.96%	0.3964	0.4112	m3
Arena Chancada de 1/4"	32.62%	0.4625	0.4797	m3
Arena Zarandeada 3/8"	29.82%	0.4228	0.4386	m3
Subtotal	90.40%	1.2818	1.3295	m3
Cal	2.80%	59.5511	61.7692	kg
Total	93.20%	.....	.....	.....

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 4. 18. Cantidad de materiales para 1 m² de carpeta asfáltica de 2 Pulg – Convencional 140°C

CANTIDAD DE MATERIALES (140°C)		
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
Piedra Chancada de 1/2"	0.0260	m3/m2
Arena Chancada de 1/4"	0.0303	m3/m2
Arena Zarandeada 3/8"	0.0303	m3/m2
Cemento Asfáltico PEN 120/150	2.3952	gln/m2
Cal Hidratada	3.5522	kg/m2
Petróleo D2	0.4623	gln/m2

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 4. 19. Calculo de la Cantidad de Materiales para 1 m³ de Mezcla Asfáltica Convencional de 100°C

MEZCLA ASFÁLTICA DE 100°C (Para 1 m3)			
DESCRIPCIÓN	COMPACTADA	SUELTO	UNIDAD
Peso Unitario de Mezcla	2270	2380	kg/m3
% Cemento Asfaltico Optimo	6.8	6.8	%
Peso de Cemento Asfaltico	154.360	161.840	kg
Peso Especifico de C.A.	1.021	1.021	kg/m3
Volumen de C.A.	39.9432	41.8788	gln
Peso de Agregados	2115.64	2218.16	kg
Peso Unitario de Agregados	1500	1500	kg/m3
Volumen de Agregados	1.4104	1.4788	m3
DE ACUERDO AL DISEÑO	COMPACTADA	SUELTO	UNIDAD
Piedra Chancada de 1/2" 27.96%	0.3944	0.4135	m3
Arena Chancada de 1/4" 32.62%	0.4601	0.4824	m3
Arena Zarandeada 3/8" 29.82%	0.4206	0.4410	m3
Subtotal 90.40%	1.2750	1.3368	m3
Cal 2.80%	59.2379	62.1085	kg
Total 93.20%	.....	.....	.....

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 4. 20. Cantidad de materiales para 1 m² de carpeta asfáltica de 2 Pulg – Convencional 100°C

CANTIDAD DE MATERIALES (100°C)		
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
Piedra Chancada de 1/2"	0.0260	m3/m2
Arena Chancada de 1/4"	0.0304	m3/m2
Arena Zarandeada 3/8"	0.0303	m3/m2
Cemento Asfáltico PEN 120/150	2.3974	gln/m2
Cal Hidratada	3.5555	kg/m2
Petróleo D2	0.4623	gln/m2

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 4. 21. Cálculo de la Cantidad de Materiales para 1 m³ de Mezcla Asfáltica con 2% de Zeolita a 100°C

MEZCLA ASFÁLTICA CON 2% DE ZEOLITA A 100°C (Para 1 m³)				
DESCRIPCIÓN		COMPACTADA	SUELTO	UNIDAD
Peso Unitario de Mezcla		2298	2396	kg/m ³
% Cemento Asfáltico Óptimo		6.6	6.6	%
Peso de Cemento Asfáltico		151.668	158.136	kg
Peso Específico de C.A.		1.021	1.021	kg/m ³
Volumen de C.A.		39.2466	40.9203	gln
Peso de Agregados		2146.332	2237.864	kg
Peso Unitario de Agregados		1500	1500	kg/m ³
Volumen de Agregados		1.4309	1.4919	m ³
DE ACUERDO AL DISEÑO		COMPACTADA	SUELTO	UNIDAD
Piedra Chancada de 1/2"	28.02%	0.4009	0.4180	m ³
Arena Chancada de 1/4"	32.69%	0.4678	0.4877	m ³
Arena Zarandeada 3/8"	29.89%	0.4277	0.4459	m ³
Subtotal	90.60%	1.2964	1.3517	m³
Cal	0.93%	19.9609	20.8121	kg
Zeolita Natural	1.87%	40.1364	41.8481	kg
Total	93.40%	.....	.....	.....

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 4. 22. Cantidad de materiales para 1 m² de carpeta asfáltica de 2 Pulg – 2% de Zeolita a 100°C

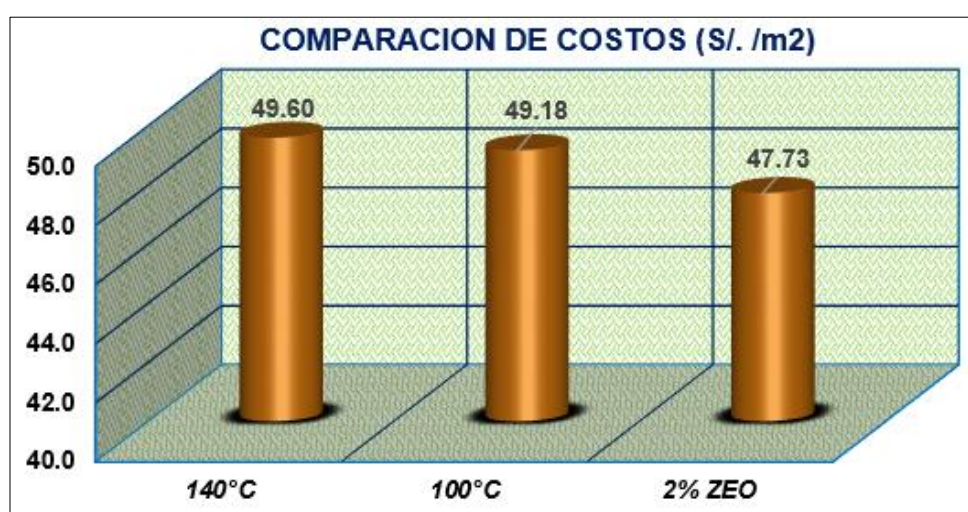
CANTIDAD DE MATERIALES (2% de Zeolita a 100°C)		
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
Piedra Chancada de 1/2"	0.0264	m ³ /m ²
Arena Chancada de 1/4"	0.0308	m ³ /m ²
Arena Zarandeada 3/8"	0.0307	m ³ /m ²
Cemento Asfáltico PEN 120/150	2.3481	gln/m ²
Cal Hidratada	1.1942	kg/m ²
Zeolita Natural	2.4013	kg/m ²
Petróleo D2	0.4623	gln/m ²

Fuente: Elaboración Propia

En análisis de costos unitarios para mezcla asfáltica convencional (140°C y 100°C) y modificado con 2% de zeolita natural clinoptilolita, se analizó para las partidas: preparación de mezcla asfáltica de espesor 2 pulg, transporte de mezcla asfáltica, esparcido y compactado de mezcla asfáltica, como se indica en siguiente Tabla N° 4.23, Tabla N° 4.24 y Tabla N° 4.25.

La comparación de **costo** para diseño de mezcla asfáltica convencional (140°C y 100°C) y modificado con 2% de zeolita natural, se realiza para un metro cuadrado (1 m^2) de área y un espesor de carpeta asfáltica de 2 pulgadas. Donde el costo diseño de mezcla asfáltica modificado con zeolita natural es S/. 47.73 y de convencional 140°C es S/. 49.60 que disminuye en S/. 1.87 equivalente a 3.77% respecto a convencional de 140°C , mientras el costo de convencional de 100°C es S/. 49.18 que también disminuye en S/. 1.45 equivalente a 2.95% respecto a convencional de 100°C . Como se muestra en la Figura N° 4.18.

Figura N° 4.18. Comparación de Costos por un Metro Cuadrado



Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 4. 23. Análisis de Costo Unitario de Mezcla Asfáltica Convencional 140°C

ANALISIS DE COSTOS UNITARIOS

PROYECTO: "COMPORTAMIENTO DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA, CON ADICIÓN DE ZEOLITA PARA LA PAVIMENTACIÓN DE LA CIUDAD DE JULIACA"

SUB PRESUPUESTO: MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL - 140°C

RESPONSABLE: TESISTAS
FECHA: 02 DE ABRIL DEL 2017

PARTIDA:	01.01	PREPARACION DE MEZCLA ASFALTICA E = 2".					
RENDIMIENTO:	m2/dia	MO:	1910	EQ:	1910	Costo Unitario Directo por: m2.	47.44
DESCRIPCION DEL RECURSO		UND.	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.	
Mano de Obra							
OPERARIO		hh	1.0000	0.0042	7.68	0.03	
OFICIAL		hh	1.0000	0.0042	6.29	0.03	
PEÓN		hh	5.0000	0.0209	5.61	0.12	
							0.18
Materiales							
ARENA CHANCADA DE 1/4"		m3		0.0303	72.50	2.20	
ARENA ZARANDEADA		m3		0.0303	32.70	0.99	
PIEDRA CHANCADA 1/2"		m3		0.0260	72.50	1.89	
CAL HIDRATADA		kg		3.5522	1.20	4.26	
CEMENTO ASFALTICO PEN 120/150		gal		2.3952	12.50	29.94	
PETROLEO D-2		gal		0.4623	11.50	5.32	
							44.59
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		3.0000	0.01	0.02	
CARGADOR SOBRE LLANTAS DE 125-135 HP 3 yd3		hm	1.0000	0.0042	170.00	0.71	
PLANTA DE ASFALTO		hm	1.0000	0.0042	400.00	1.68	
SECADORA DE ARIDOS		hm	1.0000	0.0042	64.00	0.27	
							2.67
PARTIDA:	01.02	TRANSPORTE DE MEZCLA ASFALTICA (E=2")					
RENDIMIENTO:	m2/dia	MO:	2383	EQ:	2383	Costo Unitario Directo por: m2.	0.56
DESCRIPCION DEL RECURSO		UND.	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.	
Mano de Obra							
OFICIAL		hh	1.0000	0.0034	6.29	0.02	
							0.02
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		3.0000	0.00	0.00	
CAMION VOLQUETE DE 15 m3		hm	1.0000	0.0034	160.00	0.54	
							0.54
PARTIDA:	01.03	ESPARCIDO Y COMPACTADO DE MEZCLA ASFALTICA					
RENDIMIENTO:	m2/dia	MO:	1910	EQ:	1910	Costo Unitario Directo por: m2.	1.60
DESCRIPCION DEL RECURSO		UND.	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.	
Mano de Obra							
OPERARIO		hh	1.0000	0.0042	7.68	0.03	
OFICIAL		hh	2.0000	0.0084	6.29	0.05	
PEÓN		hh	4.0000	0.0168	5.61	0.09	
							0.18
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		3.0000	0.01	0.02	
PAVIMENTADORA SOBRE ORUGAS 69 HP		hm	1.0000	0.0042	95.00	0.40	
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 70-100HP, 7- 9 ton.		hm	1.0000	0.0042	160.00	0.67	
RODILLO NEUMATICO AUTOPROPULSADO 5.5 - 20 ton		hm	1.0000	0.0042	80.00	0.34	
							1.42
RESUMEN:							
PREPARACION DE MEZCLA ASFALTICA E = 2".	=	S/.		47.44			
TRANSPORTE DE MEZCLA ASFALTICA (E=2")	=	S/.		0.56			
ESPARCIDO Y COMPACTADO DE MEZCLA ASFALTICA	=	S/.		1.60			
TOTAL	=	S/.		49.60			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 4. 24. Análisis de Costo Unitario de Mezcla Asfáltica Convencional 100°C

ANALISIS DE COSTOS UNITARIOS

PROYECTO: "COMPORTAMIENTO DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA, CON ADICIÓN DE ZEOLITA PARA LA PAVIMENTACIÓN DE LA CIUDAD DE JULIACA"

SUB PRESUPUESTO: MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL - 100°C

RESPONSABLE: TESISTAS

FECHA: 02 DE ABRIL DEL 2017

PARTIDA:	01.01	PREPARACION DE MEZCLA ASFALTICA E = 2".					
RENDIMIENTO:	m2/dia	MO:	1910	EQ:	1910	Costo Unitario Directo por: m2.	47.03
DESCRIPCION DEL RECURSO		UND.	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.	
Mano de Obra							
OPERARIO		hh	1.0000	0.0042	7.68	0.03	
OFICIAL		hh	1.0000	0.0042	6.29	0.03	
PEÓN		hh	5.0000	0.0209	5.61	0.12	
						0.18	
Materiales							
ARENA CHANCADA DE 1/4"		m3		0.0304	72.50	2.20	
ARENA ZARANDEADA		m3		0.0303	32.70	0.99	
PIEDRA CHANCADA 1/2"		m3		0.0260	72.50	1.89	
CAL HIDRATADA		kg		3.5555	1.20	4.27	
CEMENTO ASFALTICO PEN 120/150		gal		2.3974	12.50	29.97	
PETROLEO D-2		gal		0.4623	11.50	5.32	
						44.63	
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		3.0000	0.01	0.02	
CARGADOR SOBRE LLANTAS DE 125-135 HP 3 yd3		hm	1.0000	0.0042	170.00	0.71	
PLANTA DE ASFALTO		hm	1.0000	0.0042	292.00	1.22	
SECADORA DE ARIDOS		hm	1.0000	0.0042	64.00	0.27	
						2.22	
PARTIDA:	01.02	TRANSPORTE DE MEZCLA ASFALTICA (E=2")					
RENDIMIENTO:	m2/dia	MO:	2383	EQ:	2383	Costo Unitario Directo por: m2.	0.56
DESCRIPCION DEL RECURSO		UND.	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.	
Mano de Obra							
OFICIAL		hh	1.0000	0.0034	6.29	0.02	
						0.02	
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		3.0000	0.00	0.00	
CAMION VOLQUETE DE 15 m3		hm	1.0000	0.0034	160.00	0.54	
						0.54	
PARTIDA:	01.03	ESPARCIDO Y COMPACTADO DE MEZCLA ASFALTICA					
RENDIMIENTO:	m2/dia	MO:	1910	EQ:	1910	Costo Unitario Directo por: m2.	1.60
DESCRIPCION DEL RECURSO		UND.	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.	
Mano de Obra							
OPERARIO		hh	1.0000	0.0042	7.68	0.03	
OFICIAL		hh	2.0000	0.0084	6.29	0.05	
PEÓN		hh	4.0000	0.0168	5.61	0.09	
						0.18	
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		3.0000	0.01	0.02	
PAVIMENTADORA SOBRE ORUGAS 69 HP		hm	1.0000	0.0042	95.00	0.40	
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 70-100HP, 7- 9 ton.		hm	1.0000	0.0042	160.00	0.67	
RODILLO NEUMATICO AUTOPROPULSADO 5.5 - 20 ton		hm	1.0000	0.0042	80.00	0.34	
						1.42	
RESUMEN:							
PREPARACION DE MEZCLA ASFALTICA E = 2".	=	S/.	47.03				
TRANSPORTE DE MEZCLA ASFALTICA (E=2")	=	S/.	0.56				
ESPARCIDO Y COMPACTADO DE MEZCLA ASFALTICA	=	S/.	1.60				
TOTAL	=	S/.	49.18				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 4. 25. Análisis de Costo Unitario de Mezcla Asfáltica Modificado a 100°C con 2% de Zeolita

ANALISIS DE COSTOS UNITARIOS

PROYECTO: "COMPORTAMIENTO DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA, CON ADICIÓN DE ZEOLITA PARA LA PAVIMENTACIÓN DE LA CIUDAD DE JULIACA"

SUB PRESUPUESTO: MEZCLA ASFALTICA TIBIA - 100°C CON 2% DE ZEOLITA

RESPONSABLE: TESISTAS

FECHA: 02 DE ABRIL DEL 2017

PARTIDA:	01.01	PREPARACION DE MEZCLA ASFALTICA TIBIA E=2"				Costo Unitario Directo por: m2.	45.57
RENDIMIENTO:	m2/día	MO:	1910	EQ:	1910		
DESCRIPCION DEL RECURSO	UND.	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.		
Mano de Obra							
OPERARIO	hh	1.0000	0.0042	7.68	0.03		
OFICIAL	hh	1.0000	0.0042	6.29	0.03		
PEÓN	hh	5.0000	0.0209	5.61	0.12		
					0.18		
Materiales							
ARENA CHANCADA DE 1/4"	m3		0.0308	72.50	2.23		
ARENA ZARANDEADA	m3		0.0307	32.70	1.00		
PIEDRA CHANCADA 1/2"	m3		0.0264	72.50	1.91		
CAL HIDRATADA	kg		1.1942	1.20	1.43		
ZEOLITA NATURAL	kg		2.4013	0.80	1.92		
CEMENTO ASFALTICO PEN 120/150	gal		2.3481	12.50	29.35		
PETROLEO D-2	gal		0.4623	11.50	5.32		
					43.17		
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	0.01	0.02		
CARGADOR SOBRE LLANTAS DE 125-135 HP 3 yd3	hm	1.0000	0.0042	170.00	0.71		
PLANTA DE ASFALTO	hm	1.0000	0.0042	292.00	1.22		
SECADORA DE ARIDOS	hm	1.0000	0.0042	64.00	0.27		
					2.22		
PARTIDA: 01.02 TRANSPORTE DE MEZCLA ASFALTICA (E=2")							
RENDIMIENTO:	m2/día	MO:	2383	EQ:	2383	Costo Unitario Directo por: m2.	0.56
DESCRIPCION DEL RECURSO	UND.	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.		
Mano de Obra							
OFICIAL	hh	1.0000	0.0034	6.29	0.02		
					0.02		
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	0.00	0.00		
CAMION VOLQUETE DE 15 m3	hm	1.0000	0.0034	160.00	0.54		
					0.54		
PARTIDA: 01.03 ESPARCIDO Y COMPACTADO DE MEZCLA ASFALTICA							
RENDIMIENTO:	m2/día	MO:	1910	EQ:	1910	Costo Unitario Directo por: m2.	1.60
DESCRIPCION DEL RECURSO	UND.	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.		
Mano de Obra							
OPERARIO	hh	1.0000	0.0042	7.68	0.03		
OFICIAL	hh	2.0000	0.0084	6.29	0.05		
PEÓN	hh	4.0000	0.0168	5.61	0.09		
					0.18		
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	0.01	0.02		
PAVIMENTADORA SOBRE ORUGAS 69 HP	hm	1.0000	0.0042	95.00	0.40		
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 70-100HP, 7- 9 ton.	hm	1.0000	0.0042	160.00	0.67		
RODILLO NEUMATICO AUTOPROPULSADO 5.5 - 20 ton	hm	1.0000	0.0042	80.00	0.34		
					1.42		
RESUMEN:							
PREPARACION DE MEZCLA ASFALTICA TIBIA E=2"	=	S/.	45.57				
TRANSPORTE DE MEZCLA ASFALTICA (E=2")	=	S/.	0.56				
ESPARCIDO Y COMPACTADO DE MEZCLA ASFALTICA	=	S/.	1.60				
TOTAL	=	S/.	47.73				

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO V

Conclusiones

5.1 Conclusiones Generales.

La adición de zeolita natural Clinoptilolita en 2% como filler en el diseño de Mezcla Asfáltica Tibia (MAT), es parcialmente menor en sus propiedades mecánicas respecto al diseño de Mezcla Asfáltica Convencional (MAC) de 140°C y a su vez es superior al diseño de mezcla asfáltica convencional de 100°C; además se obtiene una reducción de la emisión del CO₂ que nos beneficia ambientalmente; y respecto al costo de producción de la mezcla asfáltica tibia nos permite un ahorro económico.

5.2 Conclusiones Específicos.

La **estabilidad** del diseño de MAT es parcialmente inferior que la estabilidad del diseño de MAC de 140°C en 2.47%; y en comparación a la estabilidad del diseño de MAC de 100°C es superior en 22.18 %.

El **flujo** del diseño de MAT es parcialmente mayor que el flujo del diseño de MAC de 140°C en 3.05%; y en comparación al flujo del diseño de MAC de 100°C es menor en 17.76 %.

En el ensayo de **resistencia a la compresión simple** del diseño de MAT es parcialmente inferior que la resistencia a la compresión del diseño de MAC de 140°C en 20.35%; y en comparación a la resistencia a la compresión simple del diseño de MAC de 100°C es superior en 18.17 %.

En el ensayo de **tracción indirecta** del diseño de MAT es parcialmente inferior que la tracción indirecta del diseño de MAC de 140°C en 4.37%; y en

comparación a la tracción indirecta del diseño de MAC de 100°C es superior en 5.76 %.

En la producción del diseño de MAT se determinó una reducción de la **emisión del CO₂** en comparación al diseño de MAC de 140°C en 67.54%, y en comparación a emisión de CO₂ de diseño de MAC de 100°C también se determinó una disminución en 24.25%, lo cual nos permite minimizar la contaminación ambiental y mejor salubridad a los trabajadores.

Al analizar el **costo** de la producción del diseño de MAT con adición de 2% de Zeolita Natural Clinoptilolita se determina una disminución económica en 3.77% respecto al diseño de MAC de 140°C, mientras con MAC de 100°C se determinó una reducción de costo en 2.95%, esto nos permite un ahorro en consumo de combustible y menor desgaste de las máquinas en la planta de asfalto.

CAPÍTULO VI

Recomendaciones

6.1 Recomendaciones

Se recomienda el uso de zeolita natural clinoptilolita en mezclas asfálticas donde se presenta cambios climáticos severos, para obtener las propiedades mecánicas especificados en la normatividad técnica de mezcla asfáltica de nuestro país.

Debido a la urgencia de proveer soluciones al calentamiento global, en este aspecto ambiental se recomienda el uso de zeolita natural clinoptilolita en diseño de mezcla asfáltica para reducción de emisiones de CO₂ de manera que se evite contaminación ambiental y salubridad a los trabajadores.

En el aspecto económico se recomienda un análisis de costos unitarios de mayor detalle en la producción de mezcla asfáltica tibia en planta de asfalto en consumo de combustible y desgaste de máquinas en la planta de asfalto.

En el diseño de mezcla asfáltica tibia, se recomienda contar con equipos de mayor precisión y bien calibrados de alta tecnología, con el fin de evitar errores en los ensayos realizados.

De acuerdo a la bibliografía obtenida y en base a los resultados de ensayo de laboratorio, se recomienda incorporar en las especificaciones técnicas para construcción el uso diseño de mezcla asfáltica tibia en nuestro país.

Se recomienda continuidad a este trabajo de investigación, a través de la realización de tramos de prueba en nuestro país, que permitan medir el desempeño de la mezcla asfáltica tibia ante las cargas impuestas por el tránsito y las condiciones ambientales.

CAPÍTULO VII

Referencias

- 10-2014-MTC/14, R. N. (2014). *Manual de Carreteras - Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos - Sección Suelos y Pavimentos*. Lima: MTC.
- Abusafa, A., & Yucel, H. (2002). Removal of Cs from aqueous solutions using different cationic forms of a natural zeolite: clinoptilolite. *ELSEVIER*, 103-116.
- Alonso, A., Tejeda, E., Moreno, F., Rubio, M. C., & Medel, E. (2013). *Estudio de Laboratorio Sobre Utilización de Zeolita Natural versus Zeolita Sintética en la Fabricación de Mezclas Semicalientes*. Cuba.
- Bonaquist, R. F. (2011). *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt, NCHRP Report 691, transportation research board*. Washinnton: D.C.
- Breck, D. W. (1974). *Zeolite Molecular Sieves*. Wiley Interscience.
- Carrasco, F. (2013). *Tecnología del Hormigón*. Ingeniería Civil.
- Castañeda Siete , C. A., Escobar Aguilar, G. A., & López Lemus, L. A. (2011). *Aplicación Del Método Marshall Y Granulometría Superpave En El Diseño De Mezcla Asfáltica Templada Con Emulsión Asfáltica*. Tesis.
- Celis Amado, L., & Serrano Flórez, C. (2008). *Mezclas Asfálticas Tibias*. Universidad Industrial de Santander - Colombia: Tesis.
- Crespin Molina, R., Santa Cruz Jovel, I. E., & Torres Linares, P. A. (2012). *Aplicacion del Metodo Marshall y Granulometria Superpave en el Diseño de Mezclas Asfalticas en Caliente con asfalto Clasificacion Grado de Desempeño*. Universidad de el Salvador: Tesis.
- Curi, A., Granda, W., Lima, H., & Sousa, W. (2006). *Las Zeolitas y su Aplicacion en la Descontaminacion de Efluentes Mineros*.

- EG-2013. (Junio 2013). *Manual de Carreteras - Especificaciones Técnicas Generales Para Construcción*. Lima: MTC.
- Erdem, E., Karapinar, N., & Donat, R. (2004). The removal of heavy metal cations by natural zeolites. *ELSEVIER*, 309-314.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill.
- Huaman Guerrero, N. (2004). *Pavimentos Flexibles*. Lima: UNI.
- Ibañez, W. (2010). *Costos y Tiempos en Carreteras*. Lima: MACRO.
- Kogel, J., Barker, J., Trivel, N., & Krukowski, S. (2006). *Industrial Minerals and Rocks: Commodities, Markets, and Uses* (Vol. 7ma Edición). USA: Society for Mining.
- Lesme Brun, J. G. (2015). *Estudio del Comportamiento de Mezcla Asfálticas Tibias (Mezcla Templadas) empleando Emulsiones Súper - Estabilizadas*. Chile: Tesis.
- Lopera Palacio, C. (2011). *Diseño y Producción de Mezcla Asfáltica Tibias, a Partir de la Mezcla de Asfalto y Aceite Crudo de Palma (ELAEIS GUINEENSIS)*. Universidad Nacional de Colombia: Tesis.
- Minaya Gonzáles, S., & Ordóñez Huamán, A. (2006). *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos*. Lima: ICG.
- Moll Martínez, R., Alonso Aenlle, A., & González Lobera, M. (Noviembre del 2016). Mezcla asfálticas de bajo impacto ambiental para la rehabilitación de las carreteras en Cuba. *RCI*, 14-23.
- Moltalvo M., S. J. (2013). *Aplicación de las Zeolitas Naturales al Tratamiento Biológico de Residuos*.
- Morante Carballo, F. E. (2004). *Las Zeolitas de la Costa de Ecuador, Geología, Caracterización y Aplicación*. Ecuador.
- MTC. (Mayo - 2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Lima.
- Ortega Cuan, O. J., & Paternina Medina, L. A. (2012). *Propuesta Para la Implementación de Mezcla Asfálticas Tibias en la Ciudad de Medellin*. Universidad de Medellín: Tesis.

- Padilla Rodríguez, A. (2004). *Mezcla Asfálticas*. España: Univesidad Politécnica de Cataluña.
- Senior Arrieta, V. (2013). *Diseño de Mezclas Asfálticas Drenantes Tibias, a Partir de la Mezcla de Cemento Asfáltico AC 60-70 con Licomont BS-100 Para Diferentes Niveles de Precipitación*. Universidad Nacional de Colombia: Tesis.
- Suarez robles, J., & Santos Vargas, M. (2009). *Mezclas asfálticas producto de la combinación de técnicas en mezclas de alto modulo y mezclas tibias*. Bucaramanga.
- Tacha Velasquez, C. S., Huertas Pasive, L. V., & Arevalo Berrio, Y. P. (2014). *Diseño De Una Mezcla De Asfalto En Caliente Msc-25 Reciclada Modificada Con Zeolita Sintetica*.
- Tam Málaga, J., Vera, G., & Oliveros Ramos, R. (2008). Tipos, Métodos y Estrategias de Investigación Científica. *Revista de la Escuela de Posgrado*, 145-154.
- Ulloa Calderón, A. (abril 2011). Mezclas Asfálticas Tibias (MAT). *PITRA (Programa de Infraestructura del Transporte)*, Vol 2. N° 15.
- Valle Rodas, R. (Cuarta Edición). *Carreteras, Calles y Aeropistas*. EL ATENEO.
<https://es.slideshare.net/jab2801/t-de-student-para-dos-muestras-independientes>

Anexos

Anexo A: Certificado de Uso de Laboratorio

Anexo B: Ensayos de Control de la Calidad de Materiales

Anexo C: Ensayo de Mezcla Asfáltica

Anexo D: Ficha Técnica de Zeolita Natural

Anexo E: Informe de Medición de CO₂

Anexo F: Tabla de Distribución T Student