



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



**CORRECCIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD DE LA
SUPERFICIE DE RODADURA DEL TRAMO VIAL IMATA –
PATAHUASI MEDIANTE LA COLOCACIÓN DE SLURRY SEAL,
PROGRESIVA DEL KM 125 AL 130**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. ROGER ANDERSON CONDORI QUISPE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a DIOS mi padre
celestial que me cuida, acompaña y me
da fortaleza para continuar en
momentos de angustia.*

*A mis padres Roger y Rosalia, por su
apoyo incondicional y su esfuerzo
denodado para forjarme en la persona
que soy en la actualidad.*



AGRADECIMIENTO

*A DIOS por iluminarme, darme
sabiduría y guiarme por el sendero
correcto.*

*A mis padres Roger y Rosalia y mis
hermanos, por siempre impulsarme
cada día para ser mejor persona y
profesional.*

*A mi asesor, presidente y jurados de
tesis de la Escuela Profesional de
Ingeniería Civil de la U.N.A Puno por
guiarme y apoyarme.*

*A la empresa CASA y todas las
personas que colaboraron en el
desarrollo de la presente tesis de
investigación.*



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
RESUMEN	19
ABSTRACT.....	20
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	21
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	22
1.2.1. PROBLEMA GENERAL.....	22
1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS	22
1.2.2.1. PROBLEMA ESPECÍFICO 1	22
1.2.2.2. PROBLEMA ESPECÍFICO 2.....	22
1.2.2.3. PROBLEMA ESPECÍFICO 3.....	22
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	23
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	24
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
1.4.2.1. OBJETIVO ESPECÍFICO 1.....	24
1.4.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 2.....	24
1.4.2.3. OBJETIVO ESPECÍFICO 3.....	24
1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	24
1.5.1. HIPÓTESIS GENERAL	24
1.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	25
1.5.2.1. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1.....	25
1.5.2.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2.....	25
1.5.2.3. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 3.....	25
1.6. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	25
1.6.1. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO.....	25



2.3.1.6.4.	AGUA	63
2.3.1.6.5.	ADITIVOS	64
2.3.1.7.	METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL SLURRY SEAL	64
2.3.1.8.	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL SLURRY SEAL	66
2.3.1.9.	PROCESO CONSTRUCTIVO DEL SLURRY SEAL.....	69
2.3.1.9.1.	PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	69
2.3.1.9.2.	CALIBRACIÓN DEL EQUIPO	70
2.3.1.9.3.	PROCESO DE APLICACIÓN.	72
2.3.1.9.4.	COMPACTACIÓN DE LA LECHADA ASFÁLTICA COLOCADA.....	76
2.3.1.9.5.	CONTROL DE TEMPERATURA	77
2.3.2.	ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL	78
2.3.2.1.	RESEÑA HISTÓRICA	78
2.3.2.2.	DEFINICIÓN DEL IRI	79
2.3.2.3.	MODELO DEL CUARTO COCHE	80
2.3.2.4.	MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL IRI	82
2.3.2.4.1.	MEDICIONES DE PRIMERA CLASE.....	82
2.3.2.4.2.	MEDICIONES DE SEGUNDA CLASE	83
2.3.2.4.3.	MEDICIONES DE TERCERA CLASE	83
2.3.2.4.4.	MEDICIONES DE CUARTA CLASE.....	84
2.3.2.5.	IMPORTANCIA DEL IRI	85
2.3.2.6.	ESCALA DE REGULARIDAD	86

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	MATERIALES	88
3.1.1.	MATERIALES UTILIZADOS EN EL PROCESO DE INVESTIGACIÓN	88
3.2.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	89
3.2.1.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	89
3.2.2.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	89
3.2.3.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	89
3.2.4.	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....	90
3.2.5.	ESQUEMA DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN.....	90
3.2.6.	POBLACIÓN Y MUESTRA	91
3.2.6.1.	POBLACIÓN	91



3.2.6.2.	MUESTRA	91
3.2.6.2.1.	DETERMINACIÓN DE LA MUESTRA.....	91
3.2.7.	INSTRUMENTOS	92
3.2.7.1.	INSTRUMENTOS METODOLÓGICOS.....	92
3.2.7.2.	INSTRUMENTOS DE INGENIERÍA.....	92
3.3.	PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	93
3.3.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SLURRY SEAL	93
3.3.1.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.....	93
3.3.1.1.1.	DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A REALIZARSE A LOS AGREGADOS	93
3.3.1.1.2.	RESUMEN COMPARATIVO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS	109
3.3.1.2.	CARACTERIZACIÓN DEL RELLENO MINERAL.....	110
3.3.1.2.1.	DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A REALIZARSE AL FILLER MINERAL	110
3.3.1.3.	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA.....	112
3.3.1.3.1.	DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A REALIZARSE AL AGUA.....	113
3.3.1.4.	CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	115
3.3.1.4.1.	DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LA EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS CSS – 1P.....	115
3.3.1.4.2.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LA EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS	120
3.3.2.	DISEÑO DEL SLURRY SEAL.....	122
3.3.2.1.	CONTENIDO TEÓRICO DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA	122
3.3.2.1.1.	MÉTODOS PARA LA SELECCIÓN DEL CONTENIDO DE EMULSIÓN	122
3.3.2.1.2.	MÉTODO DE LA SUPERFICIE ESPECIFICA APARENTE	122
3.3.2.1.2.1	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE TEÓRICO DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	124
3.3.2.2.	CONTENIDO DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGUA.....	126
3.3.2.2.1.	ENSAYO DE CONSISTENCIA (ISSA TB – 106).....	126



3.3.2.2.1.1 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGUA	128
3.3.2.3. COMPATIBILIDAD DE LOS COMPONENTES DEL SLURRY SEAL	129
3.3.2.3.1. TIEMPO DE MEZCLA (ISSA TB – 113).....	129
3.3.2.3.1.1 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE MEZCLADO	131
3.3.2.4. PRUEBAS DE DESEMPEÑO.....	131
3.3.2.4.1. ENSAYO DE ABRASIÓN EN HÚMEDO W.T.A.T (ISSA TB – 100).....	132
3.3.2.4.1.1 RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN EN HÚMEDO DE LAS MUESTRAS CON 0.5% DE FILLER ..	135
3.3.2.4.1.2 RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN EN HÚMEDO DE LAS MUESTRAS CON 1.0 % DE FILLER .	137
3.3.2.4.1.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN EN HÚMEDO DE LAS MUESTRAS CON 2.0 % DE FILLER .	140
3.3.2.4.2. ENSAYO DE RUEDA CARGADA L.W.T (ISSA TB – 109).	142
3.3.2.4.2.1 RESULTADOS DEL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE LAS MUESTRAS CON FILLER DE 0.5 %	145
3.3.2.4.2.2 RESULTADOS DEL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE LAS MUESTRAS CON FILLER DE 1.0%	148
3.3.2.4.2.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE LAS MUESTRAS CON FILLER DE 2.0%	151
3.3.2.5. CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA	153
3.3.2.5.1. ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA (ISSA TB – 111)	154
3.3.2.5.1.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA LAS MUESTRAS CON 0.5% DE FILLER	156
3.3.2.5.1.2 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA LAS MUESTRAS CON 1.0% DE FILLER	157
3.3.2.5.1.3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA LAS MUESTRAS CON 2.0% DE FILLER	159
3.3.2.6. ENSAYO DE COHESIÓN (ISSA TB – 139).....	161



3.3.2.6.1.	DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE APERTURA AL TRÁFICO PARA LAS MUESTRAS CON 0.5% DE FILLER	163
3.3.2.6.2.	DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE APERTURA AL TRÁFICO PARA LAS MUESTRAS CON 1.0 % DE FILLER	165
3.3.2.6.3.	DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE APERTURA AL TRÁFICO PARA LAS MUESTRAS CON 2.0% DE FILLER	167
3.3.3.	APLICACIÓN DEL SLURRY SEAL IN - SITU	169
3.3.3.1.	RESULTADOS DE LOS TIEMPOS DE APERTURA AL TRÁFICO IN - SITU	172
3.3.3.2.	CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN LA ZONA DE APLICACIÓN	175
3.3.4.	MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)	176
3.3.4.1.	ELEMENTOS DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DEL IRI	176
3.3.4.2.	INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DEL IRI	179
3.3.4.3.	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DEL IRI	181
3.3.4.4.	VALORES DE MEDICIÓN DEL IRI	181
3.3.4.4.1.	VALORES DEL IRI ANTES DE LA COLOCACIÓN DEL MORTERO ASFÁLTICO	182
3.3.4.4.2.	VALORES DEL IRI DESPUÉS DE LA COLOCACIÓN DEL MORTERO ASFÁLTICO	183

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	RESULTADOS	184
4.1.1.	VALORES DEL DISEÑO CON 0.5% DE FILLER	184
4.1.2.	VALORES DEL DISEÑO CON 1.0% DE FILLER	186
4.1.3.	VALORES DEL DISEÑO CON 2.0% DE FILLER	188
4.2.	DISCUSIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	189
4.2.1.	COMPARACIÓN DEL ENSAYO ABRASIÓN EN HÚMEDO (W.T.A.T)	190
4.2.2.	COMPARACIÓN DEL ENSAYO DE RUEDA CARGADA (L.W.T)	191
4.2.3.	TIEMPOS DE APERTURA AL TRÁFICO EN LABORATORIO	192
4.2.4.	TIEMPOS DE APERTURA AL TRÁFICO EN CAMPO	193



4.2.5. COMPARACIÓN DE LOS VALORES DEL IRI	195
4.2.5.1. VALORES DEL IRI EN TRAMO CON DISEÑO DE 0.5 % DE FILLER.....	195
4.2.5.2. VALORES DEL IRI EN TRAMO CON DISEÑO DE 1.0% DE FILLER.....	196
4.2.5.3. VALORES DEL IRI EN TRAMO CON DISEÑO DE 2.0% DE FILLER.....	197
V. CONCLUSIONES.....	199
5.1. CONCLUSIÓN GENERAL	199
5.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS	199
5.2.1. CONCLUSIÓN ESPECÍFICA 1	199
5.2.2. CONCLUSIÓN ESPECÍFICA 2	199
5.2.3. CONCLUSIÓN ESPECÍFICA 3	200
5.2.4. CONCLUSIÓN ESPECÍFICA 4	200
VI. RECOMENDACIONES	201
VII. REFERENCIAS.....	203
ANEXOS.....	208

Área : Mantenimiento y Conservación Vial

Tema : Tratamientos Superficiales

Línea de investigación: Transportes y Gestión Vial

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 14 de enero de 2022.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama esquemático de una emulsión.....	49
Figura 2.2: Representación de una emulsión aniónica y catiónica.....	51
Figura 2.3: Nomenclatura de una emulsión asfáltica.....	53
Figura 2.4: Proceso de ruptura y curado de la emulsión asfáltica.....	55
Figura 2.5: Proceso de producción de emulsiones asfálticas.....	63
Figura 2.6: Proceso de diseño del Slurry Seal.....	66
Figura 2.7: Equipo de aplicación del slurry seal.....	71
Figura 2.8: Esquema de fabricación del sello de lechada asfáltica.....	71
Figura 2.9: Gráfica del modelo “cuarto de carro”.....	81
Figura 2.10: Modelo de cuarto de vehículo.....	82
Figura 2.11: Escala estándar para cuantificar el IRI.....	86
Figura 3.1: Esquema de trabajo de la investigación.....	90
Figura 3.2: Gráfico de la curva granulométrica.....	97
Figura 3.3: Realización del ensayo de análisis granulométrico.....	97
Figura 3.4: Sustancia química CaCl_2 , para el ensayo de equivalente de arena.....	99
Figura 3.5: Realización del ensayo equivalente de arena.....	99
Figura 3.6: Realización del ensayo de peso unitario.....	101
Figura 3.7: Realización del ensayo de peso específico.....	103
Figura 3.8: Colocado de muestra en el equipo de abrasión.....	104
Figura 3.9: Realización del ensayo de abrasión.....	105
Figura 3.10: Realización del ensayo durabilidad a los sulfatos de los agregados.....	106
Figura 3.11: Realización del ensayo azul de metileno.....	108
Figura 3.12: Material fino ensayado.....	108
Figura 3.13: Ensayo de peso específico al filler (cemento).....	111
Figura 3.14: Muestra de cemento ensayado (Análisis granulométrico).....	112
Figura 3.15: Gráfico para el cálculo teórico del asfalto residual.....	123



Figura 3.16: Cálculo del contenido teórico de asfalto residual	125
Figura 3.17: Formato de la medición de la consistencia del slurry seal.....	127
Figura 3.18: Representación del ensayo de consistencia.....	127
Figura 3.19: Ensayo de tiempo de mezclado, slurry seal tipo II	130
Figura 3.20: Mezclado de los componentes, slurry seal tipo II.....	130
Figura 3.21: Equipo para el ensayo de abrasión en húmedo	134
Figura 3.22: Gráfico de tendencia del ensayo W.T.A.T, filler 0.5%.....	137
Figura 3.23: Gráfico de tendencia del ensayo W.T.A.T, filler 1.0 %.....	139
Figura 3.24: Gráfico de tendencia del ensayo W.T.A.T, filler 2.0 %	142
Figura 3.25: Equipo para el ensayo de rueda cargada	145
Figura 3.26: Gráfico de tendencia del ensayo L.W.T, filler 0.5 %	147
Figura 3.27: Gráfico de tendencia del ensayo L.W.T, filler 1.0 %	150
Figura 3.28: Gráfico de tendencia del ensayo L.W.T, filler 2.0 %	153
Figura 3.29: Límite mínimo de emulsión asfáltica.....	154
Figura 3.30: Límite máximo de emulsión asfáltica	155
Figura 3.31: Determinación del contenido óptimo de emulsión asfáltica.....	155
Figura 3.32: Gráfico para calcular el contenido óptimo de emulsión, filler 0.5%	157
Figura 3.33: Gráfico para calcular el contenido óptimo de emulsión, filler 1.0%	159
Figura 3.34: Gráfico para calcular el contenido óptimo de emulsión, filler 2.0%	160
Figura 3.35: Equipo del ensayo de cohesión (cohesímetro).....	162
Figura 3.36: Ejecución del ensayo de cohesión.....	163
Figura 3.37: Gráfico de tendencia del ensayo de cohesión, filler 0.5%	164
Figura 3.38: Gráfico de tendencia del ensayo de cohesión, filler 1.0%	166
Figura 3.39: Gráfico de tendencia del ensayo de cohesión, filler 2.0%	168
Figura 3.40: Carguío de agregados a la tolva del camión micropavimentador	173
Figura 3.41: Succión de agua, Cisterna de agua – Camión micropavimentador.....	173
Figura 3.42: Succión de emulsión, Cisterna de emulsión – micropavimentador	174



Figura 3.43: Colocación de mortero asfáltico slurry seal tipo II.....	174
Figura 3.44: Proceso de rotura de la emulsión asfáltica.....	175
Figura 3.45: Perfilómetro láser RSP – MARK IV	177
Figura 3.46: Odómetro acoplado al neumático del vehículo.....	178
Figura 3.47: Sistema computarizado para la recolección de datos.....	179
Figura 3.48: Instalación del perfilómetro láser en la parte de atrás.....	180
Figura 4.1: Gráfico del ensayo W.T.A.T a diferentes tasas de filler.....	190
Figura 4.2: Gráfico del ensayo L.W.T a diferentes tasas de filler.....	191
Figura 4.3: Tiempos de apertura al tráfico en laboratorio a diferentes tasas de filler .	192
Figura 4.4: Tiempos de apertura al tráfico en campo a diferentes tasas de filler.....	193
Figura 4.5: Tiempos de apertura al tráfico laboratorio Vs campo.....	194
Figura 4.6: Valores del IRI, Filler 0.5%	195
Figura 4.7: Valores del IRI, Filler 1.0%	196
Figura 4.8: Valores del IRI, Filler 2.0%	197
Figura 4.9: Valores del IRI de los tramos intervenidos, variando el % de filler.....	198



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tipos de Slurry Seal y tasas de aplicación.....	37
Tabla 2.2 Materiales componentes del Slurry Seal.....	44
Tabla 2.3 Especificaciones para el agregado	46
Tabla 2.4 Granulometría para mezclas de Slurry Seal.....	46
Tabla 2.5 Especificaciones para el relleno mineral	48
Tabla 2.6 Especificaciones para la emulsión asfáltica.....	59
Tabla 2.7 Especificaciones para el residuo asfáltico	59
Tabla 2.8 Tamaño promedio de partículas de asfalto en la emulsión.....	62
Tabla 2.9 Especificaciones para el agua de diseño	64
Tabla 2.10 Resumen de los métodos de medición del IRI según el Banco Mundial.....	85
Tabla 2.11 Rugosidad inicial IRI (m/km) según el tipo de carretera.....	87
Tabla 3.1 Muestras Intervenidas In - Situ.....	92
Tabla 3.2 Granulometría de la arena de la cantera Uquiña.....	96
Tabla 3.3 Especificaciones del ensayo Equivalente de Arena.....	98
Tabla 3.4 Resultado del ensayo equivalente de arena.....	99
Tabla 3.5 Resultado del ensayo de peso unitario.....	101
Tabla 3.6 Resultados del ensayo de peso específico y absorción	102
Tabla 3.7 Especificaciones del ensayo abrasión de los ángeles.....	104
Tabla 3.8 Resultado del ensayo de abrasión de los ángeles.....	104
Tabla 3.9 Especificaciones para el ensayo de duración a sulfatos.....	105
Tabla 3.10 Resultado del ensayo durabilidad a los sulfatos	106
Tabla 3.11 Especificaciones del ensayo azul de metileno	107
Tabla 3.12 Resultado del ensayo azul de metileno	108
Tabla 3.13 Resumen de los resultados del agregado ensayado	109
Tabla 3.14 Resultado del ensayo de peso específico del filler mineral	111
Tabla 3.15 Granulometría del cemento portland tipo I.....	112



Tabla 3.16 Resultado del ensayo potencial de hidrogeno pH.....	114
Tabla 3.17 Resultado del ensayo de dureza	114
Tabla 3.18 Resultados de los ensayos de la emulsión modificada con polímeros.....	121
Tabla 3.19 Resultados de los ensayos sobre el residuo de emulsión	121
Tabla 3.20 Porcentajes retenidos de acuerdo al tamiz	125
Tabla 3.21 Dosificación de las muestras preparadas y ensayadas	128
Tabla 3.22 Resultados del ensayo del cono de prueba ISSA TB - 106	128
Tabla 3.23 Especificación ISSA TB - 113	130
Tabla 3.24 Dosificación de la muestra ensayada	131
Tabla 3.25 Resultado del tiempo de mezclado	131
Tabla 3.26 Especificación del ensayo de abrasión en húmedo	134
Tabla 3.27 Dosificación de las muestras en el ensayo W.T.A.T, filler 0.5%	135
Tabla 3.28 Datos obtenidos del ensayo W.T.A.T, filler 0.5%	135
Tabla 3.29 Valores del cálculo del ensayo W.T.A.T, filler 0.5%	135
Tabla 3.30 Resultados del ensayo W.T.A.T, filler 0.5 %	136
Tabla 3.31 Dosificación de las muestras en el ensayo W.T.A.T, filler 1.0%	138
Tabla 3.32 Datos obtenidos del ensayo W.T.A.T, filler 1.0%	138
Tabla 3.33 Valores del cálculo del ensayo W.T.A.T, filler 1.0%	138
Tabla 3.34 Resultados del ensayo W.T.A.T, filler 1.0 %	139
Tabla 3.35 Dosificación de las muestras en el ensayo W.T.A.T, filler 2.0%	140
Tabla 3.36 Datos obtenidos del ensayo W.T.A.T, filler 2.0%	141
Tabla 3.37 Valores del cálculo del ensayo W.T.A.T, filler 2.0%	141
Tabla 3.38 Resultados del ensayo W.T.A.T, filler 2.0 %	141
Tabla 3.39 Especificación del ensayo de rueda cargada.....	145
Tabla 3.40 Dosificación de las muestras en el ensayo L.W.T, filler 0.5%	146
Tabla 3.41 Datos obtenidos del ensayo L.W.T, filler 0.5%	146
Tabla 3.42 Valores del cálculo del ensayo L.W.T, filler 0.5%	146



Tabla 3.43 Resultados del ensayo L.W.T, filler 0.5 %	147
Tabla 3.44 Dosificación de las muestras en el ensayo L.W.T, filler 1.0%	148
Tabla 3.45 Datos obtenidos del ensayo L.W.T, filler 1.0%	149
Tabla 3.46 Valores del cálculo del ensayo L.W.T, filler 1.0%	149
Tabla 3.47 Resultados del ensayo L.W.T, filler 1.0 %	150
Tabla 3.48 Dosificación de las muestras en el ensayo L.W.T, filler 2.0%	151
Tabla 3.49 Datos obtenidos del ensayo L.W.T, filler 2.0%	152
Tabla 3.50 Valores del cálculo del ensayo L.W.T, filler 2.0%	152
Tabla 3.51 Resultados del ensayo L.W.T, filler 2.0 %	152
Tabla 3.52 Datos de los ensayos W.T.A.T y L.W.T, Filler 0.5%	156
Tabla 3.53 Datos de los ensayos W.T.A.T y L.W.T, Filler 1.0%	158
Tabla 3.54 Datos de los ensayos W.T.A.T y L.W.T, Filler 2.0%	160
Tabla 3.55 Dosificación de muestras con 0.5% de filler	163
Tabla 3.56 Resultados del ensayo de cohesión, filler 0.5%	164
Tabla 3.57 Dosificación de muestras con 1.0% de filler	165
Tabla 3.58 Resultados del ensayo de cohesión, filler 1.0%	166
Tabla 3.59 Dosificación de muestras con 2.0% de filler	167
Tabla 3.60 Resultados del ensayo de cohesión, filler 2.0%	167
Tabla 3.61 Tiempos de apertura al tráfico de los tramos intervenidos in - situ.....	172
Tabla 3.62 Relación de sensores equipo RSP	177
Tabla 3.63 Valores del IRI antes de la intervención.....	182
Tabla 3.64 Valores del IRI después de la intervención	183
Tabla 4.1 Dosificación final del slurry seal diseñado con 0.5% de filler	184
Tabla 4.2 Resultados de los ensayos y los tiempos de apertura al tráfico, filler 0.5%	185
Tabla 4.3 Resultados del IRI del antes y después de la colocación, filler 0.5%	185
Tabla 4.4 Dosificación final del slurry seal diseñado con 1.0% de filler	186
Tabla 4.5 Resultados de los ensayos y los tiempos de apertura al tráfico, filler 1.0%	187



Tabla 4.6 Resultados del IRI del antes y después de la colocación, filler 1.0%	187
Tabla 4.7 Dosificación final del slurry seal diseñado con 2.0% de filler	188
Tabla 4.8 Resultados de los ensayos y los tiempos de apertura al tráfico, filler 2.0%	188
Tabla 4.9 Resultados del IRI del antes y después de la colocación, filler 2.0%	189



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ISSA: International Slurry Surfacing Association

W.T.A.T: Wet Abrasion Test

L.W.T: Loaded Wheel Test

IRI: Índice de Rugosidad Internacional

CSS: Cationic Slow Setting

CMS: Cationic Medium Setting

CRS: Cationic Rapid Setting

CQS: Cationic Controlled Setting



RESUMEN

La presente tesis de investigación abordó el tema del diseño y ejecución del slurry seal, ello con el objetivo general de determinar la influencia de la colocación del slurry seal en el índice de rugosidad internacional (IRI). Con los objetivos específicos planteados, se evaluó el comportamiento del slurry seal, ello a través de la variación del cemento utilizado como filler en el diseño. En el desarrollo de la investigación se planteó un diseño experimental, con un nivel de investigación relacional y un enfoque cuantitativo. Para la colocación del slurry seal se realizaron 03 diseños, cada uno con diferente contenido de filler, 0.5%, 1.0% y 2.0%. Los diseños al igual como la fabricación de la emulsión asfáltica de rotura lenta modificada con polímeros, fueron realizados y producidos en el laboratorio de la planta de emulsiones asfálticas de la empresa Construcción y Administración S.A., la cual queda ubicado en la provincia de Cañete y los agregados pétreos fueron procesados y extraídos de la cantera Uquiña, la cual se ubica en el distrito de Yura. La ejecución de los diseños de slurry seal se realizaron en tramos de prueba del tramo vial Imata – Patahuasi, progresiva del km 125 al 130, la medición para la obtención de los valores del IRI se realizó con un perfilómetro láser, dicha medición se realizó antes y después de la colocación del slurry seal. La conclusión general a la cual se llegó es que, la colocación del slurry seal influye en el IRI de una superficie de rodadura; en cuanto a las conclusiones específicas a las cuales se llegaron es que, la variación del contenido de filler influye en el diseño de un slurry seal y en el IRI, el incremento progresivo del contenido de filler reduce los valores de los ensayos de abrasión en húmedo y rueda cargada, aumentando la resistencia del mortero, asimismo este incremento progresivo del filler permite reducir los tiempos de apertura al tráfico en campo.

Palabras clave: Emulsión Asfáltica, Slurry Seal, Micropavimento, Índice de Rugosidad Internacional.



ABSTRACT

This research thesis addressed the issue of slurry seal design and execution, with the general objective of determining the influence of slurry seal placement on the international roughness index (IRI). With the specific objectives set, the behavior of the slurry seal was evaluated, this through the variation of the cement used as filler in the design. In the development of the research, an experimental design was proposed, with a relational research level and a quantitative approach. For the placement of the slurry seal, 03 designs were made, each with a different filler content, 0.5%, 1.0% and 2.0%. The designs, as well as the manufacture of the slow-breaking asphalt emulsion modified with polymers, were made and produced in the laboratory of the asphalt emulsions plant of the company Construcción y Administración SA, which is located in the province of Cañete and Los Angeles. Stone aggregates were processed and extracted from the Uquiña quarry, which is located in the Yura district. The execution of the slurry seal designs were carried out in test sections of the Imata - Patahuasi road section, progressive from km 125 to 130, the measurement to obtain the IRI values was carried out with a laser profilometer, said measurement was carried out before and after the placement of the slurry seal. The general conclusion reached is that the placement of the slurry seal influences the IRI of a running surface; Regarding the specific conclusions reached is that, the variation of the filler content influences the design of a slurry seal and the IRI, the progressive increase of the filler content reduces the values of the wet abrasion tests. and loaded wheel, increasing the resistance of the mortar, also this progressive increase of the filler allows to reduce the opening times to traffic in the field.

Keywords: Asphalt Emulsion, Slurry Seal, Micropavement, International Roughness Index,



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En el Perú y a nivel mundial, la infraestructura vial, tiene una incidencia alta en la economía, esto debido a las cuantiosas sumas de dinero que se requiere para la construcción, mantenimiento y rehabilitación de carreteras.

Con el transcurso del tiempo, los pavimentos flexibles van presentando un proceso de deterioro a nivel funcional y estructural. Las causas de estos deterioros generalmente son el envejecimiento de los materiales que componen la superficie de rodadura, el aumento del tráfico pesado y la acción intempestiva de los climas extremos. A medida que estos deterioros se van agravando progresivamente, los valores del índice de rugosidad internacional (IRI) de las superficies de rodadura se van incrementando, el IRI es un parámetro que permite evaluar de manera funcional el nivel de serviciabilidad de un pavimento.

Por tal razón, es importante realizar el mantenimiento oportuno de la superficie de rodadura de un pavimento flexible, debido a que las carreteras deben de asegurar adecuados estándares de confort, comodidad, seguridad y economía a los usuarios de las vías, para que así de esta manera no se vea afectada las interrelaciones sociales y económicas (cadena logística), para tal fin, el mantenimiento de la superficie de rodadura de las carreteras deberá realizarse con la técnica más adecuada y con la mínima inversión e interrupción de tráfico.

Una de las técnicas utilizadas para la preservación y mantenimiento de la superficie de rodadura de un pavimento es el Slurry Seal, el cual es un tipo de tratamiento superficial económico y amigable con el medio ambiente, no aporta poder estructural al pavimento, su aporte es netamente funcional. Debido a que en su composición tiene como



ligante asfáltico a las emulsiones asfálticas de rotura lenta, este tratamiento requiere de un tiempo determinado para ponerse al servicio de los usuarios, periodo de tiempo que es incómodo debido a la interrupción del tráfico.

(Escalante, 2019), el tiempo de apertura al tráfico cuando se utiliza emulsiones asfálticas de rotura lenta para la producción de slurry seal es aproximadamente de 4 a 5 horas, ello dependerá de las condiciones climáticas en la zona.

En la presente tesis de investigación se propone evaluar la influencia de la colocación del slurry seal en el índice de rugosidad internacional (IRI), así como también la influencia de la variación del contenido de cemento (filler) en el diseño.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

- ¿De qué manera influye la colocación de slurry seal en el índice de rugosidad internacional del tramo vial Imata – Patahuasi, progresiva del km 125 al 130?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

1.2.2.1. PROBLEMA ESPECÍFICO 1

- ¿La variación del contenido de filler en el diseño del slurry seal influirá en los valores del índice de rugosidad internacional de los tramos intervenidos?

1.2.2.2. PROBLEMA ESPECÍFICO 2

- ¿Cuál es la influencia de la variación del contenido de filler del slurry seal en los ensayos de desempeño: abrasión en húmedo y rueda cargada?

1.2.2.3. PROBLEMA ESPECÍFICO 3

- ¿Cómo influye la variación del contenido de filler en el tiempo para aperturar al tráfico el slurry seal tanto en laboratorio como en campo?



1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Debido a que la gran parte de las carreteras existentes en el Perú, requieren de un mantenimiento adecuado para alargar la vida útil del pavimento, el slurry seal se presenta como una adecuada alternativa para la preservación de la superficie de rodadura de un pavimento. Este tratamiento es una de las técnicas de conservación de superficies de rodaduras asfálticas que se ha utilizado más ampliamente a nivel mundial, puesto que este es un tratamiento que permite alargar la vida útil de un pavimento a bajo costo, el cual también es amigable con el medio ambiente. Esta alternativa se utiliza en superficies de rodadura que no tienen un nivel avanzado de deterioro asociado a la fatiga o deformación permanente.

La presente investigación tiene como finalidad evaluar la influencia de la colocación de slurry seal en el índice de rugosidad internacional del tramo vial Imata – Patahuasi, progresiva del km 125 al 130; es importante indicar que el IRI es un parámetro que permite evaluar de manera funcional el nivel de serviciabilidad de un pavimento, en donde a valores del IRI por encima de lo establecido en las normas, la serviciabilidad que proporciona el pavimento no es la adecuada. Con la colocación del slurry seal en los tramos viales intervenidos se pretende mejorar o corregir el índice de rugosidad internacional. Por otro lado, mediante la variación progresiva del contenido de filler en su diseño, se busca evaluar el comportamiento del slurry seal.

El alcance que tiene la presente investigación es brindar información recopilada sobre el diseño y ejecución del slurry seal, para así lograr un aporte a la ingeniería de transportes, específicamente en la tecnología de los morteros asfálticos.



1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la influencia de la colocación de slurry seal en el índice de rugosidad internacional del tramo vial Imata – Patahuasi, progresiva del km 125 al 130.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.4.2.1. OBJETIVO ESPECÍFICO 1

- Determinar la influencia de la variación del contenido de filler del slurry seal en el índice de rugosidad internacional de los tramos intervenidos.

1.4.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 2

- Determinar la influencia de la variación del contenido de filler del slurry seal en los ensayos de desempeño: abrasión en húmedo y rueda cargada.

1.4.2.3. OBJETIVO ESPECÍFICO 3

- Determinar el tiempo de apertura al tráfico tanto en laboratorio como en campo de los diseños obtenidos de slurry seal a partir de la variación del contenido de filler.

1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. HIPÓTESIS GENERAL

- La colocación del slurry seal influye en los valores del índice de rugosidad internacional del tramo vial Imata – Patahuasi, progresiva del km 125 al 130.



1.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

1.5.2.1. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1

- La variación del contenido de filler en el slurry seal influye de manera positiva en los valores del índice de rugosidad internacional de los tramos intervenidos.

1.5.2.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2

- El incremento de la cantidad de filler en el diseño del slurry seal presenta una mejor resistencia en los ensayos de desempeño: abrasión en húmedo y rueda cargada.

1.5.2.3. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 3

- El incremento de la cantidad de filler en el diseño del slurry seal reduce el tiempo de apertura al tráfico tanto en laboratorio como en campo.

1.6. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

En el capítulo I, se muestran los lineamientos generales, planteamiento metodológico (problema, justificación, objetivos e hipótesis) que sustentan la presente investigación.

En el capítulo II, se presenta los antecedentes de la investigación y las bases teóricas (marco teórico) los cuales sustentan el desarrollo de la presente investigación. Se detalla la importancia de cada uno de los componentes del mortero asfáltico (slurry seal) para su diseño, así como su evaluación superficial en campo mediante la medición del índice de rugosidad internacional.

El capítulo III, está comprendido por la metodología utilizada para la elaboración de la investigación, en el cual se enmarca los procedimientos necesarios para el cálculo



de los diseños del mortero asfáltico, así como también para la ejecución de los diseños y su respectiva evaluación en campo.

En el capítulo IV, se presentan los resultados acerca del procedimiento realizado en el capítulo III, siendo estos resultados analizados de acuerdo a los objetivos planteados en la presente investigación.

En el capítulo V, se muestran las conclusiones a las que se llegó después de realizar la investigación a partir de los objetivos planteados y los resultados obtenidos.

En el capítulo VI, se presentan las recomendaciones de la investigación a partir de las conclusiones obtenidas.

En el capítulo VII, se muestran las referencias bibliográficas consultadas para la elaboración de la presente investigación y finalmente se concluye con los siguientes anexos:

EL ANEXO A, contiene los ensayos realizados para la caracterización de los agregados.

EL ANEXO B, contiene los diseños obtenidos del slurry seal.

EL ANEXO C, contiene los resultados de la medición del índice de rugosidad internacional del antes y después de las colocaciones del mortero asfáltico.

EL ANEXO D, contiene el formato de calibración del camión micropavimentador.

EL ANEXO E, contiene el formato de calibración del equipo de medición del IRI.

EL ANEXO F, contiene imágenes del proceso de ejecución de la tesis.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. GENERALIDADES.

En el presente capítulo se presentan los antecedentes de la investigación y se describen las referencias teóricas relacionadas al tema de investigación, definiciones y conceptos entorno a la influencia del cemento utilizado como filler en los morteros asfálticos, diseño de slurry seal y la evaluación superficial tomando como parámetro de medición el índice de rugosidad internacional (IRI), ello después de la colocación del mortero asfáltico.

2.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Tanto en el ámbito nacional como en el internacional existen investigaciones realizadas en torno a los objetivos planteados de la presente investigación.

(Acero, 2011) en su tesis de investigación “Evaluación del desempeño de tratamientos superficiales en carreteras de bajo volumen de tránsito tramo Zuñiga – Dv. Yauyos”, busca comparar dos tipos de tratamientos superficiales, mortero asfáltico “Slurry Seal” y Monocapa, para su uso en pavimentos de bajo volumen de tránsito. Para lo cual utiliza un enfoque cuantitativo de nivel explicativo y diseño longitudinal, realizando la evaluación del comportamiento de los tratamientos superficiales a lo largo de 08 meses después de su colocación, mediante la medición del Índice Internacional de Rugosidad (IRI). Como resultado de la evaluación realizada en el tramo Zuñiga – Dv. Yauyos, se evidenció que el deterioro en las secciones de pavimento básico con tratamiento superficial monocapa es más acelerado que en las secciones con mortero asfáltico slurry seal. Concluyendo que, en función al Índice de Rugosidad Internacional, las secciones con tratamiento superficial monocapa se incrementó en un periodo de 8 meses en 17.35%, lo que significa una disminución del 10% de su serviciabilidad,



mientras que en las secciones con slurry seal el IRI incremento en 4.4%, disminuyendo en 2.9% su serviciabilidad; estos resultados nos muestran que existe una marcada tendencia de preservar por más tiempo la serviciabilidad del pavimento de las secciones con tratamiento superficial slurry seal comparado con los sectores con monocapa. En función al monitoreo del IRI se determinó que las tendencias en cuanto al mejor comportamiento de los tratamientos superficiales para pavimentos en vías de bajo volumen de tránsito con precipitaciones máximas anuales de 25 mm y altura promedio comprendida entre los 0 – 2000 m.s.n.m., es el denominado slurry seal. Este comportamiento del slurry seal puede ser explicado en función al índice de vacíos de los tratamientos, la granulometría es más cerrada, lo que le proporciona una barrera física contra el agua, esta baja permeabilidad al agua, le proporciona un aumento de durabilidad comparado con el TSS monocapa donde el índice de vacíos es grande.

(Huanca, 2013) en su tesis de investigación referido al diseño de slurry seal, busca analizar la influencia de la variación del contenido de filler en el mortero asfáltico. El enfoque de la investigación es cuantitativo, nivel explicativo y diseño transversal, la misma que se realizó en el laboratorio de suelos de la planta de emulsión asfáltica de CONCAR ubicada en la provincia de Nasca departamento de ICA, para lo cual se realizó 03 diseños de slurry seal con contenidos de cemento portland utilizado como filler de tasas de 0.5%, 1% y 1.5% respectivamente, teniéndose como ligante asfáltico a una emulsión asfáltica de rotura lenta modificada con polímeros CSS – 1hp y agregados extraídos de la cantera Arunta que se encuentra ubicada en la zona sur – este de la provincia de Tacna en el centro poblado Nueva Tacna. Los resultados obtenidos en cuanto al agregado utilizado para el diseño fueron satisfactorios, debido a que cumplen las especificaciones establecidas por la ISSA; las conclusiones alcanzadas son las siguientes:

(a) Al incrementar la cantidad de filler en el diseño, se incrementa la resistencia en los



ensayos de abrasión en húmedo y de rueda cargada, siendo de mayor consideración en el primer ensayo. (b) También, al incrementar la cantidad de filler en el diseño los valores de cohesión tienden a incrementarse, permitiendo reducir el tiempo de apertura al tráfico. (c) Las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros contienen agentes mejoradores de adherencia, que permite incrementar la resistencia al desprendimiento durante la puesta en servicio del mortero asfáltico.

(Pequeño, 2015) en su tesis de investigación “Comparación de costos y tecnología de mantenimiento utilizando slurry seal y mantenimiento convencional en un pavimento flexible”, busca comparar los costos y tecnología de mantenimiento utilizando slurry seal y mantenimiento convencional en un pavimento flexible. El enfoque de la investigación es no experimental de nivel descriptivo. Para dicha comparación ha tomado en cuenta como referencia el proyecto de mantenimiento en la carretera Chilete – San Pablo – Empalme Ruta 3N, de donde se muestran los costos unitarios de cada mantenimiento seguido del análisis de tecnología utilizada para obtener cuál de las alternativas de mantenimiento tiene mejor costo efectivo. Adicionalmente se detalla los equipos, análisis granulométrico, estándares y normas de cada tratamiento. Las conclusiones alcanzadas son las siguientes: a) Al realizar la comparación de costos y tecnología se verificó que el mantenimiento con slurry seal tiene mayores ventajas tecnológicas y económicas que el mantenimiento convencional sobre un pavimento flexible, b) El mantenimiento convencional bicapa es un método de mantenimiento de carreteras más costoso que el mantenimiento con slurry seal, puesto que el costo por m^2 para el mantenimiento convencional es de S/. 9.00 mientras que para el mantenimiento con slurry seal es de S/. 4.26. c) Los procesos constructivos de estos dos tipos de mantenimiento son muy parecidos, una de las diferencias es que en el proceso constructivo el slurry seal se coloca sobre el pavimento con una sola pasada del camión slurry seal para lo que el



mantenimiento convencional bicapa necesita de dos esparcidas de ligantes y dos de gravilla, siendo la ejecución de slurry seal casi cuatro veces más rápida.

(Mancha, 2016) en su tesis de investigación “Análisis comparativo del costo por niveles de serviciabilidad entre el tratamiento superficial slurry seal y el tratamiento granular convencional”, busca demostrar que existen ventajas comparativas entre el tratamiento superficial slurry seal y el tratamiento granular convencional en cuanto al menor costo de serviciabilidad en el tiempo. El enfoque de la investigación es no experimental y nivel de investigación descriptivo. Para tal efecto el análisis comparativo de ambos métodos de conservación fue aplicado al camino de la red vial nacional no pavimentada, ubicada en la región de Huancavelica, perteneciente a un sector de la ruta PE – 3SD (Dv. Colcabamba – Dv. Cobriza). Las conclusiones alcanzadas son las siguientes: a) El slurry seal a diferencia del tratamiento granular convencional, brindará mejor serviciabilidad en términos de confort, ausencia de polvo y los en épocas de sequía y en épocas de avenidas respectivamente, así como proveerá una mejor superficie de rodadura confortable de mayor durabilidad que la tradicional, b) El tratamiento mediante slurry seal sobre capas granulares darán un mejor comportamiento superficial ya que funcionara como una capa impermeable el cual protegerá la base granular del camino y a la vez proporcionara un superficie anti deslizante debido a sus textura, c) Para un tiempo de 4 años de mantenimiento y conservación con los tratamientos slurry seal y tratamiento granular convencional, se determinó que el slurry seal es más económico, debido a que de acuerdo al análisis económico realizado hay un diferencia entre ambos de 14.2%.

(Ramirez, 2017) en su tesis de investigación “Comportamiento del slurry seal a altitudes mayores de 3500 m.s.n.m. en mantenimiento de pavimentos flexibles de la ciudad de Puno”, la cual tiene un enfoque cuantitativo, un nivel explicativo y un diseño experimental, busca explicar el comportamiento del slurry seal a altitudes mayores de



3500 m.s.n.m., para lo cual implementa una alternativa económica y ecológica que corrija los efectos del ahuellamiento y sellado de micro fisuras superficiales del pavimento del Jr. Sinchi Roca de la ciudad de Puno. Se diseñó la alternativa del slurry seal con el objetivo de mejorar los parámetros de control de resistencia al deslizamiento, textura, (como son ahuellamientos y microfisuras), realizándose diferentes controles de calidad tanto en campo como en laboratorio de la empresa TDM Asfaltos en la ciudad de Lima. Antes de realizar la colocación del slurry seal, en el mantenimiento de la vía se realizó los controles de calidad a los componentes del mortero asfáltico para la verificación de los requisitos establecidos en las especificaciones de la ISSA A 105 y luego proceder con el diseño del mortero asfáltico slurry seal. Los resultados obtenidos del diseño realizado fue lo siguiente: Agregado: 100%, Emulsión: 13%, Agua: 8% y Filler: 1%. La emulsión utilizada es catiónica de rotura lenta modificada con polímeros CSS – 1HP. Se concluye que el comportamiento del slurry seal a altitudes mayores a 3500 m.s.n.m. en mantenimiento de vías asfaltadas en una alternativa eficaz, el cual corrige y mejora los niveles de serviciabilidad proporcionando vías más seguras. La aplicación del slurry seal en el tramo de prueba mejoró la resistencia al deslizamiento dando valores de coeficiente de resistencia al deslizamiento (CDR) mayores a 0.73, donde las especificaciones técnicas del Perú EG – 2013, nos indica mínimo 0.45, garantizando una buena fricción entre el neumático y la carpeta de rodadura.

(Torres, 2019) en su tesis de investigación “Comportamiento del slurry seal para el mantenimiento de la superficie asfáltica el tambo” la cual tiene un enfoque cuantitativo y un nivel explicativo, busca determinar los resultados de la aplicación de slurry seal para el mantenimiento de la superficie asfáltica de la Av. Evitamiento del distrito de el Tambo, para lo cual se determinó el tipo de slurry seal adecuado para la condición actual de la superficie de rodadura y se realizó la caracterización de los componentes del mortero



asfáltico, los resultados obtenidos del diseño fueron: Agregado: 100%, Emulsión asfáltica CQS – 1HP: 13%, Filler: 1.5%, Agua: 10% y Aditivo (Sulfato de Aluminio): 1%. Dentro de los resultados obtenidos se determinó que el componente fundamental del slurry seal fue el agregado (Arena Chancada 3/8”), ya que a partir de sus características se definió el tipo de emulsión asfáltica tipo CQS, el slurry seal diseñado para el mantenimiento de la superficie asfáltica de la Av. Evitamiento Tramo Av. Mariscal Castilla – Av. Huancavelica va generar resultados significativos, ya que demostró un buen comportamiento ante las pruebas de desempeño, garantizando su buena resistencia frente al desgaste por abrasión el cual fue determinado por el ensayo de abrasión en húmedo, asimismo se garantiza una buena resistencia a la exudación del asfalto el cual fue determinado por el ensayo de rueda cargada; finalmente el ensayo de cohesión se demostró que dicha técnica de mantenimiento optimiza el tiempo de apertura al tráfico, ya que se dará a los 90 minutos de haber sido colocado sobre la superficie asfáltica. Concluyendo que la caracterización de los componentes del Slurry Seal tienen resultados significativos para el mantenimiento de la superficie asfáltica, ya que estos cumplen de manera satisfactoria las especificaciones que establecen tanto las especificaciones generales para la construcción de carreteras EG 2013 y la ISSA A105.

(Condezo, 2020) en su tesis de investigación “Análisis del comportamiento funcional y estructural de la carretera Lamas – Pamasho y Bellavista – Ledoy con tratamientos superficiales”, siendo uno tratamiento superficial bicapa y el otro slurry seal respectivamente, busca analizar quien tiene mejor comportamiento funcional y estructural. El enfoque de la investigación es de tipo cuantitativo y de nivel explicativo. Para el análisis del comportamiento funcional uso el Índice de Rugosidad Internacional (IRI). Dentro de los resultados obtenidos se apreció que el slurry seal tiene mejor comportamiento funcional frente al tratamiento superficial bicapa (TSB), asegurando una



mejor vida útil del pavimento, mejor grado de confort al manejar y esto se explica debido a que el slurry seal presenta pocos vacíos ya que su granulometría le proporciona un bajo índice de vacío lo cual le da una mejor permeabilidad a lo que no es el tratamiento superficial bicapa. Concluyendo que el comportamiento funcional de la carretera Lamas – Pamasho (TSB) en su tercera medición presentó un IRI mayor a 3.5 m/km por encima de lo reglamentario, presentando un déficit de serviciabilidad; en cuanto al comportamiento funcional de la carretera Bellavista – Ledoy presentó niveles de IRI que están entre 1.7 a 2.5, esto quiere decir que la vía ofrece una serviciabilidad BUENA para el usuario.

(Barrionuevo , 2012) en su tesis de investigación “Diseño de micropavimento utilizando emulsión asfáltica modificado con polímeros, con agregado procedente de la cantera Calagua de la ciudad de San Miguel, provincia de Bolívar”, se planteó como objetivo diseñar y evaluar el diseño de micropavimento mediante ensayos de laboratorio, dándole a la investigación un enfoque cuantitativo de nivel explicativo y un diseño del tipo experimental. Para el diseño se utilizó emulsión asfáltica de rotura lenta modificada con polímeros CSS – 1HP, agregados de la cantera Calagua la cual se ubica en la ciudad de San Miguel, Provincia de Bolívar, cemento portland tipo I como filler y agua. La dosificación final del diseño realizado fue: (a) Agregados 100% (b) Emulsión asfáltica: 11%, Filler: 2% y Agua: 20%. Dentro de los resultados obtenidos se obtuvo en el ensayo de cohesión un tiempo de rotura de 01 hora y un tiempo de apertura al tráfico de 01 hora con 24 minutos. En el proceso del diseño indica que se utilizó ese porcentaje de filler para influir en el comportamiento a la ruptura y curado del micropavimento, asimismo para compensar la deficiencia de finos en el agregado.

(Orellana, Peña, & Perez, 2015) en su tesis de investigación “Propuesta de diseño y proceso constructivo de lechada asfáltica en el mantenimiento de obras viales en el



salvador”, investigación del tipo cuantitativo, explicativo y experimental, busca elaborar una propuesta de diseño y proceso constructivo para la aplicación de lechadas asfálticas en el mantenimiento de vías, para ello se consideraron 03 emulsiones del mismo tipo CQS – 1HP (Emulsiones asfálticas de rotura controlada modificada con polímeros) de distintas formulaciones, con la intención de poder comparar sus características reológicas con las de la emulsión utilizada en la realización de la propuesta de diseño y así predecir cuál de las cuatro emulsiones utilizadas tendría un mejor desempeño. Dentro de los resultados obtenidos en el ensayo de LWT se pudo observar que, a mayor contenido de emulsión asfáltica existe mayor adherencia de arena, concluyéndose que dicho ensayo representa la exudación (exceso de asfalto). Por otro lado, el ensayo WTAT representa la falta de asfalto en la mezcla, representando las peladuras del pavimento y la pérdida del agregado.

(Ramirez, 2017) en su tesis de investigación “Análisis de emulsiones asfálticas modificadas con polímeros para uso en slurry seal”, de tipo cuantitativa y nivel explicativo, busca comprobar si el uso de las emulsiones asfálticas con polímeros, en lechadas asfálticas, aportan a reducir la pérdida de árido, con respecto a una convencional; las dosificaciones obtenidas de las muestras ensayadas con emulsión asfáltica modificada con polímeros y emulsión asfáltica convencional respectivamente son las siguientes (1) Agregado: 100%, Emulsión: 10%, Agua: 7% y Filler: 0%, (2) Agregado: 100%, Emulsión: 10.1%, Agua: 8% y Filler: 0%. Los resultados que se obtuvo en el ensayo de pérdida por abrasión, indica que la emulsión asfáltica modificada con polímeros posee un mejor comportamiento ya que rebaja en un 35% en promedio este parámetro, al poseer mayor viscosidad la emulsión asfáltica modificada aglomera mejor al árido para entregar un mejor sello superficial, concluyendo que la emulsión asfáltica modificada utilizada en el slurry seal disminuye la pérdida por abrasión, posee un mayor porcentaje de residuo



asfáltico, posee un menor tiempo de rotura y proporciona superficies más homogéneas, ello debido a la alta viscosidad que presentan.

2.3. MARCO TEÓRICO.

2.3.1. SLURRY SEAL.

2.3.1.1. RESEÑA HISTÓRICA.

Este tipo de sellos se aplicaron por primera vez a principios de la década de los años treinta en Alemania. Sin embargo, su mayor desarrollo se produjo principalmente en la década de los años sesenta con la mecanización del procedimiento gracias a la aparición de equipos de flujo continuo y los avances en la tecnología de las emulsiones asfálticas. Se trataba de unos morteros fabricados con áridos muy finos y con emulsiones aniónicas de rotura lenta, de manera que la rotura se producía por la evaporación del agua y su utilización estaba muy ligada a la temperatura del ambiente.

En la mitad de los años sesenta se empezaron a utilizar emulsiones catiónicas, con un proceso de rotura de la emulsión por atracción electrostática independizando en gran medida su utilización del clima, no era necesario tener un sol espléndido y temperaturas elevadas para evaporar el agua de la emulsión.

Una tercera generación de morteros asfálticos posiblemente la que ha supuesto el mayor avance en su desarrollo tecnológico, se produce a principio de los años ochenta, con la aparición simultánea de las emulsiones de asfalto modificado con elastómeros (tipo de polímero) y el desarrollo de nuevas máquinas con mezcladores más potentes y rápidos, con un dispositivo de extendido que garantiza la homogeneidad de la mezcla a lo largo de todo el extendido de la misma.

En la actualidad el avance de la tecnología asfáltica emulsionada, basada en el perfeccionamiento y la variedad de emulsiones asfálticas, ha hecho posible que la ingeniería vial disponga de aditivos que mejoran la reología del asfalto. Permitiendo así,

desarrollar mezclas asfálticas en frío con mayor durabilidad y resistencia ante las cargas de tránsito y a las condiciones climáticas, tales como el slurry seal con emulsiones asfálticas catiónicas de rotura o curado lento modificadas con polímeros.

2.3.1.2. DEFINICIÓN DE SLURRY SEAL

El slurry seal es una mezcla asfáltica en frío; compuesto por la combinación bien proporcionado de emulsión asfáltica, agregado de granulometría cerrada, filler, agua y aditivos según sea necesario, esparcidos sobre una superficie pavimentada de acuerdo a las especificaciones del MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones), y según las recomendaciones de la ISSA (International Slurry Surfacing Association). Se aplica como alternativa de tratamiento superficial en capas delgadas que van desde los 3 mm hasta los 15 mm de espesor (1.15 veces el tamaño máximo del agregado), con la finalidad de impermeabilizar la carpeta de rodadura y restaurar la superficie desgastada brindando una mejor resistencia al deslizamiento (alto coeficiente de fricción); así como también, corregir irregularidades en las carpetas asfálticas como alisamientos por exudación y desintegración.

(Jimenez , Ulloa, & Munera, 2016) definen al slurry seal como: Una mezcla de agregado fino bien graduado, relleno mineral “filler”, emulsión asfáltica de rompimiento lento “SS” o controlado “QS” (esta no se debe confundir con la emulsión de rompimiento rápido “RS” que se utiliza para otras aplicaciones) y agua, que adquiere un aspecto “cremoso” cuando es mezclado.

2.3.1.3. TIPOS Y APLICACIONES DE SLURRY SEAL

La ISSA A – 105 clasifica al slurry seal en tres tipos (véase la tabla 2.1), de acuerdo a la distribución granulométrica del agregado (véase la tabla 2.4). Recomendando el lugar de aplicación y la dotación para cada tipo.

Tabla 2.1

Tipos de Slurry Seal y tasas de aplicación

Tipo	Ubicación	Rango de Aplicación Propuesto
I	Áreas de estacionamiento, Calles urbanas y residenciales Pistas de aeropuerto.	4.3 - 6.5 kg/m ²
II	Calles urbanas y residenciales Pistas de aeropuerto.	5.4 - 9.8 kg/m ²
III	Vías primarias e interprovinciales	8.1 - 12.0 kg/m ²

Fuente: ISSA A 105 – 2010

- **Tipo I (superficie fina):** Esta gradación fina dará una aplicación a razón de 4.3 a 6.5 kg. por metro cuadrado, en un espesor de 1/8” o menos. El contenido normal de residuo asfáltico estará entre 10 y 16% en peso con respecto al agregado seco. La fineza de este tipo de slurry seal otorga una máxima capacidad de penetración en las grietas. Este diseño es usado como una capa inicial sobre pavimentos agrietados, que por el alto contenido de asfalto permite una máxima adhesión en la expansión y contracción de las grietas. Este tipo de superficie se aplica en espesores muy delgados; en el caso que se requiera mejorar el desgaste superficial, servirá como primera capa en un tratamiento multicapa.
- **Tipo II (superficie general):** Esta gradación dará una aplicación a razón de 5.4 a 9.8 kg. por metro cuadrado, en un espesor de 1/4” o menos. El contenido normal de residuo asfáltico estará entre 7.5 y 13.5% en peso con respecto al agregado seco.



Este tipo de slurry seal es el más usado por tener una granulometría intermedia, esto permite a la mezcla penetrar dentro de las grietas y también proveer una adecuada superficie de rodadura. Puede usarse cuando se requiere mejorar la resistencia al desgaste superficial.

- **Tipo III (Superficie áspera):** Esta graduación dará una aplicación a razón de 8.1 a 12.0 kg. por metro cuadrado, en espesores de 3/8” o menos. El contenido de residuo asfáltico normal estará en el rango de 6.5 a 12% en peso con respecto al agregado seco.

Este tipo de slurry seal es usado en pavimentos asfálticos que estén expuestos a cambios de temperatura y al tráfico altamente pesado.

Según (Huanca, 2013) indica que los tipos mencionados, pueden ser usados en combinaciones formando una multicapa, dependiendo del espesor y ancho de las fisuras, se puede iniciar con la colocación de un tipo I o Tipo II y continuar con tipo más áspero. Para el diseño de un tipo de slurry seal, se deben considerar los siguientes factores para optimizar su tiempo de vida útil.

- El tipo y condición de la antigua o nueva superficie donde será aplicada el slurry seal, ya sea sobre una base granular, pavimento asfáltico o concreto, textura superficial, cantidad y tamaño de grietas.
- Tipo y volumen de tráfico.
- Condiciones climatológicas.

2.3.1.4. DIFERENCIA ENTRE SLURRY SEAL Y MICROPAVIMENTO.

Según (Huanca, 2013), el slurry seal y los micropavimentos, que si bien es cierto corresponden a la aplicación de mezclas asfálticas en frío utilizados para la conservación y mantenimiento de pavimentos asfálticos y pavimentos de concreto, se les debe diferenciar claramente para evitar cualquier tipo de confusión.



La ISSA define al slurry seal como un mortero asfáltico compuesto por la mezcla de agregados (incluyendo el filler), emulsión asfáltica de rotura lenta, agua y aditivos, el cual se coloca uniformemente en espesores que van desde los 5 a 15 mm. sobre la superficie de un pavimento existente. Por otra parte, la ISSA define a los micropavimentos como un tipo más avanzado o superior de mortero asfáltico, esto debido al uso de emulsiones asfálticas modificadas con polímeros de rotura rápida y de agregados con mejores propiedades físicas, que permite otorgar a la mezcla, mayor resistencia y estabilidad, capaces de alcanzar espesores de hasta 50 mm. distribuidos en capas.

2.3.1.5. TIPOS DE TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Existen tratamientos superficiales que tienen como insumo principal a las emulsiones asfálticas tales como: Fog Seal, Sand Seal, Chip Seal, Otta Seal y Cape Seal; a continuación, se procederá a describir cada uno de ellos, indicando algunas diferencias entre estos tratamientos con respecto al slurry seal.

2.3.1.5.1. FOG SEAL

Según el instituto del asfalto en su manual básico de emulsiones asfálticas MS – 19, el fog seal también es conocido como riego pulverizado, el cual es una aplicación de riego de emulsión asfáltica sobre una superficie asfáltica existente. El ligante utilizado para este tipo de tratamientos son las emulsiones asfálticas de rotura lenta y rápida.

De acuerdo al manual MS – 19, este tipo de tratamiento se utiliza para:

- Renovar viejas superficies asfálticas que en el tiempo ha secado y fragilizado.
- Sellar pequeñas fisuras y vacíos superficiales

La diferencia marcada que existe entre el slurry seal y el fog seal es en el uso, este último es un riego asfáltico en cambio el slurry seal es un mortero asfáltico.

De acuerdo al objetivo general planteado en la investigación, la colocación de este tratamiento superficial no incidiría en la rugosidad de la superficial de rodadura ya que



solo es un riego asfáltico de película muy delgada, por tal razón no se utilizaría para tal objetivo.

2.3.1.5.2. SAND SEAL

De acuerdo al manual del instituto del asfalto MS – 19, este tipo de tratamiento es conocido como sellado de arena, el cual es una aplicación de riego de emulsión asfáltica seguida de una ligera cubierta de agregado fino.

El sellado de arena se utiliza principalmente para:

- Enriquecer un pavimento seco, intemperizado u oxidado. El sellado de arena ayudará a impedir la pérdida de material de la vieja superficie por causa del efecto abrasivo del tráfico.
- Impedir el ingreso de humedad y aire. Cuando la superficie de un pavimento existente comienza a fisurarse, la humedad y el aire pueden penetrar en la estructura subyacente, reduciendo consecuentemente su capacidad portante.

Al igual que el tratamiento superficial Fog seal, la colocación de este tratamiento no incidiría en la rugosidad de la superficie de rodadura, debido a que este es un riego asfáltico de película delgada.

2.3.1.5.3. CHIP SEAL

El instituto del asfalto en su manual MS – 19, sobre este tipo de tratamiento indica: El chip seal es conocido como tratamiento superficial monocapa y bicapa, este tratamiento es particularmente adecuado para tráfico de rutina liviano y medio, y como un procedimiento de mantenimiento preventivo o provisorio.

Según el manual MS – 19, este tipo de tratamiento se utiliza para:

- Proveer una superficie impermeable, resistente al deslizamiento, sobre una estructura de pavimento existente.
- Como una medida provisoria a la espera de una aplicación de mezcla asfáltica.



De acuerdo al manual MS – 19, este tratamiento superficial puede ser múltiple, con el cual se puede alcanzar espesores entre 12 y 20 mm (1/2 y 3/4 de pulgadas). Si han sido correctamente diseñados y contruidos, los tratamientos superficiales dobles aproximadamente triplican la vida de servicio de un tratamiento simple con un costo constructivo mayor en alrededor de un 50%. Debido a que el agregado de la segunda capa es de menor tamaño, se minimiza en gran medida, la pérdida de partículas del tratamiento superficial. En los tratamientos dobles o triples, el tamaño mayor de la piedra de la primera capa define el espesor del tratamiento, las capas siguientes sirven para llenar los vacíos en la matriz de la primera capa de agregado.

Una de las diferencias existentes entre el slurry seal y el chip seal es que, el ligante asfáltico de este último puede ser una emulsión asfáltica y un cemento asfáltico, mientras que para un slurry seal el ligante asfáltico utilizado es netamente la emulsión asfáltica.

El motivo del no uso, de este tipo de tratamiento superficial para la corrección de los valores de rugosidad de una superficie asfáltica es la parte económica, (Pequeño, 2015), en su tesis de investigación, afirma que: de acuerdo a la comparación del análisis económico realizado, concluye que un tratamiento superficial bicapa (Chip Seal) es más costoso que el slurry seal. Por otro lado, afirma que, la ejecución del slurry seal es cuatro veces más rápido que el tratamiento superficial bicapa. Sin embargo, este tratamiento es recomendable para mejorar los valores del IRI.

2.3.1.5.4. OTTA SEAL

Según (Chavez, 2020) indica: El otta seal es un recubrimiento asfáltico de espesor entre 16 a 32 mm, formado por agregados bien graduados y ligante asfáltico resistente a la oxidación por intemperismo. A continuación, se procederá a describir las funciones de este tipo de tratamiento superficial:

- Impermeabiliza la superficie y proporciona durabilidad.



- Es resistente a la abrasión, erosión por esfuerzos del tráfico y el clima.
- Evita la formación de ondulaciones, polvo y lodo aportando a la seguridad y reduciendo los costos operativos.

Por otro lado (Yamunaque, 2020) afirma que: El otta seal consiste en un espesor de 16 a 32 mm de un tratamiento conformado por el riego de un ligante asfáltico relativamente “blando” (baja viscosidad), y el esparcido de gravas naturales, trituradas o una combinación de esta; con o sin sellado de arena. Este tratamiento se clasifica en simples y dobles debido a que se pueden aplicar en una o dos capas. Se subdividen en otta seal de gradación abierta, media y densa, dependiendo de la granulometría del árido.

Según (Yamunaque, 2020), indica que: A diferencia del chip seal el otta seal no requiere que los agregados tengan el mismo tamaño, existe una gradación. La colocación del otta seal sobre la estructura de un pavimento no requiere de un proceso de imprimación asfáltica.

Una de las diferencias existentes entre el slurry seal y el otta seal es que, el ligante asfáltico de este último puede ser una emulsión asfáltica y un cemento asfáltico, mientras que para un slurry seal el ligante asfáltico utilizado es netamente la emulsión asfáltica. Asimismo, los equipos utilizados para la ejecución de estos tratamientos son diferentes.

Uno de los motivos por el cual no se usaría este tratamiento superficial para su colocación en una superficie de rodadura es el tiempo de apertura al tráfico, puesto que se tendría que cerrar el tráfico por periodos largos, los cuales generarían incomodidad en los usuarios de la vía. (Yamunaque, 2020), afirma que: Para cementos asfálticos y asfaltos diluidos deberá dejarse curar la capa sellada por 12 horas y luego aperturar al tránsito, y en caso de las emulsiones asfálticas es recomendable abrir el tránsito a las 24 horas, limitando la velocidad de circulación durante las primeras dos o tres semanas a 40 – 50 km/hora.



2.3.1.5.5. CAPE SEAL

Según el instituto del asfalto en su manual básico de emulsiones asfálticas MS – 19 afirma: El cape seal es una aplicación de un riego de gravilla o monocapa (chip seal simple), ello seguido de la colocación de un mortero asfáltico (slurry seal o micropavimento). La aplicación de la lechada asfáltica o del micropavimento ayuda a llenar los vacíos entre agregados, la lechada liga los agregados gruesos para prevenir perdidas; los agregados gruesos impiden la excesiva abrasión del tráfico y la erosión de la lechada.

De acuerdo al manual MS – 19, este tipo de tratamiento se utiliza para:

- Proveer un tratamiento superficial de alta durabilidad.
- Los cape seal se emplean a menudo debido al color del tratamiento superficial ya terminado.

El motivo del no uso, de este tipo de tratamiento superficial para la corrección de los valores de rugosidad de una superficie asfáltica es la parte económica, ello debido a la composición del cape seal, ya que está conformado por un tratamiento monocapa acompañado por el slurry seal mismo, su composición hace que el cape seal sea más caro que el slurry seal. Sin embargo, este tratamiento es recomendable para mejorar los valores del IRI.

2.3.1.6. COMPONENTES DEL SLURRY SEAL

Según la ISSA los componentes del mortero asfáltico slurry seal son los que se presentan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2

Materiales componentes del Slurry Seal

Materiales componentes	Límites de especificación
Emulsión asfáltica	Tipo I: (16.5 - 26.4) %
	Tipo II: (12.4 - 22.3) %
	Tipo III: (10.7 - 19.8) %
	(Sobre peso de agregado seco)
Asfalto residual	Tipo I: (10.0 - 16.0) %
	Tipo II: (7.5 - 13.5) %
	Tipo III: (6.5 - 12.0) %
	(Sobre peso de agregado seco)
Relleno mineral	0 % a 3.0 % (sobre peso de agregado seco)
Aditivos	Lo que se requiera
Agua	Lo que se requiera para alcanzar una buena consistencia de la mezcla

Fuente: ISSA – A 105 – 2010

2.3.1.6.1. AGREGADOS

Los agregados (excluyendo los finos minerales) constituyen entre el 82% y 90% en peso del slurry seal, estos deben estar limpios, duros y libres de químicos, arcillas y otras materias que puedan afectar su adherencia, mezclado y colocación.

El agregado debe ser limpio, anguloso, durable, bien graduado y uniforme; de ser posible deberá emplearse material de trituración en un 100%.

Según el (EG, 2013) indica que la arena deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o parcialmente de fuentes naturales. La proporción de arena natural no podrá exceder del 25% de la masa total del agregado combinado.



Las propiedades de los agregados influirán en el producto final de la mezcla; es por eso que se debe considerar características fundamentales que garantice el buen desempeño del slurry seal. Estas principales características a considerar son los siguientes:

- Naturaleza e identificación: Incluye la naturaleza petrográfica de los agregados, grado de alteración de los componentes minerales, porosidad y propiedades químicas.
- Propiedades geométricas: Incluye básicamente la forma y la angulosidad de las partículas.
- Propiedades mecánicas: Incluye a los parámetros de resistencia al desgaste al pulimiento.
- Ausencia de impurezas: Es fundamental la ausencia de impurezas que puedan afectar al comportamiento de la mezcla y provocar su degradación rápida.
- Adhesividad: Considera la afinidad del agregado con la emulsión asfáltica. También se pueden utilizar aditivos para incrementar la adherencia.

Los requisitos mínimos según la ISSA, para que un agregado o mezcla de agregados sean considerados en el diseño del mortero asfáltico, se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3*Especificaciones para el agregado*

Ensayo	ASTM	AASHTO	ISSA	Especificación
Muestreo	D75	T 2		
Gravedad Específica	C 128	T 84		
Granulometría	C 136	T 27		ISSA Tipo I, II y III
Equivalente de Arena	D 2419	T 176		45 % Mínimo
Abrasión de los Ángeles	C 131	T 96		35 % Máximo
Resistencia a Sulfatos	C 88	T 104		15 - 25 % Máxima pérdida
Peso Unitario	C 29	T 19		
Azul de Metileno			TB 145	

Fuente: ISSA A – 105 – 2010

La tabla 2.4 muestra las recomendaciones establecidas por la ISSA, sobre la granulometría del agregado según el tipo de mortero asfáltico a diseñar. La granulometría debe ser bien graduada y uniforme.

Tabla 2.4*Granulometría para mezclas de Slurry Seal*

Tipo de Gradación	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Tamaño de malla	% que pasa	% que pasa	% que pasa
9.5 mm (3/8")	100	100	100
4.75 mm (N° 4)	100	90 - 100	70 - 90
2.36 mm (N° 8)	90 - 100	65 - 90	45 - 70
1.18 mm (N° 16)	65 - 90	45 - 70	28 - 50
600 µm (N° 30)	40 - 65	30 - 50	19 - 34
300 µm (N° 50)	25 - 42	18 - 30	12 - 25



150 μm (N° 100)	15 - 30	10 - 21	7 - 18
75 μm (N° 200)	10 - 20	5 - 15	5 - 15

Fuente: ISSA A – 105 – 2010

2.3.1.6.2. RELLENO MINERAL (FILLER)

En realidad, materiales denominados rellenos minerales pueden ser definidos como aquellos que presentan partículas finamente divididas, provenientes de la trituración de rocas minerales o de la molienda de materiales pequeños a través de procesos industrializados, que dan como resultado el desarrollo de productos sintéticos (cal o cemento).

Según (Huanca, 2013) estos se incluyen en los morteros asfálticos, principalmente con la finalidad de generar mayor estabilidad y resistencia, así como también, reducir el tiempo de rotura curado.

Según (Ramirez, 2017) la adición de este relleno mineral tiene como finalidad incrementar las propiedades de manejabilidad en la mezcla, así como, mejorar la parte final de la curva granulométrica de los agregados, influyendo en el comportamiento a la ruptura y curado del mortero asfáltico.

De acuerdo a la norma ASTM D 242 y AASHTO M 17, se pueden utilizar indistintamente como relleno mineral: Cemento portland tipo I, cal hidratada, polvo de roca, polvo de escoria o ceniza fina.

La ISSA, recomienda el uso de filler en una cantidad máxima del 3% en peso del agregado seco en el diseño del mortero asfáltico, como se muestra en la tabla 2.5

Tabla 2.5

Especificaciones para el relleno mineral

ENSAYO	ASTM	AASHTO	ESPECIFICACIÓN
Mineral de Relleno	D 242	M 17	0 - 3 %

Fuente: ISSA A105 – 2010

2.3.1.6.2.1 DIFERENCIA ENTRE CEMENTO PORTLAND TIPO I Y TIPO IP

Según la norma técnica peruana NTP, los tipos de cemento se clasifican en: Cemento portland sin adición, con adición y de características especiales. La diferencia entre los dos primeros tipos, es que el segundo (cementos con adición) presenta en su composición a la puzolana y la escoria; en cambio los cementos de características especiales están diseñados para cumplir ciertos requerimientos tales como: alta resistencia a los sulfatos y alta resistencia inicial.

El cemento portland tipo I pertenece a los cementos sin adición y es el cemento que se utiliza comúnmente en la construcción, mientras que el cemento portland tipo IP pertenece a los cementos con adición, ello debido a que en su composición presenta a la puzolana.

2.3.1.6.3. EMULSIÓN ASFÁLTICA

(Chavez, 2020) afirma que: Las emulsiones asfálticas son el resultado de la dispersión de pequeñas micro partículas de asfalto dentro de una matriz acuosa. Se define como la dispersión de glóbulos microscópicos de asfalto (fase dispersa o discreta) dentro de una solución de agua jabonosa (fase continua o dispersante), los cuales son no miscibles entre si (véase figura 2.1). Las emulsiones típicamente contienen entre un 40% a un 75% de asfalto y a temperatura ambiente presentan consistencia líquida que va desde fluida hasta

muy viscosa. El tamaño de la partícula se encuentra en un rango desde 1 a 10 micrones de diámetro.

El asfalto es por naturaleza hidrófobo (repulsión al agua); este fenómeno obliga a usar productos denominados emulsificantes en el proceso de fabricación de las emulsiones, formando junto con el agua y otros aditivos (cloruro de calcio y/o ácido clorhídrico) la solución jabonosa.

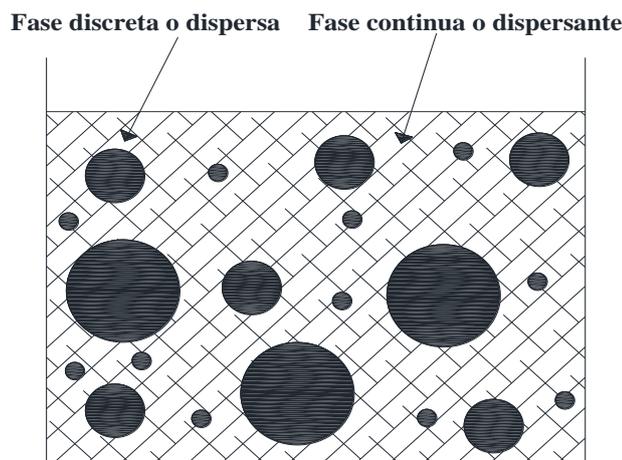


Figura 2.1: Diagrama esquemático de una emulsión.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte

2.3.1.6.3.1 COMPOSICIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.

(Chavez, 2020) afirma que: Una emulsión asfáltica consiste de tres ingredientes básicos: asfalto, agua y un agente emulsivo, en algunas ocasiones la emulsión puede contener otros aditivos, como estabilizantes, mejoradores de recubrimiento o agentes de control de rotura.

Es bien sabido que el agua y el asfalto no se mezclan, excepto en condiciones cuidadosamente controladas, utilizando equipos de alta especialización y aditivos químicos. Mezclar agua y asfalto es una tarea similar a la del mecánico que intenta lavar, solo con agua sus manos engrasadas. Solo con detergente o con un agente jabonoso la grasa puede ser exitosamente removida.



Algunos de los mismos principios físicos y químicos se aplican a la formulación, producción y uso de emulsiones asfálticas. El objetivo es lograr una dispersión estable del cemento asfáltico en el agua, suficientemente estable para ser bombeada, almacenada durante tiempo prolongado y mezclada.

En resumen, la emulsión asfáltica está compuesta por cemento asfáltico, agua, emulsificante y otros aditivos que mejoren ciertas características de esta.

- **Cemento asfáltico:** Es el elemento básico de la emulsión asfáltica y constituye entre un 50% y un 75%. El cemento asfáltico está compuesto básicamente de grandes moléculas de hidrocarburos y su composición química es muy variada, estas variadas propiedades dependen esencialmente a los orígenes diferentes del crudo y del proceso de refinación.

Una de las características de mucha importancia en las emulsiones asfálticas es la estabilidad, es por eso que, para producir emulsiones asfálticas estables, debe haber una compatibilidad química entre el emulsificante y el cemento asfáltico.

- **Agua:** El agua es de mucha importancia y puede contener minerales u otros elementos que afecten la producción de las emulsiones asfálticas estables; preocupa principalmente la presencia de iones de calcio y magnesio, que favorecen a la formación de una emulsión catiónica estable; sin embargo, puede ser perjudicial para las emulsiones aniónicas.

El uso de aguas impuras puede originar un desequilibrio en los componentes de la emulsión, lo que puede afectar de forma adversa a la performance o causar la rotura prematura. Por ese motivo, se debe de hacer

control estricto de la calidad del agua para un determinado tipo de emulsión.

- **Emulsificante:** También llamados emulgentes, son compuestos que cumplen la función de estabilizar a la emulsión, de esta manera se evita la formación de varias fases. Se caracterizan por la presencia de radicales hidrofóbicos y de componente hidrofílicos los cuales en el momento que entran en contacto con el agua, estos se disocian quedando cargas negativas, positivas o no – iónicas según sea el tipo de emulsificante.

Como el emulsificante usado para el uso vial es del tipo iónico (véase figura 2.2), donde los glóbulos están cargados eléctricamente en su superficie con carga negativa o positiva; siendo esta carga del mismo signo para todos los glóbulos, que genera una repulsión electrostática y contribuye a impedir que los glóbulos se unan entre sí, y se pueda mantener estable la emulsión asfáltica.

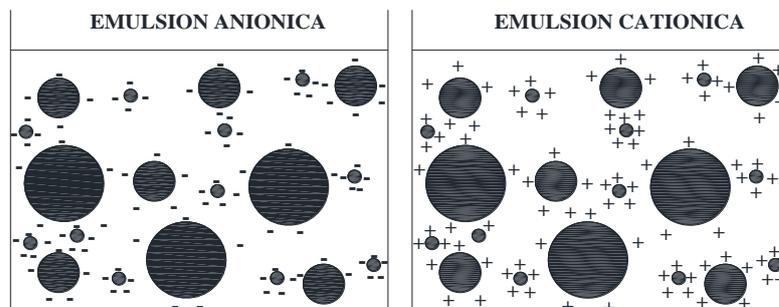


Figura 2.2: Representación de una emulsión aniónica y catiónica.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte

2.3.1.6.3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS

Para clasificar las emulsiones asfálticas, se puede tomar en cuenta las siguientes características:

Por el tipo de emulsificante usado:



- Emulsiones aniónicas: Los glóbulos de asfalto tienen una carga negativa.
- Emulsiones catiónicas: Los glóbulos de asfalto tienen una carga positiva.

Por su velocidad de rotura:

- Rompimiento rápido (RS): El rompimiento ocurre de manera rápida al contacto con los agregados limpios, usados para riegos de liga y tratamientos superficiales.
- Rompimiento medio (MS): El rompimiento no es tan rápida, de manera que pueden mezclarse con agregados de baja área superficial, usada generalmente para mezclas en frío elaboradas en planta destinadas al bacheo, nivelación, etc.
- Rompimiento lento (SS): De rotura lenta, usada para mezclas en frío elaboradas en planta, son emulsiones muy versátiles, con la cuales se pueden hacer trabajos de morteros asfálticos, reciclados, mezclas de arena emulsión, etc.
- Rompimiento controlado (QS): Son emulsiones de rotura controlada, sirven para trabajos de slurry seal o micropavimento.

2.3.1.6.3.3 NOMENCLATURA DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS

De acuerdo a las normas AASHTO y ASTM, la nomenclatura usada para identificar a las emulsiones, ya sean de tipo aniónicas o de tipo catiónicas es la siguiente:

- La letra C: El uso de esta letra significa que es una emulsión catiónica. La ausencia de esta letra significa aniónica.
- Las cifras 1 y 2: Determina la viscosidad; 1 = viscosidad baja, 2 = viscosidad alta.

- La letra h (hard), significa que la base asfáltica es más consistente (dura); la letra s (soft), significa que la base asfáltica es más blanda; la letra p, significa que es una emulsión modificada con polímeros.
- Las letras HF: Significa alta flotación.

Según (Huanca, 2013): En general, se sabe que el tipo de emulsión usado en el diseño de slurry seal es la emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta CSS.

En la figura 2.3 se especifica la forma en la cual se detalla la nomenclatura de una emulsión asfáltica.

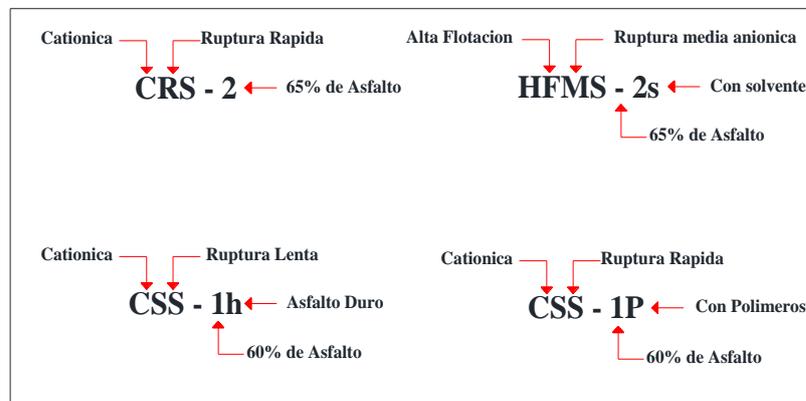


Figura 2.3: Nomenclatura de una emulsión asfáltica

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte

2.3.1.6.3.4 PROCESO DE ROTURA Y CURADO DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.

En una emulsión asfáltica, el agua debe separarse de la fase asfáltica y evaporarse, para que actúe como ligante. Los procesos para tal fin son los siguientes:

- **Rotura de la emulsión:**

(Ramirez, 2017) indica que este fenómeno de rompimiento o ruptura de la emulsión ocurre debido a la carga eléctrica que tiene el material pétreo. La carga que tiene el material pétreo neutraliza la carga de las partículas de asfalto en la emulsión, permitiendo que se acerquen unas a otras para formar agregados de gran

tamaño, estos agregados son lo que se depositan sobre el material pétreo formando una capa asfáltica.

Según (Huanca, 2013) este es un proceso inminentemente necesario, debido a que se necesita que el agregado sea cubierto por el asfalto. Para que esto ocurra, se debe desestabilizar la emulsión. El proceso de desestabilización de la emulsión se da debido a la carga que tiene el agregado, el cual neutraliza la carga del asfalto en la emulsión. De esta manera, la pequeña carga que tiene la emulsión se ira moviendo hacia el agregado que tiene carga opuesta y comenzara a formarse partículas de gran tamaño, el mismo que comenzara a recubrir el agregado.

- **Curado de la emulsión:**

(Escalante, 2019) afirma que: En este proceso es donde se desarrollan las propiedades mecánicas del asfalto, dando como resultado una película cohesiva continua capaz de mantener a los agregados adheridos. Este proceso se alcanza cuando el agua lleva a evaporarse completamente de la superficie y las partículas de la emulsión asfáltica tienen que coalescer y unirse al agregado. Si las condiciones climáticas son favorables, la evaporación del agua se realizará de manera rápida; sin embargo, la excesiva humedad, bajas temperaturas o lluvias inmediatamente después de la aplicación puede retardar dicho proceso.

Como se puede ver en la figura 2.4; la primera imagen muestra como la emulsión reacciona con el agregado y se inicia la rotura, en la siguiente imagen continua la rotura e inicia el curado; y la última imagen muestra como el asfalto recubre el agregado culminando el proceso de curado.

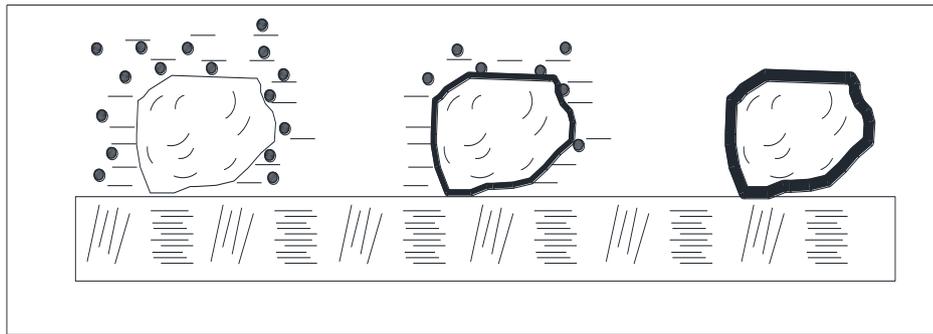


Figura 2.4: *Proceso de ruptura y curado de la emulsión asfáltica.*

Fuente: Instituto Mexicano del transporte

2.3.1.6.3.5 FACTORES QUE AFECTAN LA ROTURA Y EL CURADO

Algunos de los factores que afectan las velocidades de rotura y curado de las emulsiones asfálticas son:

- Absorción de agua: Un agregado de textura áspera, poroso, acelera el tiempo de rotura al absorber agua de la emulsión.
- Contenido de humedad de los agregados: Si bien los agregados húmedos pueden facilitar el recubrimiento, tienden a hacer más lento el proceso de curado al incrementar el tiempo necesario para la evaporación.
- Condiciones climáticas: La temperatura, la humedad y la velocidad del viento tienen influencia en la velocidad de evaporación de agua.
- Superficie específica: Una mayor superficie específica de los agregados, particularmente finos en exceso o agregado sucio, acelera la rotura de la emulsión.
- Temperatura de la emulsión y del agregado: La rotura se demora cuando las temperaturas de la emulsión y del agregado son bajas. Esto es particularmente evidente en el caso de micro aglomerados.
- Tipo y cantidad de emulsivo: El surfactante empleado en la elaboración de la emulsión determina las características de rotura de los grados de emulsiones para sellados y mezclas en frío.



2.3.1.6.3.6 BENEFICIOS Y DESVENTAJAS DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS

Beneficios:

- Es un ligante asfáltico no contaminante ni peligroso, ya que contiene del 35 al 40% de agua como solvente.
- Tienen viscosidades considerablemente más que las del asfalto puro por lo que pueden usarse a menor temperatura.
- Favorecen la reducción de emisiones, reducción del consumo de energía, evitan la oxidación del asfalto y son menos peligrosas que las técnicas que utilizan asfalto en caliente.
- Son más económicas y ambientalmente amigables que las técnicas en frío que utilizan asfaltos rebajados.
- Tiene un límite de almacenamiento y es muy amplio, ya que puede ser almacenado por semanas o meses.
- Tienen una gran adhesión con cualquier agregado pétreo, a pesar de condiciones de humedad adversas muy pequeño y al uso de agentes emulsificantes de tipo catiónico.
- Se aplica en un lapso muy corto de tiempo, lo que permite la pronta funcionalidad de la obra en que se esté usando.

Desventajas:

- Si se sobrecalientan o congelan pueden romper y volverse inusables.
- No son compatibles con asfaltos rebajados ni ligantes asfálticos.
- Las emulsiones aniónicas y catiónicas son incompatibles y por tal razón no deben mezclarse.



2.3.1.6.3.7 EMULSIONES ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON POLÍMEROS

Según (Huanca, 2013), en la actualidad los pavimentos están sometidos a exigencias cada vez más críticas como: El incremento continuo del tráfico, cargas más pesadas y condiciones climáticas agresivas. Este aumento de solicitudes trae como consecuencia el ahuellamiento por deformación plástica del ligante, agrietamientos por diferencias térmicas y también por fatiga, así como el desprendimiento de agregados; que contribuyen al deterioro de la superficie de rodadura. Estos inconvenientes hoy en día se reducen considerablemente, mediante el empleo de emulsiones asfálticas modificadas con polímeros.

Se define a un polímero como un compuesto de alto peso molecular formado por la unión de moléculas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples como: estireno, butadieno, etileno, vinil, acetato, etc.), los cuales al unirse forman moléculas más grandes en distintos arreglos.

(Chavez, 2020) afirma que: La modificación de las emulsiones asfálticas con polímeros busca mejorar sus propiedades viscoelásticas para cumplir con los requerimientos de un proyecto; de manera muy concisa se puede decir que mediante la modificación se desea mejorar la elasticidad y la flexibilidad, la consistencia y la durabilidad con el fin de extender la vida útil de las mezclas asfálticas. La modificación de la emulsión asfáltica se puede hacer de dos maneras; la primera, si se emplea el polímero en forma de látex (líquido), mediante la adición directa a la emulsión terminada o en el momento de la molienda. En cambio, si se emplea un polímero sólido, este debe ser incorporado al cemento asfáltico de partida.

Actualmente se utiliza una gran variedad de polímeros comerciales con composición química y propiedades diferentes. Entre los empleados de forma más generalizada



tenemos los elastómeros SBS (Estireno – Butadieno – Estireno) y SBR (Estireno – Butadieno – Rubber) y los plastómeros EVA (Etileno – Vinil – Acetato).

- **Polímero SBS**

Polímero en estado sólido compuesto por monómeros de estireno, butadieno y estireno.

Mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto en altas como en bajas temperaturas.

Usado en tratamientos superficiales y en carpetas estructurales de pavimentos con elevados índice de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

- **Polímero SBR**

Polímero en estado líquido compuesto por monómeros de estireno y butadieno, añadiendo ácido acrílico para mejorar la adhesividad.

Mejora el comportamiento de las mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es usado en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

- **EVA**

Polímero en estado sólido compuesto por monómeros de etileno, vinil y acetato.

Mejora la resistencia al ahuellamiento y disminuye la susceptibilidad de las mezclas asfálticas a altas temperaturas.

Según la ISSA, la emulsión asfáltica modificada con polímeros y su residuo asfáltico deben cumplir con las especificaciones establecidas por la ASSHTO y ASTM (véase tabla 2.6 y 2.7), para que puedan ser considerados en el diseño del slurry seal.

Tabla 2.6

Especificaciones para la emulsión asfáltica

ENSAYO	AASHTO	ASTM
Muestreo de materiales bituminosos	T 40	D 140
Ensayos de emulsión asfáltica	T 59	D 244
Especificaciones para la emulsión catiónica	M 280	D 2397

Fuente: ISSA A 105 - 2010

Tabla 2.7

Especificaciones para el residuo asfáltico

ENSAYO	AASHTO	ASTM
Punto de ablandamiento	T 53	D 36
Penetración	T 49	D 5

Fuente: ISSA A 143 – 2010

2.3.1.6.3.8 FABRICACIÓN DE UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA

Equipo de emulsificación.

Para preparar una emulsión asfáltica, se requiere básicamente de los siguientes equipos:

- Molino coloidal: El molino debe estar provisto de medidores de flujo, temperatura y presión.
- Tanque para la solución jabonosa.
- Tanque para el asfalto caliente.
- Bombas.
- Si las temperaturas de salida esperadas son mayores al punto de ebullición del agua se requerirá la instalación de un intercambiador de calor.



El molino coloidal es un dispositivo mecánico de alta velocidad y de altas tensiones de corte, en este el asfalto es dividido en partículas muy pequeñas. Posee un rotor de 1000 RPM – 6000 RPM con aberturas de paso de 0.25 mm – 0.50 mm.

El tamaño de las gotitas de asfalto depende de la energía mecánica suministrada por el molino, generalmente tienen un diámetro que va de 1 μm – 10 μm . También pueden ser utilizados molinos con velocidades de 7000 RPM – 9000 RPM para altas tensiones de corte, para trituración de polímero en caso de que se encuentre en estado sólido o bien para la rápida dispersión de los componentes.

Las bombas son empleadas para suministrar la solución jabonosa y el asfalto al molino coloidal. Debido a que la solución jabonosa puede ser altamente corrosiva, puede ser necesario utilizar equipos construidos con materiales resistentes a la corrosión o bien tanques recubiertos.

Proceso de Emulsificación

I. Preparación de la solución jabonosa

La adición del agente emulsivo al agua varía con el procedimiento de cada fabricante. Algunos emulsificantes como las aminas deben mezclarse y reaccionar con un ácido para ser solubles en agua. Otros como los ácidos grasos, deben mezclarse y reaccionar con un álcali. El emulsificante es adicionado al agua caliente que contenga ácido o álcali (dependiendo del tipo de emulsificante), y es agitado hasta su completa disolución y se ajusta el PH de la solución hasta el valor deseado. La solución jabonosa se alimenta al molino generalmente a una temperatura entre 45 °C y 50 °C.

II. Preparación del asfalto

De manera independiente, el asfalto es calentado para bajarle la viscosidad y sea posible su manipulación. La temperatura del asfalto y de la solución jabonosa se



ajustan dependiendo de las características de emulsificación del cemento asfáltico y de la compatibilidad entre asfalto y el agente emulsivo; debido a estas características las temperaturas de asfalto y solución jabonosa, así como de la emulsión producida, pueden tener cierta variación, ya que la temperatura de la emulsión al abandonar el molino debe ser inferior al punto de ebullición del agua, el asfalto no se lleva a temperaturas extremadamente altas, a menos que exista un sistema de enfriamiento. La temperatura de asfalto a la alimentación del molino, por lo general va de 120 °C a 150 °C y esto depende de las características de asfalto.

III. Emulsificación

Una vez que es asfalto y la solución jabonosa han alcanzado las condiciones de operación necesarias, son alimentados simultáneamente al molino coloidal, donde el asfalto es dividido en pequeñas gotas por la fuerza mecánica que ejerce el molino sobre él, e integrado con la solución jabonosa para dar origen a la emulsión asfáltica.

Las proporciones de asfalto y de solución jabonosa deben medirse con exactitud, mediante medidores de flujo; sin embargo, también pueden controlarse verificando la temperatura de cada fase y de la descarga del molino. Si se utiliza el método de regulación de temperatura, a partir de los componentes se calcula la temperatura de salida deseada de la emulsión ya elaborada; y así se controla el porcentaje de contenido de asfalto.

Una vez producida la emulsión es bombeada a tanques de almacenamiento, que pueden estar equipados con agitadores mecánicos para mantener la uniformidad de la emulsión asfáltica.



El tamaño de las partículas de asfalto (véase tabla 2.8), es un factor vital en la elaboración de una emulsión estable. Estas partículas se dispersan en el agua en presencia del emulsificante; este produce un cambio en la tensión superficial en el área de contacto entre las gotitas de asfalto y el agua, de tal manera que el asfalto permanece en suspensión. Debido a que las partículas de asfalto tienen la misma carga, se repelen entre y esto ayuda a mantenerlas suspendidas.

Tabla 2.8

Tamaño promedio de partículas de asfalto en la emulsión

TAMAÑO DE PARTICULA	PORCENTAJE
Menos de 0.001 mm	28%
De 0.001 a 0.005 mm	57%
De 0.005 a 0.010 mm	15%

Fuente: Instituto del Asfalto (MS – 19)

En la figura 2.5 se presenta el proceso general para la producción de emulsiones asfálticas.

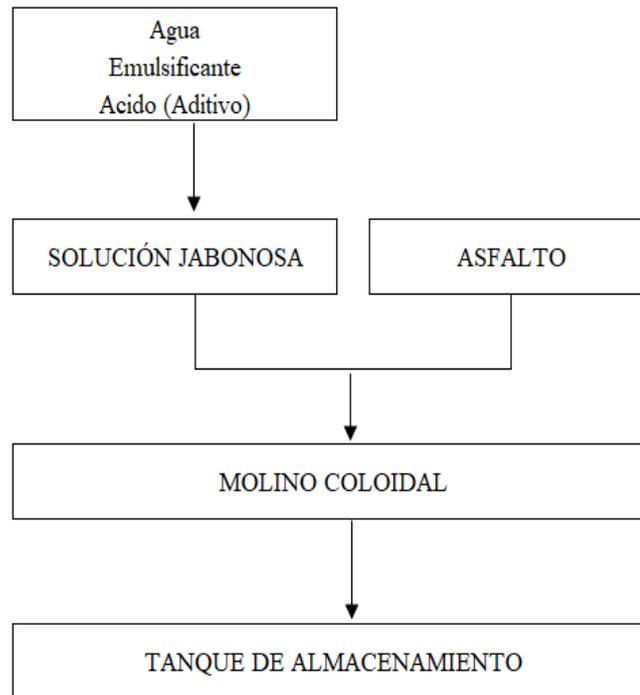


Figura 2.5: *Proceso de producción de emulsiones asfálticas.*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

2.3.1.6.4. AGUA

Es el insumo que controla la consistencia de la mezcla, en peso compone del 4 al 12% del agregado seco. El agua cumple la función de humedecer previamente al agregado para funcionar como lubricante ante la emulsión, y pueda reducir la tensión superficial de las partículas del agregado facilitando el recubrimiento de la emulsión asfáltica.

Según (Huanca, 2013), las empresas dedicadas a la fabricación de emulsiones asfáltica recomiendan realizar los ensayos de dureza total y la determinación del potencial de hidrogeno (PH), ya que tienen relación con la rotura prematura de la emulsión al realizar el mezclado, disminuyendo su trabajabilidad.

El agua de preferencia deberá ser potable para el diseño de un mortero asfáltico, libre de sales solubles, suciedad y sedimentos. Debe cumplir con las especificaciones del control de calidad como se muestra en el cuadro 2.9.

Tabla 2.9

Especificaciones para el agua de diseño

ENSAYO	METODO	ESPECIFICACION	
		Min	Max
pH	ASTM D 1293	6.5	8
Dureza, ppm	ASTM D 1126	-	500

Fuente: NTP 339. 073

2.3.1.6.5. ADITIVOS

Generalmente se usa como aditivo, el emulsificante utilizado en la elaboración de la emulsión asfáltica, con la finalidad de evitar incompatibilidad con otros componentes de la mezcla. La cantidad de aditivo varía de 0 – 2% del volumen de la emulsión.

Los aditivos pueden ser usados para acelerar o retardar el tiempo de rotura del slurry seal, según sean las condiciones climáticas existentes en su colocación. Se utiliza cuando la emulsión no cumple con el ensayo de tiempo de mezcla.

La práctica común es mantener baja la cantidad de aditivos, para reducir el tiempo de apertura al tráfico.

Las variables que influyen en la dosificación del aditivo:

- Naturaleza del agregado.
- Temperatura del ambiente.
- Contenido de finos e influencia del cemento.

2.3.1.7. METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL SLURRY SEAL

Según (Huanca, 2013), la ISSA (International Slurry Surfacing Association) es una asociación internacional sin fines de lucro formada por los contratistas, fabricantes de equipos, funcionarios públicos, investigadores, ingenieros consultores y otros



profesionales de la industria, los cuales trabajan en conjunto para promover métodos de conservación de pavimento como el slurry seal.

Para el diseño del slurry seal se llevan a cabo las siguientes fases, las cuales se presentan también en el esquema que resume el proceso de diseño (véase figura 2.6).

- Caracterización de los componentes.
- Cálculo del contenido óptimo de asfalto residual.
- Cálculo del contenido óptimo de agua.
- Compatibilidad de los componentes en la mezcla.
- Pruebas de desempeño.
- Cálculo del contenido óptimo de asfalto residual.
- Determinación del tiempo de apertura al tráfico.

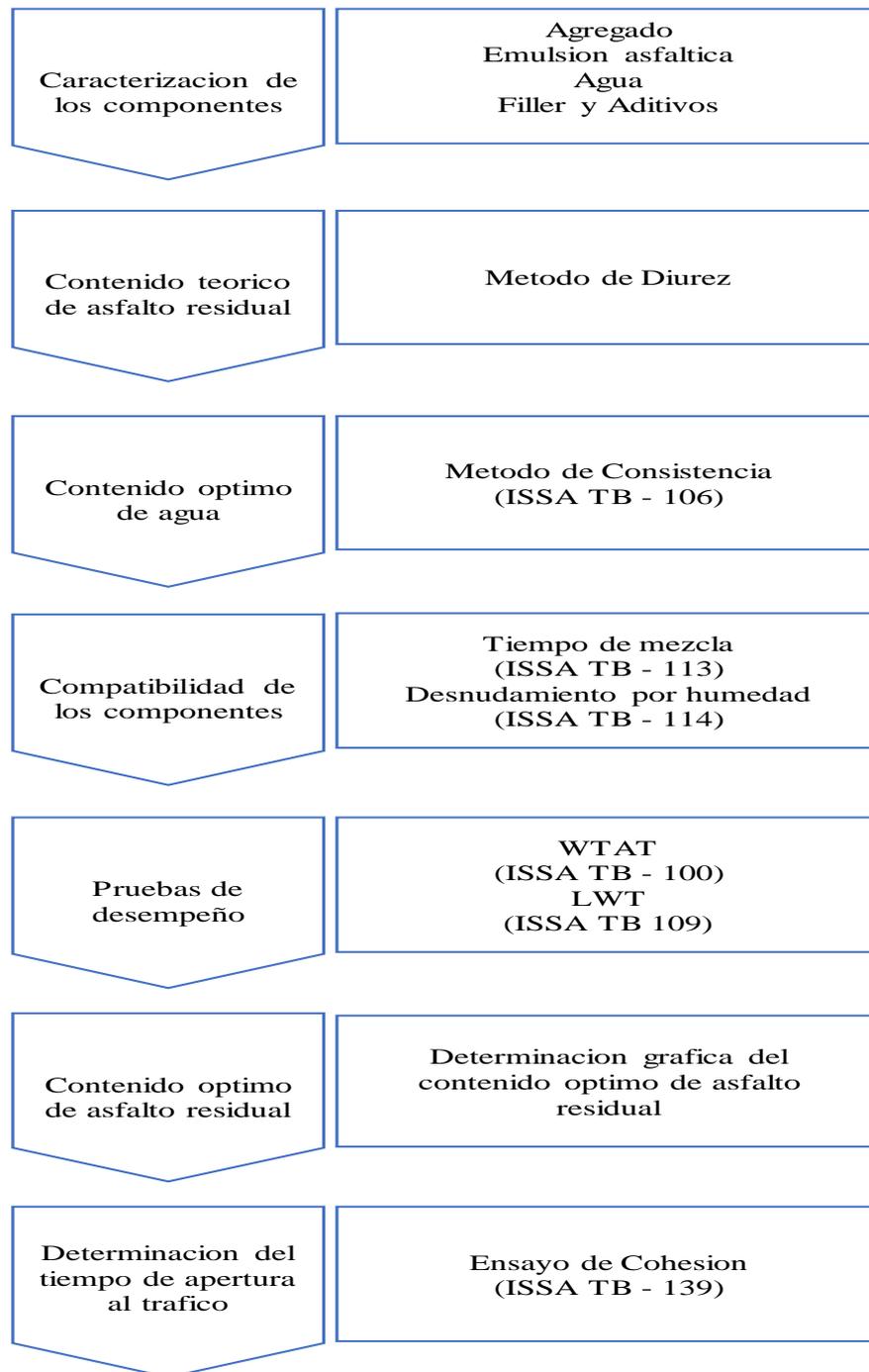


Figura 2.6: *Proceso de diseño del Slurry Seal*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

2.3.1.8. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL SLURRY SEAL

Estos procedimientos son recomendaciones establecidas por la ISSA, depende de cada diseñador, tomarlo o no en cuenta.



- **Caracterización de los componentes**

Se debe respetar y seguir las especificaciones establecidas para cada componente.

- **Contenido teórico de asfalto residual**

Este valor es necesario para iniciar el diseño con mezclas preliminares y evaluar el comportamiento del agregado con la emulsión asfáltica.

Se determina en base al análisis granulométrico del agregado y de su capacidad de absorción. El método que generalmente se utiliza para su determinación es el método de Diurez.

- **Contenido óptimo de agua**

La cantidad de agua necesaria en la mezcla se obtiene mediante el ensayo de consistencia en el cono de Kansas, cumpliendo los parámetros establecidos en la ISSA TB – 106. Tiene como finalidad garantizar la trabajabilidad de la mezcla durante su colocación.

- **Compatibilidad de los componentes en la mezcla**

Estos ensayos permiten observar el comportamiento de los componentes de la mezcla, incidiendo en el agregado, la emulsión y el filler. Deben cumplir los parámetros establecidos para cada ensayo, los ensayos a realizarse son:

- Tiempo de mezcla (ISSA TB – 113)
- Desnudamiento por humedad (ISSA TB – 114)

- **Pruebas de desempeño**

Estos ensayos permiten calcular el contenido óptimo de emulsión y a su vez predice el comportamiento del slurry seal cuando este puesto en servicio. Los ensayos a realizarse son los siguientes:



- Ensayo de abrasión en húmedo (ISSA TB – 100): Simula una superficie saturada en agua, sometido a la abrasión mecánica por el tránsito de los vehículos. Determina el contenido mínimo de residuo asfáltico.
- Ensayo de rueda cargada (ISSA TB – 109): Simula una superficie sometida a cargas pesadas de tránsito. Determina el contenido máximo de residuo asfáltico.

- **Contenido óptimo de asfalto residual.**

Este valor, indica la cantidad de residuo asfáltico en el diseño definitivo del slurry seal, con el cual se realizará la producción en el equipo llamado camión micropavimentador para su colocación en obra.

Según (Huanca, 2013), para obtener dicho valor, se necesita superponer las gráficas de los ensayos WTAT y LWT (abrasión en húmedo y rueda cargada), para así establecer el límite mínimo y máximo del residuo asfáltico. El punto medio del límite será la cantidad óptima, variando en +/- 1.5% de su valor, según las condiciones climáticas en obra.

- **Determinación del tiempo de apertura al tráfico**

Esta variable es muy importante en obra, porque indica cuando tiempo se debe esperar después de colocar el slurry seal, para que transiten los vehículos sobre la vía. Se determina mediante el ensayo de cohesión (ISSA TB -139).

Según (Huanca, 2013) indica que los resultados no son tan precisos debido a que se realizan a condiciones de laboratorio, pero otorga una referencia para evaluar en obra.



2.3.1.9. PROCESO CONSTRUCTIVO DEL SLURRY SEAL

La construcción del slurry seal involucra una serie de actividades bien definidas, las que incluyen desde la preparación de la superficie hasta la fabricación y colocación de la mezcla.

2.3.1.9.1. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

Según (Herrera, 2007), en su investigación indica lo siguiente: Previo a la construcción de la lechada asfáltica se deberán realizar los trabajos de reparación necesarios para proveer una adecuada serviciabilidad. Esto incluye generalmente bacheo de arenas inestables del pavimento existente, sellado de fisuras y grietas.

- **Limpieza de la superficie**

Inmediatamente antes de la aplicación de la lechada, se debe barrer la superficie del pavimento, para así eliminar todo material suelto y polvo. Este trabajo se puede realizar mediante equipos tales como: Escobas mecánicas, manuales, sopladores o chorros de agua; en el caso de usar un sistema húmedo, se debe permitir que la superficie seque antes de aplicar la lechada.

- **Riego de liga**

Según (Herrera, 2007) en su investigación indica, si la superficie del pavimento está muy oxidada y desgastada, o si el pavimento existente es de hormigón, se debe aplicar un riego de liga para mejorar la adherencia entre la lechada y el pavimento existente. La ISSA recomienda una dosis de 0.15 a 0.35 l/m² de emulsión diluida como riego de liga. En general no es necesario aplicar este riego, ya que la lechada es suficientemente rica en emulsión para adherirse a la capa subyacente. Para realizar el riego de liga se recomienda usar el mismo tipo de emulsión que el usado en la lechada.



2.3.1.9.2. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

La colocación de un mortero asfáltico slurry seal se puede realizar de dos formas: Mediante la utilización de un trompo mezclador, siendo la colocación de forma manual y mediante el uso de un equipo mecánico conocido comúnmente como camión micropavimentador, generalmente se utiliza este último, el cual para su utilización deberá de calibrarse de acuerdo al diseño obtenido en laboratorio.

Según (Herrera, 2007) en su investigación indica, después de la aprobación del diseño de lechada asfáltica, se elabora una fórmula de trabajo, se debe configurar el equipo mezclador – distribuidor para así obtener una producción exigida y mantener las proporciones del diseño. Estas cantidades dependen del tipo de equipo y la producción requerida en el proyecto, así como de las condiciones del pavimento a tratar. Para realizar esta configuración cada uno de los sistemas de suministro (agregados, emulsión, agua, filler y aditivo) deben ser calibrados. La calibración de estos sistemas permite conocer como varía la producción y el flujo de un respectivo material con respecto al parámetro que lo controla. Una vez conocidas estas relaciones, el equipo se configura de modo de mantener la proporción de materiales fijo. Con respecto al suministro de agua, se debe ajustar la dosis de agua de acuerdo a la humedad del agregado, ya que la calibración se hace en seco.

Según (Orellana, Peña, & Perez, 2015) indican, es esencial calibrar cada máquina de lechada con los mismos materiales del proyecto. La calibración debería respetar las proporciones de los materiales correspondientes al diseño de la mezcla. Pueden aceptarse informes sobre calibraciones previas con estos mismos materiales, si aquellos fueron realizados dentro del actual año calendario. Deberían realizarse aplicaciones de prueba como una verificación final de la consistencia y trabajabilidad de la mezcla.



Figura 2.7: Equipo de aplicación del slurry seal

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

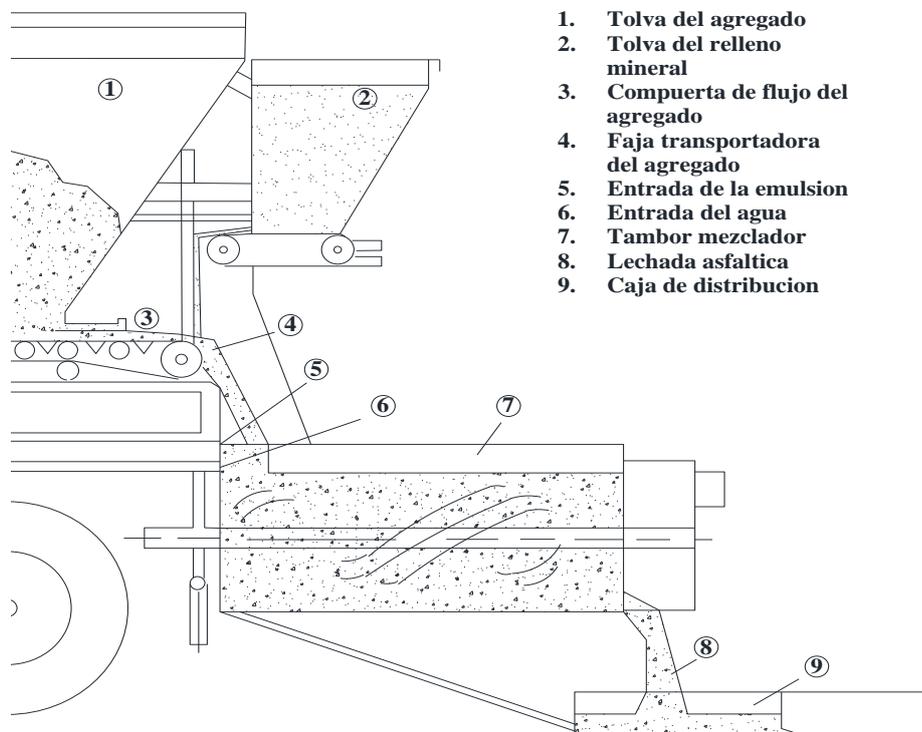


Figura 2.8: Esquema de fabricación del sello de lechada asfáltica

Fuente: Figura tomada de la Guía de Lechadas Asfálticas

2.3.1.9.3. PROCESO DE APLICACIÓN.

Una vez que la superficie ha sido preparada y el equipo está debidamente calibrado y configurado, se está en condiciones de iniciar la aplicación de la lechada asfáltica

- **Cargado de materiales**

El camión mezclador – distribuidor debe ser cargado con todos los materiales componentes de la lechada. Esto se puede realizar en forma continua en algunos equipos modernos o en un sector de abastecimiento, en cuyo caso el equipo debe retornar periódicamente a cargar materiales.

- **Agregados:** Se cargan al camión micropavimentador desde el acopio utilizando un cargador frontal, retroexcavadora, correa transportadora u otro sistema adecuado.
- **Emulsión:** Se llena el estanque del camión micropavimentador desde el estanque de almacenamiento, usando la bomba que posee el mismo camión.
- **Agua:** Se extrae del estanque de almacenamiento o bien de una red de agua.
- **Filler:** Cuando se usa filler almacenado en sacos, estos se vacían directamente en la tolva de filler. Si el filler se almacena en algún contenedor especial, este debe estar equipado con un sistema de alimentación con el cual se llena la tolva del camión.
- **Aditivo:** Se puede recargar en forma manual, directamente en el estanque de aditivo del camión, ya que en general la cantidad usada es muy baja.

- **Inicio de la extensión**

Una vez que el camión llega al frente de trabajo debe ser equipado con la caja distribuidora, que normalmente se desmonta y se deja en el lugar de colocación.

El camión se ubica en la posición de inicio y se deposita la caja distribuidora sobre la superficie del pavimento. En este momento todo está listo para iniciar la



colocación, personal de apoyo, responsable de cuadrilla de trabajo o encargados. Luego de verificar todas las condiciones necesarias, el encargado de cuadrilla (capataz) da inicio a la extensión de la lechada. El operador pone en funcionamiento el equipo y se inicia la mezcla de la lechada, que comienza a alimentar la caja distribuidora. Una vez que la caja tenga un nivel adecuado de mezcla, el encargado de la cuadrilla ordena al conductor iniciar la marcha del camión. A medida que el camión avanza en el camino, el encargado o el operador deben guiar al conductor para que este mantenga la ruta adecuada (paralelo al eje de la calzada).

Según el (EG, 2013), sobre la aplicación del mortero asfáltico indica: Una vez preparada y antes de iniciar la extensión del mortero, la superficie por tratar de ser el caso, deberá ser humedecida con agua de manera uniforme en una cantidad que será aprobada por el supervisor, teniendo en cuenta el estado de la superficie y las condiciones climatológicas existentes. El mortero preparado en el cajón mezclador de la máquina, pasará a través de una compuerta vertedero a la caja repartidora, la cual se encargará de distribuirla de manera uniforme sobre la superficie. El avance del equipo se hará paralelamente al eje de la carretera y su velocidad se ajustará para garantizar una aplicación correcta del mortero y una superficie uniforme.

- **Control del proceso de fabricación de la lechada**

- a. **Control del agregado en la tolva**

Es conveniente verificar la granulometría del agregado suministrado desde la tolva, para verificar que corresponde a la curva de diseño. Si es posible, se debe muestrear el agregado completo (agregado mas filler) directamente antes de la caja mezcladora. De no ser así se pueden tomar muestras desde la tolva.



La verificación de la granulometría se puede hacer en seco, si esto contribuye a acelerar el ensayo. Por supuesto en este caso se debe comparar con la granulometría de diseño realizado en la misma condición.

b. Control de la mezcla

Durante el proceso de colocación, una inspección visual puede ser una ayuda oportuna. Se debe vigilar principalmente la envuelta del material (cobertura), vigilando que el 100 % del agregado este cubierto con emulsión. Si se detectan irregularidades en la envuelta se deben verificar los siguientes factores, que son los que más influyen.

- Dosis de filler.
- Porosidad de los agregados.
- Limpieza del agregado.
- Variaciones de temperatura de la emulsión.
- Estabilidad de la emulsión.
- Tiempo de mezclado en la caja.

Si durante el proceso de extensión se nota que hay una rotura brusca en la caja esparcidora, se forman grumos o hay dificultad para revolver, se debe detener el proceso hasta corregir el problema.

c. Condiciones generales de operación

Durante la operación extensión de la lechada, deben vigilarse los siguientes aspectos.

- **Cantidad de material en la caja distribuidora:** En todo momento la caja distribuidora deberá tener una cantidad de mezcla tal que cubra los tornillos o paletas distribuidoras, si la caja no tiene suficiente material la distribución de la lechada no será homogénea, habrá peligro de



segregación y pueden quedar sectores descubiertos. Por otro lado, un exceso de material puede provocar que la lechada se derrame por los costados de la caja.

- **Humectación de la superficie:** Durante la aplicación de la lechada asfáltica se efectuará un humedecimiento de la superficie. Para ello los equipos están provisto de rociadores delante de la caja distribuidora. La cantidad de agua rociada depende de las condiciones específicas del clima y de la superficie del pavimento. Se debe evitar que se formen olas delante de la caja por exceso de agua. Mientras se realice la extensión de la lechada, el personal de apoyo deberá seguir el proceso de colocación, realizando las tareas siguientes: a) Retirar partículas con sobre tamaño aplicados en el pavimento, b) Corregir la textura cuando aparezca una partícula con sobre tamaño o cuando hay defecto o exceso de material aplicado y c) Aplicar la lechada en zonas donde el equipo distribuidor no tenga acceso, en este caso se debe tratar que la terminación sea uniforme y similar a la dejada por la distribuidora, usando las herramientas manuales apropiadas.

- **Juntas de trabajo**

Según el (EG, 2013), las juntas de trabajo longitudinales no podrán presentar traslapes, ni áreas sin cubrir y las acumulaciones que se produzcan serán alisadas manualmente antes de la rotura de la emulsión. Los traslapes de las juntas transversales serán igualmente alisados, antes de la rotura de la emulsión, de modo que no se presenten cambios en la uniformidad de la superficie.

Según (Herrera, 2007), en la actualidad existen equipos de colocación continua, capaces de ser abastecidos de material en terreno, sin interrumpir la aplicación de



la lechada. En este caso solo se producen juntas de construcción al inicio y al término de la jornada. Este tipo de junta se puede considerar como una junta “fría”, puesto que se aplica lechada junto a un tramo ya curado, y en general no reviste mayores complicaciones. Sin embargo, al trabajar con equipos sin autonomía se produce una junta cada vez que se consume el agregado de la tolva. Esto puede significar que se produzcan juntas a intervalos de hasta 50 m., dependiendo del espesor de aplicación y la capacidad del equipo. Este tipo de juntas son “frescas”, es decir se parte sobre lechada que no ha curado suficientemente. Al poner la caja distribuidora (con la lona) sobre la lechada fresca, el agregado es levantado y se produce una fuerte discontinuidad en la textura, entre las dos aplicaciones. Este problema en las juntas es más grave en lechadas gruesas, ya que el mayor tamaño del agregado hace que al rodar este dañe más la textura. Además, producto de la heterogeneidad inicial, la lechada al principio tiende a ser más rica en líquidos. Para minimizar la discontinuidad en las juntas es recomendable seguir las siguientes consideraciones:

- Al finalizar la aplicación de una carga y retirarse el camión distribuidor se debe “cortar” la aplicación anterior de modo que se produzca una junta recta.
- Se debe limpiar la zona adyacente a la junta, retirando cualquier resto de mezcla.
- Traslapar lo mínimo posible ambas aplicaciones.
- Repasar manualmente (usando rastras) las juntas que resulten abultadas.

2.3.1.9.4. COMPACTACIÓN DE LA LECHADA ASFÁLTICA COLOCADA

(Orellana, Peña, & Perez, 2015) en su investigación, indican: Rara vez es necesaria la compactación de una lechada asfáltica. El uso de un compactador neumático puede



ayudar en proyectos de aeropuertos y estacionamientos, donde el tráfico existente no alcanza a compactar suficientemente la lechada luego de su aplicación. Un compactador neumático de nueve ruedas, con un peso de entre 9 y 11 toneladas, con una presión de 350 – 425 kPa, es adecuado. En general dos pasadas son suficientes. Es importante compactar cuando el proceso de rotura de la lechada asfáltica está lo suficientemente avanzado para soportar el paso del compactador sin que haya material que quede adherido a las ruedas. Los compactadores de ruedas de acero no son adecuados para lechadas asfálticas. Estos compactadores tienen a apoyarse sobre las zonas altas del pavimento, dejando sin compactar las áreas bajas. Además, dejan marcas en la superficie y puede triturar el agregado de gran tamaño.

También (Herrera, 2007) sobre la compactación indica lo siguiente: La lechada asfáltica, gracias a su consistencia fluida, no necesita compactación mecánica. Una vez que se encuentra en servicio el tráfico compacta la lechada aumentando la estabilidad de la mezcla. Hay sectores donde no hay suficiente tráfico, como estacionamientos, ciclovías, en los cuales se recomienda compactar mecánicamente. La compactación de la lechada se hará con compactadores de neumáticos, de no más de 10 ton, de peso y presión de contacto de 50 psi, con un mínimo de 5 pasadas.

2.3.1.9.5. CONTROL DE TEMPERATURA

Según el (EG, 2013), indica: No se permitirá la elaboración y aplicación del mortero si la temperatura ambiental es inferior a 6 °C o durante precipitaciones pluviales.

Por otro lado, la (ISSA, 2010) indica: El sello no se aplicará si bien el pavimento o la temperatura del aire está por debajo de los 50 °F (10° C) y la caída, si no que puede aplicarse cuando ambas temperaturas de pavimento y de aire están por encima de los 45° F (7 °C) y en aumento. El sello no se aplicará cuando existe la posibilidad de temperaturas de congelamiento en la ubicación del proyecto dentro de las 24 horas después de la



aplicación. La mezcla no se aplicará cuando las condiciones climáticas prolongan la apertura al tráfico más allá de un tiempo razonable.

2.3.2. ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL

2.3.2.1. RESEÑA HISTÓRICA

Según el (Instituto Mexicano del Transporte, 1998), el Banco Mundial patrocinó varios programas de investigación en los años setenta, ello para conocer los problemas en los países en vías de desarrollo. Algunos de ellos arrojaron que los caminos con poca inversión en infraestructura resultan costosos a estos países, debido a los costos que los usuarios pagan al transitar por esos caminos. La rugosidad de las carreteras fue identificada como un factor primario en los análisis que involucran la calidad del camino, en función de los costos de los usuarios. Se vio que los datos de la rugosidad de las diferentes partes del mundo no podían ser comparados, debido a que los datos, aún de un mismo país, eran poco confiables, ya que las mediciones estaban basadas en métodos diferentes.

La gran variedad de equipos utilizados para medir la regularidad superficial y los numerosos índices y escalas existentes para establecer los criterios de aceptación de la funcionalidad de una carretera, llevaron a considerar la conveniencia de adoptar “índice único”. Debido a que cada país contaba con un equipo propio, no se podía imponer un solo equipo a todos y tampoco se podía coartar las futuras mejoras de los equipos existentes o el desarrollo de nuevos equipos.

En 1982, el Banco Mundial inicio un experimento en Brasil para establecer correlaciones y un estándar de calibración para las mediciones de rugosidad. Se observó que los valores de los equipos de medición de la rugosidad superficial existentes eran correlacionables. Una vez establecido este punto, uno de los objetivos de las investigaciones fue encontrar



un índice de referencia al que posteriormente se denominó índice internacional de rugosidad.

El Índice Internacional de Rugosidad, es el primer índice de perfil ampliamente utilizado, donde el método de análisis está adaptado para trabajar con diferentes tipos de equipos de medición de rugosidad y se puede decir que es una propiedad del perfil de un camino. Las ecuaciones de análisis fueron desarrolladas y ensayadas para minimizar los efectos de algunos parámetros de mediciones de perfil, tales como el intervalo de muestreo.

2.3.2.2. DEFINICIÓN DEL IRI

Según (Solminhiac, 2001): El IRI resumen matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie del camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico. Está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas (razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia recorrida) producto de la simulación del modelo del cuarto carro (RQCS, Reference Quarter Car Simulation), para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h. Es calculado a partir de las elevaciones de la superficie medidas mediante un levantamiento topográfico o perfilometría.

Por otro lado (Crespo del Río, 1999), afirma: En ingeniería de carreteras la calidad del pavimento se analiza determinando la regularidad superficial, característica del pavimento que analiza la diferencia entre las cotas teóricas y las cotas reales del perfil longitudinal. Las diferencias o irregularidades se deben a dos causas: El proceso constructivo y el uso de la carretera. En ocasiones son una combinación de ambas. Así, por ejemplo, los rellenos de la superficie de estructuras curvas o convexas suelen producir irregularidades por asentamiento de la parte más flexible que aparecen con el uso, pero son debidas a un deficiente proceso constructivo.



(Ramos, 2018) en su investigación sobre la medición del IRI en vías pavimentadas con el uso del perfilómetro laser Romdas indica: Los valores de IRI se expresan como la variación acumulada del movimiento por unidad de longitud, es decir m/km (metros por kilómetro) o pulg/mi (pulgada por milla). Las unidades de IRI en m/km son comúnmente usadas en países de Latinoamérica y en el lado oeste de Europa; por otro lado, las unidades pulg/milla son usadas comúnmente por el estado americano y países al este de Europa; así como los países asiáticos. Algunas características y bondades del IRI que podemos enumerar son las siguientes:

- La universalidad de su interpretación se basa en el modelo matemático válido universalmente el cual proviene del análisis de un perfil topográfico.
- La obtención del IRI está asociado a diversos factores tanto como de técnicas y procedimientos para los trabajos de campo.
- El adecuado uso de los equipos y la precisión de los mismos es un factor importante a considerar cuando se decide realizar trabajos de campo.
- Los procedimientos para el cálculo del IRI en la actualidad son diversos métodos desde básico como el de mira y nivel hasta los más sofisticados y eficientes desde el punto de la productividad (perfilómetros laser).

2.3.2.3. MODELO DEL CUARTO COCHE

Según el (Instituto Mexicano del Transporte, 1998), el modelo de cuarto carro utilizado en el algoritmo del IRI debe su nombre a que implica la cuarta parte de un vehículo. El modelo se muestra en la figura 2.9; que incluye una rueda representada por un resorte vertical, la masa del eje soportada por la llanta, un resorte de la suspensión, un amortiguador, y la masa del vehículo soportada por la suspensión de dicha rueda. El cálculo del índice internacional de rugosidad se basa en este modelo, el mismo que calcula la deflexión de la suspensión de un sistema mecánico simulado como una respuesta

similar a la que tuviera el pasajero. Los desplazamientos de la suspensión del modelo son acumulados y divididos entre la distancia recorrida para dar el índice internacional de rugosidad, en unidades m/km, mm/m, in/mi, etc.

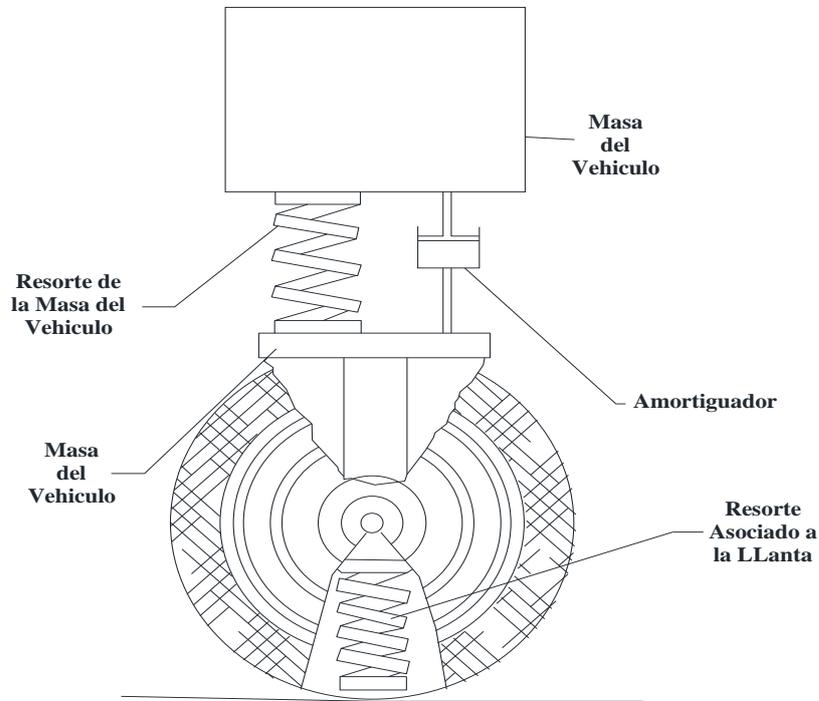


Figura 2.9: Gráfica del modelo “cuarto de carro”

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte

Por otro lado (Alvarez, 2014) en su investigación indica, La masa del cuarto de carro se divide en dos partes, la superior, soportada por el sistema de suspensión (masa suspendida) y la parte inferior, independiente de la suspensión (masa no suspendida). La suspensión se esquematiza por un resorte (k_2) y un amortiguador (c_2) y la parte no suspendida (prácticamente la rueda) se esquematiza a su vez por un resorte (k_1) que representa deformabilidad o rigidez del neumático. La figura 2.10, muestra el modelo de cuarto de carro, que sirve de base para la definición del IRI y otros muchos relacionados con la dinámica de automóviles.

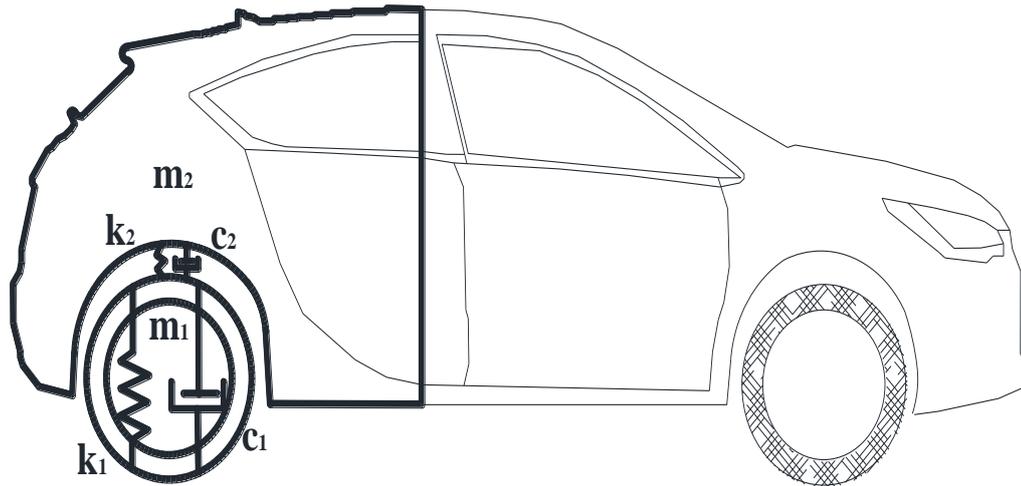


Figura 2.10: *Modelo de cuarto de vehículo*

Fuente: (Alvarez, 2014)

2.3.2.4. MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL IRI

Para la medición del IRI, según el boletín técnico presentado por el Banco Mundial en el año 1986, existen 4 métodos de medición:

2.3.2.4.1. MEDICIONES DE PRIMERA CLASE

(Ramos, 2018) en su investigación indica: Son los más exactos para la medición del IRI. Los métodos de la clase 1 establecen la rugosidad a través de la determinación muy exacta del perfil longitudinal de un pavimento, con medidas espaciadas cada 0.25 m y cotas con una precisión de 0.5 mm para pavimentos lisos, pudiendo aumentar en pavimentos más rugosos. A esta clase pertenecen los métodos basados en la medición del perfil del pavimento con el perfilómetro modelo viga TRRL y con mira y nivel de precisión. Por su bajo rendimiento y excesiva exactitud, comparada con la incertidumbre de la trayectoria recorrida, no se aconseja como adecuados para grandes auscultaciones.

Según (Alvarez, 2014), dentro de estos métodos podemos encontrar al método de mira y nivel cuyos procedimientos están referidos en la ASTM E1364 en la cual establece entre otros parámetros el nivel de precisión para los equipos según el nivel rugosidad y según



la clase, este método a pesar de fácil y sencillo sirve para evaluar ciertos tramos los cuales sirven para contrarrestar la precisión de otros equipos de medición de perfil. Por los bajos rendimientos que ofrecen estos equipos y por los distintos perfiles que se pueden encontrar a lo largo de una huella estos métodos generalmente se utilizan para la calibración de otros equipos de menos precisión. Mediciones de esta clase también pueden ser realizadas por perfilómetros dinámicos (perfilómetro laser) los cuales permiten obtener valores de alta calidad y a un alto rendimiento y no es necesario ningún tipo de calibración y con menos recursos humanos, pero a su vez comprenden equipos de alto costo.

2.3.2.4.2. MEDICIONES DE SEGUNDA CLASE

(Alvarez, 2014) indica, este grupo incluye otros métodos que basan el cálculo del IRI en la medida del perfil longitudinal, pero que no tienen la exactitud de los de la clase 1. Esta clase también comprende medida tanto con perfilómetros de alta velocidad como con métodos estáticos que nos satisfacen los criterios de precisión y exactitud como para ser considerados de clase 1.

Por otro lado (Ramos, 2018) indica, esta clase incluye todos los otros métodos en el que el perfil es medido directamente por un programa para la obtención de IRI, y no cumplen con la precisión y exactitud de la clase 1.

2.3.2.4.3. MEDICIONES DE TERCERA CLASE

Según (Ramos, 2018), es esta clase están los métodos que recurren al uso de una ecuación de correlación para la estimación del IRI. Estos métodos, también denominados “tipo respuesta” establecen la regularidad basados en la detección del movimiento relativo que experimenta el sistema de suspensión de un vehículo de pasajeros o de un tráiler remolcado, al transitar sobre el pavimento. Las propiedades dinámicas son únicas para cada equipo y varía con el tiempo. Los métodos clase 3 emplean diversos tipos de equipos,



tales como el Mays meter, el cual es un dispositivo de combinación eléctrica y mecánica con la capacidad de medir los movimientos verticales que experimenta el vehículo relativos al eje de suspensión.

(Alvarez, 2014) afirma, actualmente luego de haber transcurrido más de 30 años en el país se siguen utilizando equipos tipo respuesta como el BUMP INTEGRATOR, por ejemplo. Sin embargo, estos equipos deben ser calibrados por mediciones clase 1 o 2 para validar sus mediciones. Inclusive en nuestro medio pueden utilizarse el MERLIN para realizar las calibraciones el mismo que a pesar de ser un equipo básico sus resultados ofrecen una gran precisión.

Por otro lado (Solminhiac, 2001) indica, a esta clase también pertenecen el instrumento MERLIN, cuyas mediciones generan un valor de irregularidad superficial correlacionable con el IRI, aunque no se mida el perfil propiamente tal, y al mismo tiempo requiere una calibración periódica.

2.3.2.4.4. MEDICIONES DE CUARTA CLASE

Según (Ramos, 2018), las mediciones de clase 4 son generalmente casi subjetivas desde el hecho que pueden calcularse por la gran experiencia que tienen los profesionales en este campo.

Por otro lado (Alvarez, 2014), afirma que en esta clase el IRI se obtiene a partir de una evaluación subjetiva (experiencia y evaluación visual) o mediciones no calibradas. Aplica para casos en donde no se exija mucha exactitud en el resultado del IRI. La inspección visual, siempre ha sido un método de evaluación inmediata, dependiendo del operador y/o especialista puede ser acertada. Sin embargo, para casos de mayor exigencia en la precisión se debe recurrir a las metodologías anteriores.

Tabla 2.10

Resumen de los métodos de medición del IRI según el Banco Mundial

Clase	Descripción	Equipos	Precisión
Clase 1	Son los más exactos estableciendo la regularidad superficial a través de la determinación exacta del perfil longitudinal	Nivel y mira topográfica	Muy alta
		Perfilómetro Laser	Alta
Clase 2	Incluyen todos los métodos medidos directamente del perfil longitudinal, sin cumplir el grado de precisión de la clase 1	Otros perfilómetros de menor precisión	Alta
Clase 3	Conocidos como RTRRMS, miden la respuesta (rebote) del vehículo a la regularidad del pavimento, siendo una medida relativa de la regularidad, por lo que necesitan de calibración	Mays meter	Medio
		Bump Integrator	Medio
Clase 4	Evaluación realizada en campo cuando no se requiera de gran precisión	Evaluación visual	Bajo

Fuente: (Ramos, 2018)

2.3.2.5. IMPORTANCIA DEL IRI

(Lavaud, 2005) en su investigación afirma que: La regularidad superficial o llamada también rugosidad superficial, es la variable más representativa para la determinación del estado de una carretera. En algunos países el termino rugosidad es sinónimo de fricción y en otros es regularidad.

(Badilla, 2009) sostiene que: De acuerdo a la magnitud de irregularidades superficiales que existan en el pavimento dependerá los costos de operación de los vehículos, estas irregularidades afectan la velocidad de circulación, deterioro de los vehículos y el consumo de combustible. La regularidad de la superficie de rodadura permite ofrecer condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de las carreteras.

(Ramos, 2017) en su tesis de investigación afirma que: El IRI es un indicador de la irregularidad superficial del pavimento de una vía, la regularidad del pavimento se

modifica lentamente en función del paso del tránsito, evolucionando hacia valores más elevados del IRI, este indicador es importante porque representa la condición general del pavimento.

2.3.2.6. ESCALA DE REGULARIDAD

Para (Ramos, 2017) la escala IRI es proporcional a la regularidad. Un IRI de 0.0 significa que el perfil es absolutamente liso, los pavimentos con valores de IRI mayores a 8m/km son casi intransitables excepto a velocidades reducidas.

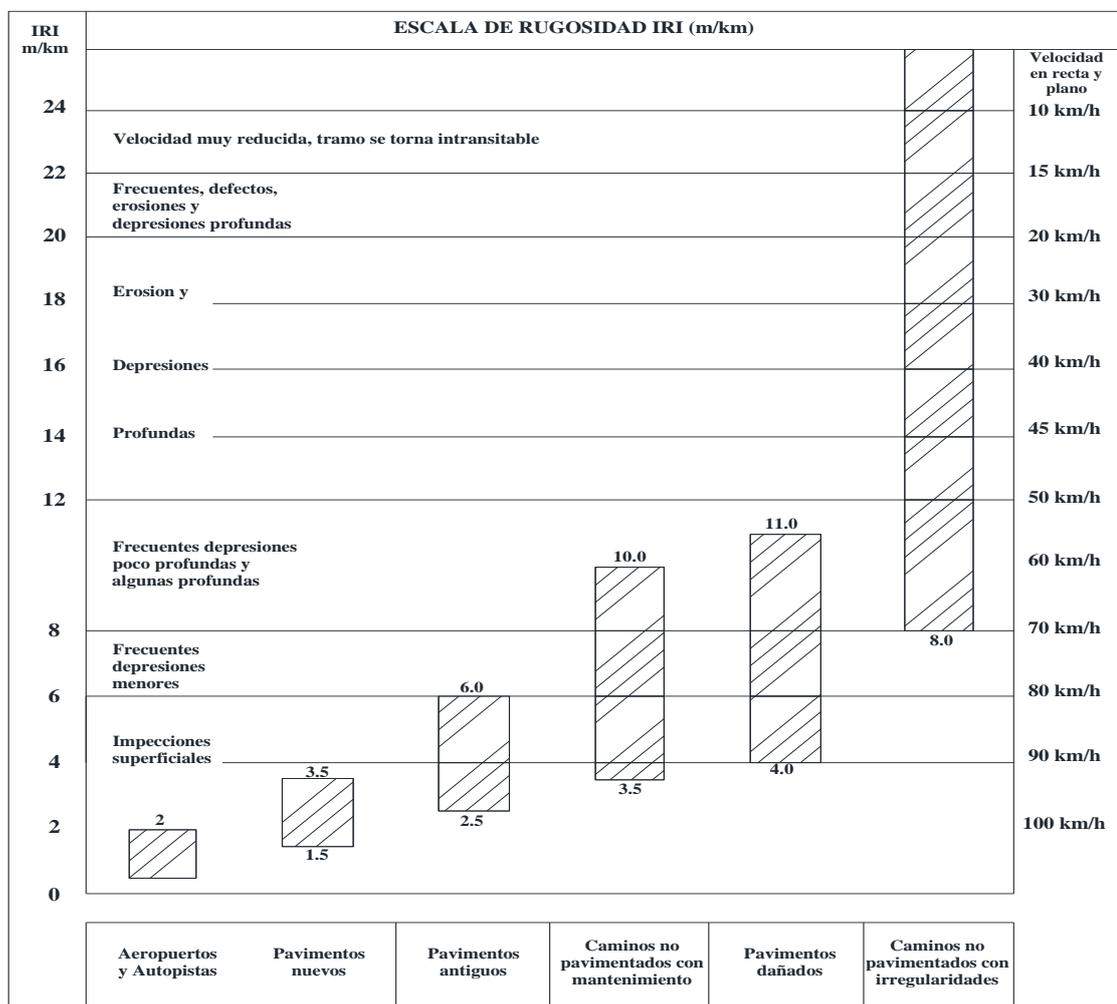


Figura 2.11: Escala estándar para cuantificar el IRI

Fuente: Documento técnico N° 46 del Banco Mundial

En la figura 2.11, se muestra un gráfico que contempla las escalas de rugosidad para distintos tipos de pavimentos y condición.

Para el Perú, el manual de carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, nos indica los valores de rugosidad inicial para un pavimento nuevo, pavimento reforzado y para un pavimento en servicio, estos valores se muestran en la tabla 2.11.

Tabla 2.11

Rugosidad inicial IRI (m/km) según el tipo de carretera

Tipo de carretera	Rugosidad característica inicial pavimento nuevo IRI (m/km)	Rugosidad característica inicial pavimento reforzado IRI (m/km)	Rugosidad característica durante el periodo de servicio IRI (m/km)
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	2.00	2.50	3.50
Carreteras duales o multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	2.00	2.50	3.50
Carreteras de primera clase: carreteras con un IMDA entre 4000 y 2001 veh/día, de una calzada de dos carriles	2.50	3.00	4.00
Carreteras de segunda clase: carreteras con un IMDA entre: 2000 y 401 veh/día, de una calzada de dos carriles	2.50	3.00	4.00
Carreteras de tercera clase: carreteras con un IMDA entre 400 y 201 veh/día, de una calzada de dos carriles	3.00	3.50	4.50
Carreteras de bajo volumen de tránsito: carreteras con un IMDA \leq 200 veh/día, de una calzada	3.00	3.50	4.50

Fuente: Manual de carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” 2013



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

3.1.1. MATERIALES UTILIZADOS EN EL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

Los materiales utilizados para el procesamiento de datos y obtención de resultados son los que se muestran a continuación.

- **Instrumentos y equipos de laboratorio de suelos**

Equipos con los cuales se realizó la caracterización de los componentes del mortero asfáltico.

- **Equipos de laboratorio de mezclas asfálticas**

Se utilizaron para someter las muestras asfálticas preparadas a las pruebas de desempeño necesarias, así de esta manera obtener los diseños del mortero asfáltico, ello de acuerdo a los objetivos planteados en la presente investigación.

- **Equipo mecánico para la colocación del mortero asfáltico**

La colocación del mortero asfáltico se realizó mediante la utilización de un equipo autotransportable comúnmente conocido como camión micropavimentador.

- **Equipos para la medición del IRI**

El equipo utilizado para la medición del IRI de las zonas de estudio, es un equipo que de acuerdo a la clasificación de los equipos para la medición del IRI se encuentra en la CLASE I, ello debido a su alta precisión y rendimiento, el cual tiene el nombre de “PERFILÓMETRO LASER – RSP – MARK IV”, el cual trabaja con un software denominado Dynastest.



- **Software Word y Excel 2019**

Softwares utilizados en forma dinámica y general en la elaboración y edición de la presente investigación.

3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de la investigación es experimental, (Hernandez, 2018) afirma que: Los diseños experimentales manipulan y prueban tratamientos, estímulos, influencias o intervenciones (denominadas variables independientes) para así observar sus efectos sobre otras variables (las dependientes). Es decir, los diseños experimentales se utilizan cuando el investigador pretende establecer el posible efecto de una causa que se manipula.

3.2.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación tiene un nivel de investigación correlacional o relacional, debido a que el propósito es conocer la relación entre dos o más variables; según (Hernandez, 2018), el nivel correlacional o relacional tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que existe entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto en particular. La investigación correlacional tiene, en alguna medida, un valor explicativo, aunque parcial, ya que el hecho de saber que dos conceptos o variables se relacionan aporta cierta información explicativa.

3.2.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es básica, busca la generación de teorías y conceptos, según la planificación es prospectivo puesto que las mediciones son planeadas, es longitudinal según el periodo temporal y el número de mediciones, según el número de variables es analítico debido a que tiene más de una variable y según la intervención del investigador es experimental.

3.2.4. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque de la presente investigación es cuantitativo, (Hernandez, 2018) afirma que: El enfoque cuantitativo es apropiado cuando queremos medir, estimar las magnitudes u ocurrencia de los fenómenos. Los estudios cuantitativos pretenden describir, explicar y predecir los fenómenos investigados, buscando regularidades y relaciones causales entre variables, así de esta manera acotar información.

3.2.5. ESQUEMA DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

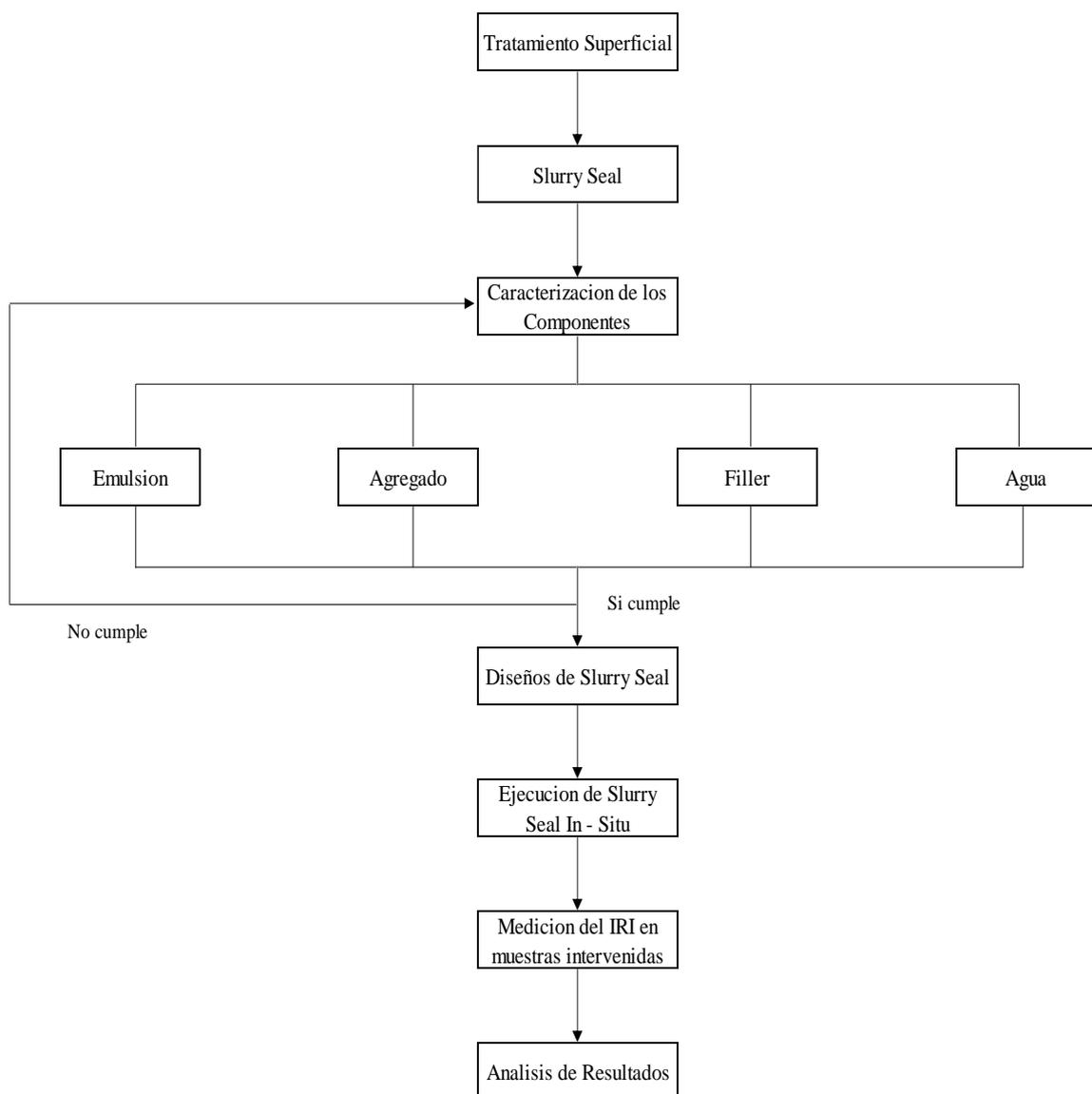


Figura 3.1: Esquema de trabajo de la investigación

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.2.6. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.6.1. POBLACIÓN

La población (N) que se consideró para la presente investigación es el tramo comprendido entre las progresivas Km 125 a 130 del tramo vial Imata – Patahuasi, dicho tramo se encuentra en la carretera Juliaca – Arequipa, el cual pertenece al Corredor Vial Interoceánico Sur Perú – Brasil Tramo V, corredor que esta concesionado a la Concesionaria Vial del Sur (Covisur). Cabe indicar que el tipo de pavimento existente en el tramo vial considerado es de tipo flexible.

3.2.6.2. MUESTRA

La muestra de la presente investigación es de tipo probabilística, según (Hernandez, 2018), la muestra es un sub grupo de la población o universo, de la cual se recolectan datos pertinentes, los cuales deben ser representativos de la población.

3.2.6.2.1. DETERMINACIÓN DE LA MUESTRA

El tamaño de la muestra (n) se determinará mediante el uso de la fórmula para poblaciones finitas, considerando los siguientes datos: Población (N): 5000 m, error máximo aceptable: 5%, porcentaje estimado de la muestra: 50% y nivel de confianza: 90%.

$$n = \frac{z^2 * p * q * N}{e^2 * (N - 1) + z^2 * p * q}$$
$$n = \frac{1.64^2 * 0.5 * 0.50 * 5000}{0.05^2 * (5000 - 1) + 1.90^2 * 0.5 * 0.5}$$
$$n = 256 m$$

De acuerdo a la muestra obtenida, en la tabla 3.1 se presenta las progresivas y la muestra representativa de la población.

Tabla 3.1

Muestras Intervenidas In - Situ

Progresivas		Longitud (m)	Lado	Dosificación de Filler
Inicio	Final			
125+000	125+100	100.00	Izquierdo	0.5%
127+200	127+300	100.00	Derecho	1%
129+300	129+400	100.00	Izquierdo	2%
Total		300.00 m		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.2.7. INSTRUMENTOS

3.2.7.1. INSTRUMENTOS METODOLÓGICOS

Los instrumentos metodológicos que se utilizaron en la presente investigación están constituidos básicamente por libros, artículos científicos, tesis de investigación y video conferencias; algunas de estas en documentos físicos y otras en archivos digitales.

3.2.7.2. INSTRUMENTOS DE INGENIERÍA

La presente investigación, tanto para la caracterización de los componentes mediante el uso de equipos de laboratorio, como para el diseño, ejecución y medición del IRI, se ciñó y baso estrictamente en los siguientes documentos técnicos:

- Especificaciones técnicas generales para la construcción de carretera (EG, 2013)
- Guía de diseño de la ISSA (International Slurry Surfacing Association) A – 105.
- Manual de ensayo de materiales (EM, 2016)



3.3. PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SLURRY SEAL

3.3.1.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

Según (Huanca, 2013), los materiales granulares que se emplean en la elaboración de mezclas asfálticas, tienen una gran importancia; ya que forma el esqueleto mineral el cual proporciona las propiedades físicas a la mezcla garantizando el buen desempeño de la misma. Esta importancia, ha originado que se desarrollen estudios con el objeto de establecer procedimientos y parámetros, para clasificar a los materiales según sus propiedades físicas y químicas. Esto permite a los profesionales adoptar un criterio al momento de utilizar un material en el diseño de las mezclas asfálticas.

Para (Ramirez, 2017), los agregados (excluyendo al filler) constituyen entre el 82% y el 90% del peso del Slurry Seal, estos deben estar limpios, duros y libres de químicos, arcillas y otras materias que puedan afectar su adherencia, mezclado y colocación. Asimismo, estos deben de cumplir las exigencias y especificaciones establecidas en las normas existentes.

3.3.1.1.1. DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A REALIZARSE A LOS AGREGADOS

A continuación, se presenta una breve descripción, así como también los resultados obtenidos de los ensayos realizados al agregado. Esto según las recomendaciones de la guía de la ISSA – A105 y las especificaciones técnicas generales EG – 2013.

El agregado utilizado para la presente investigación, es una arena extraída de la cantera Uquiña, ubicada en la región de Arequipa, provincia de Arequipa y distrito de Yura.



a) Muestreo de los agregados (MTC E 201 – 2016)

- **Descripción**

Este ensayo tiene como objetivo principal, obtener una muestra representativa del volumen del material pétreo en estudio tales como: roca, grava, gravilla o arena, la cual debe de cumplir las exigencias y requerimientos de cada ensayo a realizarse.

El propósito del muestreo según el (EM, 2016) contempla los siguientes propósitos.

- Investigación preliminar de la fuente potencial de abastecimiento.
- Control en la fuente de abastecimiento.
- Control de las operaciones en el sitio de su utilización.
- Aceptación o rechazo de los materiales.

- **Resultados**

El muestreo del agregado se realizó cumpliendo la norma establecida.

b) Análisis granulométrico (MTC E 204 – 2016)

- **Descripción**

Según el (EM, 2016), se aplica para determinar la gradación de materiales propuestos para uso como agregados o los que están siendo usados como tales. Los resultados serán usados para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de partículas con los requisitos exigidos en la especificación técnica de la obra y proporcionar datos necesarios para el control de producción de agregados.

Este ensayo tiene como propósito determinar, cuantitativamente, los tamaños de las partículas de los agregados por medio de tamices normalizados.



Para (Huanca, 2013), este ensayo consiste en hacer pasar cierta cantidad de muestra por dichos tamices normalizados, ordenados de mayor a menor abertura, y pesar los materiales retenidos en cada uno de ellos; con el objetivo de hallar el porcentaje acumulado que pasa y así de esta forma realizar la curva granulométrica. Para un mejor entendimiento sobre este ensayo, se debe conocer los términos de tamaño máximo y tamaño máximo nominal.

- El tamaño máximo del agregado es el tamiz de menor abertura por el cual pasa el 100% del material.
- El tamaño máximo nominal es el tamiz de mayor abertura que retiene más del 10% del material.

- **Resultados**

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.2 y en la figura 3.2, de los cuales se deduce lo siguiente:

- El agregado de la cantera Uquiña tiene un tamaño máximo de 3/8".
- El tamaño máximo nominal de la cantera Uquiña es de 2.36 mm.
- Con el valor del tamaño máximo del agregado se puede estimar el posible espesor del slurry seal: $e = 1.15 TM = 1.1 \text{ cm}$ Aproximadamente.
- De acuerdo a los usos granulométricos establecidos por la ISSA, la distribución granulométrica de las partículas del agregado de la cantera Uquiña, cumple los requerimientos para un diseño de slurry seal tipo II.



Tabla 3.2

Granulometría de la arena de la cantera Uquiña

Mallas		% Retenido	% Retenido acumulado	% que pasa	Especificación	
Serie Americana	Abertura (mm)	%	%	%	Tipo II	
3/8"	9.525			100.0	100	- 100
# 4	4.76	10.0	10.0	90.0	90	- 100
# 8	2.38	22.0	32.0	68.0	65	- 90
# 16	1.19	15.0	47.0	53.0	45	- 70
# 30	0.59	11.0	58.0	42.0	30	- 50
# 50	0.297	12.0	70.0	30.0	18	- 30
# 100	0.149	12.0	82.0	18.0	10	- 21
# 200	0.074	9.0	91.0	9.0	5	- 15
< # 200	(ASTM C - 117)	9.0	100.0	0.0		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

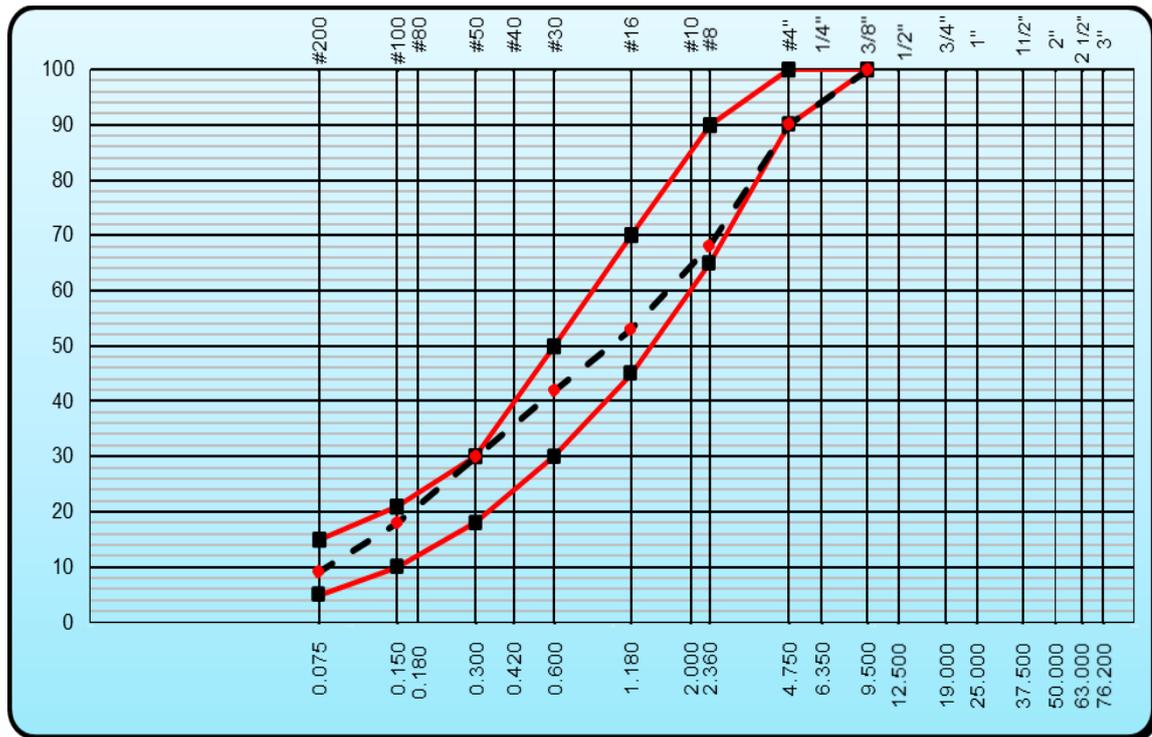


Figura 3.2: Gráfico de la curva granulométrica

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Figura 3.3: Realización del ensayo de análisis granulométrico

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

c) Ensayo de equivalente de arena (MTC E 114 – 2016)

- **Descripción**

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), este método de ensayo se propone servir como una prueba de correlación rápida de campo. El propósito de este método es indicar, bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de suelos arcillosos o finos plásticos y polvo en suelos granulares y agregados finos que pasan el tamiz N° 4 (4.75mm). El equivalente de arena será el del agregado finalmente obtenido mediante la combinación de las distintas fracciones, según las proporciones determinadas en la fórmula de trabajo.

El objetivo de este ensayo es determinar la proporción de polvo fino nocivo o material arcilloso en el agregado.

En la tabla 3.3 se presenta los valores permisibles de este ensayo.

Tabla 3.3

Especificaciones del ensayo Equivalente de Arena

Ensayo	Normatividad	Especificación
Equivalente de Arena	EG - 2013	40% Min
	ISSA - A 105	45 % Min

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

- **Resultados**

En la tabla 3.4 se muestra el resultado del ensayo equivalente de arena, realizado al agregado de la cantera Uquiña. Este resultado (57%), es un valor que está muy por encima del mínimo especificado tanto por el EG – 2013 y la ISSA, indicando que el agregado es un material limpio y puede

ser utilizado para el diseño del mortero asfáltico (slurry seal) que de acuerdo a la granulometría es de Tipo II.

Tabla 3.4

Resultado del ensayo equivalente de arena

Ensayo	Resultado
Equivalente de Arena	57%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Figura 3.4: Sustancia química $CaCl_2$, para el ensayo de equivalente de arena

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Figura 3.5: Realización del ensayo equivalente de arena

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



d) Ensayo de peso unitario y vacíos del agregado (MTC E 203 – 2016)

- **Descripción**

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), el objetivo de este ensayo es obtener el peso unitario suelto, compactado y el porcentaje de los vacíos de los agregados finos, estos valores son útiles para hacer las transformaciones de pesos a volúmenes y viceversa.

El ensayo para peso unitario compactado consiste en colocar el agregado en un recipiente en tres capas compactando con 25 golpes por capa con una varilla. Luego debe pesarse el recipiente de volumen conocido.

El ensayo para peso unitario suelto se debe llenar el recipiente, pero sin compactar y se debe pesarse el recipiente de volumen conocido.

- **Resultados**

En la tabla 3.5 se muestra los resultados del ensayo de peso unitario realizados al agregado, presentando como resultado final el promedio de tres muestras ensayadas.

Tabla 3.5

Resultado del ensayo de peso unitario

Numero de Muestra		1	2	3
A. Peso de material+molde	gr	10215.3	10202	10199.1
B. Peso del molde	gr	6547.7	6547.7	6547.7
C. Peso del material	gr	3667.6	3654.3	3651.4
D. Volumen del molde	cm ³	2132.7	2132.7	2132.7
E. Peso unitario	g/cm ³	1.720	1.713	1.712
F. Peso unitario	kg/m ³	1719.70	1713.46	1712.10
G. Promedio	kg/m ³		1715	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

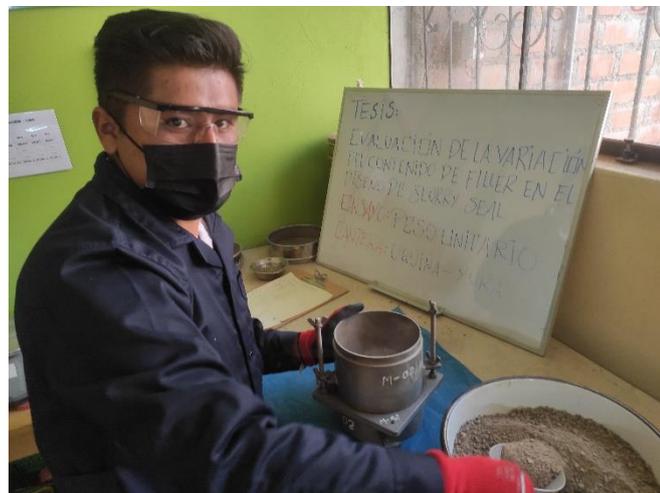


Figura 3.6: Realización del ensayo de peso unitario

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



e) Ensayo de peso específico y absorción de agregados finos (MTC E 205 – 2016)

- **Descripción**

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), este ensayo sirve para determinar el peso específico seco, peso específico saturado con superficie seca, el peso específico aparente y la absorción después de las 24 horas de sumergido en agua el agregado fino.

El ensayo consiste en hallar los pesos de las muestras finas a diferentes condiciones, peso de la muestra seca, peso de la muestra saturada con superficie seca, peso de la muestra saturada; para así hallar la gravedad específica.

- **Resultados**

La tabla 3.6 nos muestra los resultados del ensayo de peso específico y absorción de agregados finos, presentando como resultado final el promedio de tres muestras ensayadas.

Tabla 3.6

Resultados del ensayo de peso específico y absorción

Ensayo		1	2	3	Promedio
Peso Específico Bulk (Base seca)	gr/cm ³	2.54	2.524	2.559	2.541
Peso Específico Bulk (Base Saturada)	gr/cm ³	2.674	2.674	2.688	2.679
Peso Específico Aparente (Base seca)	gr/cm ³	2.932	4.495	2.938	3.455
Absorción	%	5.26	5.93	5.04	5.410

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Figura 3.7: Realización del ensayo de peso específico

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

f) Ensayo de abrasión de los ángeles (MTC E 207 – 2016)

- **Descripción**

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia al desgaste de agregados debido a que estos deben de resistir la producción, colocación, compactación y sobre todo los esfuerzos ejercidos durante la vida de servicio.

El ensayo consiste en tomar una muestra de agregado e introducirla en la máquina de los ángeles, junto con las cargas abrasivas, que depende de los porcentajes retenidos en cada malla. Se hace rotar a 500 revoluciones durante 15 min. Finalizando la rotación, el material debe ser tamizado por la malla N° 12, se lava y se pesa, calculando de esta manera el porcentaje de desgaste.

En la tabla 3.7 se presenta las especificaciones para este ensayo.



Figura 3.9: Realización del ensayo de abrasión

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

g) Ensayo de durabilidad a sulfatos (MTC E 209 – 2016)

- **Descripción**

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), este ensayo suministra información útil para juzgar la alterabilidad de los agregados sometidos a la acción de la intemperie. El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia del árido al deterioro por acción de los agentes climáticos durante la vida útil de la obra. El ensayo consiste, en exponer la muestra del agregado en ciclos alternativos de baño de inmersión en una solución de sulfato de sodio o magnesio y secado al horno. Una inmersión y secada se consideran un ciclo de durabilidad, se debe realizar cinco ciclos de durabilidad para este ensayo.

Tabla 3.9

Especificaciones para el ensayo de duración a sulfatos

Ensayo	Normatividad	Especificación
Durabilidad a Sulfatos	EG - 2013	18% Max (Mg)
	ISSA - A 105	15 % Max (Na)
		25 % Max (Mg)

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

- **Resultados**

En la tabla 3.10, se muestra el resultado del ensayo de durabilidad que se realizó agregado, el cual está por debajo del máximo valor permisible. Este valor indica que el material será resistente a los cambios de temperatura (intemperismo) que se producirán en el desarrollo de la vida útil del slurry seal tipo II.

Tabla 3.10

Resultado del ensayo durabilidad a los sulfatos

Ensayo	Resultado
Durabilidad a los sulfatos	10.45%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Figura 3.10: Realización del ensayo durabilidad a los sulfatos de los agregados

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

h) Ensayo de azul de metileno

- **Descripción**

Según (Huanca, 2013), el objetivo de este ensayo es determinar a través de los valores de reactividad de los materiales finos pasantes del tamiz N° 200, las características del emulsificante químico a utilizar en el diseño de la emulsión asfáltica. La prueba consiste en añadir cantidades controladas

de azul de metileno (0.5ml) al material fino, hasta que este ya no absorba más.

El valor de azul de metileno, también se puede emplear para estimar la cantidad de arcillas dañinas y la cantidad de materia orgánica presente en un agregado. Un valor significativo (13 – 19 mgr/gr) indicara una gran cantidad de estos materiales presentes en la muestra, que puede originar problemas en el uso del agregado.

En la tabla 3.11 se presenta las especificaciones para este ensayo.

Tabla 3.11

Especificaciones del ensayo azul de metileno

Ensayo	Normatividad	Especificación
	EG - 2013	8 Max
Azul de Metileno	ISSA - A 105	10 Max (Basalto) 7 Max (Arenisca)

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

- **Resultados**

En la tabla 3.12, se muestra el resultado (8 mg/g) del ensayo azul de metileno, el cual indica que el material es relativamente reactivo, puesto que se encuentra en el límite superior establecido por el EG – 2013 y por encima del valor máximo establecido por la ISSA, pero es aceptable.

Generalmente cuando este valor supera los rangos establecidos, el emulsificante utilizado para la fabricación de la emulsión asfáltica tiene que tener la capacidad de evitar el rompimiento prematuro de la emulsión al contacto con el árido. Por tanto, en estos casos la elección del tipo de emulsificante es muy importante.

Tabla 3.12

Resultado del ensayo azul de metileno

Muestra	Azul de Metileno Cada	Reactividad Numero
Agregado fino pasante la malla N° 200	0.5 ml	8

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Figura 3.11: *Realización del ensayo azul de metileno*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Figura 3.12: *Material fino ensayado*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.3.1.1.2. RESUMEN COMPARATIVO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

En la tabla 3.13, se muestra el resumen de los resultados obtenidos en el laboratorio para el agregado de la cantera Uquiña, comparados con los requerimientos establecidos por las especificaciones técnicas generales para la construcción de carreteras (EG – 2013) y la guía de diseño A – 105 de la ISSA.

Según los resultados obtenidos, el agregado cumple con las especificaciones establecidas en los documentos técnicos mencionados líneas arriba. Por lo tanto, el agregado puede ser utilizado para el diseño del mortero asfáltico (slurry seal).

Tabla 3.13

Resumen de los resultados del agregado ensayado

ENSAYO	RESULTADO	ESPECIFICACION		CONDICION
	CANTERA UQUIÑA	EG - 2013	ISSA A 105	
Granulometría	Tipo II	Tipo II	Tipo II	Cumple
Equivalente de Arena (%)	57.0	40% Mínimo	45% Mínimo	Cumple
Abrasión de los Ángeles (%)	20.0	25% Máximo	35% Máximo	Cumple
Durabilidad al Sulfato de Magnesio (%)	3.9	18% Máximo	25% Máximo	Cumple
Azul de Metileno	8.0	8 mg/g	-	Cumple

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.3.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL RELLENO MINERAL

Según (Huanca, 2013), la importancia de un relleno mineral, radica principalmente en su granulometría fina. Esto permite llenar los vacíos existentes en una mezcla asfáltica, con la finalidad de hacerlo más consistente e impermeable.

Generalmente para el diseño de slurry seal, se utiliza como filler cemento portland tipo I, ello por las propiedades de resistencia que brinda a la mezcla y por su bajo costo en comparación a los otros fillers comerciales como la cal hidratada. Para los diseños del mortero asfáltico, lo cual es tema de estudio de la presente investigación se utilizó como filler al cemento portland tipo I.

3.3.1.2.1. DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A REALIZARSE AL FILLER MINERAL

Según el (EG, 2013), el filler mineral incluido en los agregados podrá complementarse o suplirse con un producto comercial o especialmente preparado, cuya misión sea controlar el proceso de rotura de la emulsión o activar la consecución de la cohesión del mortero asfáltico.

Para (Huanca, 2013), los ensayos de peso específico y granulometría, son fundamentales para describir las principales propiedades del relleno mineral y poder caracterizarlo.

A continuación, se detallará de manera precisa cada uno de ellos.

a. Ensayo de peso específico y absorción de agregados finos (MTC E 205 – 2016)

- **Descripción**

El objetivo de este ensayo es determinar la relación entre el peso y el volumen de los agregados más finos (filler). (Huanca, 2013) afirma que el procedimiento es similar al realizado por los agregados, solo que en este caso se utiliza el frasco de Le Chatelier.

- **Resultado**

En la tabla 3.14 se muestra el resultado del ensayo de peso específico que se realizó al cemento portland tipo I, utilizado como filler en la presente investigación.

Tabla 3.14

Resultado del ensayo de peso específico del filler mineral

Ensayo	Resultado
Peso Específico (gr/cm ³)	2.83

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Figura 3.13: *Ensayo de peso específico al filler (cemento)*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

b. Análisis granulométrico del relleno mineral (MTC E 216 – 2016)

- **Descripción**

El objetivo de este ensayo es obtener los tamaños del filler por medio de tamices normalizados.

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), este ensayo consiste en pasar el filler por los tamices N° 30, N° 50 y N° 200, para lo cual se debe pasar el material mediante el lavado con agua potable, hasta que se obtenga agua clara. Finalmente se debe secar el residuo de cada tamiz y

determinar el peso retenido, así como el porcentaje de material pasante de cada tamiz.

- **Resultado**

En la tabla 3.15 se muestra el resultado de la finesa (material que pasa la malla N° 200) del filler mineral a utilizarse en los diseños de slurry seal.

Tabla 3.15

Granulometría del cemento portland tipo I

Malla	% Retenido	% Que pasa
# 30	0.70	99.30
# 50	1.64	98.36
# 200	5.40	94.60
< # 200	94.60	-

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Figura 3.14: *Muestra de cemento ensayado (Análisis granulométrico)*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.3.1.3. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

Según el (EG, 2013), el agua deberá ser limpia y estará libre de materia álcalis y otras sustancias deletéreas. Su pH, medido según norma NTP 339.073, deberá estar comprendido entre 5.5 y 8.0 y el contenido de sulfatos, expresado como SO_4 y determinado según norma NTP 339.074, no podrá ser superior a 380 ppm, determinado según la norma NTP 339.072. En general, se considera adecuada el agua potable y ella se podrá emplear sin necesidad de realizar ensayos de calificación antes indicados.

La guía A – 105 de la ISSA, establece que el agua debe ser potable y libre de sales solubles nocivas o de productos químicos reactivos y cualquier otro contaminante.

Para (Huanca, 2013), la importancia del agua radica principalmente en la trabajabilidad que aporta a la mezcla. Dependiendo del clima presente en obra, se puede variar su cantidad en la mezcla; cantidades menores de agua en climas fríos (10 – 20 °C) y mayores cantidades durante climas más calurosos (30 – 40 °C). Es por ello, que es importante que el agua cumpla las especificaciones establecidas en las normas.

3.3.1.3.1. DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A REALIZARSE AL AGUA

(Huanca, 2013), afirma que los ensayos de potencial de hidrogeno (pH) y dureza, son fundamentales para caracterizar al agua de diseño y poder determinar su aceptación en el diseño.

a. Ensayo de potencial de hidrogeno (ASTM D 1293)

- **Descripción**

Es una medida de la acidez y la alcalinidad de una solución. Su valor va de 0 a 14, siendo ácidas las disoluciones con pH menores a 7 y alcalinas las que tienen pH mayores a 7, mientras el pH igual a 7 indica la neutralidad de la disolución.

(Huanca, 2013) afirma lo siguiente: Se sabe que una emulsión catiónica es una disolución ácida y si se dispone para la mezcla una agua muy alcalina o básica, podría haber problemas produciendo una rotura acelerada de la emulsión.

El agua utilizada para el diseño fue de la fuente de agua ubicada en el tramo vial Imata – Patahuasi, específicamente en el Km 152+000 Lado Derecho.

- **Resultado**

El resultado obtenido del ensayo de potencial de hidrogeno pH (7.2) se encuentra dentro del rango establecido por la norma ASTM D 1293.

Tabla 3.16

Resultado del ensayo potencial de hidrogeno pH

Ensayo	Método	Resultado	Especificación		
pH	ASTM D 1293	7.2	6	-	8

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

b. Ensayo de Dureza (ASTM D 1126)

- **Descripción**

Para (Huanca, 2013), la dureza total expresa las concentraciones de sales disueltas en el agua que, a su vez, es la suma de la dureza temporal o carbonatada, representada por aquellas sales que se pueden eliminar por medio de ebullición, y la dureza permanente, que reúne aquellas sales que no son eliminadas por ebullición.

- **Resultado**

El resultado obtenido del ensayo de dureza (100 ppm) se encuentra dentro del rango establecido por la norma ASTM D 1126.

Tabla 3.17

Resultado del ensayo de dureza

Ensayo	Método	Resultado	Especificación	
			Min	Max
Dureza, ppm	ASTM D 1126	100	-	380

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



3.3.1.4. CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA

Los ensayos de caracterización de la emulsión asfáltica se establecieron para medir las cualidades relacionadas con la composición, consistencia, estabilidad, performance, entre otros.

El tipo de emulsión utilizado para la presente investigación es una emulsión catiónica de rotura lenta, fabricada con cemento asfáltico blando con un residuo asfáltico de 60.5% y modificada con polímeros CSS – 1P; dicha emulsión se fabricó en la planta de emulsiones de la empresa CASA, ubicada en la ciudad de cañete, empresa que fabrica dicho insumo para su propio uso.

La caracterización de la emulsión asfáltica se realiza para su control de calidad, los ensayos realizados se describen a continuación

3.3.1.4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LA EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS CSS – 1P.

Para la caracterización de la emulsión asfáltica CSS – 1P, se tomaron como referencia las especificaciones establecidas en las siguientes normativas: Manual de ensayo de materiales (EM – 2016), especificaciones técnicas generales para la construcción de carreteras EG – 2013 y los métodos establecidos en las normas de la ASTM y AASHTO.

a. Ensayo de destilación de emulsiones asfálticas (MTC E 401 – 2016)

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), la finalidad de este ensayo es separar el agua de la emulsión asfáltica; para así obtener el asfalto residual y realizar ensayos adicionales. El ensayo consiste en destilar una muestra de emulsión hasta una temperatura de 260 °C durante un tiempo de 15 minutos, para así poder medir las proporciones relativas de cemento asfáltico y agua.



b. Ensayo de viscosidad Saybolt de emulsiones asfálticas (MTC E 406 – 2016)

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), este ensayo tiene como objetivo determinar la viscosidad o consistencia de las emulsiones asfálticas por medio del viscosímetro Saybolt Furol.

Este ensayo consiste en verter la muestra en el tubo del viscosímetro y después se deja caer al matraz, para luego controlar el tiempo en que dicha muestra se demora en llegar al aforo y se registra como segundos Saybolt (ssf).

c. Ensayo residuo por evaporación de las emulsiones asfálticas (MTC E 411 – 2016)

Según el (EM, 2016), el objetivo de este ensayo es determinar en forma cualitativa los residuos de los asfaltos emulsionados compuesto principalmente de una base asfáltica, líquida o semisólida, agua y un agente emulsificador. Mediante este ensayo se determina el porcentaje de asfalto que contiene una emulsión, evaporando el agua y pesando el residuo.

Este método de prueba del residuo de evaporación tiende a brindar un residuo asfáltico menor en penetración y ductilidad que el método de la prueba de destilación. Se podría aceptar el material, pero no se le rechazara por no haber cumplido con las especificaciones, las cuales incluyen los requisitos para determinar el residuo por destilación, de los datos obtenidos por la evaporación. Si el residuo por la evaporación no cumple con los requisitos de las propiedades especificadas del residuo de la destilación, se realizarán las pruebas de nuevo usando el método de la prueba de destilación.

d. Ensayo de sedimentación a los 7 días (MTC E 404 – 2016)

Según el (EM, 2016), este ensayo tiene como finalidad determinar la capacidad de una emulsión asfáltica para permanecer como un medio disperso uniforme



durante el tiempo de almacenamiento. Mediante este ensayo se valora la sedimentación que se produce durante el almacenamiento de las emulsiones asfálticas. El ensayo consiste en verter en una probeta una muestra de emulsión y dejar reposar durante 5 días, al final de este tiempo se toma una muestra de la parte superior y otra de la parte inferior, se calcula el residuo por evaporación del agua de cada una y por diferencia se calcula el porcentaje de asentamiento de la emulsión.

e. Ensayo de prueba del tamiz N°20 (MTC E 405 – 2016)

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), el objetivo de este ensayo es determinar la cantidad de producto asfáltico mal emulsionado que hay en la emulsión.

El ensayo consiste en verter la emulsión a través de un tamiz de 850mm (N° 20); después, se lava la malla, se seca y se pesa, para que por diferencia de pesos se calcule el porcentaje de asfalto retenido en la malla.

f. Ensayo de mezcla con cemento (MTC E 410 – 2016)

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), el objetivo del ensayo es determinar el porcentaje de emulsión que se rompe cuando se mezcla con cemento, es así como se determina la capacidad de dicha emulsión para mezclarse, sin romper, con un material de alta superficie específica.

Según (Huanca, 2013), este ensayo es aplicable solo para emulsiones de rotura lenta.

El ensayo consiste en mezclar una muestra de emulsión asfáltica con cemento portland finamente molido y después lavar la mezcla sobre el tamiz N° 14. El porcentaje retenido en dicha malla se considera como la emulsión rota.



g. Ensayo de carga de las partículas de las emulsiones asfálticas (MTC E 407 – 2016)

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), el objetivo de este ensayo es identificar a las emulsiones asfálticas aniónicas y catiónicas. Las emulsiones catiónicas son identificadas por la migración de las partículas a un electrodo negativamente cargado (cátodo) por medio de una corriente directa.

El ensayo consiste en introducir en la emulsión una pareja de electrodos, uno positivo y otro negativo, unidos a una fuente de alimentación de corriente continua, observando al cabo de un tiempo (30 minutos), que electrodo muestra la capa de asfalto.

Al residuo asfáltico obtenido producto del ensayo de destilación, por control de calidad también se le realizan ensayos, los cuales se describen a continuación.

h. Ensayo de penetración (MTC E 304 – 2016)

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), el objetivo de este ensayo es determinar la penetración o dureza del residuo asfáltico a una temperatura específica. Valores altos de penetración indica una consistencia más suave.

El ensayo consiste en verter una muestra de residuo asfáltico a una capsula, se deja enfriar y posteriormente se sumerge a un baño de agua a 25 °C por un tiempo determinado, para luego dejar caer una aguja normalizada durante 5 segundos y medir la penetración.

i. Ensayo de ductilidad (MTC E 306 – 2016)

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), la finalidad de este ensayo es determinar la ductilidad de los materiales asfálticos de consistencia sólida o semisólida. La ductilidad de un material bituminoso se mide por la distancia a la



cual se alargará antes de romperse cuando dos extremos de un espécimen son separados a una velocidad y temperatura específicas.

El ensayo consiste en someter a una briqueta a un ensayo de tracción, luego de que ha sido llevado en un baño de agua a la temperatura de prueba, finalmente se estira a una velocidad normalizada hasta que la muestra se rompa. La distancia a la cual se rompe la muestra se le llama ductilidad.

j. Ensayo de punto de ablandamiento (MTC E 307 – 2016)

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), el objetivo de este ensayo es determinar el punto de ablandamiento del material asfáltico, para tener un valor de la tendencia del material a fluir, cuando se somete a temperaturas elevadas.

Este ensayo consiste en calentar a una velocidad controlada dos discos horizontales de material bituminoso, que soportan cada uno de ellas dos bolas de acero. Cuando los discos se ablanden lo suficiente, dejaran caer las bolas de acero cubiertas con el material bituminoso. El promedio de las dos temperaturas registradas se le llama punto de ablandamiento.

k. Recuperación elástica torsional (MTC E 320 – 2016)

Según el manual de ensayo de materiales (EM, 2016), el objetivo de este ensayo es determinar el grado de elasticidad que presentan los residuos de asfalto modificado.

En casos particulares de clima, orográficos o de tránsito, se pueden utilizar productos generalmente polímeros, que incorporados al ligante asfáltico modifican las características de este, con el objeto de mejorarlo funcionalmente.

El ensayo consiste en extraer en un cilindro de dimensiones específicas, el residuo asfáltico y se deja enfriar. Luego es torsionado un ángulo de 180 °C, para luego



después de un tiempo determinado de 30 minutos se determine el ángulo recuperado, hallando así de esta manera el porcentaje de recuperación.

3.3.1.4.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LA EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS

En las tablas 3.18 y 3.19 se muestran los principales ensayos que se realizaron a la emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta modificada con polímeros (CSS – 1P) y los ensayos que se realizaron al residuo asfáltico respectivamente; ello de acuerdo a los procedimientos indicados en el manual de ensayo de materiales (EM – 2016) y las especificaciones establecidas en las especificaciones técnicas generales para la construcción de carreteras (EG – 2013).

Cabe indicar que la emulsión asfáltica y los resultados de la caracterización fueron brindados por la empresa Construcción y Administración S.A (CASA).

De acuerdo a los resultados obtenidos dicho insumo cumple con las especificaciones establecidas en las normativas; a partir de ello se determina que la emulsión puede ser utilizada para los diseños de slurry seal.

Tabla 3.18*Resultados de los ensayos de la emulsión modificada con polímeros*

Ensayos sobre la emulsión	Método	Unidades	Resultado	Especificaciones	
				Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt Furol, 25° C	MTC - E 430	ssf	31	20	100
Residuo por evaporación	MTC - E 411	%	61	60	-
Estabilidad de almacenamiento, 24 horas	-	%	0.1	0	1
sedimentación a los 7 días	MTC - E 404	%	0.2	-	5
Prueba del tamiz N° 20	MTC - E 405	%	0.01	-	0.1
Mezcla con cemento	MTC - E 410	%	0	-	2
Carga de Partícula	MTC - E 407		Positivo	Positivo	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo**Tabla 3.19***Resultados de los ensayos sobre el residuo de emulsión*

Ensayos sobre el residuo de emulsión	Método	Unidades	Resultado	Especificaciones	
				Mínimo	Máximo
Penetración, 25° C, 100 g, 5s	MTC - E 304	dmm	108	100	150
Punto de ablandamiento	MTC - E 307	° C	48	45	-
Ductilidad, 25° C, 5 cm/min	MTC - E 306	cm	90	10	-
Recuperación elástica torsional, 25° C	MTC - E 320	%	40	20	-

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



3.3.2. DISEÑO DEL SLURRY SEAL

3.3.2.1. CONTENIDO TEÓRICO DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA

3.3.2.1.1. MÉTODOS PARA LA SELECCIÓN DEL CONTENIDO DE EMULSIÓN

Según (Yamunaque, 2020), existen una serie de métodos utilizados para la selección del contenido teórico del residuo asfáltico, los cuales tienen su fundamento en el análisis granulométrico del agregado. A continuación, se señala los métodos existentes:

- Método Francés.
- Método del Instituto del Asfalto (USA).
- Método de la SAHOP (secretaría de obras públicas – México)
- Método de la Superficie Especifica Aparente.

Para el diseño del slurry seal de la presente investigación se utilizará el método de la superficie especifica aparente o conocido como el método de Diurez, ya que generalmente es el más utilizado. A partir de la obtención del contenido teórico del residuo asfáltico se procede a calcular el contenido teórico de la emulsión asfáltica

3.3.2.1.2. MÉTODO DE LA SUPERFICIE ESPECIFICA APARENTE

El método de la superficie especifica aparente (Método de Diurez), es utilizado para calcular el área superficial de los áridos, ello basado en su granulometría, y a partir de ello determinar el porcentaje teórico del residuo asfáltico utilizando el gráfico de la figura 3.15.

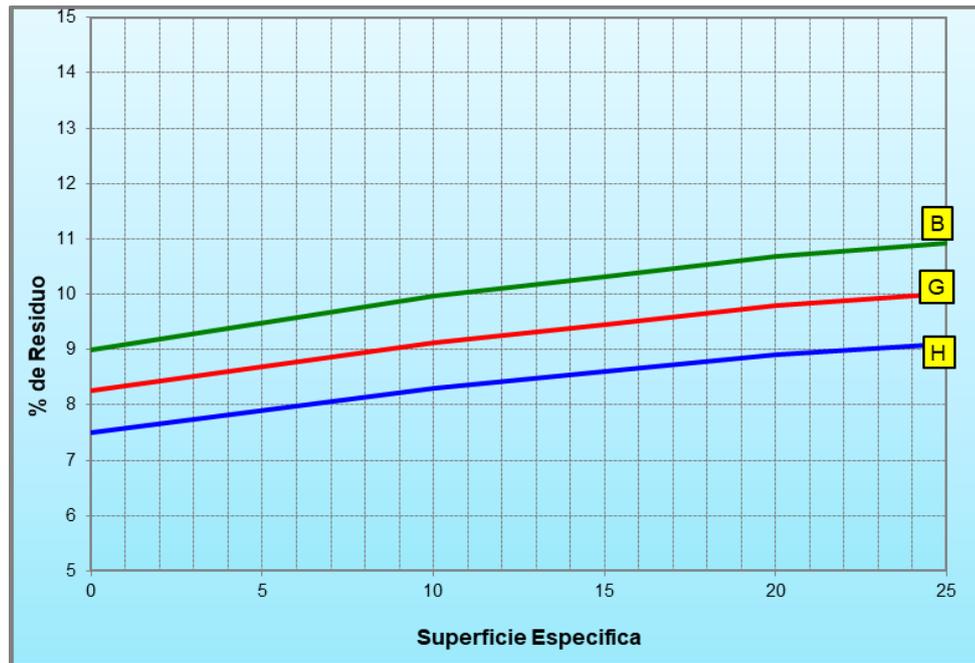


Figura 3.15: Gráfico para el cálculo teórico del asfalto residual

Fuente: Guía de diseño de morteros asfálticos TDM Asfaltos

Del gráfico de la figura anterior:

B: Materiales con bajo EA y absorción alta.

G: Materiales con propiedades promedio.

H: Materiales con alto EA y absorción baja.

Para determinar la superficie específica de los agregados, se utiliza la expresión 3.1:

$$SE = \frac{0.342 * A + 1.92 * B + 15.33 * C + 118 * D}{100} \dots \dots (3.1)$$

Donde:

SE: Superficie específica aparente

A: % Porcentaje retenido entre las mallas 3/8" y N° 04

B: % Porcentaje retenido entre las mallas N° 04 y N° 50

C: % Porcentaje retenido entre las mallas N° 50 y N° 200

D: % Porcentaje que pasa la malla N° 200



Luego de la determinación del valor de la superficie específica aparente del agregado, se procede a ingresar este valor al gráfico de la figura 3.15, el cual posee tres curvas, donde sus valores dependen del tipo de material y sus propiedades, para así de esta forma determinar el contenido teórico del asfalto residual.

Para el cálculo del porcentaje teórico de la emulsión asfáltica se utilizará la expresión 3.2:

$$\% \text{ Teorico de la emulsion} = \frac{\% \text{ Residuo Teorico} * 100}{\% \text{ Residuo por evaporacion}} \dots \dots (3.2)$$

Los valores del porcentaje de residuo teórico asfáltico y el porcentaje del residuo por evaporación se obtienen del gráfico de la figura 3.15 y del ensayo del residuo (MTC E 411) por evaporación respectivamente.

3.3.2.1.2.1 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE TEÓRICO DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA

La obtención de los valores de la expresión 3.1, se obtendrá a partir de los datos obtenidos del ensayo de análisis granulométrico, los cuales se encuentran en la tabla 3.2.

Mallas		% Retenido	% Retenido acumulado	% que pasa
Serie Americana	Abertura (mm)	%	%	%
3/8"	9.525			100.0
# 4	4.76	10.0	10.0	90.0
# 8	2.38	22.0	32.0	68.0
# 16	1.19	15.0	47.0	53.0
# 30	0.59	11.0	58.0	42.0
# 50	0.297	12.0	70.0	30.0
# 100	0.149	12.0	82.0	18.0
# 200	0.074	9.0	91.0	9.0
< # 200	(ASTM C - 117)	9.0	100.0	0.0

A partir de los datos obtenidos de la tabla 3.2, se obtienen los valores para el cálculo de la superficie específica aparente, los cuales se presentan en la tabla 3.20.

Tabla 3.20

Porcentajes retenidos de acuerdo al tamiz

Valores	Descripción	%
A	Porcentaje retenido en las mallas N° 3/8" y N° 4	20
B	Porcentaje retenido en las mallas N° 4 y N° 50	60
C	Porcentaje retenido en las mallas N° 50 y N° 200	21
D	Porcentaje que pasa la malla N° 200	9

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

$$SE = \frac{0.342 * 20 + 1.92 * 60 + 15.33 * 21 + 118 * 9}{100}$$

$$SE = 15\%$$

Debido a las propiedades del agregado caracterizado se utilizará la curva G y con el resultado de la superficie específica aparente se determinará el contenido teórico del asfalto residual, utilizando el gráfico de la figura 3.16.

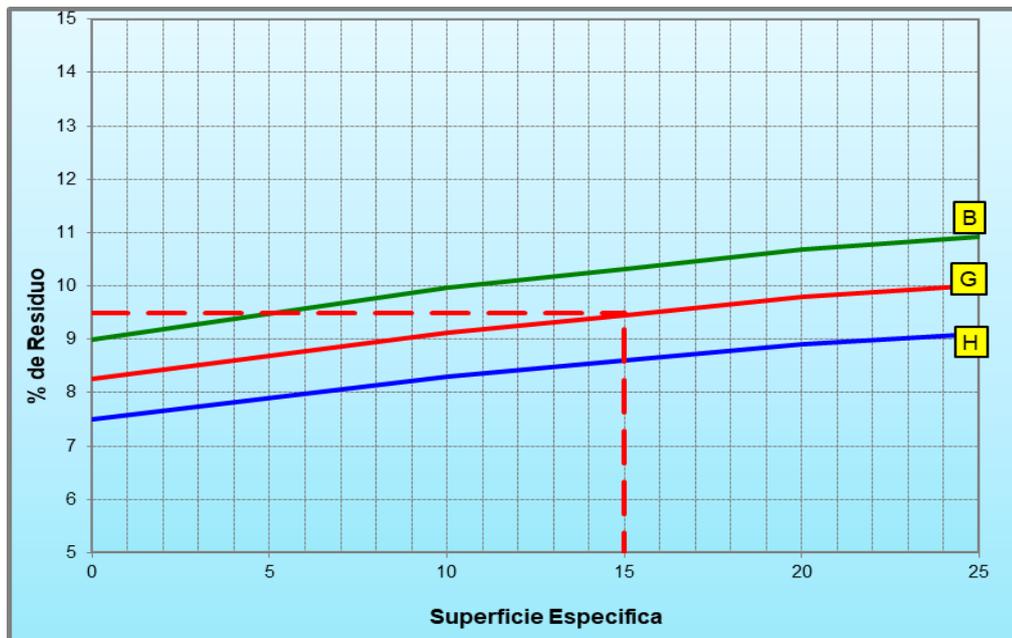


Figura 3.16: *Cálculo del contenido teórico de asfalto residual*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Del gráfico de la figura 3.16 el contenido teórico del asfalto residual es:

% teórico de asfalto residual: 9.5%

El valor del contenido teórico de emulsión asfáltica utilizando la expresión 3.2 es:

$$\% \text{ teorico de emulsion} = \frac{9.5\% * 100}{61\%} = 15.57\% = 15.6\%$$

3.3.2.2. CONTENIDO DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGUA

Según (Huanca, 2013), para determinar el contenido óptimo de agua que permita obtener una consistencia adecuada a la mezcla, existen una serie de métodos entre los cuales el más utilizado es el método desarrollado por el departamento de transportes de Kansas, conocido comúnmente como el “Cono de Prueba”, el cual es reconocido internacionalmente como un método estándar en la industria de los morteros asfálticos.

3.3.2.2.1. ENSAYO DE CONSISTENCIA (ISSA TB – 106)

El ensayo de consistencia se usa para determinar la cantidad de agua necesaria y así formar una mezcla estable y trabajable, este ensayo establecido por la guía A – 105 de la ISSA se apoya en el método del cono de prueba, el cual se describe a continuación.

- **Procedimiento de ensayo**

- La muestra es una mezcla que contiene 400 gramos de agregado, mezclados a temperatura de ambiente, con el contenido teórico de emulsión y con diferentes porcentajes de agua.
- Se realiza las mezclas necesarias, cada muestra debe ser mezclada durante 30 segundos.
- Se centra el cono en la escala de flujo y una vez mezclado bien durante los 30 segundos, se llena, sin apretar; posterior a ello se sacude inmediatamente y se procede a retirar el cono con un movimiento suave y vertical.

- La salida de la mezcla se mide en 4 puntos de separación de 90°, se procede a registrar el promedio de las 4 lecturas en cm. y la cantidad de agua agregada a la mezcla.
- Se considera una adecuada consistencia al flujo radial de 2.5 cm, con límites de 2.0 y 3.0 cm de acuerdo a la ISSA TB – 106.

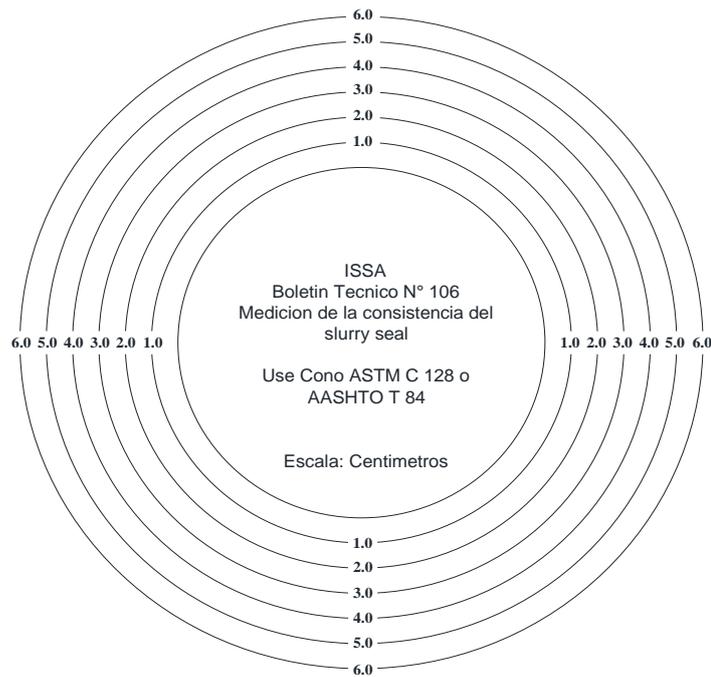


Figura 3.17: Formato de la medición de la consistencia del slurry seal

Fuente: ISSA TB – 106



Figura 3.18: Representación del ensayo de consistencia

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.3.2.2.1.1 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGUA

En la tabla 3.21 se presenta la dosificación de las muestras preparadas y ensayadas, el porcentaje de emulsión es el obtenido teóricamente 15.6%, la cantidad de filler que se adicionó a las 03 muestras fue de 1%, generalmente este valor es utilizado para el diseño inicial del slurry seal.

Tabla 3.21

Dosificación de las muestras preparadas y ensayadas

Insumos	Porcentaje	Cantidad en peso (gr)		
Emulsión	15.60%	62.4	62.4	62.4
Agregados	100%	400	400	400
Filler	1%	4	4	4
Agua	(En peso)	28	36	44
	(En %)	7	9	11

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 3.22 se presenta las lecturas de las muestras preparadas y ensayadas, ello usando el cono de prueba.

Tabla 3.22

Resultados del ensayo del cono de prueba ISSA TB - 106

Contenido de Agua	Resultado (cm)
7%	1.9
9%	2.6
11%	3.4

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



De los resultados obtenidos presentados en la tabla 3.22, el valor más cercano a la especificación establecida por la ISSA TB – 106 es el valor de 2.6 cm. Por tanto, el porcentaje óptimo de agua con el cual se realizará los diseños es:

$$\% \text{ agua} = 9\%$$

3.3.2.3. COMPATIBILIDAD DE LOS COMPONENTES DEL SLURRY SEAL

Con los porcentajes calculados tanto de emulsión asfáltica y del agua se procederá a fabricar muestras de mortero asfáltico, las cuales se someterán al ensayo de tiempo de mezcla para así verificar la compatibilidad de los componentes del mortero asfáltico.

3.3.2.3.1. TIEMPO DE MEZCLA (ISSA TB – 113)

Para (Huanca, 2013), esta prueba es el primer paso en el diseño de mezclas de slurry seal, se elaboran pequeñas mezclas de 100 a 200 gramos en taras que se tengan disponibles, la mezcla en la tara también es útil para entrenar a los operadores y técnicos en familiarizarse con la apariencia visual y las propiedades mecánicas de la mezcla.

Según (Jimenez, Ulloa, & Molina, 2010), en su investigación indican: El proceso que se sigue para llevar a cabo el ensayo, consiste en mezclar el agregado combinado, para luego añadir agua y ambos elementos se mezclan por 20 segundos, se tiene que observar que la distribución sea uniforme, después se añade la emulsión asfáltica y se mezcla vigorosamente por 30 segundos hasta que la mezcla este homogénea. Durante este proceso se debe observar la mezcla con el objetivo de identificar si existe líquidos libres, o por el contrario la mezcla esta excesivamente seca y rígida.

Luego del mezclado inicial, se toma la mitad de la muestra (100 gramos) y se moldea sobre un papel absorbente, a estas muestras hay que presionarlas periódicamente con el dedo índice, y se registra el tiempo cuando el sello toma forma y no se aprecia un desplazamiento bajo la acción de presión con el dedo índice.

La especificación de esta norma ISSA TB – 113 se muestra en la tabla 3.23.

Tabla 3.23

Especificación ISSA TB - 113

Ensayo	Especificación
Tiempo de mezcla	Mínimo 180 seg.

Fuente: ISSA – 105



Figura 3.19: *Ensayo de tiempo de mezclado, slurry seal tipo II*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Figura 3.20: *Mezclado de los componentes, slurry seal tipo II*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.3.2.3.1.1 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE MEZCLADO

La dosificación con la cual se fabricó el espécimen, es el que se muestra en la tabla

3.24.

Tabla 3.24

Dosificación de la muestra ensayada

Material	Dosificación	Cantidad en Peso (gr.)
Emulsión	15.60%	31.2
Agregado	100%	200
Filler	1%	2
Agua	9%	18

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

El resultado del ensayo tiempo de mezclado se expresa en segundos (seg.), al ser un ensayo por observación no se necesitan realizar cálculos.

El resultado obtenido del ensayo se muestra en la tabla 3.25

Tabla 3.25

Resultado del tiempo de mezclado

Ensayo	Especificación	Resultado
Tiempo de mezcla	Mínimo 180 seg.	250 seg.

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.3.2.4. PRUEBAS DE DESEMPEÑO

Las pruebas de desempeño: Ensayo de abrasión en húmedo y rueda cargada conocidas comúnmente por las siglas W.T.A.T y L.W.T, son los ensayos mecánicos a los cuales son sometidos los especímenes fabricados (a diferentes tasas de emulsión) del

mortero asfáltico, teniendo como objetivo principal evaluar el comportamiento del mortero y a partir de ello obtener el óptimo contenido de emulsión asfáltica.

Para la presente investigación se realizaron tres diseños con tasas de emulsión asfáltica de 0.5%, 1% y 2%, ello con el objetivo principal de evaluar su influencia en el diseño del mortero asfáltico slurry seal.

La cantidad de emulsión asfáltica para los diseños preliminares se varió en tasas de: 11.6%, 13.6%, 15.6% y 17.6% ello de acuerdo al (EG, 2013), con el fin de determinar la cantidad óptima de cada diseño.

3.3.2.4.1. ENSAYO DE ABRASIÓN EN HÚMEDO W.T.A.T (ISSA TB – 100)

Según (Ramirez, 2017), este ensayo determina la resistencia al desgaste por abrasión, simulando una superficie de pavimento saturada por agua expuesta al tránsito vehicular. Mediante esta prueba se define el valor mínimo de emulsión asfáltica, necesario para obtener una mezcla con suficiente cohesión como para resistir la acción abrasiva del tráfico.

Consiste en someter una mezcla de mortero asfáltico sumergida en agua, a la acción abrasiva de un cilindro de goma, que gira sobre la superficie durante 5 minutos. Después de someter los especímenes al ensayo de abrasión en húmedo W.T.A.T, el resultado final del ensayo según la norma ISSA TB – 100 se obtendrá mediante la siguiente expresión.

$$PA = (P_1 - P_2) * 32.9 \dots \dots (3.3)$$

Donde:

PA: Perdida por abrasión (gr/m²).

P₁: Peso de la probeta seca antes de someterla a la abrasión.

P₂: Peso de la probeta seca después de someterla a la abrasión.



- **Procedimiento de ejecución del ensayo**

- Dividir o cuartear la cantidad suficiente de agregado seco al aire y pasar por el tamiz N° 04, para obtener al menor 800 gramos en una cuarta parte.
- Pesar los 800 gramos de agregado en un tazón. Con una cuchara se debe mezclar el cemento con el agregado durante un minuto hasta que se tenga una mezcla homogénea, posteriormente se agrega agua y se debe mezclar la mezcla durante un minuto, hasta que se tenga una mezcla homogénea y por último se agrega la cantidad predeterminada de emulsión por un periodo de un minuto y no mayor de tres minutos.
- Luego se centrará la apertura del molde en el disco de 286 mm. de diámetro en el cartón asfáltico, inmediatamente vierta la mezcla en el molde.
- Con la escobilla de goma o regla, se debe nivelar con el mínimo de manipulación y se tiene que desechar el material sobrante, posteriormente se retira el molde y se coloca la probeta moldeada en el horno a una temperatura de 60°C, ello durante un periodo de 15 horas.
- Luego se saca la muestra del horno y se deja enfriar a temperatura de ambiente y posteriormente se pesa la muestra.
- Después de pesar, se coloca la muestra en agua a 25°C durante un periodo de 60 a 75 minutos. Posteriormente se saca la muestra y se coloca en la bandeja de 330 mm de diámetro de fondo plano, se sujeta a la placa de montaje y se ajusta con las abrazaderas. Se debe

cubrir completamente la muestra con 6 mm de agua a 25°C, para así fijar la cabeza de tubo de caucho en el eje de la máquina, deberá elevarse la plataforma hasta que el tubo se apoye en la superficie de la muestra.

- Posteriormente se enciende la maquina a velocidad baja durante 5 minutos, una vez ensayada la probeta, se debe retirar la bandeja y se procede a lavar los residuos, para después colocar la probeta lavada en el horno a 60°C.
- Finalmente se retira del horno la probeta y se pesa. La diferencia de los 2 pesos (antes de ensayar y después de ensayar) es la perdida por desgaste.

La especificación según la ISSA TB – 100 de este ensayo se muestra en la tabla 3.26

Tabla 3.26

Especificación del ensayo de abrasión en húmedo

Ensayo	Método	Especificación
W.T.A.T	ISSA TB - 100	Max. 807 gr/m ²

Fuente: ISSA – A105



Figura 3.21: *Equipo para el ensayo de abrasión en húmedo*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.3.2.4.1.1 RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN EN HÚMEDO DE LAS MUESTRAS CON 0.5% DE FILLER

En la tabla 3.27 se muestra las dosificaciones de las muestras fabricadas con un porcentaje de filler de 0.5% y que fueron ensayadas en el equipo de abrasión en húmedo W.T.A.T.

Tabla 3.27

Dosificación de las muestras en el ensayo W.T.A.T, filler 0.5%

Material	M - 01		M - 02		M - 03		M - 04	
	%	gr.	%	gr.	%	gr.	%	gr.
Emulsión	11.6	92.8	13.6	108.8	15.6	124.8	17.6	140.8
Agregado	100	800	100	800	100	800	100	800
Filler	0.5	4	0.5	4	0.5	4	0.5	4
Agua	9	72	9	72	9	72	9	72

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En las tablas 3.28 y 3.29, se muestran los datos obtenidos del ensayo realizado y el cálculo del valor de pérdida por abrasión respectivamente.

Tabla 3.28

Datos obtenidos del ensayo W.T.A.T, filler 0.5%

Peso seco (gr)	M - 01	M - 02	M - 03	M - 04
P 1	560.12	564.77	572.47	584.48
P 2	533.52	544.67	558.37	574.68
P1 - P2	26.60	20.10	14.10	9.80

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla 3.29

Valores del cálculo del ensayo W.T.A.T, filler 0.5%

M - 01	M - 02	M - 03	M - 04
875.1	661.3	463.9	322.4

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 3.30 se presenta los resultados finales del ensayo W.T.A.T, con los cuales se realizó el grafico de la figura 3.22.

Tabla 3.30

Resultados del ensayo W.T.A.T, filler 0.5 %

N° Muestra	Asfalto (%)	Emulsión (%)	Resultado (gr/m2)
M - 01	7.1	11.6	875.1
M - 02	8.3	13.6	661.3
M - 03	9.5	15.6	463.9
M - 04	10.7	17.6	322.4

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

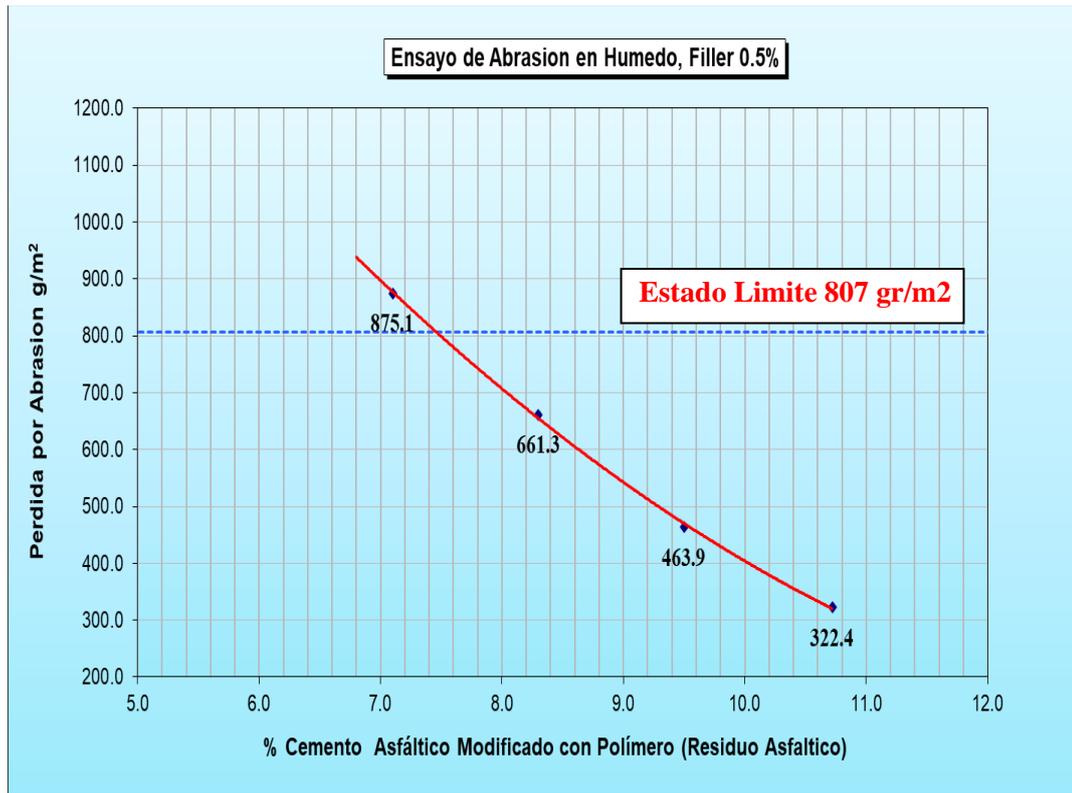


Figura 3.22: Gráfico de tendencia del ensayo W.T.A.T, filler 0.5%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En el gráfico de la figura 3.22 se observa que el resultado de la mezcla fabricada y ensayada con un porcentaje de emulsión de 11.6% (7.1% de residuo asfáltico) se encuentra por encima del límite superior establecido, siendo esta dosificación desestimada para el diseño del slurry seal; sin embargo los resultados de las muestras fabricadas con los porcentajes de emulsión de 13.6%, 15.6% y 17.6% (8.3%, 9.5% y 10.7% de residuo asfáltico) se encuentran por debajo del límite superior, por tanto, no se tendría problemas de abrasión, si se llegara a utilizar estos valores en el diseño final.

3.3.2.4.1.2 RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN EN HÚMEDO DE LAS MUESTRAS CON 1.0 % DE FILLER

En la tabla 3.31 se muestra las dosificaciones de las muestras fabricadas con un porcentaje de filler de 1.0% y que posteriormente fueron ensayadas en el equipo de abrasión en húmedo W.T.A.T.

Tabla 3.31*Dosificación de las muestras en el ensayo W.T.A.T, filler 1.0%*

Material	M - 01		M - 02		M - 03		M - 04	
	%	gr.	%	gr.	%	gr.	%	gr.
Emulsión	11.6	92.8	13.6	108.8	15.6	124.8	17.6	140.8
Agregado	100	800	100	800	100	800	100	800
Filler	1	8	1	8	1	8	1	8
Agua	9	72	9	72	9	72	9	72

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En las tablas 3.32 y 3.33, se muestran los datos obtenidos del ensayo realizado y el cálculo del valor de pérdida por abrasión respectivamente.

Tabla 3.32*Datos obtenidos del ensayo W.T.A.T, filler 1.0%*

Peso seco (gr)	M - 01	M - 02	M - 03	M - 04
P 1	558.48	552.44	561.89	572.16
P 2	536.38	537.24	548.99	563.66
P1 - P2	22.10	15.20	12.90	8.50

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo**Tabla 3.33***Valores del cálculo del ensayo W.T.A.T, filler 1.0%*

M - 01	M - 02	M - 03	M - 04
727.1	500.1	424.4	279.7

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 3.34 se presenta los resultados finales del ensayo W.T.A.T, con los cuales se realizó el gráfico de la figura 3.23

Tabla 3.34

Resultados del ensayo W.T.A.T, filler 1.0 %

N° Muestra	Asfalto (%)	Emulsión (%)	Resultado (gr/m ²)
M - 01	7.1	11.6	727.1
M - 02	8.3	13.6	500.1
M - 03	9.5	15.6	424.4
M - 04	10.7	17.6	279.7

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

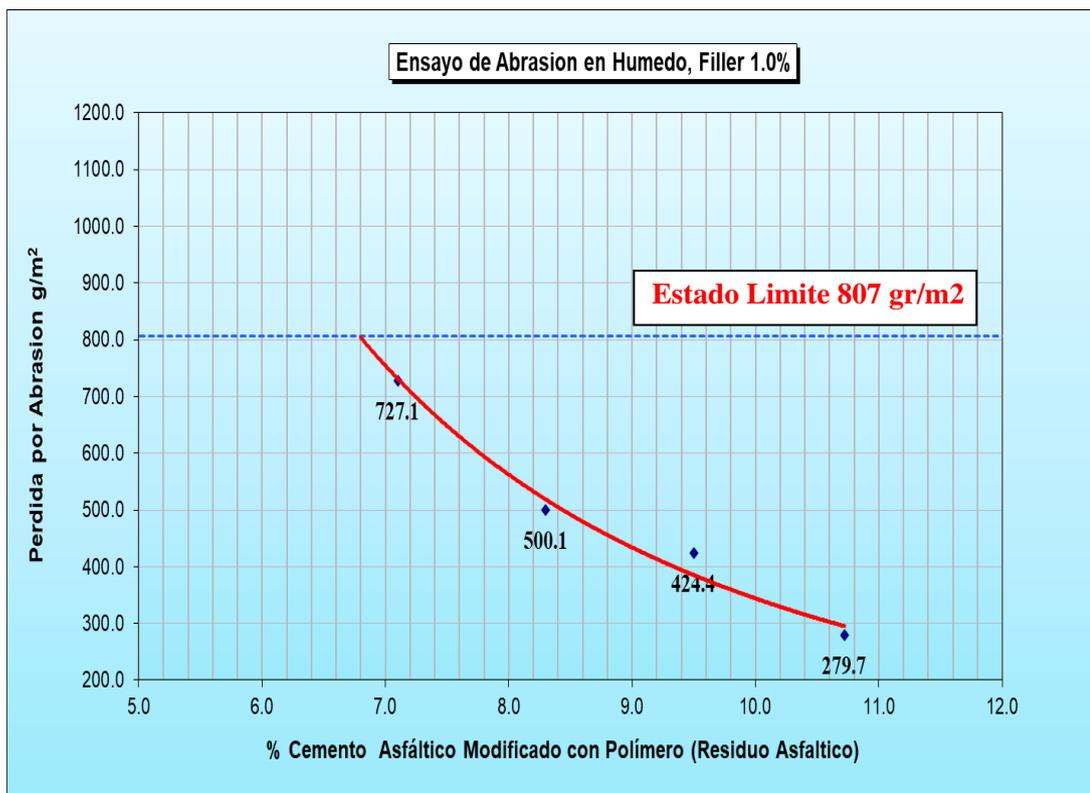


Figura 3.23: Gráfico de tendencia del ensayo W.T.A.T, filler 1.0 %

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

El gráfico de la figura 3.23 nos muestra que los valores de pérdida por abrasión están por debajo del límite máximo establecido por la normativa de la ISSA TB – 100. Lo cual nos da a entender que no se tendrá problemas de abrasión, si se llegara a utilizar cualquiera de los porcentajes de emulsión asfáltica 11.6%, 13.6%, 15.6% y 17.6% (7.1%, 8.3%, 9.5% y 10.7% de residuo asfáltico).

3.3.2.4.1.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN EN HÚMEDO DE LAS MUESTRAS CON 2.0 % DE FILLER

En la tabla 3.35 se muestra las dosificaciones de las muestras fabricadas con un porcentaje de filler de 2.0% y que posteriormente fueron ensayadas en el equipo de abrasión en húmedo W.T.A.T.

Tabla 3.35

Dosificación de las muestras en el ensayo W.T.A.T, filler 2.0%

Material	M - 01		M - 02		M - 03		M - 04	
	%	gr.	%	gr.	%	gr.	%	gr.
Emulsión	11.6	92.8	13.6	108.8	15.6	124.8	17.6	140.8
Agregado	100	800	100	800	100	800	100	800
Filler	2	16	2	16	2	16	2	16
Agua	9	72	9	72	9	72	9	72

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En las tablas 3.36 y 3.37, se muestran los datos obtenidos del ensayo realizado y el cálculo del valor de pérdida por abrasión respectivamente.

Tabla 3.36*Datos obtenidos del ensayo W.T.A.T, filler 2.0%*

Peso seco (gr)	M - 01	M - 02	M - 03	M - 04
P 1	597.54	584.69	573.14	562.11
P 2	578.94	571.79	563.24	555.61
P1 - P2	18.60	12.90	9.90	6.50

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo**Tabla 3.37***Valores del cálculo del ensayo W.T.A.T, filler 2.0%*

M - 01	M - 02	M - 03	M - 04
611.9	424.4	325.7	213.9

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 3.38 se presenta los resultados finales del ensayo W.T.A.T, con los cuales se realizó el gráfico de la figura 3.24

Tabla 3.38*Resultados del ensayo W.T.A.T, filler 2.0 %*

N° Muestra	Asfalto (%)	Emulsión (%)	Resultado
M - 01	7.1	11.6	611.9
M - 02	8.3	13.6	424.4
M - 03	9.5	15.6	325.7
M - 04	10.7	17.6	213.9

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

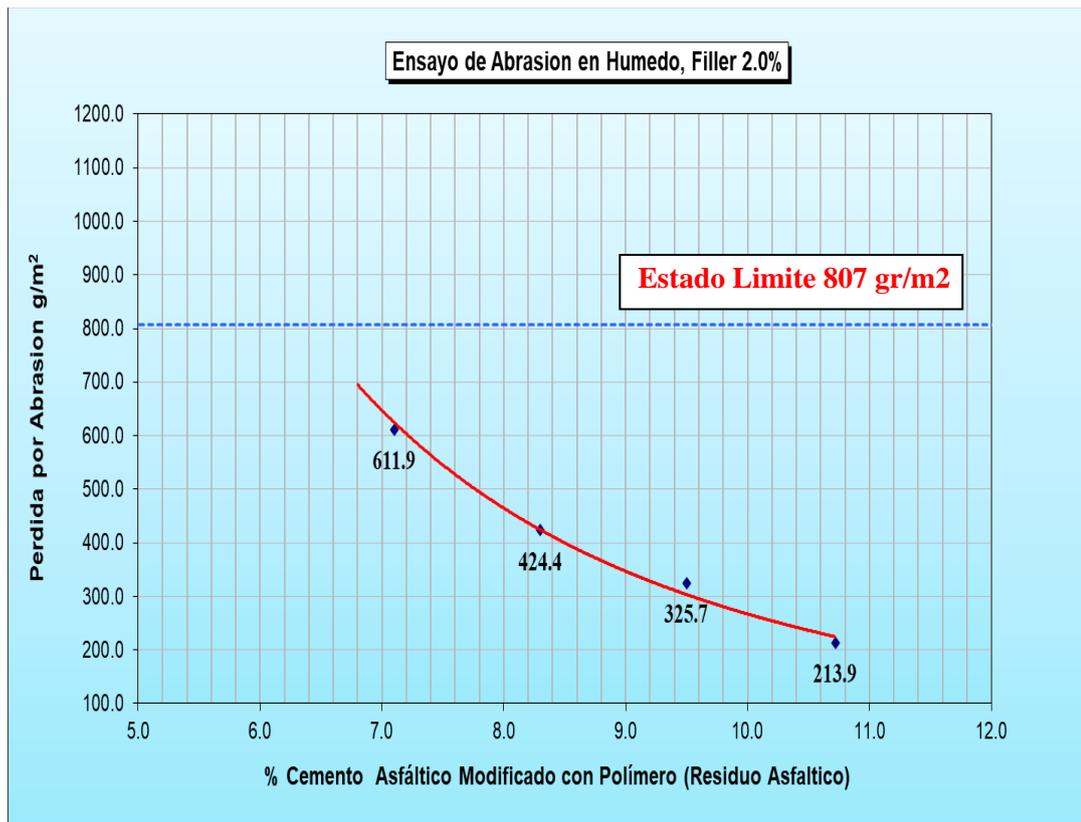


Figura 3.24: Gráfico de tendencia del ensayo W.T.A.T, filler 2.0 %

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

El gráfico de la figura 3.24 nos muestra que los valores de pérdida por abrasión están por debajo del límite máximo establecido por la normativa de la ISSA TB – 100. Lo cual nos da a entender que no se tendrá problemas de abrasión, si se llegara a utilizar cualquiera de los porcentajes de emulsión asfáltica 11.6%, 13.6%, 15.6% y 17.6% (7.1%, 8.3%, 9.5% y 10.7% de residuo asfáltico).

3.3.2.4.2. ENSAYO DE RUEDA CARGADA L.W.T (ISSA TB – 109)

Según (Huanca, 2013), este ensayo determina la resistencia a la exudación del asfalto, simulando una superficie de pavimento expuesto al tránsito vehicular. Mediante esta prueba se define el valor máximo de emulsión asfáltica, necesario para obtener una mezcla con suficiente cohesión, como para evitar exudación bajo cargas de tránsito.



Para (Ramirez, 2017), este ensayo determina el contenido máximo de asfalto en mezclas para morteros asfálticos y micropavimentos por la medición de la adhesión de arena en especímenes sujetos a la simulación de cargas pesadas bajo la acción de una rueda, además de medir desplazamientos laterales por el mismo efecto.

(Jimenez, Ulloa, & Molina, 2010) con respecto a este ensayo afirman: Este método de ensayo se utiliza para el diseño de mezcla del sello, y busca evitar que el asfalto se exude bajo la acción de las cargas de tránsito.

En resumen, este ensayo consiste en someter un espécimen rectangular de mortero asfáltico a una carga de 125 libras, ello mediante una rueda de caucho hasta cumplir 1000 ciclos, para luego colocar arena de otawa en la muestra y completar 100 ciclos adicionales.

Después de someter los especímenes al ensayo de rueda cargada L.W.T, el resultado final del ensayo según la norma ISSA TB – 109 se obtendrá mediante la siguiente expresión.

$$AA = (P_1 - P_2)/A \dots \dots (3.4)$$

Donde:

AA: Arena adherida gr/m².

P₁: Peso de la probeta seca sin arena.

P₂: Peso de la probeta seca con arena.

A: Área del molde

El molde utilizado tiene las siguientes dimensiones: A = 14”x1.5” = 0.01354836 m²



- **Procedimiento de ejecución del ensayo**

- Preparar un 25 – 30% más de mezcla necesaria para llenar el molde de la mezcla (generalmente 300 gramos de mezcla son necesarios para llenar el molde de ¼”).
- Se deberá realizar la mezcla pesando y añadiendo cuidadosamente los materiales de slurry seal, durante un periodo de 45 segundos.
- Posteriormente se colocará la mezcla a lo largo del molde previamente centrado en la placa metálica. Usando un movimiento de vaivén horizontal se nivela con la barra, cuando la muestra se ha fijado lo suficiente como para evitar desplazamiento, se desmolda. Luego se procede a secar la probeta durante un mínimo de 12 horas en el horno a una temperatura de 60°C. Luego se extrae la probeta del horno y se deja enfriar a temperatura ambiente.
- Una vez realizado los procedimientos anteriores, la probeta se monta con la placa de montaje firmemente ajustada contra los pines de fijación y se fija en posición con las arandelas de agarre y las tuercas. Posterior a ello se limpia la rueda con un solvente evaporable y agua. La rueda se deberá colocar sobre la probeta y así mismo se carga con el peso de 125 libras.
- Después se deberá llevar a cero el contador de revoluciones y se enciende la maquina hasta que se complete 1000 ciclos, se recomienda agregar agua cuando se note una pegajosidad o un brillo, ello para evitar la adherencia de la prueba a la rueda.
- Posteriormente se descarga la maquina y se procede a lavar la muestra y secar a 60°C hasta un peso constante. Se deberá proceder

a pesar y nuevamente se lo coloca en la maquina usando un marco superior con la parte de la goma hacia la probeta, en donde es llenado con 300 gramos de arena de otawa caliente a 82°C.

- Se deberá cargar nuevamente a la maquina y se completa 100 ciclos más. Finalmente se descarga y se limpia la arena suelta y posteriormente se pesa, ello para poder calcular la cantidad de arena adherida.

La especificación según la ISSA TB – 109 de este ensayo se muestra en la tabla 3.39.

Tabla 3.39

Especificación del ensayo de rueda cargada

Ensayo	Método	Especificación
L.W.T	ISSA TB - 109	Máximo 538 gr/m ²

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Figura 3.25: *Equipo para el ensayo de rueda cargada*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.3.2.4.2.1 RESULTADOS DEL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE LAS MUESTRAS CON FILLER DE 0.5 %

En la tabla 3.40 se muestra las dosificaciones de las muestras fabricadas con un porcentaje de filler de 0.5% y que posteriormente fueron ensayadas en el equipo de rueda cargada L.W.T.

Tabla 3.40*Dosificación de las muestras en el ensayo L.W.T, filler 0.5%*

Material	M - 01		M - 02		M - 03		M - 04	
	%	gr.	%	gr.	%	gr.	%	gr.
Emulsión	11.6	46.4	13.6	54.4	15.6	62.4	17.6	70.4
Agregado	100	400	100	400	100	400	100	400
Filler	0.5	2	0.5	2	0.5	2	0.5	2
Agua	9	36	9	36	9	36	9	36

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En las tablas 3.41 y 3.42, se muestran los datos obtenidos del ensayo realizado y el cálculo del valor de arena de otawa adherida a los especímenes ensayados (utilizando la expresión 3.4).

Tabla 3.41*Datos obtenidos del ensayo L.W.T, filler 0.5%*

Peso seco (gr)	M - 01	M - 02	M - 03	M - 04
P 1	381.36	378.15	372.87	381.24
P 2	377.84	374.04	367.94	374.85
AA = P1 - P2	3.52	4.11	4.93	6.39

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo**Tabla 3.42***Valores del cálculo del ensayo L.W.T, filler 0.5%*

M - 01	M - 02	M - 03	M - 04
259.70	303.00	363.60	471.90

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 3.43 se presenta los resultados finales del ensayo L.W.T, con los cuales se realizó el gráfico de la figura 3.26.

Tabla 3.43

Resultados del ensayo L.W.T, filler 0.5 %

N° Muestra	Asfalto (%)	Emulsión (%)	Resultado (gr/m ²)
M - 01	7.1	11.6	259.7
M - 02	8.3	13.6	303.0
M - 03	9.5	15.6	363.6
M - 04	10.7	17.6	471.9

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

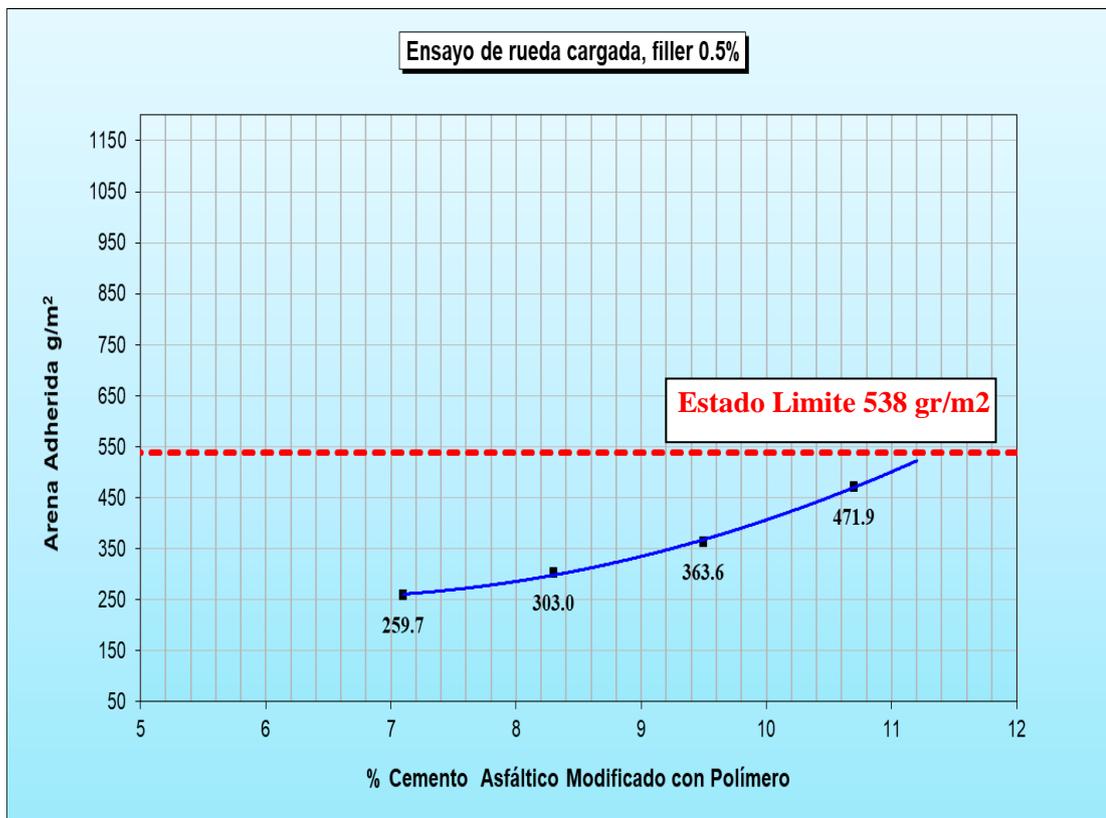


Figura 3.26: Gráfico de tendencia del ensayo L.W.T, filler 0.5 %

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

El gráfico de la figura 3.26, nos indica que los resultados de las muestras ensayadas con los porcentajes de emulsión asfáltica 11.6%, 13.6%, 15.6% y 17.6% (7.1%, 8.3%, 9.5% y 10.7% de residuo asfáltico) se encuentran por debajo del límite máximo establecido por la norma ISSA TB – 109, en tal sentido no se tendrá problemas de exudación si se llegase a utilizar cualquiera de estos porcentajes en el diseño final del slurry seal.

3.3.2.4.2 RESULTADOS DEL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE LAS MUESTRAS CON FILLER DE 1.0%

En la tabla 3.44 se muestra las dosificaciones de las muestras fabricadas con un porcentaje de filler de 1.0% y que posteriormente fueron ensayadas en el equipo de rueda cargada L.W.T.

Tabla 3.44

Dosificación de las muestras en el ensayo L.W.T, filler 1.0%

Material	M - 01		M - 02		M - 03		M - 04	
	%	gr.	%	gr.	%	gr.	%	gr.
Emulsión	11.6	46.4	13.6	54.4	15.6	62.4	17.6	70.4
Agregado	100	400	100	400	100	400	100	400
Filler	1	4	1	4	1	4	1	4
Agua	9	36	9	36	9	36	9	36

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En las tablas 3.45 y 3.46, se muestran los datos obtenidos del ensayo realizado y el cálculo del valor de arena de otawa adherida a los especímenes ensayados, para el cálculo se utilizó la expresión 3.4.

Tabla 3.45

Datos obtenidos del ensayo L.W.T, filler 1.0%

Peso seco (gr)	M - 01	M - 02	M - 03	M - 04
P 1	368.1	361.32	359.47	363.13
P 2	364.47	356.84	354.15	356.60
AA = P1 - P2	3.63	4.48	5.32	6.53

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla 3.46

Valores del cálculo del ensayo L.W.T, filler 1.0%

M - 01	M - 02	M - 03	M - 04
267.90	330.40	392.90	482.10

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 3.47 se presenta los resultados finales del ensayo L.W.T, con los cuales se realizó el gráfico de la figura 3.27.

Tabla 3.47

Resultados del ensayo L.W.T, filler 1.0 %

N° Muestra	Asfalto (%)	Emulsión (%)	Resultado (gr/m ²)
M - 01	7.1	11.6	267.9
M - 02	8.3	13.6	330.4
M - 03	9.5	15.6	392.9
M - 04	10.7	17.6	482.1

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

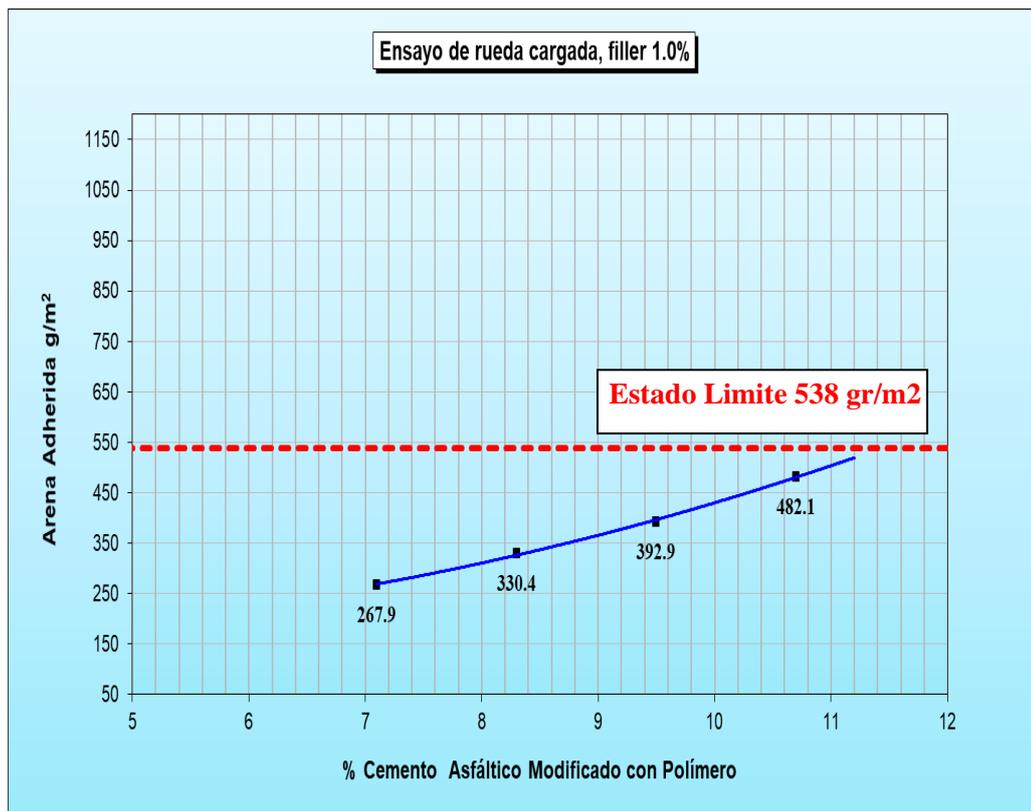


Figura 3.27: Gráfico de tendencia del ensayo L.W.T, filler 1.0 %

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

El gráfico de la figura 3.27, nos indica que los resultados de las muestras ensayadas con los porcentajes de emulsión asfáltica 11.6%, 13.6%, 15.6% y 17.6% (7.1%,

8.3%, 9.5% y 10.7% de residuo asfáltico) se encuentran por debajo del límite máximo establecido por la norma ISSA TB – 109, en tal sentido no se tendrá problemas de exudación si se llegase a utilizar cualquiera de estos porcentajes en el diseño final del slurry seal.

3.3.2.4.2.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE LAS MUESTRAS CON FILLER DE 2.0%

En la tabla 3.48 se muestra las dosificaciones de las muestras fabricadas con un porcentaje de filler de 2.0% y que posteriormente fueron ensayadas en el equipo de rueda cargada L.W.T.

Tabla 3.48

Dosificación de las muestras en el ensayo L.W.T, filler 2.0%

Material	M - 01		M - 02		M - 03		M - 04	
	%	gr.	%	gr.	%	gr.	%	gr.
Emulsión	11.6	46.4	13.6	54.4	15.6	62.4	17.6	70.4
Agregado	100	400	100	400	100	400	100	400
Filler	2	8	2	8	2	8	2	8
Agua	9	36	9	36	9	36	9	36

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En las tablas 3.49 y 3.50, se muestran los datos obtenidos del ensayo realizado y el cálculo del valor de arena de otawa adherida a los especímenes ensayados (utilizando la expresión 3.4).

Tabla 3.49*Datos obtenidos del ensayo L.W.T, filler 2.0%*

Peso seco (gr)	M - 01	M - 02	M - 03	M - 04
P 1	377.06	370.05	366.71	375.13
P 2	373.19	365.68	360.97	368.06
AA = P1 - P2	3.87	4.37	5.74	7.07

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo**Tabla 3.50***Valores del cálculo del ensayo L.W.T, filler 2.0%*

M - 01	M - 02	M - 03	M - 04
285.70	322.60	424.00	522.00

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 3.51 se presenta los resultados finales del ensayo L.W.T, con los cuales se realizó el gráfico de la figura 3.28.

Tabla 3.51*Resultados del ensayo L.W.T, filler 2.0 %*

Nº Muestra	Asfalto (%)	Emulsión (%)	Resultado (gr/m ²)
M - 01	7.1	11.6	285.7
M - 02	8.3	13.6	322.6
M - 03	9.5	15.6	424.0
M - 04	10.7	17.6	522.0

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

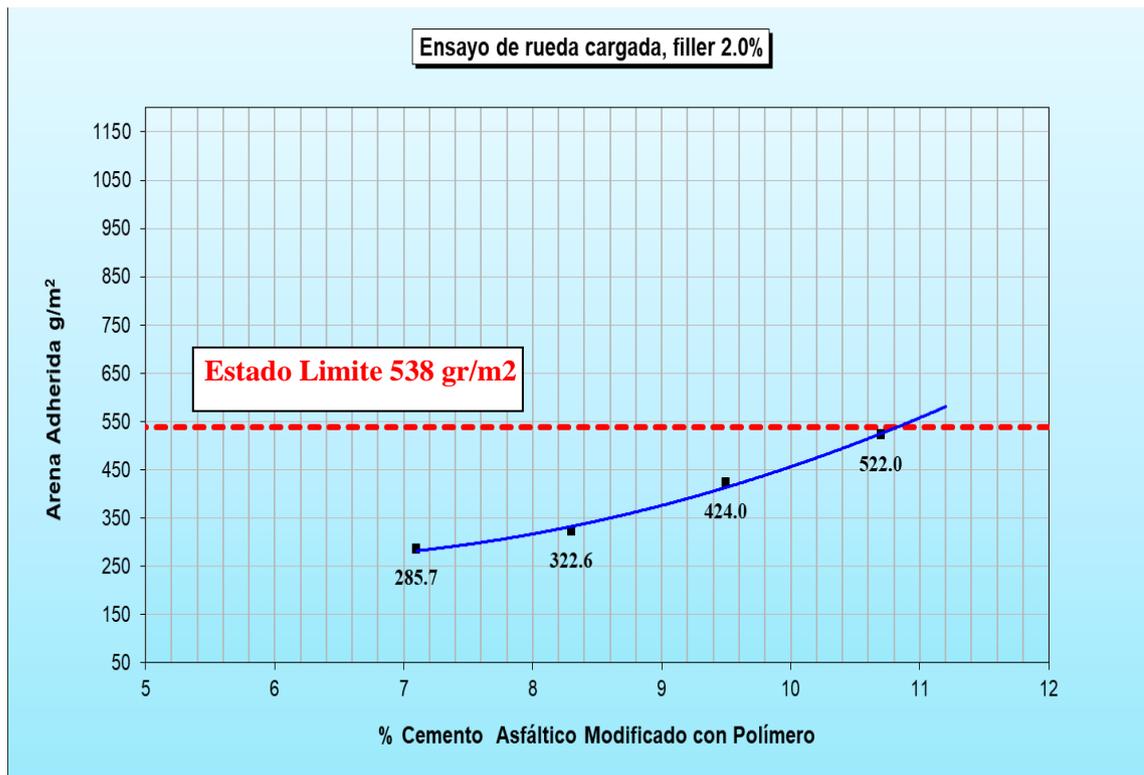


Figura 3.28: Gráfico de tendencia del ensayo L.W.T, filler 2.0 %

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

El gráfico de la figura 3.28, nos indica que los resultados de las muestras ensayadas con los porcentajes de emulsión asfáltica 11.6%, 13.6%, 15.6% y 17.6% (7.1%, 8.3%, 9.5% y 10.7% de residuo asfáltico) se encuentran por debajo del límite máximo establecido por la norma ISSA TB – 109, en tal sentido no se tendrá problemas de exudación si se llegase a utilizar cualquiera de estos porcentajes en el diseño final del slurry seal.

3.3.2.5. CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA

Con los datos obtenidos de los ensayos de abrasión en húmedo (W.T.A.T) y rueda cargada (L.W.T), en esta sección se procederá a determinar el contenido óptimo de emulsión asfáltica para los tres diseños en los cuales se está variando el contenido de filler 0.5%, 1.0% y 2.0%.

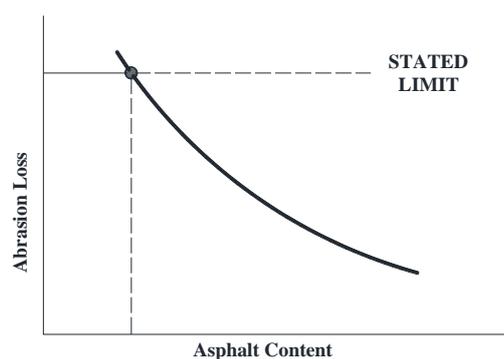
La determinación del contenido óptimo de emulsión asfáltica se determinará según la normativa de la ISSA TB – 111.

3.3.2.5.1. ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA (ISSA TB – 111)

La normativa ISSA TB – 111 para la determinación del contenido óptimo de emulsión asfáltica utiliza métodos gráficos, los mismos que se obtienen de los ensayos de desempeño, para lo cual recomienda las siguientes consideraciones.

- Determinación del límite mínimo de emulsión asfáltica (ISSA TB – 100) y límite máximo de emulsión asfáltica (ISSA TB – 109).
- Graficar los resultados de cada ensayo mencionado y superponer los límites establecidos.
- Determinar el contenido óptimo de emulsión asfáltica.

En el gráfico de la figura 3.29 se muestra la curva trazada con los valores del ensayo W.T.A.T, con la intersección entre esta curva y el límite máximo establecido por la normativa de la ISSA TB – 100 (807 gr/m^2) se obtiene el límite mínimo de emulsión asfáltica.

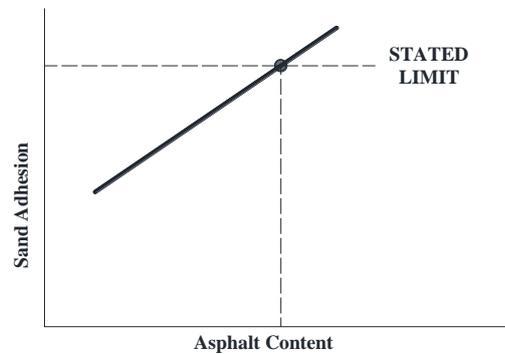


A. MINIMUM ASPHALT CONTENT by
WET TRACK ABRASION TEST

Figura 3.29: *Límite mínimo de emulsión asfáltica*

Fuente: ISSA TB – 111

El gráfico de la figura 3.30 muestra la curva trazada con los valores del ensayo L.W.T, la intersección entre esta curva y el límite máximo establecido por la normativa de la ISSA TB – 109 (538 gr/m²) proporciona el límite máximo de emulsión asfáltica.



B. MAXIMUM ASPHALT CONTENT by
LOADED WHEEL TEST

Figura 3.30: Límite máximo de emulsión asfáltica

Fuente: ISSA TB - 111

En el gráfico de la figura 3.31 los gráficos de las figuras 3.29 y 3.30 se superponen, y el contenido óptimo de emulsión asfáltica será el valor medio entre el límite mínimo y límite máximo de emulsión asfáltica, la variación de este valor según la ISSA será de +/- 1.5%.

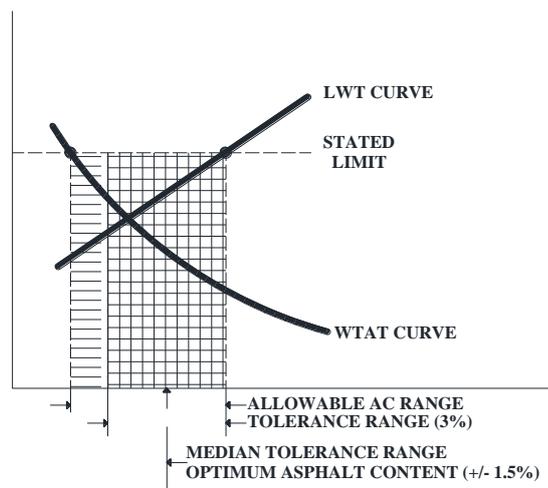


Figura 3.31: Determinación del contenido óptimo de emulsión asfáltica

Fuente: ISSA TB – 111

3.3.2.5.1.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA LAS MUESTRAS CON 0.5% DE FILLER

En la tabla 3.52 se muestra los valores de los ensayos de desempeño realizados: Abrasión en Húmedo (W.T.A.T) y Rueda Cargada (L.W.T); ello para las muestras moldeadas con 0.5% de filler, con los cuales se procederá a realizar el cálculo del contenido óptimo de emulsión asfáltica.

Tabla 3.52

Datos de los ensayos W.T.A.T y L.W.T, Filler 0.5%

Asfalto (%)	Emulsión (%)	W.T.A.T (gr/m ²)	L.W.T (gr/m ²)
7.1	11.6	875.1	259.7
8.3	13.6	661.3	303.0
9.5	15.6	463.9	363.6
10.7	17.6	322.4	471.9

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

La tabla 3.52 muestra los valores de los ensayos de desempeño realizados, ello para diferentes tasas de emulsión asfáltica (11.6%, 13.6%, 15.6% y 17.6%); a partir de estos datos se realizará la superposición de las curvas obtenidas de los ensayos W.T.A.T y L.W.T de acuerdo al gráfico de la figura 3.31, para así obtener los límites mínimo y máximo de emulsión asfáltica.

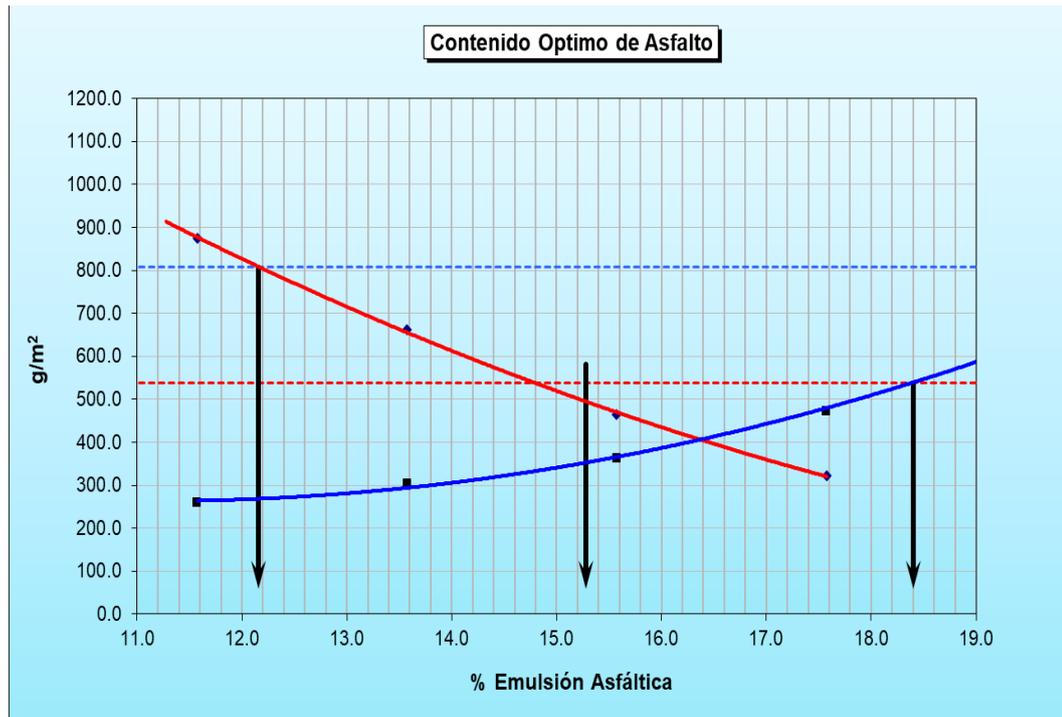


Figura 3.32: Gráfico para calcular el contenido óptimo de emulsión, filler 0.5%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

El gráfico de la figura 3.32 nos presenta la superposición de las curvas obtenidas en los ensayos de desempeño, del cual se obtiene el límite mínimo (12.16%) y máximo (18.4%) de emulsión asfáltica, con estos datos se procede a calcular el contenido óptimo de emulsión asfáltica usando el siguiente criterio:

$$\% \text{ óptimo de emulsión} = \frac{\text{Lim. maximo} - \text{Lim. minimo}}{2} + \text{Lim. minimo} \dots (3.5)$$

$$\% \text{ óptimo de emulsión} = \frac{18.4 - 12.16}{2} + 12.16 = 15.28\%$$

3.3.2.5.1.2 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA LAS MUESTRAS CON 1.0% DE FILLER

En la tabla 3.53 se muestra los valores de los ensayos de desempeño realizados: Abrasión en Húmedo (W.T.A.T) y Rueda Cargada (L.W.T); ello para las muestras

moldeadas con 1.0% de filler, con los cuales se procederá a realizar el cálculo del contenido óptimo de emulsión asfáltica.

Tabla 3.53

Datos de los ensayos W.T.A.T y L.W.T, Filler 1.0%

Asfalto (%)	Emulsión (%)	W.T.A.T (gr/m ²)	L.W.T (gr/m ²)
7.1	11.6	727.1	267.9
8.3	13.6	500.1	330.4
9.5	15.6	424.4	392.9
10.7	17.6	279.7	482.1

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

La tabla 3.53 muestra los valores de los ensayos de desempeño realizados, ello para diferentes tasas de emulsión asfáltica (11.6%, 13.6%, 15.6% y 17.6%); a partir de estos datos se realizará la superposición de las curvas obtenidas de los ensayos W.T.A.T y L.W.T de acuerdo al gráfico de la figura 3.31, para así obtener los límites mínimo y máximo de emulsión asfáltica.

Con respecto a la obtención del contenido óptimo de emulsión asfáltica, existe otro criterio el cual consiste en tomar el punto donde las curvas obtenidas de las muestras sometidas a los ensayos de abrasión en húmedo y rueda cargada se cruzan; la elección del criterio para la obtención del contenido óptimo dependerá del profesional a cargo.

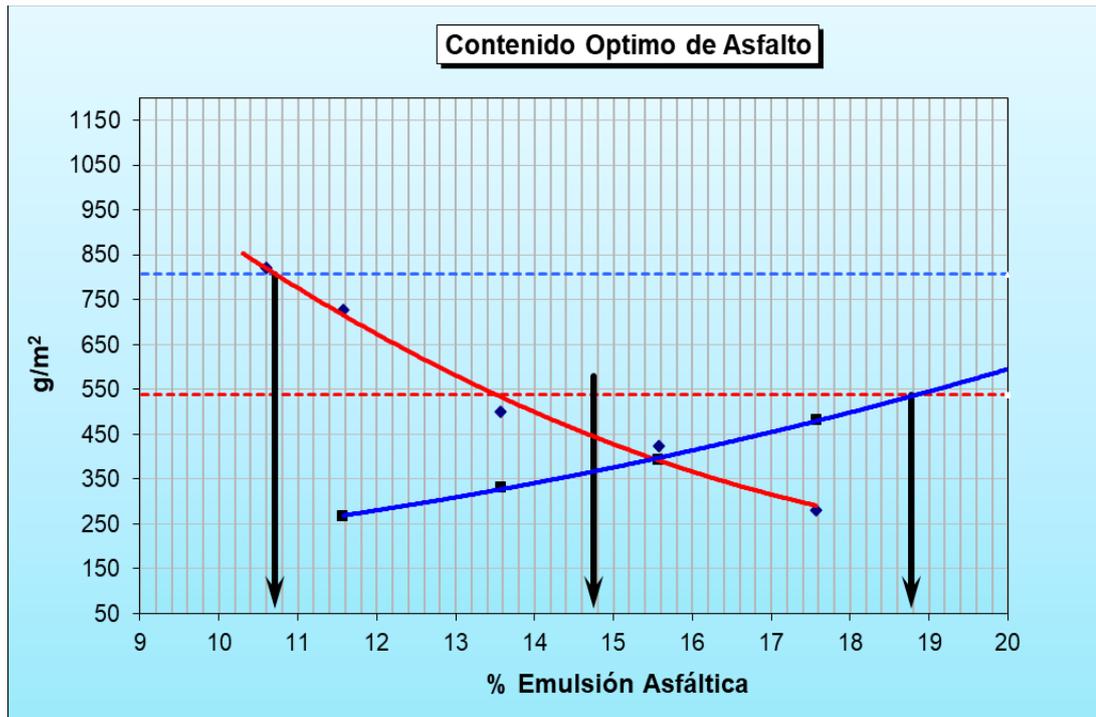


Figura 3.33: Gráfico para calcular el contenido óptimo de emulsión, filler 1.0%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

El gráfico de la figura 3.33 nos presenta la superposición de las curvas obtenidas en los ensayos de desempeño, del cual se obtiene el límite mínimo (10.71%) y máximo (18.78%) de emulsión asfáltica, con estos datos se procede a calcular el contenido óptimo de emulsión asfáltica usando la expresión 3.5.

$$\% \text{ óptimo de emulsión} = \frac{18.78 - 10.71}{2} + 10.71 = 14.75\%$$

3.3.2.5.1.3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA LAS MUESTRAS CON 2.0% DE FILLER

En la tabla 3.54 se muestra los valores de los ensayos de desempeño realizados: Abrasión en Húmedo (W.T.A.T) y Rueda Cargada (L.W.T); ello para las muestras moldeadas con 2.0% de filler, con los cuales se procederá a realizar el cálculo del contenido óptimo de emulsión asfáltica.

Tabla 3.54

Datos de los ensayos W.T.A.T y L.W.T, Filler 2.0%

Asfalto (%)	Emulsión (%)	W.T.A.T (gr/m ²)	L.W.T (gr/m ²)
7.1	11.6	611.9	285.7
8.3	13.6	424.4	322.6
9.5	15.6	325.7	424.0
10.7	17.6	213.9	522.0

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

La tabla 3.54 muestra los valores de los ensayos de desempeño realizados, ello para diferentes tasas de emulsión (11.6%, 13.6%, 15.6% y 17.6%); con estos datos se realizará la superposición de las curvas obtenidas de los ensayos W.T.A.T y L.W.T de acuerdo al gráfico de la figura 3.31.

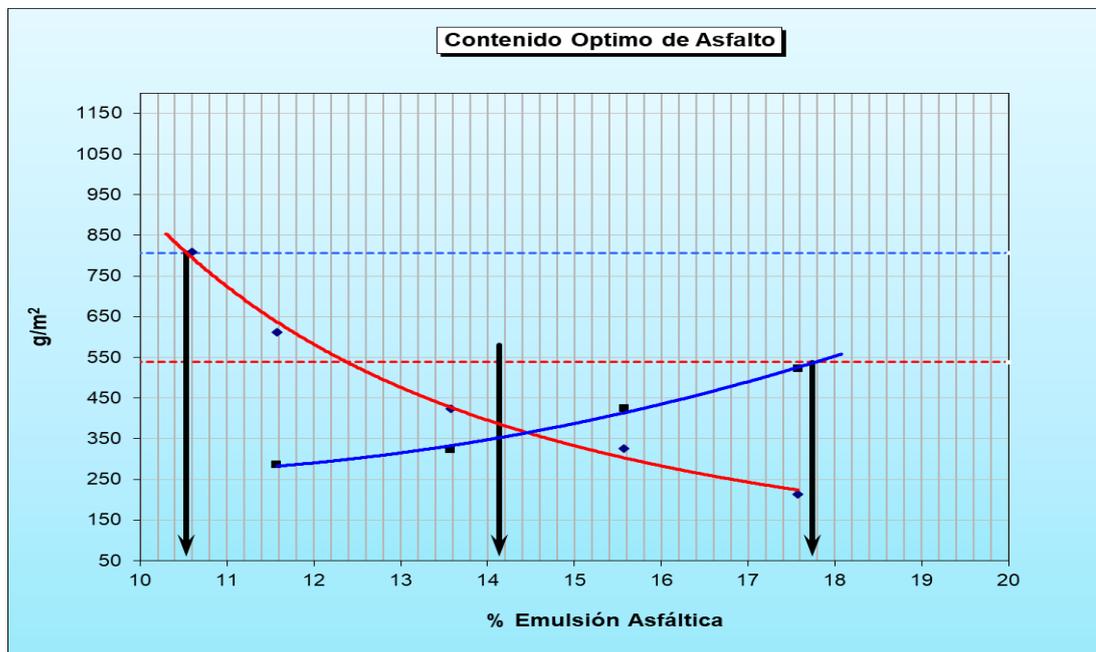


Figura 3.34: Gráfico para calcular el contenido óptimo de emulsión, filler 2.0%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

El gráfico de la figura 3.34 nos presenta la superposición de las curvas obtenidas en los ensayos de desempeño, del cual se obtiene el límite mínimo (10.53%) y máximo

(17.74%) de emulsión asfáltica, con estos datos se procede a calcular el contenido óptimo de emulsión asfáltica usando la expresión 3.5.

$$\% \text{ óptimo de emulsión} = \frac{17.74 - 10.53}{2} + 10.53 = \mathbf{14.13\%}$$

3.3.2.6. ENSAYO DE COHESIÓN (ISSA TB – 139)

Según (Ramirez, 2017), este ensayo nos muestra la evolución de la consistencia de la mezcla en función al tiempo de curado, nos permite determinar las características de rompimiento de la mezcla y grado de cohesión entre el agregado y la emulsión, así como los tiempos de apertura al tráfico dependiendo de las condiciones del clima en el área de aplicación. En resumen, clasifica el sistema en términos de cuan rápido la mezcla desarrolla una adecuada cohesión a fin de poder aperturar el tráfico.

Para (Huanca, 2013), este ensayo determina la cohesión, simulando una superficie de pavimento expuesto al tránsito vehicular. Mediante esta prueba se define el tiempo de rotura y el tiempo de apertura al tráfico, necesarios para evaluar en obra la apertura al tránsito vehicular. En el ensayo consiste en someter una mezcla de mortero asfáltico, a una presión de 200 kPa mediante un cilindro de compresión neumático y aplicar un torque.

Tanto (Huanca, 2013) y (Ramirez, 2017) en su investigación indican: El tiempo de rotura es el tiempo transcurrido desde la fabricación de la mezcla hasta que esta no pueda ser remezclada homogéneamente, este tiempo queda definido cuando se llega a un nivel de torque igual 12 kg.cm; el tiempo de apertura al tráfico, es el tiempo que va desde que la mezcla se extiende hasta permitir el tránsito de los vehículos, el tiempo queda definido cuando se llega a un nivel de torque igual a 20 kg.cm.

- **Procedimiento de ejecución del ensayo**

- Para las gradaciones de mortero asfáltico del tipo II y III se tamiza a través de los tamices de 4.75 mm y 8 mm respectivamente; mientras que la parte retenida se descarta. Para la preparación de las muestras a ser ensayadas se utiliza una cantidad de 200 gramos de agregado. Un número adecuado de muestras idénticas son mezclados y fundidos, moldes en los anillos de 6 mm para el tipo II y 10 mm para el tipo III.
- Las mediciones del torque se realizan en intervalos adecuados de tiempo, ello después de haber colocado la muestra en el molde. Posteriormente la probeta se centra en el pie de neopreno, instrumento de presión de aire a 200 kPa; y el pie se baja contra la muestra a una velocidad de 8 a 10 cm por segundo.
- Después de 5 a 6 segundos de la compactación, el medidor de torque se pone en cero y se coloca en la parte superior del cilindro de compresión neumática; se gira en un suave y firme movimiento horizontal de 90° a 120° dentro de 0.7 a 1.0 segundos.
- Finalmente, se lectura el torque junto con el tiempo.



Figura 3.35: *Equipo del ensayo de cohesión (cohesímetro)*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

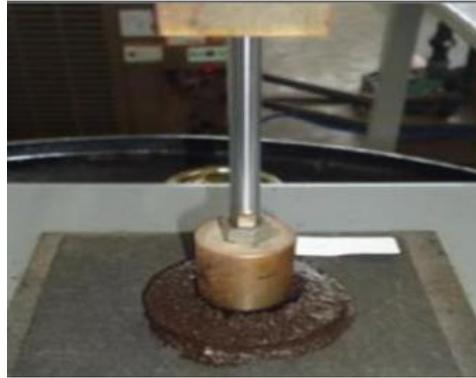


Figura 3.36: *Ejecución del ensayo de cohesión*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.3.2.6.1. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE APERTURA AL TRÁFICO PARA LAS MUESTRAS CON 0.5% DE FILLER

En la tabla 3.55 se muestra la dosificación de los componentes del mortero asfáltico, con el cual se fabricó las muestras ensayadas en el ensayo de cohesión, las cuales se fabricaron con el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica obtenido a partir del gráfico de la figura 3.32.

Tabla 3.55

Dosificación de muestras con 0.5% de filler

Material	Cantidad	
	%	Peso (gr)
Emulsión	15.28	30.56
Agregado	100	200
Filler	0.5	1
Agua	9	18

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Los tiempos en los cuales se ensayó y se obtuvo el valor de la cohesión fueron: 60 min, 120 min, 180 min, 240 min, 300 min y 360 min. En la tabla 3.56 se muestra los resultados obtenidos (valores de torque) de las muestras ensayadas en el cohesímetro.

Tabla 3.56

Resultados del ensayo de cohesión, filler 0.5%

Tiempo	min	60'	120'	180'	240'	300'	360'
Torque	kg.cm	5	8	12	15	20	21

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

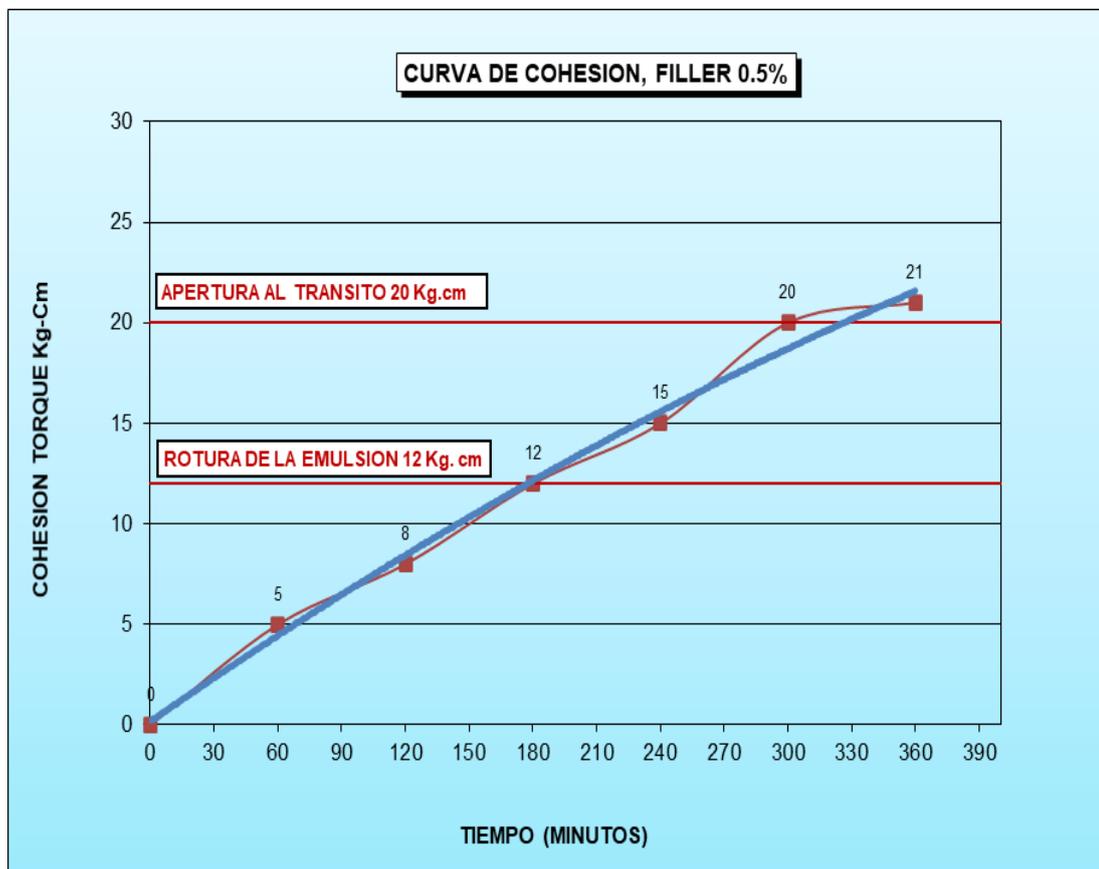


Figura 3.37: Gráfico de tendencia del ensayo de cohesión, filler 0.5%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En el gráfico de la figura 3.37 se muestra los resultados de torque de las muestras ensayadas, así como también la tendencia que existe entre el torque y el tiempo,

mostrando de esta forma la evolución de la consistencia del slurry seal diseñado con un porcentaje de filler de 0.5%. El tiempo de apertura al tráfico según el ensayo realizado es igual a 300 min (05 hrs.).

3.3.2.6.2. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE APERTURA AL TRÁFICO PARA LAS MUESTRAS CON 1.0 % DE FILLER

En la tabla 3.57 se muestra la dosificación de los componentes del mortero asfáltico, con el cual se fabricó las muestras ensayadas en el ensayo de cohesión, las cuales se fabricaron con el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica obtenido a partir del gráfico de la figura 3.33.

Tabla 3.57

Dosificación de muestras con 1.0% de filler

Material	Cantidad	
	%	Peso (gr)
Emulsión	14.75	29.5
Agregado	100	200
Filler	1	2
Agua	9	18

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Los tiempos en los cuales se ensayó y se obtuvo el valor de la cohesión fueron: 60 min, 120 min, 180 min, 240 min, 270 min y 330 min. En la tabla 3.58 se muestra los resultados obtenidos (valores de torque) de las muestras ensayadas en el cohesímetro. Se elaboraron 6 muestras con un porcentaje de filler de 1.0%.

Tabla 3.58

Resultados del ensayo de cohesión, filler 1.0%

Tiempo	min	60'	120'	180'	240'	270'	330'
Torque	kg.cm	5	9	13	16	21	22

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

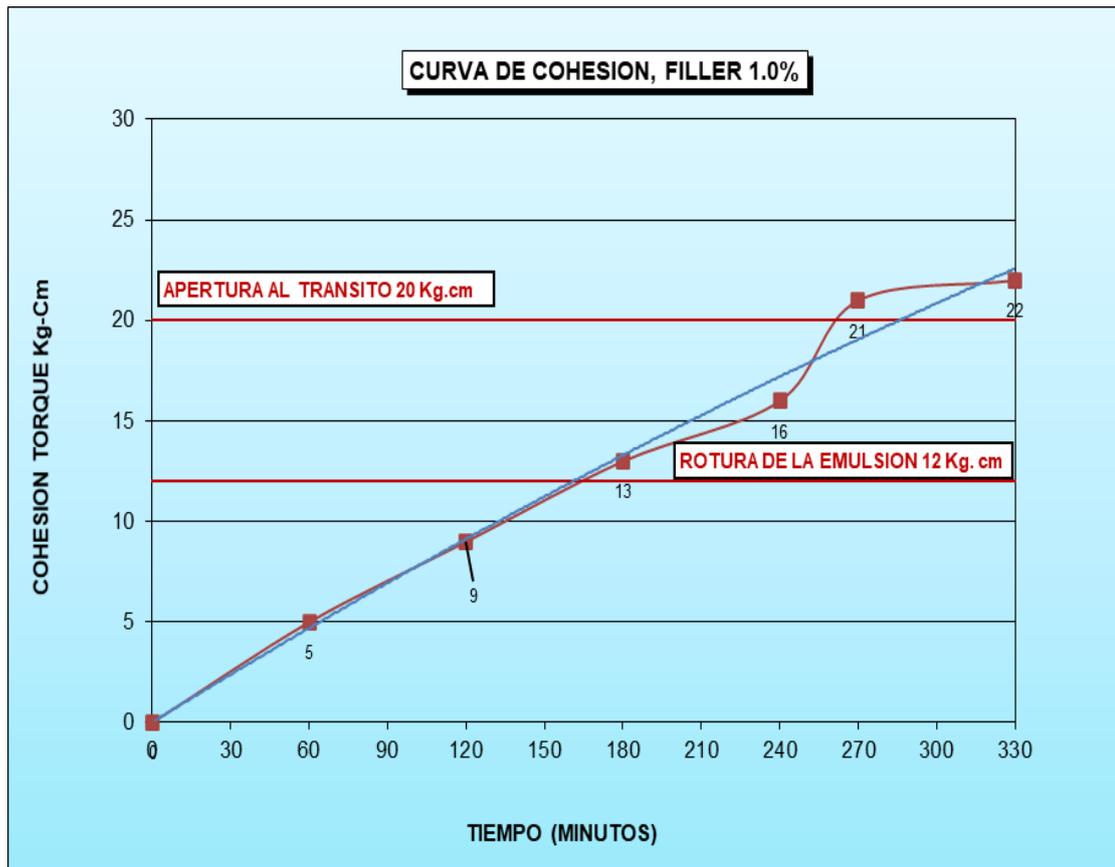


Figura 3.38: *Gráfico de tendencia del ensayo de cohesión, filler 1.0%*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En el gráfico de la figura 3.38 se muestra los resultados de torque de las muestras ensayadas, así como también la tendencia que existe entre el torque y el tiempo, mostrando de esta forma la evolución de la consistencia del slurry seal diseñado con un porcentaje de filler de 1.0%. El tiempo de apertura al tráfico según el ensayo realizado es igual a 260 min (04 horas y 20 min).

3.3.2.6.3. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE APERTURA AL TRÁFICO PARA LAS MUESTRAS CON 2.0% DE FILLER

En la tabla 3.59 se muestra la dosificación de los componentes del mortero asfáltico, con el cual se fabricó las muestras ensayadas en el ensayo de cohesión, las cuales se fabricaron con el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica obtenido a partir del gráfico de la figura 3.34.

Tabla 3.59

Dosificación de muestras con 2.0% de filler

Material	Cantidad	
	%	Peso (gr)
Emulsión	14.13	28.26
Agregado	100	200
Filler	2	4
Agua	9	18

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Los tiempos en los cuales se ensayó y se obtuvo el valor de la cohesión fueron: 30 min, 60 min, 120 min, 180 min, 210 min y 270 min. En la tabla 3.60 se muestra los resultados obtenidos (valores de torque) de las muestras ensayadas en el cohesímetro.

Tabla 3.60

Resultados del ensayo de cohesión, filler 2.0%

Tiempo	min	30'	60'	120'	180'	240'	270'
Torque	kg.cm	6	10	15	17	22	23

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

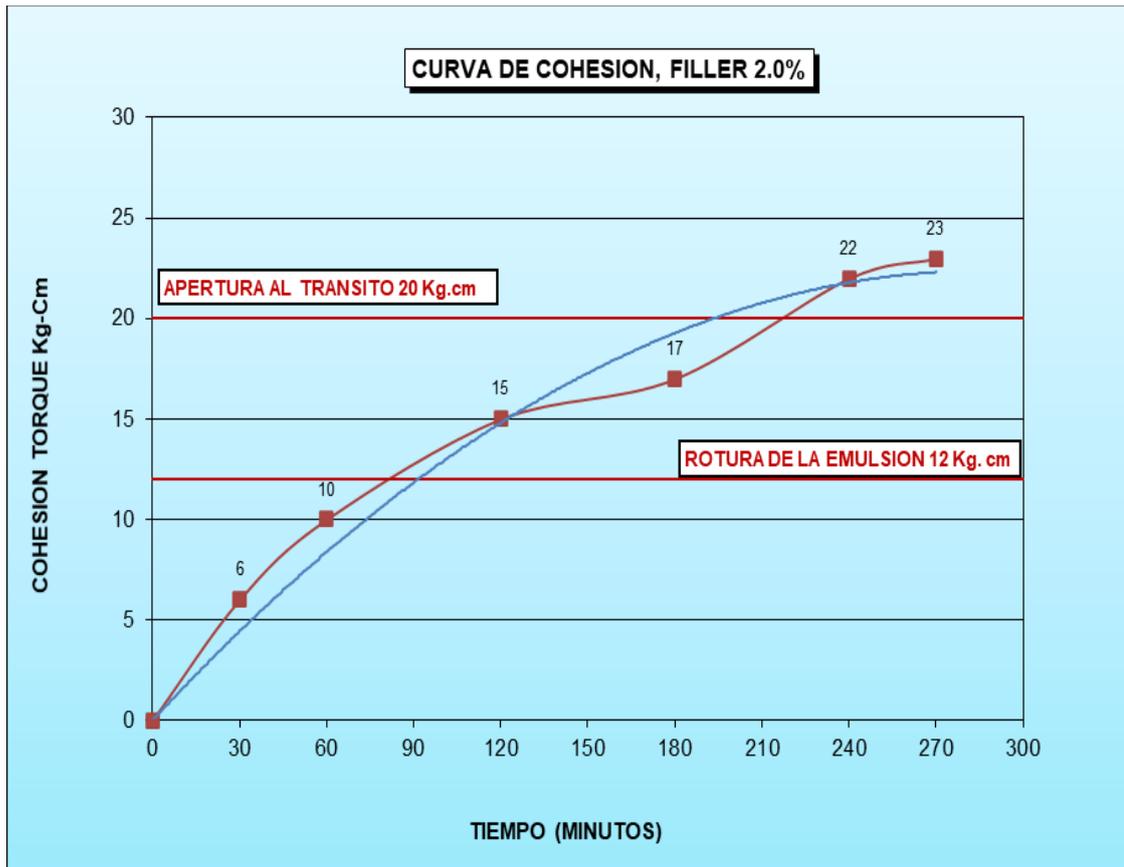


Figura 3.39: Gráfico de tendencia del ensayo de cohesión, filler 2.0%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En el gráfico de la figura 3.39 se muestra los resultados de torque de las muestras ensayadas, así como también la tendencia que existe entre el torque y el tiempo, mostrando de esta forma la evolución de la consistencia del slurry seal diseñado con un porcentaje de filler de 2.0%. El tiempo de apertura al tráfico según el ensayo realizado es igual a 217 min (03 horas y 37 min).



3.3.3. APLICACIÓN DEL SLURRY SEAL IN - SITU

La aplicación del mortero asfáltico slurry seal se realizó en los tramos de prueba indicados en la tabla 3.1. Los tramos de prueba intervenidos fueron tres (03), en cada uno de ellos se ejecutó el mortero asfáltico con diferentes porcentajes de filler 0.5%, 1.0% y 2.0%, en estos tramos de prueba se realizó el control del tiempo necesario para aperturar al tránsito el slurry seal colocado, tomando en cuenta los resultados obtenidos en laboratorio sobre este parámetro.

- **Recursos para le ejecución.**

Mano de obra:

- Operadores del equipo de colocación del mortero asfáltico
- Oficiales y peones para el acabado del mortero asfáltico y la señalización de la zona de trabajo respectivamente.

Materiales:

- Emulsión asfáltica de rotura lenta modificada con polímeros CSS
 - 1P
- Agregado triturado
- Agua y
- Filler mineral

Equipos y Maquinarias:

- Equipo de colocación de mortero asfáltico
- Retroexcavadora
- Cisterna de emulsión asfáltica
- Cisterna de agua



- **Procedimiento de ejecución**

El procedimiento mediante el cual se llevó a cabo las colocaciones del mortero asfáltico es el siguiente:

- **Acopio de agregados:**

El árido con el cual se diseñó y ejecuto el mortero asfáltico se procesó y traslado desde la cantera denominada “Uquiña”, hasta la zona de acopio (pillones).

- **Almacenamiento de insumos:**

La emulsión asfáltica utilizada fue trasladada desde la planta de emulsiones asfálticas de la empresa CASA ubicada en cañete hasta la zona de pillones.

El agua utilizada fue extraída de la toma de agua ubicada en el lado izquierdo de la progresiva 152+000, perteneciente al tramo vial Patahuasi – Imata. Tanto la emulsión asfáltica como el agua fueron almacenados en las mismas unidades que trasladaron estos insumos (cisterna de emulsión y cisterna de agua respectivamente).

- **Calibración del equipo (camión micropavimentador):**

Las técnicas para la ejecución del slurry seal pueden ser de manera manual o mediante la utilización de un equipo automatizado.

Para la presente investigación la colocación del mortero asfáltico se realizó mediante un equipo autopropulsado conocido comúnmente como camión micropavimentador.

La calibración del camión micropavimentador es importante y fundamental para la correcta ejecución del mortero asfáltico, ello a través de los diseños obtenidos en laboratorio. La finalidad de la



calibración es obtener la altura de la compuerta por donde salen los agregados.

En cuanto a la realización de la calibración de este equipo se proporcionó de los diferentes materiales e insumos componentes del slurry seal al camión micropavimentador tales como: Emulsión asfáltica, dicho insumo se proporcionó mediante la succión de la bomba de emulsión del camión micropavimentador, el agua al igual que la emulsión se proporcionó mediante la succión de la bomba de agua del camión. El agregado se proporcionó con el apoyo de una retroexcavadora, ello mediante el carguío de los agregados a la tolva del camión micropavimentador. El filler (cemento portland tipo I) se doto de manera manual.

La calibración del camión micropavimentador se encuentra en los anexos de la presente investigación.

- **Señalización vial de la zona intervenida:**

La señalización es fundamental por las siguientes razones: Para el control y regulación del tráfico en la zona antes del colocado del slurry seal y para el resguardo, cuidado del mortero asfáltico después de su colocación, ello hasta aperturar el tráfico.

- **Colocación del mortero asfáltico:**

La colocación del slurry seal se realizó en 3 días, en cada día se ejecutó el diseño para cada contenido de filler 0.5%, 1.0% y 2.0%.

La temperatura del ambiente promedio en el periodo de ejecución de estos diseños estuvo por encima de los 20 °C.

- **Control y/o cuidado del mortero asfáltico:**

Una vez colocado el mortero asfáltico, se procedió al cuidado del mismo, ello hasta su apertura al tránsito, proceso que se ejecutó tomando en cuenta los datos obtenidos en laboratorio (ensayos de cohesión). Cabe indicar que cada intervalo de tiempo (30 minutos) se verificó el proceso de evolución de la consistencia del mortero asfáltico. El criterio utilizado para la apertura al tráfico se realizó mediante la realización de un movimiento con la parte de atrás del zapato (taco), leve giro sobre el mortero colocado.

3.3.3.1. RESULTADOS DE LOS TIEMPOS DE APERTURA AL TRÁFICO IN - SITU

Los tiempos de apertura al tráfico obtenidos en campo se detallan en la tabla 3.61.

Tabla 3.61

Tiempos de apertura al tráfico de los tramos intervenidos in - situ

N°	Progresivas		Lado	Dosificación de Filler	Tiempo de apertura al tráfico	Temperatura del ambiente
	Inicio	Final				
1	125+000	125+100	Izquierdo	0.5	240	22
2	127+200	127+300	Derecho	1	210	22
3	129+300	129+400	Izquierdo	2	180	23

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

A continuación, se muestra imágenes del proceso de colocación in – situ del mortero asfáltico.



Figura 3.40: *Carguío de agregados a la tolva del camión micropavimentador*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

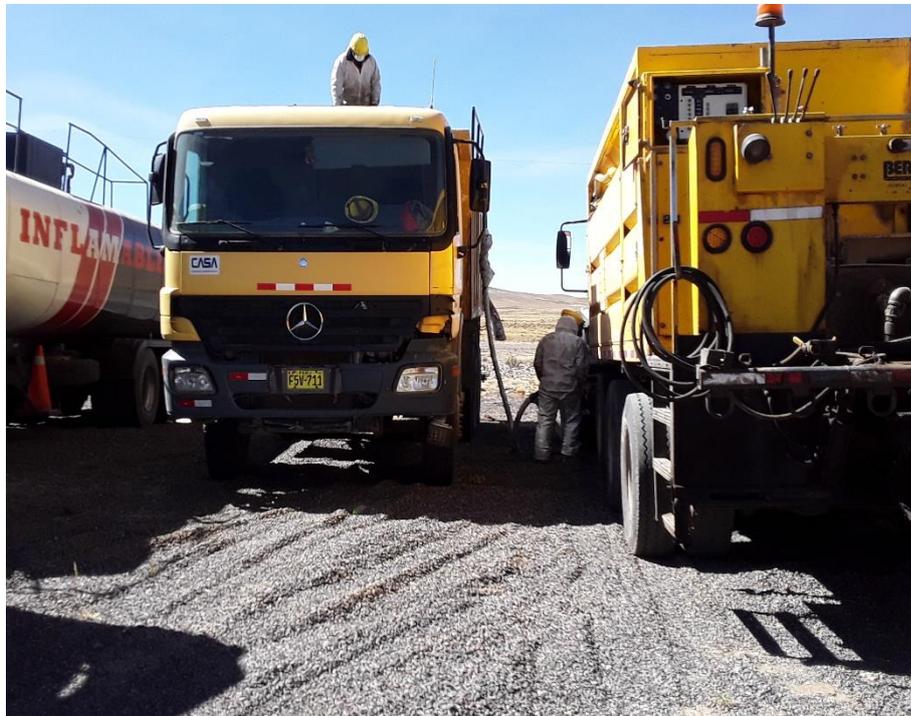


Figura 3.41: *Succión de agua, Cisterna de agua – Camión micropavimentador*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Figura 3.42: *Succión de emulsión, Cisterna de emulsión – micropavimentador*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

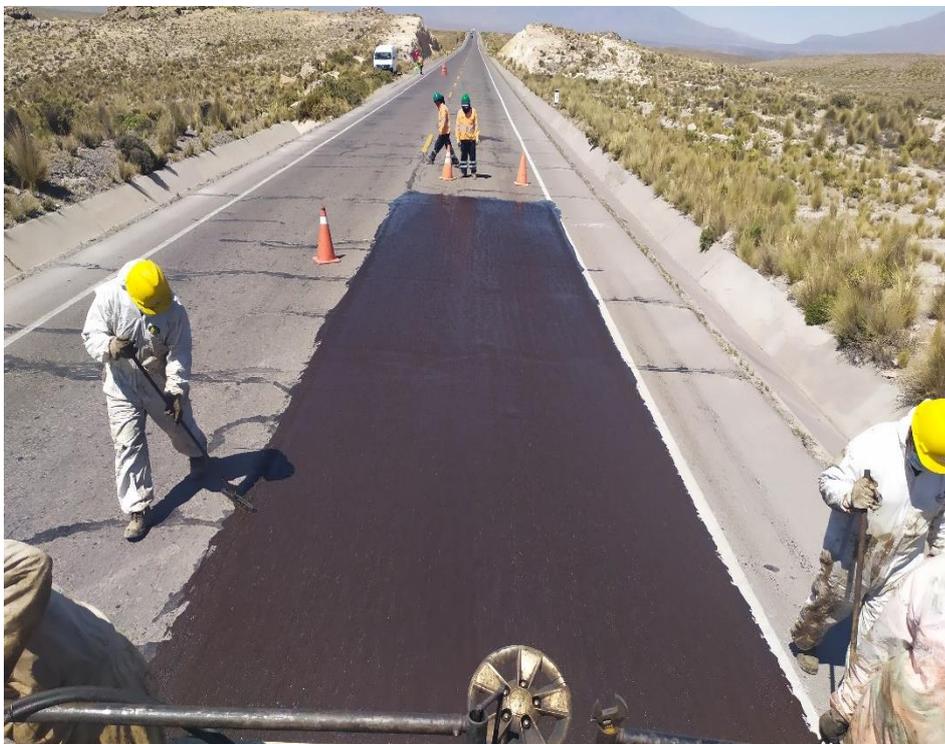


Figura 3.43: *Colocación de mortero asfáltico slurry seal tipo II*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Figura 3.44: *Proceso de rotura de la emulsión asfáltica*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.3.3.2. CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN LA ZONA DE APLICACIÓN

Las consideraciones técnicas que se deben tener en cuenta para el uso de emulsiones asfálticas y la colocación del slurry seal en zonas donde existen bajas temperaturas, como es el caso del tramo intervenido de la presente investigación, son las siguientes:

- (Chavez, 2020), afirma que: De acuerdo al clima y la altitud de la zona, se deberá de elegir el grado de penetración del cemento asfáltico para el diseño de la emulsión asfáltica.
- (Escalante, 2019) afirma que: Si bien es cierto las emulsiones asfálticas permiten su almacenamiento a temperatura de ambiente, sin embargo en zonas donde la temperatura ambiente se encuentra por debajo de 0°C , la emulsión presentara un proceso de congelamiento, lo que conllevará a que esta empiece a romper y ya no



sea de utilidad; por tal razón, para este tipo de zonas con bajas temperaturas, se recomienda que la emulsión asfáltica se almacene en depósitos que tengan un sistema de recirculación y preservación de la temperatura, teniendo en cuenta que el exceso de la recirculación de la emulsión asfáltica puede generar la rotura.

- En este tipo de zonas con bajas temperaturas, se presenta el fenómeno de congelamiento en los componentes del camión micropavimentador (bomba de succión de la emulsión y del agua) dificultando así su normal funcionamiento, por tal razón se deberá realizar la protección y el calentamiento de estos elementos en horas donde la temperatura de ambiente se encuentra por debajo de los 0°C.
- La aplicación de este tipo de mortero asfáltico slurry seal, diseñado con una emulsión de rotura lenta, el cual requiere de un tiempo determinado para ponerse al servicio de los usuarios, deberá realizarse máximo hasta el mediodía, puesto que en horas de la tarde la temperatura de ambiente en zonas de altitud baja considerablemente.

3.3.4. MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)

La medición del índice de rugosidad internacional (IRI) se realizó con el apoyo de un perfilómetro láser RSP – MARK IV (Road Surface Profiler), el cual es un equipo de alto rendimiento que revela de forma continua el carril de circulación que se desea medir, recorriendo el mismo a una velocidad superior a los 20 km/h.

3.3.4.1. ELEMENTOS DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DEL IRI

a. Perfilómetro láser

El perfilómetro láser debido a la eficiencia a la que puede trabajar, necesita acoplarse a un vehículo que se desplace en sentido de la calzada.

En la figura 3.45, se puede observar al perfilómetro láser utilizado, el cual está ubicado en la parte trasera e inferior del vehículo, apoyado sobre una barra de aluminio que sostiene el equipo.



Figura 3.45: Perfilómetro láser RSP – MARK IV

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

El perfilómetro láser está compuesto por dos dispositivos propios que permiten analizar el perfil longitudinal del pavimento, los cuales son los siguientes:

Tabla 3.62

Relación de sensores equipo RSP

Cantidad	Sensores	Función
2	Sensores acelerómetros	Miden el desplazamiento vertical del vehículo
2	Sensores laser	Miden el desplazamiento entre el vehículo y el pavimento

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

El sensor láser permite medir la distancia entre la posición en la que se encuentra este y el nivel superficial de pavimento, mientras que el sensor acelerómetro permite eliminar la variabilidad de los resultados obtenidos, variabilidad que se genera por los factores propios de cada vehículo de medición, tales como: Peso

del vehículo, personas dentro del mismo y la suspensión o amortiguación del vehículo, siendo este último el principal factor.

Según (Ramos, 2018), por medio de estos dos dispositivos (sensores), el perfilómetro láser permite obtener el perfil longitudinal relativo de la superficie del pavimento. La unida láser brinda el perfil longitudinal estático desde el nivel de referencia (parte inferior de la unidad láser) hacia el nivel de la superficie del pavimento, mientras que el acelerómetro obtiene el perfil longitudinal debido al movimiento vertical originado por el vehículo y su propia amortiguación obtenido por medio de integraciones a las aceleraciones medidas.

b. Odómetro

El odómetro es un dispositivo que mide el desplazamiento lineal del recorrido, es decir, la progresiva, el odómetro utilizado es un equipo de alta resolución el cual permite medir la distancia correlacionando un contador de pulsos del equipo con la posición lineal recorrida por el vehículo, posición lineal previamente calibrada, sobre una distancia patrón.



Figura 3.46: *Odómetro acoplado al neumático del vehículo.*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la figura 3.46, se muestra el odómetro acoplado al neumático derecho de la parte de atrás del vehículo a utilizarse.

c. Sistema computarizado

El sistema computarizado permite interconectar la información registrada proveniente del perfilómetro láser y del odómetro.

En la figura 3.47, se observa que el sistema computarizado se encuentra ubicado en la parte de adelante del vehículo. Dependiendo del tipo de vehículo, ya sea una minivan o una camioneta el sistema computarizado puede estar en la parte trasera o en la parte delantera.



Figura 3.47: Sistema computarizado para la recolección de datos

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.3.4.2. INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DEL IRI

a. Perfilómetro láser

El perfilómetro láser no requiere de un vehículo especializado para realizar las mediciones, sin embargo, es necesario que su interior sea espacioso para la ubicación del sistema computarizado, que permita la integración de todos los dispositivos. En este caso se utilizó una camioneta, ello debido a su potencia, eficiencia y versatilidad.

El perfilómetro laser puede ubicarse tanto en la parte delantera como trasera del vehículo, la ubicación depende del propio vehículo, es decir se buscará la

mejor posición para el soporte, en este caso se ubicó al perfilómetro en la parte trasera de la camioneta.



Figura 3.48: *Instalación del perfilómetro láser en la parte de atrás.*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la figura 3.48 se muestra al perfilómetro láser montado por medio de pernos y barras de aluminio, así mismo se muestra que la ubicación del perfilómetro láser es perpendicular a la superficie del pavimento. Debido a esto, es que el equipo cuenta con un nivel esférico ojo de pollo en la parte superior que permite nivelar el dispositivo verticalmente. Esto es necesario ya que las mediciones por la parte de la unidad láser y el acelerómetro deben ser perpendiculares a la superficie de la carretera para una correcta medición.

b. Odómetro

El odómetro se instaló en el plato del neumático de la llanta trasera derecha. La posición del dispositivo se debe a que la tracción del vehículo, se encuentra en la parte trasera.

c. Video cámara

Generalmente la video cámara panorámica se ubica en la parte superior del vehículo de manera que la vista que se obtenga sea de todo el derecho de la



vía. En este caso los tramos de medición son de una calzada y un carril de ida y vuelta. En caso exista la presencia de una mayor cantidad de carriles por calzada se requerirá de una cámara adicional para poder cubrir el derecho de vía.

3.3.4.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DEL IRI

(Ramos, 2018) en su tesis de investigación “Estudio del índice de regularidad internacional en vías pavimentadas mediante el uso del perfilómetro Láser Romdas” afirma que: Indudablemente la utilización de equipos electrónicos requiere contar con el certificado correspondiente de calibración del equipo, de manera que los datos obtenidos a partir de este sean confiables y consistentes en el tiempo. Es lógico que la calibración realizada por el fabricante del equipo de medición del IRI (perfilómetro láser y odómetro) es distinta a la calibración realizada por el operador de este equipo, pero eso no quiere decir que dichas calibraciones sean muy distantes, por lo que, se recomienda realizar un proceso de validación del equipo. Esto quiere decir que los equipos no se calibran debido a la alta complejidad de los componentes que requieren la alta precisión de estos equipos de clase 1; sino que estos equipos se validan para corroborar que los datos que se obtienen sean congruentes y confiables.

El formato de validación del equipo de medición del IRI se encuentra en los anexos de la presente investigación.

3.3.4.4. VALORES DE MEDICIÓN DEL IRI

En la presente sección se muestra los valores obtenidos a partir de la medición del índice de rugosidad internacional (IRI), medición que se realizó con el apoyo de un equipo que está tipificado como de Clase 1: perfilómetro láser.

Los valores que se muestran corresponden a la medición del IRI antes de la colocación de los diseños de mortero asfáltico (slurry seal) en los tramos de prueba y los valores de la medición después de su colocación o ejecución.

Es importante resaltar que el intervalo de tiempo existente entre la primera y la segunda medición es de aproximadamente un año.

3.3.4.4.1. VALORES DEL IRI ANTES DE LA COLOCACIÓN DEL MORTERO ASFÁLTICO

Tabla 3.63

Valores del IRI antes de la intervención

N°	Progresivas		Longitud (m)	Dosificación de Filler %	IRI a 100 m HI m/km	IRI a 100 m HD m/km	IRI a 100 m Promedio m/km
	Inicio	Final					
1	125+000	125+100	100.00	0.5	3.23	1.96	2.60
2	127+200	127+300	100.00	1	5.21	7.75	6.48
3	129+300	129+400	100.00	2	1.76	1.29	1.53

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 3.63 se muestra los valores de la medición del índice de rugosidad internacional de los tramos de prueba. Estos valores corresponden a la medición del IRI antes de la colocación del mortero asfáltico (slurry seal). La tabla muestra los valores del IRI de las huellas izquierda, derecha y el promedio de estas.

3.3.4.4.2. VALORES DEL IRI DESPUÉS DE LA COLOCACIÓN DEL MORTERO ASFÁLTICO

Tabla 3.64

Valores del IRI después de la intervención

N°	Progresivas		Longitud (m)	Dosificación de Filler %	IRI a	IRI a	IRI a 100 m Promedio
	Inicio	Final			100 m HI	100 m HD	
1	125+000	125+100	100.00	0.5	3	1.85	2.43
2	127+200	127+300	100.00	1	4.71	6.35	5.53
3	129+300	129+400	100.00	2	2.09	1.55	1.82

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 3.64 se muestra los valores de la medición del índice de rugosidad internacional de los tramos de prueba. Estos valores corresponden a la medición del IRI después de la colocación del mortero asfáltico (slurry seal).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

De acuerdo al desarrollo de la presente investigación en la cual se realizaron 3 diseños de slurry seal, cada uno de ellos con diferentes contenidos de filler 0.5%, 1.0% y 2.0% en la mezcla del mortero asfáltico. A continuación, se muestran los parámetros importantes que se obtuvieron para el cumplimiento de los objetivos planteados en la presente investigación los cuales son:

- Valores de los ensayos de desempeño, diseños del slurry seal.
- Valores del tiempo de apertura al tráfico del slurry seal colocado en campo.
- Valores del IRI de los tramos intervenidos.

4.1.1. VALORES DEL DISEÑO CON 0.5% DE FILLER

En la tabla 4.1 se muestra la dosificación final de los componentes del slurry seal para el diseño del mismo con un porcentaje de filler de 0.5%. Valores que pueden ser modificados en obra de acuerdo a las condiciones climáticas en obra y el criterio del especialista a cargo.

Tabla 4.1

Dosificación final del slurry seal diseñado con 0.5% de filler

Componente	Cantidad
Cantidad óptima de emulsión	15.28%
Agregado	100%
Agua	9%
Filler	0.50%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

La tabla 4.2 nos muestra los resultados obtenidos de las pruebas de desempeño realizadas a las muestras moldeadas y los tiempos de apertura al tráfico obtenidos tanto en laboratorio como en campo.

Tabla 4.2

Resultados de los ensayos y los tiempos de apertura al tráfico, filler 0.5%

Descripción	Resultado
Tiempo de Mezclado (ISSA TB - 113)	300 seg.
W.T.A.T (Abrasión en húmedo ISSA TB - 100)	495.41 g/m ²
L.W.T (Rueda cargada ISSA TB - 109)	370.23 g/m ²
Tiempo de apertura al tráfico según laboratorio (Cohesión ISSA TB - 139)	300 min
Tiempo de apertura al tráfico según campo	240 min

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 4.3 se muestra los valores del índice de rugosidad internacional (IRI), ello del tramo en el cual se realizó la colocación del slurry seal con un porcentaje de filler de 0.5%, valores del IRI correspondientes al antes y después de la colocación.

Tabla 4.3

Resultados del IRI del antes y después de la colocación, filler 0.5%

Descripción	Progresivas		Longitud (m)	IRI a	IRI a	IRI a
	Inicio	Final		100 m HI	100 m HD	100 m Promedio
Antes de la colocación	125+000	125+100	100.00	3.23	1.96	2.60
Después de la colocación				3	1.85	2.43

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Los datos mostrados en la tabla 4.3 nos indica que la colocación del slurry seal con una tasa de filler de 0.5%, permitió reducir los valores de rugosidad de la superficie de rodadura del tramo intervenido de 2.60 a 2.43 m/km, presentándose una disminución de 6.5% del valor inicial de la rugosidad, lo cual es favorable, debido a que ello mejora la condición de la superficie de rodadura.

4.1.2. VALORES DEL DISEÑO CON 1.0% DE FILLER

En la tabla 4.4 se muestra la dosificación final de los componentes del slurry seal para el diseño del mismo con un porcentaje de filler de 1.0%.

Tabla 4.4

Dosificación final del slurry seal diseñado con 1.0% de filler

Componente	Cantidad
Cantidad Optima de Emulsión	14.75%
Agregado	100%
Agua	9%
Filler	1.00%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

La tabla 4.5 nos muestra los resultados obtenidos de las pruebas de desempeño realizadas a las muestras moldeadas y los tiempos de apertura al tráfico obtenidos tanto en laboratorio como en campo.

Tabla 4.5*Resultados de los ensayos y los tiempos de apertura al tráfico, filler 1.0%*

Descripción	Resultado
Tiempo de Mezclado (ISSA TB - 113)	250 seg.
W.T.A.T (Abrasión en húmedo ISSA TB - 100)	445.85 g/m ²
L.W.T (Rueda cargada ISSA TB - 109)	366.86 g/m ²
Tiempo de apertura al tráfico Según laboratorio (Cohesión ISSA TB - 139)	260 min
Tiempo de apertura al tráfico según campo	210 min

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 4.6 se muestra los valores del índice de rugosidad internacional (IRI), ello del tramo en el cual se realizó la colocación del slurry seal con un porcentaje de filler de 1.0%, valores del IRI correspondientes al antes y después de la colocación.

Tabla 4.6*Resultados del IRI del antes y después de la colocación, filler 1.0%*

Descripción	Progresivas		Longitud (m)	IRI a	IRI a	IRI a
	Inicio	Final		100 m HI	100 m HD	100 m Promedio
Antes de la colocación				5.21	7.75	6.48
Después de la colocación	127+200	127+300	100.00	4.71	6.35	5.53

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Los datos mostrados en la tabla 4.6 nos indica que la colocación del slurry seal con una tasa de filler de 1.0 %, permitió reducir los valores de rugosidad de la superficie de rodadura del tramo intervenido de 6.48 a 5.53 m/km, presentándose una disminución de 14.7 % del valor inicial de la rugosidad.

4.1.3. VALORES DEL DISEÑO CON 2.0% DE FILLER

En la tabla 4.7 se muestra la dosificación final de los componentes del slurry seal para el diseño del mismo con un porcentaje de filler de 2.0%.

Tabla 4.7

Dosificación final del slurry seal diseñado con 2.0% de filler

Componente	Cantidad
Cantidad Optima de Emulsión	14.13%
Agregado	100%
Agua	9%
Filler	2.00%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

La tabla 4.8 nos muestra los resultados obtenidos de las pruebas de desempeño realizadas a las muestras moldeadas y los tiempos de apertura al tráfico obtenidos tanto en laboratorio como en campo.

Tabla 4.8

Resultados de los ensayos y los tiempos de apertura al tráfico, filler 2.0%

Descripción	Resultado
Tiempo de Mezclado (ISSA TB - 113)	220 seg.
W.T.A.T (Abrasión en humeado ISSA TB - 100)	401.49 g/m ²
L.W.T (Rueda cargada ISSA TB - 109)	349.44 g/m ²
Tiempo de apertura al tráfico Según laboratorio (Cohesión ISSA TB - 139)	217 min
Tiempo de apertura al tráfico según campo	180 min

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 4.9 se muestra los valores del índice de rugosidad internacional (IRI), ello del tramo en el cual se realizó la colocación del slurry seal con un porcentaje de filler de 2.0%, valores del IRI correspondientes al antes y después de la colocación.

Tabla 4.9

Resultados del IRI del antes y después de la colocación, filler 2.0%

Descripción	Progresivas		Longitud (m)	IRI a 100 m HI	IRI a 100 m HD	IRI a 100 m Promedio
	Inicio	Final		m/km	m/km	m/km
Antes de la colocación				1.76	1.29	1.53
Después de la colocación	129+300	129+400	100.00	2.09	1.55	1.82

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Los datos mostrados en la tabla 4.9 nos indica que la colocación del slurry seal con una tasa de filler de 2.0%, permitió incremento los valores de rugosidad de la superficie de rodadura del tramo intervenido de 1.53 a 1.82 m/km, presentándose un incremento de 11.9% del valor inicial de la rugosidad, lo cual es desfavorable para el tramo intervenido.

4.2. DISCUSIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se muestra gráficos comparativos, en los cuales se visualiza los valores de los ensayos de desempeño, el tiempo de apertura al tráfico tanto en laboratorio como en campo y los valores del índice de rugosidad internacional. Este último del antes y después de la colocación del mortero asfáltico en los tramos intervenidos. La comparación de resultados está en función a la variación del contenido de filler (cemento

portland tipo I), ello en cumplimiento de los objetivos específicos planteados en la presente investigación.

4.2.1. COMPARACIÓN DEL ENSAYO ABRASIÓN EN HÚMEDO (W.T.A.T)

En la figura 4.1 se muestra los resultados del ensayo de abrasión en húmedo (ISSA TB – 100) ello en función a la variación del contenido de filler (cemento portland tipo I), variación a tasas de dosificación del filler de 0.5%, 1.0% y 2.0%.

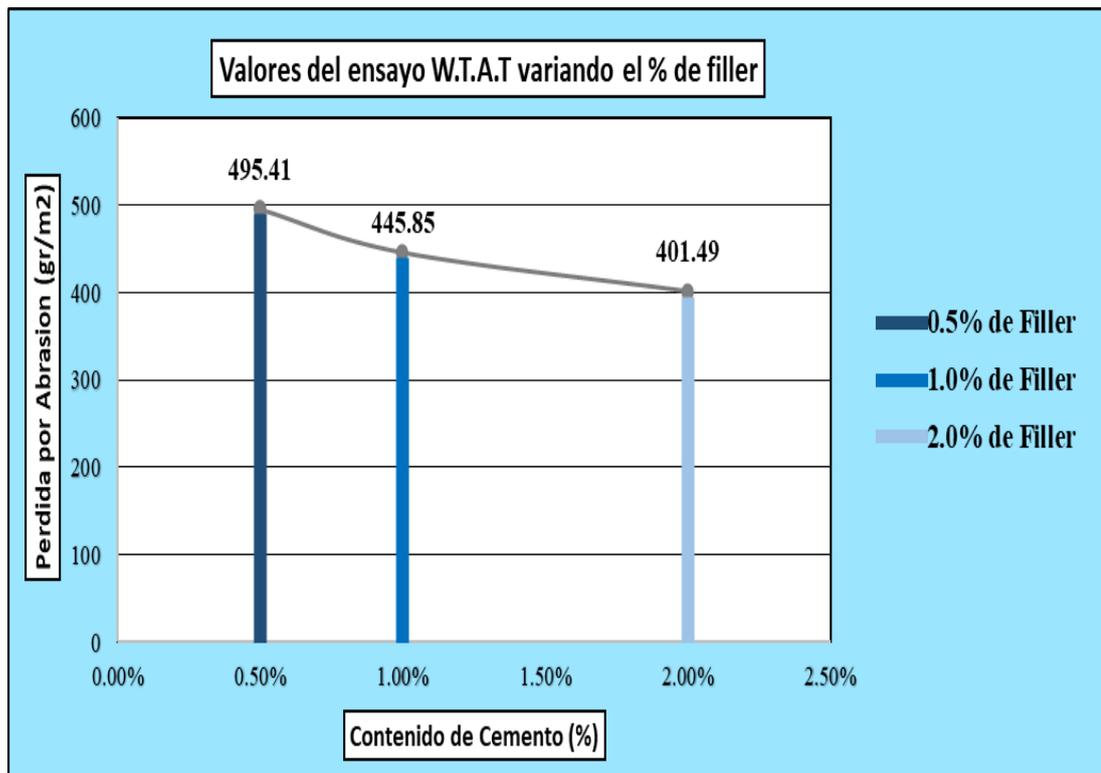


Figura 4.1: Gráfico del ensayo W.T.A.T a diferentes tasas de filler

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

De acuerdo al gráfico de la figura 4.1, para un porcentaje de filler de 0.5% tenemos un valor de pérdida por abrasión en húmedo de 495.41 gr/m², mientras que para un porcentaje de 1.0% se tiene un valor de 445.85 gr/m² y para un porcentaje de filler de 2.0% se tiene un valor de 401.49 gr/m². Estos resultados nos indica la tendencia existente, la cual es que a medida que se incrementa el porcentaje de filler en la mezcla de mortero asfáltico la pérdida por abrasión en húmedo disminuye, esta tendencia denota que la

mezcla de mortero asfáltico será más resistente al tráfico en zonas donde existan precipitaciones pluviales (zonas lluviosas).

4.2.2. COMPARACIÓN DEL ENSAYO DE RUEDA CARGADA (L.W.T)

En la figura 4.2 se muestra los resultados del ensayo de rueda cargada (ISSA TB – 109) ello en función a la variación del contenido de filler (cemento portland tipo D), variación a tasas de dosificación del filler de 0.5%, 1.0% y 2.0%.

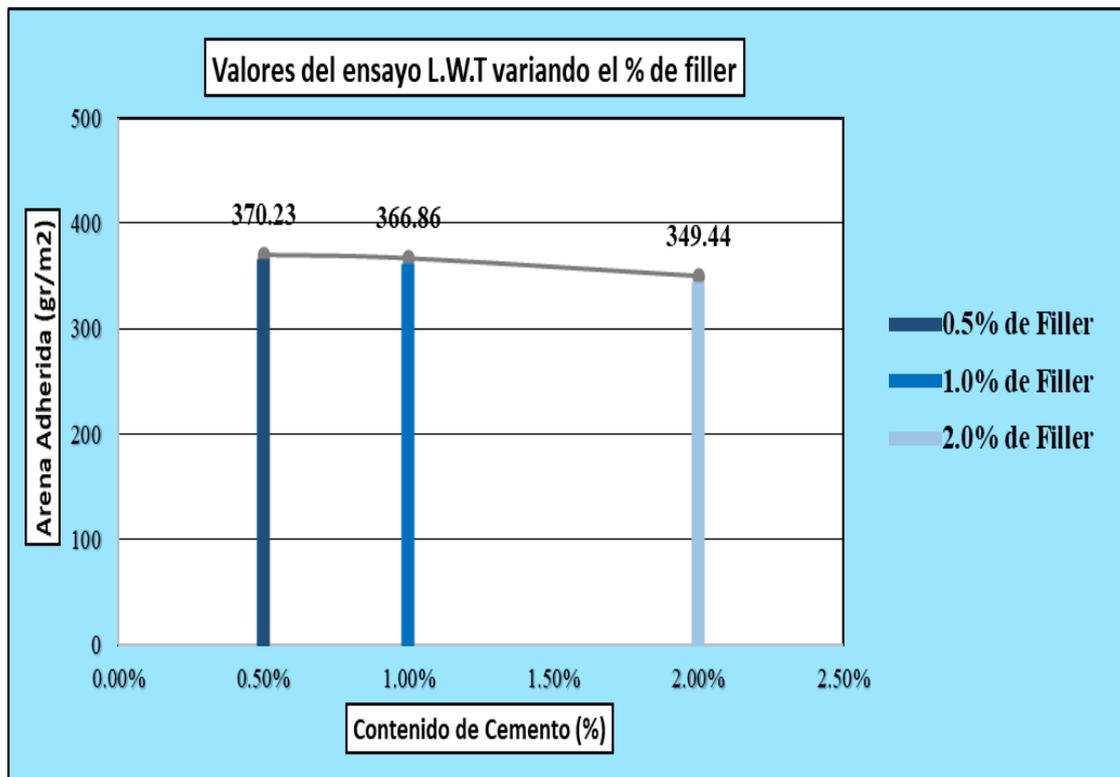


Figura 4.2: Gráfico del ensayo L.W.T a diferentes tasas de filler

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

De acuerdo al gráfico de la figura 4.2, para un porcentaje de filler de 0.5% tenemos un valor de arena adherida de 370.23 gr/m², mientras que para un porcentaje de 1.0% se tiene un valor de 366.86 gr/m² y para un porcentaje de filler de 2.0% se tiene un valor de 349.44 gr/m². Estos resultados nos indica la tendencia existente, la cual es que a medida que se incrementa el porcentaje de filler en la mezcla de mortero asfáltico la cantidad de

arena adherida disminuye, esta tendencia denota que la mezcla de mortero asfáltico será más resistente al tráfico.

4.2.3. TIEMPOS DE APERTURA AL TRÁFICO EN LABORATORIO

En la figura 4.3 se muestra la comparación de los tiempos de apertura al tráfico, obtenidos en laboratorio mediante el ensayo de cohesión (ISSA TB – 139), ello en función a la variación del contenido de filler (cemento portland tipo I), variación a tasas de dosificación del filler de 0.5%, 1.0% y 2.0%.

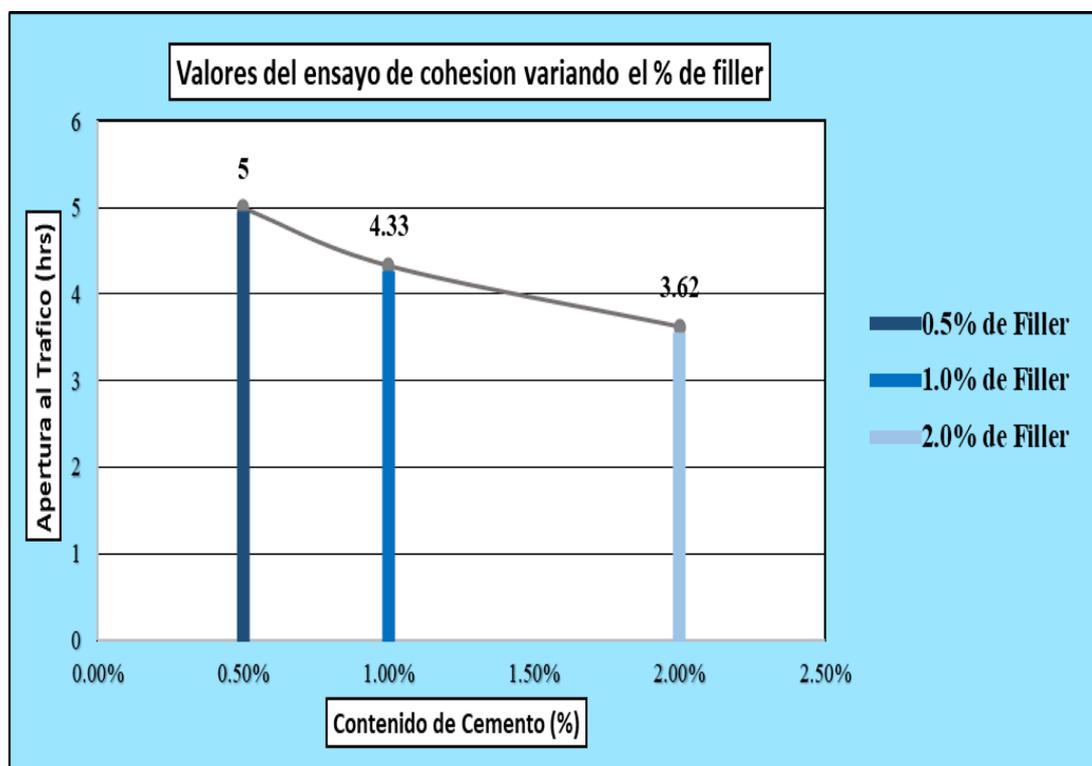


Figura 4.3: *Tiempos de apertura al tráfico en laboratorio a diferentes tasas de filler*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

De acuerdo al gráfico de la figura 4.3, para un porcentaje de filler de 0.5% tenemos un tiempo de apertura al tráfico obtenido en laboratorio de 5 horas, mientras que para un porcentaje de 1.0% se tiene un valor de 4.33 horas y para un porcentaje de filler de 2.0% se tiene un valor de 3.62 horas. Estos resultados nos indica la tendencia existente, la cual

es que a medida que se incrementa el porcentaje de filler en la mezcla de mortero asfáltico el tiempo de apertura al tráfico disminuye.

4.2.4. TIEMPOS DE APERTURA AL TRÁFICO EN CAMPO

En la figura 4.4 se muestra la comparación de los tiempos de apertura al tráfico, obtenidos en campo a partir de la colocación de los diseños de mortero asfáltico en los tramos intervenidos, tiempos que están en función a la variación del contenido de filler (cemento portland tipo I), variación a tasas de dosificación del filler de 0.5%, 1.0% y 2.0%.

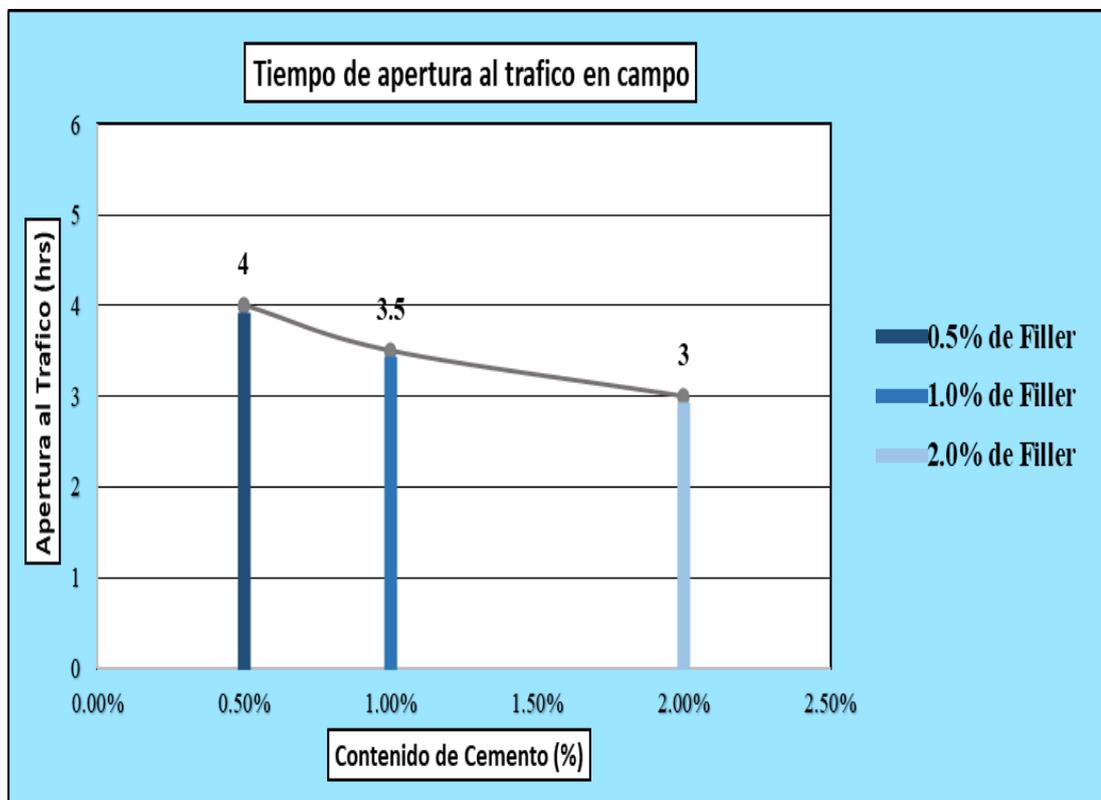


Figura 4.4: Tiempos de apertura al tráfico en campo a diferentes tasas de filler

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

De acuerdo al gráfico de la figura 4.4, para un porcentaje de filler de 0.5% tenemos un tiempo de apertura al tráfico obtenido en campo de 4 horas, mientras que para un porcentaje de 1.0% se tiene un valor de 3.5 horas y para un porcentaje de filler de 2.0% se tiene un valor de 3 horas. Estos resultados obtenidos en campo corroboran la tendencia

existente en los valores de tiempo de apertura al tráfico obtenidos en laboratorio, la cual es que a medida que se incrementa el porcentaje de filler en la mezcla de mortero asfáltico el tiempo de apertura al tráfico disminuye.

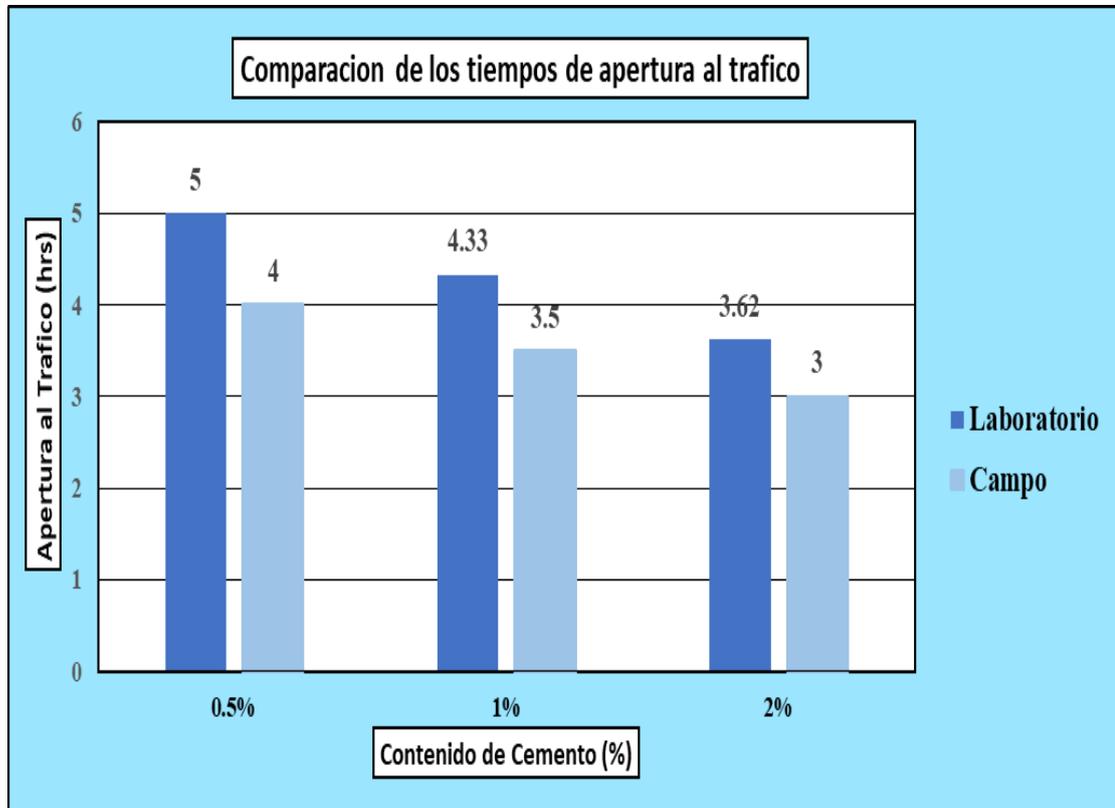


Figura 4.5: Tiempos de apertura al tráfico laboratorio Vs campo

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En el gráfico de la figura 4.5 se muestra la comparación de los tiempos de apertura al tráfico obtenidos en laboratorio a partir del ensayo de cohesión (ISSA TB – 139) y los tiempos obtenidos en campo, todo ello a diferentes tasas de filler 0.5%, 1.0% y 2.0%. Los tiempos obtenidos en campo difieren de los obtenidos en laboratorio.

4.2.5. COMPARACIÓN DE LOS VALORES DEL IRI

4.2.5.1. VALORES DEL IRI EN TRAMO CON DISEÑO DE 0.5 % DE FILLER

En la figura 4.6 se muestra los valores del índice de rugosidad internacional, los cuales corresponden a la medición realizada al antes y después de la colocación del mortero asfáltico diseñado con un porcentaje de filler (cemento portland tipo I) de 0.5%.

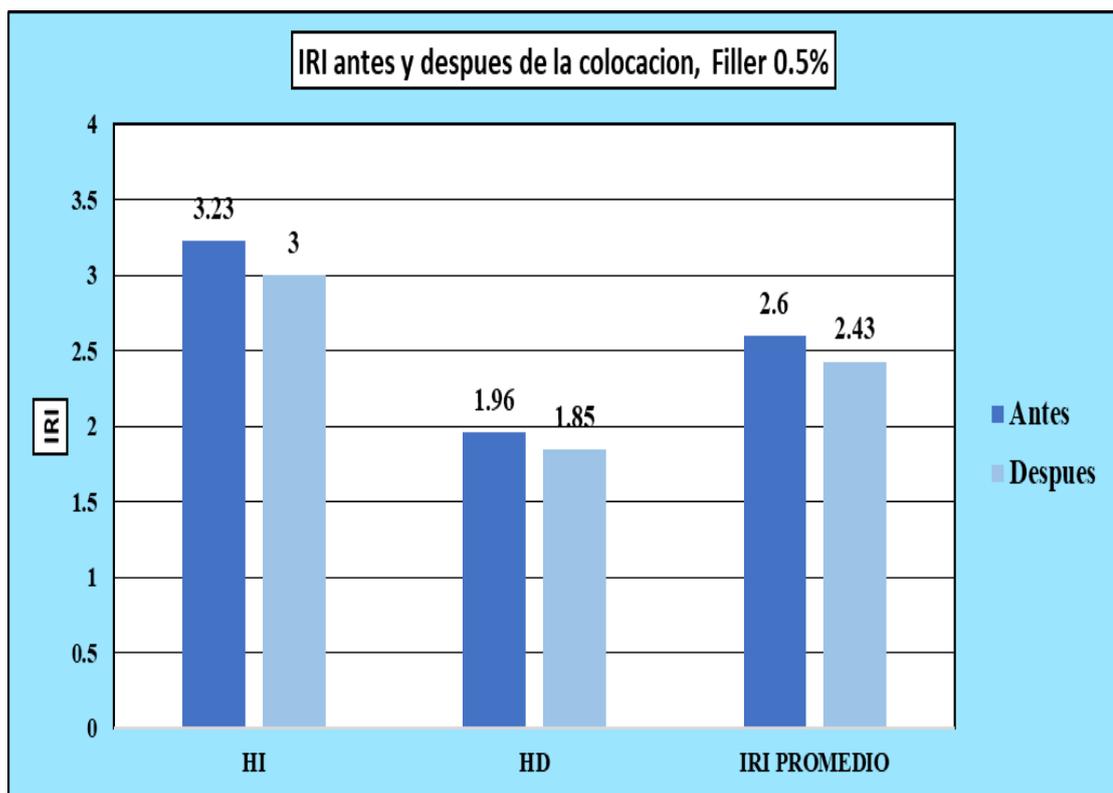


Figura 4.6: Valores del IRI, Filler 0.5%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

El gráfico de la figura 4.6 nos muestra los valores del IRI medidos tanto en la huella izquierda como en la huella derecha, ello de acuerdo a la metodología de medición por el equipo utilizado para tal fin (perfilómetro láser). Asimismo, se muestra el valor de la rugosidad promedio, el cual como su mismo nombre lo indica es el promedio de los valores de la huella izquierda y derecha. Los valores de rugosidad obtenidos después de la colocación del mortero asfáltico para este diseño son menores a los valores obtenidos

antes de la colocación, lo cual es un parámetro de mejora de la serviciabilidad del tramo intervenido. Si bien es cierto los valores de la rugosidad antes de la intervención se encontraban dentro de lo requerido (Valores menores a 3.5 m/km), la colocación del mortero asfáltico permitió mejorar la serviciabilidad, debido a que los valores del IRI disminuyeron.

4.2.5.2. VALORES DEL IRI EN TRAMO CON DISEÑO DE 1.0% DE FILLER

En la figura 4.7 se muestra los valores del índice de rugosidad internacional, los cuales corresponden a la medición realizada al antes y después de la colocación del mortero asfáltico diseñado con un porcentaje de filler (cemento portland tipo I) de 1.0%.

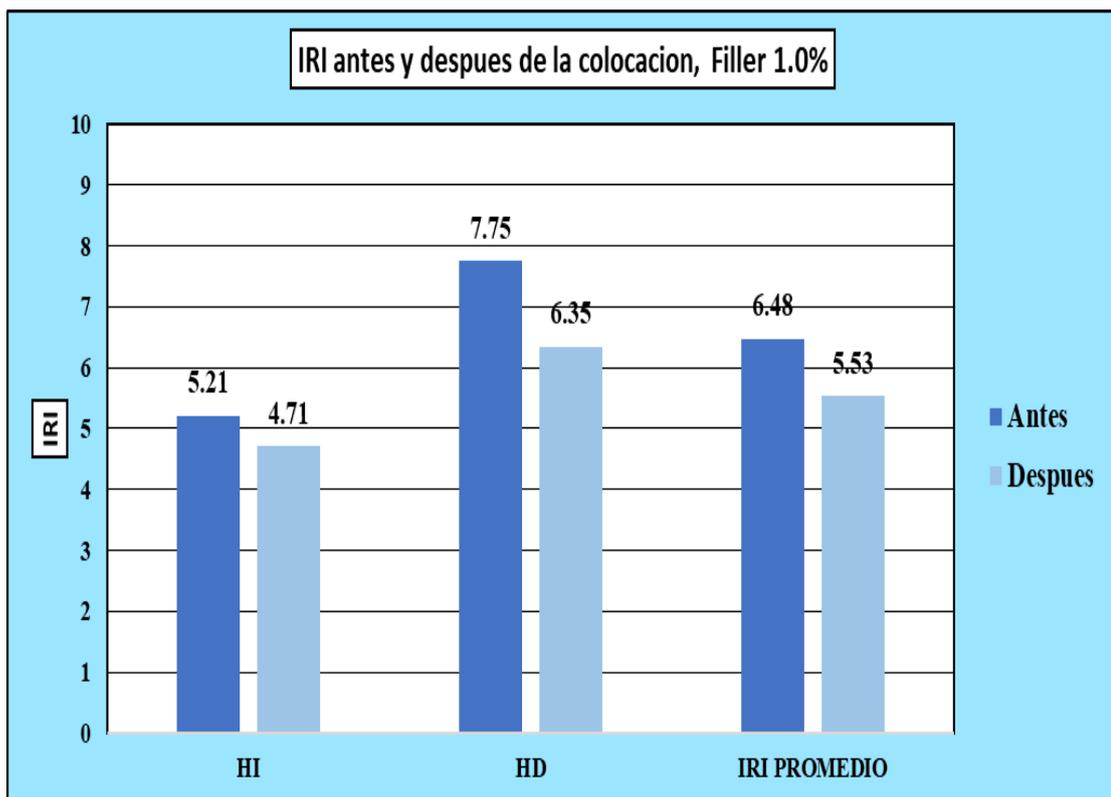


Figura 4.7: Valores del IRI, Filler 1.0%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Los valores de la rugosidad obtenidos después de la colocación del mortero asfáltico para este diseño con un porcentaje de filler de 1.0%, son menores a los valores obtenidos antes

de la colocación, lo cual es un parámetro de mejora de la serviciabilidad del tramo intervenido. Sin embargo, los valores obtenidos de la medición de la rugosidad antes y después de la colocación del mortero asfáltico se encuentra por encima de lo requerido, valores mayores a 3.5 m/km, lo cual nos indica el déficit de serviciabilidad existente en el tramo intervenido.

4.2.5.3. VALORES DEL IRI EN TRAMO CON DISEÑO DE 2.0% DE FILLER

En la figura 4.8 se muestra los valores del índice de rugosidad internacional, los cuales corresponden a la medición realizada al antes y después de la colocación del mortero asfáltico diseñado con un porcentaje de filler (cemento portland tipo I) de 2.0%.

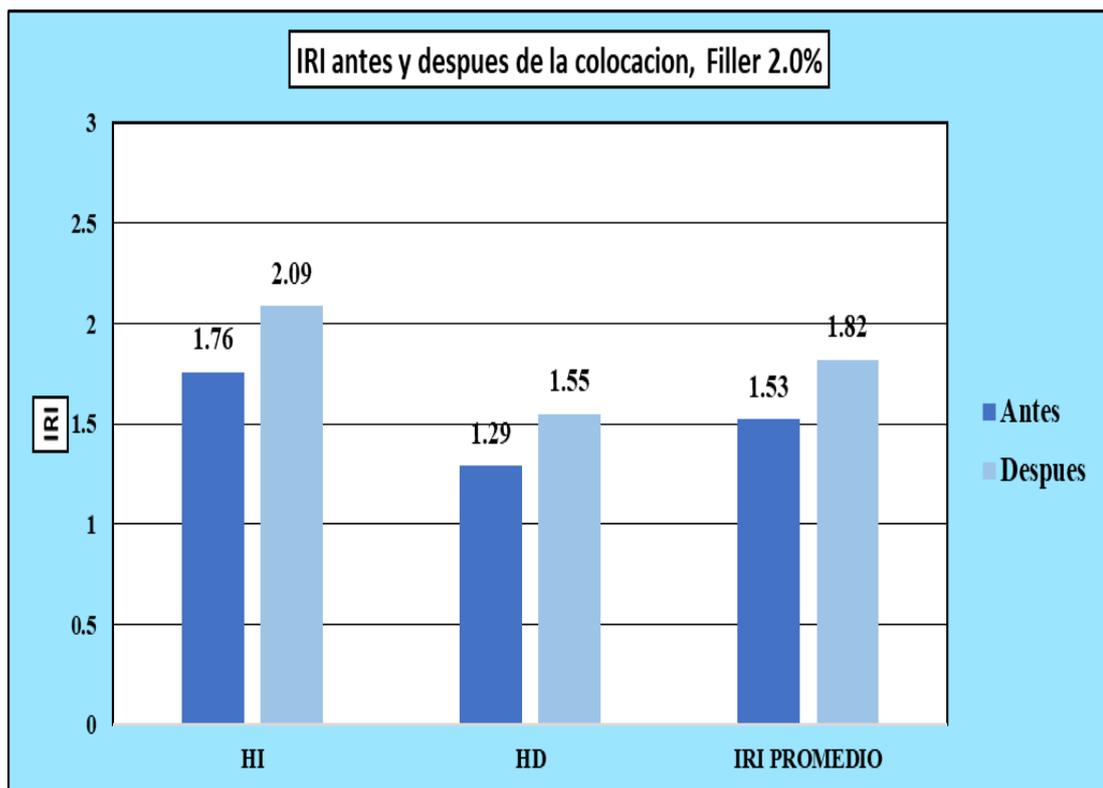


Figura 4.8: Valores del IRI, Filler 2.0%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Los valores de la rugosidad obtenidos después de la colocación del mortero asfáltico para este diseño con un porcentaje de filler de 2.0%, son mayores a los valores obtenidos antes

de la colocación, si bien es cierto todos estos valores se encuentran por debajo del valor requerido (3.5 m/km), el incremento de los valores de la rugosidad no es favorable, puesto que ello afecta directamente a la serviciabilidad del tramo.

El gráfico de la figura 4.9 nos muestra los valores del IRI correspondiente al antes y después de la colocación, ello de los tramos en los cuales se realizó la ejecución de los diseños de mortero asfáltico variando el contenido de filler (cemento portland tipo I) en tasas de 0.5%, 1.0% y 2.0%.

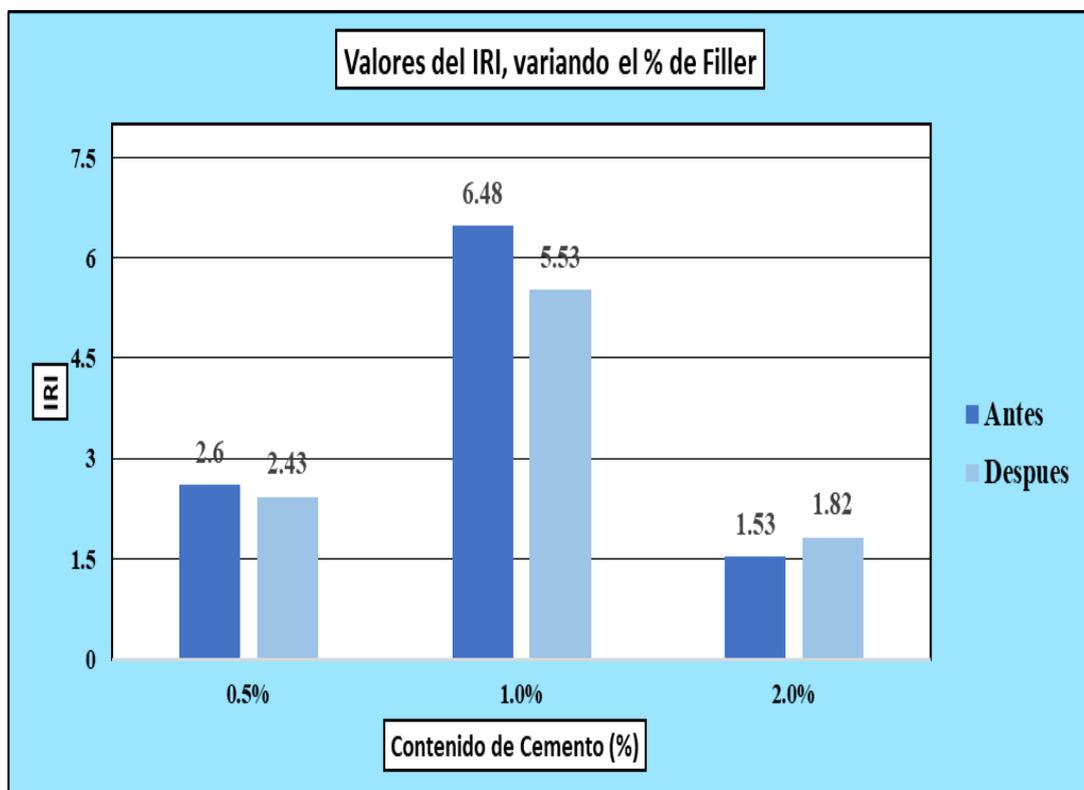


Figura 4.9: *Valores del IRI de los tramos intervenidos, variando el % de filler*

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



V. CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIÓN GENERAL

En esta tesis de investigación se evaluó la influencia de la colocación del slurry seal en el índice de rugosidad internacional del tramo vial Imata – Patahuasi. La ejecución del slurry seal se realizó en una muestra del tramo vial comprendido entre las progresivas Km 125 al Km 130, de donde se concluye que, la colocación del slurry seal si influye en el índice de rugosidad internacional de la superficie de rodadura de un pavimento, tratamiento que permite reducir los valores de rugosidad, siendo esta una alternativa técnica y sustentable para el mantenimiento oportuno de la superficie de rodadura de un pavimento flexible.

5.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

5.2.1. CONCLUSIÓN ESPECÍFICA 1

En la presente tesis de investigación se determinó la incidencia de la colocación del slurry seal variando el contenido de cemento en los valores del índice de rugosidad internacional (IRI) de los tramos intervenidos, de lo cual se concluye que: la aplicación del slurry seal mejoro los valores de la rugosidad en los tramos donde se colocaron el mortero asfáltico con una tasa de dosificación del filler de 0.5% y 1.0%, en donde se tuvo una disminución de la rugosidad de 6.5% y 14.7% respectivamente, sin embargo en el tramo vial donde se ejecutó el mortero asfáltico con una tasa de filler del 2.0%, los valores de la rugosidad fueron mayores respecto a los valores iniciales, teniendo un incremento del 11.9%.

5.2.2. CONCLUSIÓN ESPECÍFICA 2

Para la presente tesis de investigación se determinó la influencia de la variación del contenido de filler del slurry seal en los ensayos de desempeño abrasión en húmedo y rueda cargada; los valores obtenidos de perdida por abrasión en húmedo a diferentes tasas



de filler fueron: 495.41 gr/m² (0.5%), 445.85 gr/m² (1.0%) y 401.49 gr/m² (2.0%), de acuerdo a ello se concluye que: el incremento progresivo del contenido de filler reduce los valores de pérdida del ensayo de abrasión en húmedo (W.T.A.T) incrementando así de esta manera la resistencia del mortero asfáltico; por otro lado los valores obtenidos de arena adherida a diferentes tasas de filler fueron: 370.23 gr/m² (0.5%), 366.86 gr/m² (1.0%) y 349.44 gr/m² (2.0%), de acuerdo a ello se concluye que: el incremento progresivo del contenido de filler reduce la cantidad de arena adherida del ensayo de rueda cargada (L.W.T) incrementando así de esta manera la resistencia del mortero asfáltico.

5.2.3. CONCLUSIÓN ESPECÍFICA 3

Para la tesis de investigación se determinó el tiempo de apertura al tráfico tanto en laboratorio como en campo de los diseños obtenidos de slurry seal a partir de la variación del contenido de filler, los valores obtenidos del tiempo de apertura al tráfico en laboratorio fueron: 5 hrs (0.5%), 4.33 hrs (1.0%) y 3.62 hrs (2.0%), mientras que los valores obtenidos del tiempo de apertura al tráfico en campo fueron: 4 hrs (0.5%), 3.5 hrs (1.0%) y 3.0 hrs (2.0%), de lo cual se concluye que: el incremento progresivo del contenido de filler incrementa los valores del ensayo de cohesión y a partir de ello reduce los valores del tiempo de apertura al tráfico; esto permite minimizar recursos en seguridad vial y aumentar el rendimiento de la colocación del mortero asfáltico.

5.2.4. CONCLUSIÓN ESPECÍFICA 4

De acuerdo a la distribución granulométrica obtenida, el slurry seal fue caracterizado de tipo II, asimismo estos agregados pétreos utilizados para el desarrollo de los diseños y su posterior empleo en la producción del slurry seal, cumplieron con las especificaciones técnicas establecidas en la guía A – 105 por la ISSA.



VI. RECOMENDACIONES

- Para el diseño de un mortero asfáltico Slurry Seal se recomienda que todos los componentes (agregados pétreos, emulsión asfáltica, agua y filler) cumplan con las exigencias y/o especificaciones establecidas en las normas y guías existentes (ISSA A – 105).
- El uso del agregado pétreo (arena chancada) de la cantera Uquiña ubicada en el distrito de yura, es recomendable para la producción de slurry seal, puesto que sus características mecánicas cumplen con las especificaciones establecidas en la guía de la ISSA A – 105.
- Se recomienda que el contenido de filler (cemento portland tipo I) para el diseño y producción del slurry seal sea de 1.0%, debido a los resultados obtenidos en los ensayos de desempeño abrasión en húmedo y rueda cargada, así como también en el tiempo de apertura al tráfico y la incidencia que tiene en el índice de rugosidad internacional (IRI), este contenido dependerá de los requerimientos en campo, siendo este alcance analizado por el especialista a cargo.
- A comparación de los diseños de slurry seal con un contenido de filler de 0.5 y 1.0%, el diseño con un contenido de filler de 2.0% presenta mejores resultados en los ensayos de desempeño y cohesión, siendo este último importante para la reducción de recursos en los trabajos de seguridad vial y el incremento del rendimiento en campo; sin embargo, su empleo no es recomendable, puesto que los valores de rugosidad del tramo vial intervenido con este porcentaje de filler se incrementaron.
- Para aperturar al tráfico el slurry seal en campo, se recomienda realizar movimientos en forma de torque con el taco del zapato, si al realizar estos



movimientos no se generan desplazamientos laterales, el slurry seal se debe poner al servicio de los usuarios.



VII. REFERENCIAS

- Acero, E. (2011). *Evaluacion del desempeño de tratamientos superficiales en carreteras de bajo volumen de transito tramo Zuñiga - Dv. Yauyos [Tesis para optar el Titulo Profesional de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingenieria]*. Lima. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3481>
- Alvarez, E. (2014). *Medicion de niveles de servicio de IRI con Perfilometro Laser en la Via de Evitamiento de Camana - Panamerica Sur [Tesis para optar el titulo profesional de Ingeniero Civil / Universidad Catolica de Santa Maria]*. Arequipa. Obtenido de <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/4675>
- Asfalto, I. d. (s.f.). *Manual Basico de Emulsiones Asfálticas MS - 19*.
- Badilla, G. (2009). *Determinacion de la regularidad superficial del pavimento, mediante el calculo del indice de regularidad internacional (IRI)*. San Jose. Obtenido de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/500/CILA-05-09.%20DETERMINACION%20DE%20LA%20REGULARIDAD%20SUPERFICIAL%20DE%20PAVIMENTOS%20MEDIANTE%20EL%20CALCULO%20DEL%20INDICE%20REGULARIDAD%20INTERNACIONAL%20IRI%20A>
- Barrionuevo , L. (2012). *Diseño del micropavimento utilizando emulsion asfaltica modificada con polimero, con agregado procedente de la cantera calagua [Trabajo de graduacion para la obtencion del titulo de Ingeniero Civil, Universidad Central del Ecuador]*. Quito. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/457>
- Chavez, I. (2020). *Construccion de carreteras sostenibles I*. Lima.



- Condezo, T. (2020). *Analisis del comportamiento funcional y estructural de la carretera Lamas - Pamasho y Bellavista - Ledoy con tratamientos superficiales [Tesis para optar el titulo de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de San Martin]*. Tarapoto. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11458/3864>
- Crespo del Rio, R. (1999). *Calidad ante la rodadura [Revista tecnica de la asociacion española de carretera]*.
- EG. (2013). *Especificaciones tecnicas generales para la construccion de carreteras [Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC]*. Lima.
- EM. (2016). *Manual de ensayo de materiales [Ministerio de Transportes y Comunicaciones / MTC]*. Lima. Obtenido de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html
- Escalante, J. (2019). *Slurry Seal - Criterios y Aplicacion en Obra*. Lima.
- Hernandez, R. (2018). *Metodologia de la investigacion*. McGRAW - HILL INTERAMERICANA EDITORES S.A.
- Herrera, T. I. (2007). *Metodo de diseño y construccion de la lechada asfaltica "Slurry Seal" [Memoria para optar el titulo de Ingeniero en Construccion, Universidad Andres Bello, Facultad de Ingenieria y Construccion Civil]*. Santiago. Obtenido de <http://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/13914>
- Huanca, C. J. (2013). *Diseño de slurry seal empleando emulsion asfaltica modificada con polimeros y su evaluacion variando el contenido de filler [Tesis para optar el titulo profesional de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingenieria]*. Lima. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3450>
- Instituto Mexicano del Transporte. (1998). *Indice Internacional de Rugosidad en la Red Carretera de Mexico [Secretaria de Comunicaciones y Transportes]*.



- ISSA. (2010). *Guia por sello de mezcla de asfalto emulsionado [Asociacion Internacional Superficies de Lechada]*.
- Jimenez , Ulloa, & Munera. (2016). *Guia de diseño de mezcla de laboratorio para los sellos de lechada asfaltica (Slurry Seals) [Universidad de Costa Rica, LanammeUCR]*.
- Jimenez, M., Ulloa, A., & Molina, D. (2010). *Implementacion de los ensayos de laboratorio para el diseño de mezcla y evaluacion del desempeño para los sellos de lechada asfaltica [Informe final / Unidad de investigacion del LANAMME]* . San Jose.
- Lavaud, P. (2005). *Importancia de la regularidad superficial (IRI) en la construccion de pavimentos asfalticos en caliente*. Obtenido de <https://dokumen.tips/engineering/importancia-del-indice-de-rugosidad-internacional-iri-en-la-construccion.html>
- Mancha, R. (2016). *Analisis comparativo del costo por niveles de serviciabilidad entre el tratamiento superficial Slurry Seal y el tratamiento granular convencional [Tesis para optar el titulo profesional de ingeniero civil / Universidad nacional de Huancavelica]* . Huancavelica. Obtenido de <file:///D:/OPERACION%20TESIS/5-%20TESIS%20ANTECEDENTES,%20BASES%20TEORICAS/TESIS%20MANCHA%20DE%20LA%20CRUZ%20COMPARACION%20ENTRE%20SLURRY%20SEAL%20Y%20MANTENIMIENTO%20GRANULAR.pdf>
- Orellana, M., Peña, E., & Perez, B. (2015). *Propuesta de diseño y proceso constructivo de lechada asfaltica en el mantenimiento de obras viales en el Salvador [Tesis para optar el Titulo de Ingeniero Civil, Universidad de el Salvador, Escuela de Ingenieria Civil]*. San Salvador. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/3196>



- Pequeño, D. (2015). *Comparacion de costos y tecnologia de mantenimiento utilizando slurry seal y mantenimiento convencional en un pavimento flexible [Tesis para optar el titulo profesional de ingeniero civil / Universidad privada del norte]*. Cajamarca. Obtenido de [https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/6823/Peque%
c3%b1o%20Otoya%20Daniel%20Andr%c3%a9s.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/6823/Peque%c3%b1o%20Otoya%20Daniel%20Andr%c3%a9s.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ramirez. (2017). *Comportamiento del Slurry Seal a altitudes mayores a 3500 m.s.n.m en mantenimiento de pavimento flexibles de la ciudad de Puno [Tesis para Optar el Titulo Profesional de Ingeniero Civil, Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez]*. Puno. Obtenido de <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/885>
- Ramirez, A. D. (2017). *Analisis de las emulsiones asfalticas modificada con polimeros para uso en Slurry Seal*. Santiago de Chile. Obtenido de <http://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/5016>
- Ramos. (2017). *Evaluacion del estado de pavimento por deflectometria e indice de rugosidad internacional de la carretera: Puno - Vilque - Mañazo [Tesis para optar el titulo profesional de ingeniero civil / Universidad Nacional del Altiplano]*. Puno. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5094>
- Ramos, L. (2018). *Estudio del Indice de Regularidad Internacional en vias pavimentados mediante el uso del Perfilometro Laser Romdas [Tesis para obtener el Titulo Profesional de Ingeniero Civil / Pontificia Universidad Catolica del Peru]*. Lima. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/11734>
- Solminhiac, H. (2001). *Gestion de Infraestructura Vial [Universidad Catolica de Chile]*. Santiago de Chile.



- Torres, Y. (2019). *Comportamiento del slurry seal para el mantenimiento de la superficie asfáltica, el tambo [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, Universidad Peruana los Andes, Escuela Profesional de Ingeniería Civil].* Huancayo. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12848/1050>
- Toscano, L. V. (2014). *Diseño de micropavimento aplicado como tratamiento superficial para el control de la variación térmica en el pavimento flexible de la vía Pifo - Cusubamba [Tesis para la obtención del título de Ingeniero Civil/Universidad Internacional del Ecuador].* Quito. Obtenido de <http://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/2222>
- Vallejo, R. D. (2011). *Diseño de mezclas asfálticas en frío empleando emulsión asfáltica y su evaluación del daño por humedad utilizando fillers comerciales [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería].* Lima. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3311>
- Yamunaque, J. (2020). *Otta seal, una solución vial sustentable.* Lima.



ANEXOS